

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ოთარ თავდიშვილი

კომპიუტერული ხედავა

II ნაწილი



დამტკიცებულია სახელმძღვანელოდ
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
სარედაქციო-საგამომცემლო საბჭოს
მიერ. 07.07.2021, ოქმი №1

თბილისი
2022

შპს 004.9

სახელმძღვანელო შეიქმნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ხელოვნური ინტელექტის დეპარტამენტის სტუდენტებისათვის წაკითხული ლექციების საფუძველზე. მასში განხილულია ორ- და სამგანზომილებიანი სცენების გამოსახულებების ციფრული დამუშავებისა და ანალიზის ძირითადი საკითხები.

გამოცემა განკუთვნილია ბაკალავრიატისა და მაგისტრატურის სტუდენტებისთვის, ის ასევე საინტერესო იქნება კომპიუტერული ხედვის საკითხებით დაინტერესებულ მკითხველთა ფართო წრისათვის.

რეცენზენტები: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი მარიამ ჩხაიძე,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ვლადიმერ ჭავჭავანიძის სახელობის კიბერნეტიკის ინსტიტუტის დირექტორი თამაზ სულაბერიძე

© საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2022

ISBN 978-9941-20-274-2 (ყველა ნაწილი)

ISBN 978-9941-28-800-5 (მეორე ნაწილი)

<http://www.gtu.ge>



ყველა უფლება დაცულია. ამ წიგნის არც ერთი ნაწილის (იქნება ეს ტექსტი, ფოტო, ილუსტრაცია თუ სხვა) გამოყენება არანაირი ფორმით და საშუალებით (იქნება ეს ელექტრონული თუ მექანიკური) არ შეიძლება გამომცემლის წერილობითი ნებართვის გარეშე. საავტორო უფლებების დარღვევა ისჯება კანონით.

წიგნში მოყვანილი ფაქტების სიზუსტეზე პასუხისმგებელია ავტორი/ავტორები.

ავტორის/ავტორთა პოზიციას შეიძლება არ ემთხვეოდეს საგამომცემლო სახლის პოზიცია.

I თავი. მონაცემთა შეთავსება 2D სივრცეში

1.1. შესავალი

რეალურ ცხოვრებაში არსებობს ბევრი ამოცანა, როცა ორგანოზომილებიან სივრცეში საჭიროა შესაბამისობის დადგენა გამოსახულებებს, გამოსახულებებსა და რუკებს და ასევე გამოსახულებებსა და ობიექტების მოდელებს შორის. მაგალითად, განვიხილოთ ქალაქის განაშენიანების, კერძოდ, ახალი ნაგებობების აღრიცხვის ამოცანა მშენებლობების დაგეგმვის ან ახალი რუკების შექმნის მიზნით. თვითმფრინავიდან გადაღებული ქალაქის აეროფოტოსურათები დარდება მანამდე არსებულ ქალაქის რუკებს მათი განახლების მიზნით. შესაბამისად ხდება ქალაქის შესახებ არსებული მონაცემთა ბაზის განახლება, ინფორმაციის შეტანა არსებული შენობების, გზების, საწარმოების და ა. შ. შესახებ. მეორე მაგალითად შეიძლება განვიხილოთ სამედიცინო ამოცანა. ვთქვათ, საჭიროა პაციენტის გულსა და ფილტვებში გამავალი სისხლის ნაკადის გამოკვლევა. ამისათვის პაციენტს ჯერ უღებენ რენტგენის სურათს. შემდეგ მის სისხლს უმატებენ სპეციალურ საღებავს და ისევ უღებენ რენტგენის სურათს. მეორე სურათზე უკვე გამოჩნდება სისხლის ნაკადი და ასევე ხმაური და სხვადასხვა უცხო ფრაგმენტი, რომლებიც ადამიანის სხეულის სხვადასხვა ქსოვილს შეესაბამება, მაგალითად, ძვლებს. თუ ახლა მეორე გამოსახულებას გამოვაკლებთ პირველს, მაშინ მიღებულ გამოსახულებაზე როგორც ხმაურის, ისე უცხო ფრაგმენტების რაოდენობაც შემცირდება და ხაზგასმით გამოჩნდება საღებავის გამოყენებით გამოწვეული ცვლილებები. მაგრამ მანამ, სანამ მოვახდენთ გა-

მოსახულებების გამოკლებას, საჭიროა პირველი გამოსახულების გეომეტრიული გარდაქმნა (დეფორმირება) მეორე გამოსახულებასთან მისი შეთავსების მიზნით. ეს გარდაქმნა საჭიროა რენტგენის სურათის გადაღებისას პაციენტის სხეულის ქსოვილების პოზიციის მცირე ცვლილებების, დეფორმაციების, გამოწვეულს მისი სხეულის პოზის ცვლილებით, გულის ფეთქვით, სუნთქვით და ა. შ. კომპენსაციისათვის.

ამავე დროს უნდა აღინიშნოს, რომ გეომეტრიული გარდაქმნის თვისებები ძალზე მნიშვნელოვანია ობიექტა ისეთი თვისებების ასარჩევად, რომელიც არ არის დამოკიდებული სცენის ფარგლებში კამერის ან ობიექტების განლაგებაზე.

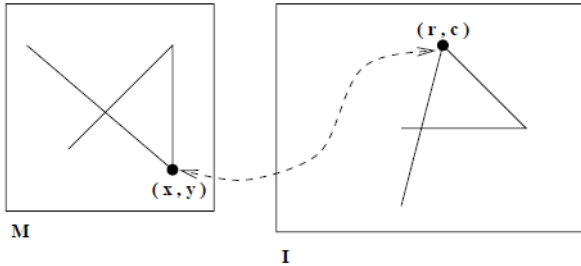
1.2. გეომეტრიული გარდაქმნების არსი 2D სივრცეში

გამოსახულებებს, გამოსახულებებსა და რუკებს, და ასევე გამოსახულებებსა და ობიექტების მოდულებს შორის შესაბამისობის დადგენის ამოცანა მოითხოვს ერთი 2D კოორდინატთა სივრცის მეორეზე შექცევად ასახვას. ამისთვის უნდა განისაზღვროს ისეთი გეომეტრიული გარდაქმნა, რომელიც დაკვირვების ერთი წერტილიდან დანახული სცენის ობიექტის წერტილებს შეუთანადებს დაკვირვების სხვა წერტილიდან დანახული იმავე ობიექტის (გამოსახულების) ან სხვა ობიექტის წერტილებს. სამედიცინო ამოცანაში ასეთ ობიექტს წარმოადგენს დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან დანახული ადამიანის სხეულის რომელიმე ანატომიური უბანი. მაგალითი, რომელიც აღწერს ასეთ ასახვას ორგანზომილებიანი სივრცის ორ, M და I გამოსახულებას შორის (რომლებიც წინასწარაა შერჩეული), სადაც M შეიძლება იყოს რუკა, რომელიმე ობიექტის მოდელი,

გამოსახულება, ხოლო I გამოსახულება, წარმოდგენილია (1.1) განტოლებისა და 1.1 სურათის სახით.

$$M[x, y] = I[g(x, y), h(x, y)];$$

$$I[r, c] = M[g^{-1}(r, c), h^{-1}(r, c)]. \quad (1.1)$$



სურ. 1.1

განსაზღვრება 1.1. ერთი ორგანზომილებიანი კოორდინატთა სივრცის ასახვას მეორეზე ორგანზომილებიანი გარდაქმნა (2D transformation) ეწოდება.

(1.1) განტოლებით განსაზღვრულ გარდაქმნას ხანდახან სივრცულ გარდაქმნას, გეომეტრიულ გარდაქმნას ან დეფორმაციას (გამოიყენება მხოლოდ არაწრფივი გარდაქმნებისას) უწოდებენ. g და h ასახვის ფუნქციები განსაზღვრავენ შესაბამისობას მოდელის $[x, y]$ წერტილებსა და გამოსახულების $[r, c]$ წერტილებს შორის. ამ ფუნქციების საშუალებით შესაძლებელია მოდელის ნებისმიერ მახასიათებელი წერტილისთვის (მაგალითად, წერტილი შეიძლება იყოს ნახევრეტის ცენტრი, მრავალკუთხედის წვერო, ორი მონაკვეთის გადაკვეთის წერტილი და ა. შ.) გამოითვალოს შესაბამისი წერტილის კოორდინატები გამო-

სახელებზე. ჩავთვალოთ, რომ ასახვის ფუნქციები შექცევადია. ასეთ შემთხვევაში შექცეული ფუნქციების საშუალებით შესაძლებელია გარდაქმნის ორივე მიმართულებით შესრულება.

ჩვენ მიერ ქალაქის განაშენიანების შესახებ ზემოთ ნახსენებ მაგალითში ასახვის ფუნქციების გამოყენება შესაძლებლობას იძლევა რუკაზე არსებული ობიექტების კონტურები გარდაიქმნას ობიექტების კონტურებად აერო-ფოტო გამოსახულებაზე. ამის შემდეგ, გამოსახულების ის არე, რომელიც რუკაზე შეესაბამება ობიექტს, შეიძლება გაანალიზებულ იქნეს ახალი ობიექტების, მაგალითად, ახალი შენობების, სასოფლო-სამეურნეო ნათესებისა და ა. შ. აღმოსაჩენად. დღესდღეობით ასეთი ამოცანების გადაწყვეტა ადამიანის მიერ ხდება ინტერაქტიული პროგრამების გამოყენებით.

რაც შეეხება სამედიცინო ამოცანას, თუ მისთვის ცნობილია შესაბამისი ასახვის ფუნქციები, მაშინ რენტგენოლოგს რენტგენის სურათების ანალიზისთვის შეუძლია განიხილოს $I_2[r_2, c_2] - I[g(r_2, c_2), h(r_2, c_2)]$ სხვაობით მოცემული გამოსახულება. ამ შემთხვევაში ასახვის ფუნქციები ორი გამოსახულების მსგავსი წერტილების შეთავსების (image registration) საშუალებას იძლევა.

ამგვარად, 2D გამოსახულებებს შორის შესაბამისობის დადგენა მოითხოვს მათ შეთავსებას. ორი გამოსახულების ერთმანეთთან შეთავსება მათი წერტილების გარკვეული გეომეტრიული გარდაქმნის პროცესია.

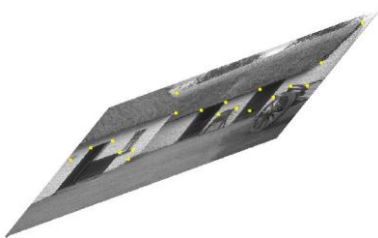
განსაზღვრება 12. *ორი გამოსახულების შეთავსება (image registration) ეწოდება ამ გამოსახულებების შემადგენელი წერტილების ისეთი გეომეტრიული გარდაქმნის პროცესს, რომლის დროსაც გამოსახულებების ნიშნადი (მახასიათებელი) წერტილები კოორდინატების ერთსა და იმავე მნიშვნელობას მიიღებ-*

ენ. რა თქმა უნდა, ამ დროს იგულისხმება, რომ ამ ორ გამოსახულებაზე ერთი და იგივე სცენაა გამოსახული, ოღონდ ეს გამოსახულებები ახლო მდებარე წერტილებიდანაა დამზერილი.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, შეთავსების პროცესის შესასწავლად წარმოადგენს დაკვირვების (დამზერის) ახლო მდებარე წერტილებიდან მიღებული ორი გამოსახულება, ხოლო გამოსასწავლად კი გარკვეული გეომეტრიული გარდაქმნის შედეგი, როდესაც ერთი გამოსახულების მახასიათებელი წერტილები აისახება მეორის შესაბამის წერტილებში ისე, რომ ორი გამოსახულება შეირწყმება ერთ გამოსახულებად. 1.2,გ სურათზე წარმოდგენილია დაკვირვების ორი სხვადასხვა (თუმცა ახლომდებარე) წერტილიდან გადაღებული – ა) და ბ) გამოსახულებების შეთავსების მაგალითი, როდესაც მახასიათებელი წერტილები წინასწარაა გამოყოფილი.



ა



ბ



გ

სურ. 1.2

ორგანზომილებიანი (ბრტყელი) გარდაქმნების გამოყენებისას თავს იჩენს ზოგიერთი თეორიული ასპექტი, რომელსაც დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს. კერძოდ, როგორია g და h ასახვის ფუნქციების სახე, არის თუ არა ისინი წრფივი, უწყვეტი და ა. შ.; გარდაიქმნება თუ არა ასახვის შედეგად ერთი 2D სივრცის წრფეები მეორე სივრცეში წრფეებად თუ მრუდწირებად; ერთნაირია თუ არა გარდაქმნის შედეგად მანძილები შესაბამის წერტილთა წყვილებს შორის ორივე სივრცეში; როგორ შეიძლება სხვადასხვა ფუნქციის თვისებები გამოყენებული იქნეს სასურველი ასახვის მისაღებად. ასევე მნიშვნელოვანია, თუ როგორი იქნება მოდელის ან გამოსახულების შემცველი ორგანზომილებიანი სივრცე – უწყვეტი თუ დისკრეტული. თუ ამ სივრცეებიდან ერთი მაინც წარმოადგენს ციფრულ გამოსახულებას, მაშინ მიღებული შედეგის სიზუსტესა და ვიზუალურ წარმოდგენაზე გავლენას დისკრეტიზაციის ეფექტი მოახდენს.

13. წერტილის წარმოდგენა 2D სივრცეში

როგორც ვიცით, ორგანზომილებიან ევკლიდურ სივრცეში (სიბრტყეზე) წერტილის მდებარეობა განისაზღვრება 2 კოორდინატით და წერტილი შეიძლება წარმოდგენილი იყოს ვექტორ-სტრიქონის ან ვექტორ-სვეტის სახით. მაგალითად, P წერტილისთვის შესაბამისად გვექნება $\mathbf{P} = [x, y]$ და $\mathbf{P} = [x, y]^t = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ ვექტორები, სადაც t ტრანსპონირების ინდექსია. ამავე დროს, გარკვეული ამოცანების გადაწყვეტისას შეიძლება საჭირო გახდეს წერტილის კოორდინატების განსაზღვრა სიბრტყეზე მდებარე სხვადასხვა კოორდინატთა სისტემის მიმართ, წირის გადასვლა წირში, წირებს შორის წრფივობისა და პარალელურობის შენა-

რჩუნება, მათ შორის კუთხეების გასაზღვრა, ასევე გეომეტრიული ფიგურების პარამეტრებს შორის ფუნქციური დამოკიდებულებების შენარჩუნება ისეთი გეომეტრიული გარდაქმნების შესრულებისას, როგორცაა გადატანა, მობრუნება და მასშტაბირება. ასეთ გარდაქმნებს აფინური ან გეომეტრიული გარდაქმნები ეწოდება.

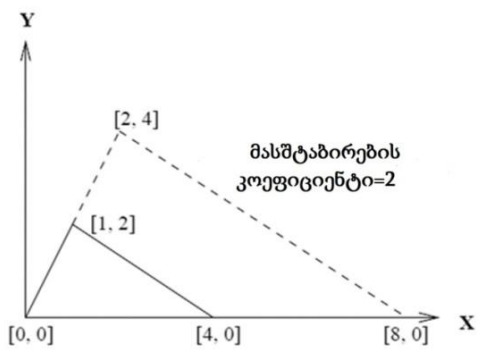
ცნობილია, რომ მანქანური ხედვის სისტემებში გამოიყენება რამდენიმე ტიპის კოორდინატა სისტემა (§2.4.2, I ნაწილი). ეს კი საჭიროებს ინდექსირების შესაბამისი სისტემის შემოღებას. ამიტომ, თუ რომელიმე წერტილი გვინდა წარმოვადგინოთ სხვადასხვა კოორდინატა სისტემაში, მაშინ მათი ერთმანეთისგან განსასხვავებლად შეიძლება გამოვიყენოთ ამ სისტემების აღმნიშვნელი დამატებითი ინდექსები, ვთქვათ, წერტილის ზედა ინდექსი. მაგალითად, რომელიმე P_j მახასიათებელი წერტილის კოორდინატები კოორდინატთა C სისტემაში აღვნიშნოთ P_j^c . მაგრამ პერსპექტიული პროექციის ან აფინური გარდაქმნებისას, სადაც განსხვავებული და სხვადასხვა განზომილების კოორდინატთა სისტემა გამოიყენება, ინდექსირების ასეთი სისტემა ართულებს მონაცემების კომპიუტერულ დამუშავებას. აღმოჩნდა, რომ ასეთი გარდაქმნებისას (განსაკუთრებით აფინური გარდაქმნებისას) მათემატიკური ფორმულები შეიძლება ჩაიწეროს უფრო გამარტივებული ფორმით, რაც გაადვილებს მონაცემების კომპიუტერულ დამუშავებას. ამ მიზნით მოსახერხებელი აღმოჩნდა წერტილების წარმოდგენა ერთგვარობანი კოორდინატების გამოყენებით. საზოგადოდ, მათემატიკაში ნებისმიერი (x_1, x_2, \dots, x_n) წერტილი n განზომილებიანი სივრცეში წარმოიდგინება როგორც $(sx_1, sx_2, \dots, sx_n, s)$ წერტილი $(n+1)$ განზომილების სივრცეში, სადაც, $s \neq 0$ ნებისმიერი ნამდვილი რიცხვია. აღნიშნული $(n+1)$ რიცხვი განსაზღვრავს

საწყისი წერტილის ერთგვაროვან კოორდინატებს n განზომილებიან სივრცეში. მაგალითად, ორგანზომილებიან სივრცეში ვექტორულ სახეში წარმოდგენილი $P = [x, y]^t$ წერტილის ერთგვაროვანი კოორდინატები დაიწერება შემდეგნაირად – $P = [sx, sy, s]^t$ სადაც $s \neq 0$ და მას მასშტაბირების კოეფიციენტი ეწოდება. ჩვეულებრივად მისი მნიშვნელობა 1 -ის ტოლი აიღება. მაშინ ორგანზომილებიან სივრცეში ვექტორულ სახეში წარმოდგენილი $P = [x, y]^t$ წერტილის ერთგვაროვანი კოორდინატები $P = [x, y, 1]^t$ სახეში ჩაიწერება. ერთგვაროვანი კოორდინატების ცნების გაჩენა გამოიწვია n განზომილებიანი სივრციდან $(n + 1)$ განზომილებების სივრცეში უკუგარდაქმნის საჭიროებამ. ამასთან, ერთგვაროვანი კოორდინატებიდან დეკარტის კოორდინატთა სისტემაში გადასასვლელად საკმარისია P წერტილის პირველი ორი კოორდინატი გავეყთ მასშტაბირების კოეფიციენტზე.

1.4. ძირითადი აფინური გარდაქმნები სიბრტყეზე

პრაქტიკაში გამოყენებული სივრცითი გარდაქმნების ფართო კლასი შეიძლება წარმოვადგინოთ მატრიცისა და ერთგვაროვანი კოორდინატებში წარმოდგენილი წერტილის (ვექტორის) ნამრავლის სახით. ამ შემთხვევაში მატრიცა განიხილება როგორც გეომეტრიული გარდაქმნის ოპერატორი, რომლის საშუალებითაც ხორციელდება ვექტორულ სახეში წარმოდგენილი წერტილის სივრცითი გარდაქმნა სიბრტყეზე. განვიხილოთ ის ძირითადი სივრცითი გარდაქმნები სიბრტყეზე, რომელიც ფართოდ გამოიყენება ციფრული გამოსახულებების ანალიზის ამოცანებში.

მასშტაბირება. მასშტაბირება (scaling) წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე გამოყენებად სივრცით გარდაქმნას. ის ხორციელდება კოორდინატთა სათავის მიმართ. ერთგვაროვანი მასშტაბირების შემთხვევაში ყველა ობიექტის განზომილება ერთნაირად იცვლება. მასშტაბირების მაგალითი ობიექტის – სამკუთხედის შემთხვევაში, როცა მასშტაბირების კოეფიციენტი 2-ის ტოლია, წარმოდგენილია 1.3 სურათზე. როგორც ვხედავთ, სამკუთხედის ერთ-ერთი წვეროს – $P = [1,2]$ კოორდინატების მნიშვნელობები მასშტაბირების შემდეგ ორმაგდება და მიიღება ახალი $P' = [2,4]$ წვერო. თუ ასეთ მასშტაბირებას მოვახდენთ სამკუთხედის დარჩენილი ორი წვეროსთვისაც, მივიღებთ პუნქტირით აღნიშნულ სამკუთხედს, რომელიც საწყისზე ორჯერ უფრო დიდია.



სურ. 1.3

მასშტაბირება წარმოადგენს წრფივ გარდაქმნას, ამიტომ ის შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს 2D ევკლიდური სივრცის ორი ბაზისური ვექტორის წრფივი კომბინაციით მასშტაბირების კოეფიციენტის გამოყენებით. მაგალითად, $[1,2] = 1[1,0] + 2[0,1]$ და $2[1,2] = 2(1[1,0] + 2[0,1]) = 2[1,0] + 4[0,1] = [2,4]$.

ორგანზომილებიანი $P(x, y)$ წერტილის მასშტაბირება, როგორც სივრცითი გარდაქმნა შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს როგორც ამ წერტილის x და y კოორდინატების დაჭიმვარადაც c სიდიდით, რის შედეგადაც მიიღება ახალი $P'(x', y')$ წერტილი, სადაც

$$x' = cx \text{ და } y' = cy.$$

იქიდან გამომდინარე, რომ მასშტაბირება წრფივ გარდაქმნას წარმოადგენს, ის შეიძლება ჩაიწეროს მატრიცულ სახეში C მატრიცის, რომლის დიაგონალური ელემენტები მასშტაბირების c კოეფიციენტია და $P = [x, y]^t$ ვექტორ-სვეტის ნამრავლის სახით:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cx \\ cy \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}.$$

ხოლო ზოგად შემთხვევაში მასშტაბირების გარდაქმნა მატრიცულად წარმოიდგინება:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x & 0 \\ 0 & c_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x x \\ c_y y \end{bmatrix},$$

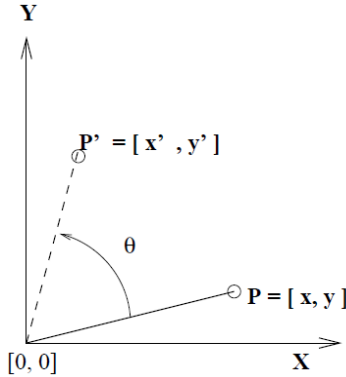
ან მოკლედ

$$P' = CP$$

სახით, რომელშიც ერთეულოვანი ვექტორების მასშტაბირება x და y მიმართულებით განსხვავებული c_x და c_y სიდიდის კოეფიციენტებით ხორციელდება.

მასშტაბირების საშუალებით ხდება მილიმეტრებში გაზომილი გამოსახულების ნამდვილი კოორდინატების სისტემიდან გადასვლა სტრიქონების და სვეტების ერთეულებში გაზომილი გამოსახულების პიქსელურ (რასტრულ) კოორდინატთა სისტემაზე. ნამდვილ კოორდინატთა სისტემაში გამოსახულების წერტილის x და y კოორდინატები ნამდვილი რიცხვებია და იზომება მაგალითად მმ-ში. ამავე დროს რასტრულ კოორდინატთა სისტემაში x და y კოორდინატები გამოსახულების პიქსელთა მასივში არ წარმოადგენენ პიქსელების ინდექსებს (კოორდინატებს). რასტრულ კოორდინატთა სისტემაში გამოსახულების თითოეულ წერტილს აქვს მთელრიცხვა პიქსელური კოორდინატები, რომლებიც გამოსახულების მასივში სტრიქონის და სვეტის ნომერს შეესაბამებიან. კვადრატული პიქსელების მქონე კამერის გამოყენებისას ზემოაღნიშნული გადასვლისას მასშტაბირების კოეფიციენტებს ორივე ღერძის მიმართულებით აქვთ ერთნაირი მნიშვნელობები $c_x = c_y = c$. ხოლო სატელევიზიო სტანდარტის მქონე კამერის შემთხვევაში მასშტაბის კოეფიციენტების ფარდობა უნდა იყოს $4/3$ -ის ტოლი.

მობრუნება. მობრუნება (rotation) წარმოადგენს ისეთ გარდაქმნას სიბრტყეზე, რომლის დროსაც მობრუნება ხორციელდება რომელიმე წერტილის მიმართ. ვთქვათ გვაქვს ორგანზომილებიანი $\mathbf{P} = [x, y]$ წერტილი. თუ ამ წერტილს მოვაბრუნებთ კოორდინატთა სათავის მიმართ საათის ისრის საწინააღმდეგო მიმართულებით θ კუთხით, მივიღებთ ახალ $\mathbf{P}' = [x', y']$ წერტილს (სურ. 14).



სურ. 14

მიღებული ახალი P' წერტილის კოორდინატები იქნება

$$\begin{aligned}x' &= x \cos \theta - y \sin \theta, \\y' &= x \sin \theta + y \cos \theta.\end{aligned}$$

აღნიშნული გარდაქმნა მატრიცული სახით ასე ჩაიწერება:

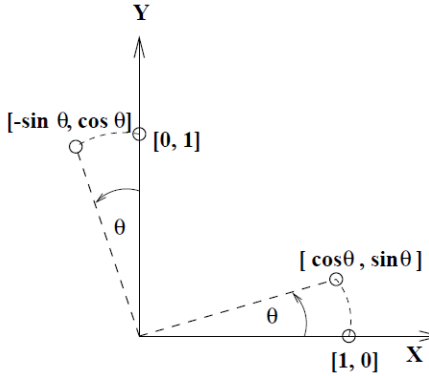
$$\begin{bmatrix}x' \\y'\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta\end{bmatrix} \begin{bmatrix}x \\y\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}x \cos \theta - y \sin \theta \\ x \sin \theta + y \cos \theta\end{bmatrix},$$

ან მოკლედ

$$P' = RP$$

სადაც, R მობრუნების მატრიცაა.

იმის გამო, რომ მობრუნება წრფივ გარდაქმნას წარმოადგენს, მისი მატრიცის სვეტების განსაზღვრა ასევე შესაძლებელია ამ გარდაქმნის გამოყენებით ბაზისური ვექტორების მიმართაც (სურ. 1.5).



სურ. 1.5

საზოგადოდ კი, ნებისმიერი სხვა ვექტორის გარდაქმნა შეიძლება წარმოვადგინოთ ბაზისური ვექტორების წრფივი კომბინაციის, ანუ ბაზისური ვექტორების მობრუნებათა კომბინაციის სახით.

$$\begin{aligned}
 R_{\theta}([x, y]) &= R_{\theta}(x[1,0] + y[0,1]) = \\
 &= xR_{\theta}([1,0]) + yR_{\theta}([0,1]) = \\
 &= x[\cos \theta, \sin \theta] + y[-\sin \theta, \cos \theta] = \\
 &= [x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta].
 \end{aligned}$$

უნდა აღინიშნოს, რომ სიბრტყეზე მობრუნების გარდაქმნა შეიძლება შესრულდეს არა მარტო კოორდინატთა სისტემის სათავეს, არამედ სიბრტყის ნებისმიერი წერტილის მიმართ. ამისთვის საჭიროა მობრუნების წერტილის გადატანა კოორდინატთა სათავეში, შესაბამისი მობრუნების გარდაქმნის შესრულება და მიღებული შედეგის ისევ მობრუნების საწყის ცენტრში გადატანა. მაგრამ გადატანის შესასრულებლად 2×2 განზომილების მატრიცა არ გამოდგება – საჭიროა 3×3 განზომილებ-

ის გარდაქმნის მატრიცა, რაც თავის მხრივ მოითხოვს შესაბამისად წერტილის ერთგვაროვან კოორდინატებში წარმოდგენას.

ორთოგონალური და ორთონორმირებული გარდაქმნები

განსაზღვრება 13. *ვექტორთა სიმრავლეს ეწოდება ორთოგონალური, თუ ამ სიმრავლის ყველა ვექტორი წყვილ-წყვილად ორთოგონალურია.*

აღნიშნული განსაზღვრებიდან გამომდინარეობს, რომ თუ ვექტორთა სიმრავლე ორთოგონალურია (მართობულია), მაშინ ამ სიმრავლიდან აღებული ვექტორთა ნებისმიერი წყვილის სკალარული ნამრავლი ნულის ტოლი იქნება. მაგრამ თუ ორთოგონალურ ვექტორთა სიმრავლე წარმოადგენს ერთეულოვან ვექტორთა სიმრავლეს, მაშინ

განსაზღვრება 14. *ვექტორთა სიმრავლეს ეწოდება ორთონორმირებული, თუ ის ორთოგონალურია და მისი ყველა ვექტორი ერთეულოვანია.*

მობრუნების გარდაქმნის შესრულების შემდეგ ნარჩუნდება ბაზისური ვექტორების სიგრძე და ორთოგონალურობა. ამის შედეგს წარმოადგენს ის, რომ მანძილი გარდაქმნის შედეგად მიღებულ ახალ წერტილებს შორის იგივეა, რაც საწყის წერტილებს შორის. ამ თვისებით ხასიათდება ე.წ. **მკაცრი გარდაქმნა**. ასეთი გარდაქმნა გამოიყენება მყარტანიანი სხეულებით ოპერირებისას და ერთი კოორდინატთა სისტემიდან სხვა კოორდინატთა სისტემაში გადასასვლელად. მართალია, თანაბარი, 1.0 -გან განსხვავებული კოეფიციენტით მასშტაბირებისას ვექტორების სიგრძე იცვლება – კუთხე მათ შორის უცვლელი რჩ-

ება. აღნიშნული გარდაქმნები მნიშვნელოვანია ობიექტების ისეთი თვისებების ძიებისას, რომლებიც ინვარიანტულია სცენაზე მათი და კამერის განთავსების მიმართ.

გადატანა. იმ შემთხვევაში, როცა საჭიროა სიბრტყეზე წერტილების რაღაც მოცემულ მანძილზე გადაადგილება, გამოიყენება **გადატანის** (translation) სივრცითი გარდაქმნა. ეს გარდაქმნა კოორდინატთა სისტემის სათავის ცვლილების ეკვივალენტურია. ასეთი გარდაქმნის საჭიროება წარმოიშობა მაშინ, თუ გვსურს, მაგალითად, გამოსახულების პიქსელის კოორდინატების [სტრიქონი, სვეტი] გარდაქმნა რუკის კოორდინატებად (განედი, გრძედი). იმის გამო, რომ გადატანის გარდაქმნის გამოყენებით ვერ მოხდება კოორდინატთა სისტემის $[0,0]$ სათავის თავის თავში ასახვა, შესაბამისად მას ვერ წარმოვადგენთ 2×2 მატრიცისა და წერტილის კოორდინატების ნამრავლის სახით, როგორც ეს იყო მასშტაბირებისა და მობრუნების გარდაქმნების შემთხვევაში. მისი მატრიცული სახით წარმოდგენისთვის შეიძლება 2×2 მატრიცის განზომილების გაზრდა 3×3 მატრიცამდე. შესაბამისად, საჭირო იქნება წერტილის კოორდინატებს დაეუმატოთ კიდევ ერთი კოორდინატი. ამისთვის გადავიდეთ ერთგვაროვან კოორდინატებზე. დამატებული კოორდინატის მნიშვნელობად იღებენ 1.0 ან სხვა რომელიმე სიდიდეს. აქედან გამომდინარე, $\mathbf{P}[x, y]$ წერტილი ასეთნაირად წარმოდგინება:

$$\mathbf{P} = [x, y] \cong [wx, wy, w] = [x, y, 1], w = 1.$$

იმის გამო, რომ \mathbf{P} წერტილი აღიწერება სამედეკენტიანი ვექტორ-სტრიქონით, შესაბამისად გადატანის გარდაქმნის მატ-

რიცაღ 3×3 განზომილების უნდა იყოს. ზემოთქმულიდან გამომდინარე, $P[x, y]$ წერტილის $P' = [x', y']$ წერტილში გადატანის გარდაქმნა შეიძლება წარმოვადგინოთ 3×3 განზომილების D გადატანის მატრიცისა და $P[x, y]^t$ ვექტორ-სვეტის ნამრავლის სახით.

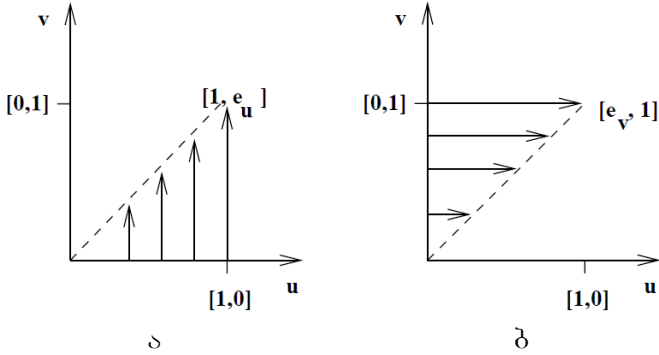
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + x_0 \\ y + y_0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

ამგვარად, გადატანის შემდეგ $[x, y]$ კოორდინატების მქონე წერტილის ახალი კოორდინატები იქნება:

$$[x', y'] = D([x, y]) = [x + x_0, y + y_0].$$

როგორც ვხედავთ, გადატანის გარდაქმნის შედეგად მოხდება მოცემული წერტილის x და y კოორდინატების სიბრტყეზე გადატანა შესაბამისად x_0 და y_0 მანძილით.

წანაცვლება. წანაცვლების (shear) სივრცითი გარდაქმნის ქვეშ იგულისხმება კოორდინატთა სიბრტყის წერტილების წანაცვლება კოორდინატთა რომელიმე ღერძის გასწვრივ. ასეთი გარდაქმნა ნახვენებია მე-1.6 სურათზე, სადაც ადგილი აქვს (U, V) კოორდინატთა სიბრტყის წერტილების წანაცვლებას v ღერძის გასწვრივ ამ ღერძიდან მათი დაშორების პროპორციულად. ასეთი წანაცვლების შემდეგ $[u, v]$ წერტილი გარდაიქმნება $[u, e_u u + v]$ წერტილად (სურ. 1.6,ა). ხოლო თუ $[u, v]$ წერტილის წანაცვლება ხდება u ღერძის გასწვრის, მაშინ ეს წერტილი გარდაქმნის შემდეგ აღმოჩნდება (U, V) სიბრტყის $[u + e_v v, v]$ წერტილში (სურ. 1.6,ბ).



სურ. 1.6

აქედან გამომდინარე, შესაბამისი გარდაქმნები მატრიცულ სახეში ჩაიწერება ასე:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ e_u & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & e_v & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}.$$

ამასთან, უნდა აღინიშნოს, რომ წანაცვლების მატრიცის ვექტორ-სვეტები შეიძლება მიღებულ იქნეს ამ გარდაქმნების ბაზისურ ვექტორებზე გამოყენების შედეგადაც.

ღერძის მიმართ სიმეტრია. სივრცითი გარდაქმნის მეხუთე ტიპს წარმოადგენს ღერძის მიმართ სიმეტრიული გარდაქმნა (reflection). მისი არსის განსაზღვრისთვის განვიხილოთ სიმეტრია კოორდინატთა სათავეზე გამავალი რომელიმე ღერძის, მაგალითად, u ღერძის მიმართ (სურ. 1.6). ასეთი სიმეტრიული გარდაქმნისას $[1, 0]$, $[0, 1]$ ბაზისური ვექტორები აისახება $[1, 0]$, $[0, -1]$ ვექტორებზე. ხოლო სიმეტრია v ღერძის მიმართ $[1, 0]$, $[0, 1]$ ბაზისურ ვექტორებს ასახავს $[-1, 0]$, $[0, 1]$ ვექტორებზე.

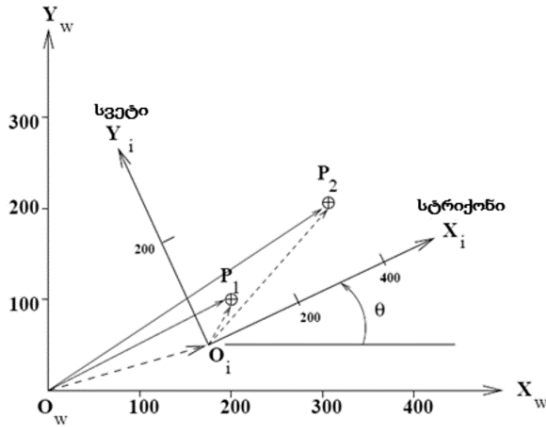
ისევე, როგორც წინა შემთხვევებში, აქაც აღნიშნული გარდაქმნების ჩაწერა შესაძლებელია 2×2 ან 3×3 განზომილების მატრიცის საშუალებით.

ამგვარად, ნებისმიერი აფინური გარდაქმნა შეიძლება წარმოვიდგინოთ ჩვენ მიერ ზემოგანხილული 5 გარდაქმნის კომბინაციის სახით. ამასთან, თითოეულ ამ გარდაქმნას აქვს შესაბამისი უკუგარდაქმნა.

1.5. მობრუნების, მასშტაბირებისა და გადატანის აფინური გარდაქმნების ერთობლივი გამოყენება

ვექტორულ სახეში წარმოდგენილ სიბრტყის წერტილებზე, რომლებიც შეიძლება სხვადასხვა ფორმის ობიექტების წვეროებს წარმოადგენენ, მატრიცული ოპერაციების გამოყენებით შესაძლებელია ობიექტების ზედაპირების ფორმისა და მდებარეობის ცვლილებების განხორციელება. ამისთვის კი შეიძლება ერთზე მეტი სივრცითი გარდაქმნის შესრულება გახდეს საჭირო. განვიხილოთ სამივე სივრცითი გარდაქმნის ერთდროული გამოყენების მაგალითი 1.7 სურათზე მოცემული ზოგადი შემთხვევისთვის. საწყისი $I[\mathbf{r}, \mathbf{c}]$ გამოსახულება მიღებულია კვადრატული პიქსელებიანი კამერით (square-pixel camera), რომლის ოპტიკური ღერძი მიმართულია მსოფლიო $W[\mathbf{x}, \mathbf{y}]$ კოორდინატთა სისტემის მუშა სივრცის სიბრტყის (სურათის სიბრტყის) მართობულად. ამოცანა იმაში მდგომარეობს, რომ პიქსელური $[r, c]$ ([სტრიქონი, სვეტი]) კოორდინატებიდან მივიღოთ მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემის $[x, y]$ კოორდინატებში (გაზომილი მაგალითად, მმ-ში) გარდაქმნის ფორმულა. ასეთი გეომეტრიული გარდაქმნის შესასრულებლად გამოსახულების მახასიათებელი წერტილების მიმართ საჭიროა გამოვიყენოთ სამივე სივრცითი გარ-

დაქმნის – მობრუნების R , მასშტაბირების S და გადატანის D მატრიცების კომბინაცია.



სურ. 1.7

აღნიშნული D, S, R გარდაქმნების კომბინაცია მატრიცულ სახეში ასე წარმოიდგინება:

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

ანუ მოკლედ ასე ჩაიწერება:

$$P_j^w = D_{x_0, y_0} S_s R_\theta P_j^i.$$

პიქსელური კოორდინატების [სტრიქონი, სვეტი] მუშა სივრცის სიბრტყის $[x, y]$ კოორდინატებში ასახვა განისაზღვრება შემდეგი ოთხი პარამეტრის საშუალებით:

1. θ მობრუნების კუთხით;
2. პიქსელების მმ-ში გადასაყვანად s მასშტაბის კოეფიციენ-
ტით;
3. x ღერძის მიმართულებით x_0 გადაადგილების სიდიდით;
4. y ღერძის მიმართულებით y_0 გადაადგილების სიდიდით.

აღნიშნული პარამეტრების გამოსათვლელად მუშა სივრცეში უნდა შეირჩეს ისეთი წერტილები, რომლებიც აშკარად შესამჩნევია და რომელთა მახასიათებელი ნიშან-თვისებებიც გამოსახულებაზე ადვილად საპოვნელია. ასეთ წერტილებს **საკონტროლო წერტილები** (control points) ეწოდება.

განსაზღვრება 1.5. საკონტროლო წერტილები ეწოდება ერთმანეთისგან აშკარად განსხვავებულ და ადვილად საპოვნელ წერტილებს, რომლებიც გამოიყენება სხვადასხვა კოორდინატთა სისტემებს შორის ცნობილი შესაბამისობების დასადგენად.

სწორედ ამ წერტილების კოორდინატების საშუალებით ხდება ზემოაღნიშნული პარამეტრების მნიშვნელობების გამოთვლა. 1.7 სურათზე ისინი შეესაბამება P_1 და P_2 საკონტროლო წერტილებს და აღნიშნულია “+” სიმბოლოთი.

პრაქტიკული ამოცანების გადაწყვეტისას, მაგალითად, დედამიწის ზედაპირის აეროფოტოსურათების დამუშავებისას, საკონტროლო წერტილების როლში ხშირად იღებენ გზაჯვარედინებს, შენობების კუთხეებს, მდინარეების მკვეთრ ხვეულებს, მაღალ ანძებს და ა. შ. ამავე დროს აღსანიშნავია, რომ ერთი და იმავე ნიშან-თვისების მქონე წერტილი, მაგალითად, P_1 შეიძლება წარმოდგენილი იყოს ორი ან მეტი განსხვავებუ-

ლი ვექტორის საშუალებით. მაგალითად, ერთი მათგანი შეიძლება წარმოადგენდეს I გამოსახულებაზე წერტილის პიქსელურ კოორდინატებს, ხოლო მეორე – მმ-ში გაზომილ $[x, y]$ კოორდინატებს კოორდინატთა მსოფლიო W სისტემაში. აღნიშნოთ ეს წერტილები შესაბამისად P_1^i და P_1^w . 1.7 სურათზე მოცემული შემთხვევისთვის $P_1^i = [100, 60]$ და $P_1^w = [200, 100]$.

ზემოთ დასმული ამოცანის გადასაწყვეტად უნდა გამოითვალოს ოთხივე პარამეტრის მნიშვნელობა. ამისთვის საჭიროა ვიცოდეთ როგორც P_1 , ასევე P_2 წერტილების კოორდინატები კოორდინატთა ორივე სისტემაში. თუ ამ წერტილების კოორდინატების მნიშვნელობები ცნობილია, მაშინ (1.2) მატრიცულ განტოლებებზე დაყრდნობით თითოეული წერტილისთვის მიიღება ორი ოთხუცნობიანი განტოლება.

$$x_w = x_i s \cos \theta - y_i s \sin \theta + x_0. \quad (1.3)$$

$$y_w = x_i s \sin \theta + y_i s \cos \theta + y_0. \quad (1.4)$$

ამგვარად, P_1 და P_2 წერტილებისთვის გვექნება 4 განტოლებისგან შემდგარი ოთხუცნობიანი განტოლებათა სისტემა. მისი ამოხსნით მიიღება ზემოჩამოთვლილი ოთხივე პარამეტრის რიცხვითი მნიშვნელობა.

მობრუნების θ კუთხის გამოთვლა შესაძლებელია დანარჩენი პარამეტრებისაგან დამოუკიდებლად. კერძოდ, I გამოსახულების კოორდინატთა სისტემაში $\overrightarrow{P_1 P_2}$ ვექტორის მიმართულება განისაზღვრება:

$$\theta_i = \arctg((y_2^i - y_1^i)/(x_2^i - x_1^i))$$

კუთხით. ხოლო კოორდინატთა W სისტემაში კი:

$$\theta_w = \arctg((y_2^w - y_1^w)/(x_2^w - x_1^w))$$

კუთხით. მაშინ $\overline{P_1P_2}$ ვექტორის მობრუნების კუთხის მნიშვნელობად აიღება ამ ორი კუთხის მნიშვნელობათა სხვაობა:

$$\theta = \theta_w - \theta_i.$$

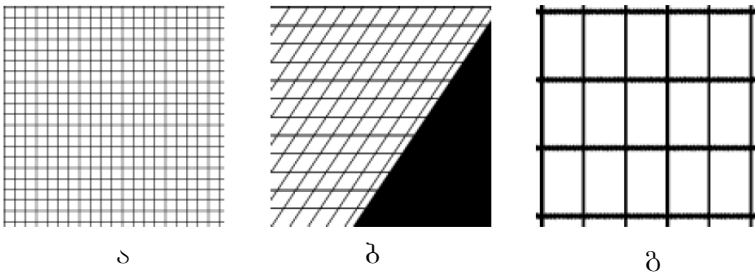
მობრუნების კუთხის მნიშვნელობის ზემოაღნიშნულ განტოლებათა სისტემაში ჩასმით განისაზღვრება $\sin \theta$ და $\cos \theta$ მნიშვნელობები, რის შედეგად განტოლებათა სისტემა დაიყვანება სამუცნობიანი სამი განტოლებისგან შემდგარ სისტემაზე, რომელიც ამოიხსნება s , x_0 და y_0 უცნობების მიმართ.

1.5.1. აფინური გარდაქმნის მაგალითები

სივრცითი გარდაქმნის ამოცანა განვიხილოთ აფინური დეფორმაციის და ობიექტის ამოცნობისა და მდებარეობის განსაზღვრის კონკრეტულ მაგალითებზე.

აფინური დეფორმაცია. ვთქვათ, მართკუთხა ბადის ციფრული გამოსახულებიდან (სურ. 1.8,ა) გვინდა პარალელოგრამის ფორმის ფრაგმენტის ამოღება. ამისთვის სავსებით საკმარისია სამი წერტილის აღება. პირველი წერტილი განსაზღვრავს ფრაგმენტის, როგორც ახალი გამოსახულების საწყის წერტილს და შეესაბამება პარალელოგრამის ერთ-ერთ წვეროს, ხოლო პირველი წერტილის მომიჯნავე მეორე და მესამე წერტილები კი შეესაბამება პარალელოგრამის დანარჩენ წვეროებს. საწყის გამოსახულებაზე (სურ. 1.8,ა) შერჩეულ ამ სამ წერტილზე, რომლებიც არაპერპენდიკულარულ დერძებს განსაზღვრავს, წანაცვლების აფინური გარდაქმნის გამოყენების შედეგად მიიღე-

ბა დეფორმირებული გამოსახულება – დახრილი ბადის გამოსახულება (სურ. 1.8,ბ). ასეთი დეფორმირებული გამოსახულებიდან ისევ მართკუთხა ბადის გამოსახულების მისაღებად საჭიროა წანაცვლებული გამოსახულებიდან ისეთი ახალი მესამე გამოსახულების ფორმირება, რომლის ღერძები ემთხვევა დახრილი ბადის გამოსახულების (სურ. 1.8,ბ) ფორმირებისთვის გამოყენებულ დახრილ ღერძებს. მიღებული ახალი გამოსახულების ფრაგმენტი მოცემულია 1.8,გ სურათზე. აღსანიშნავია, რომ სამივე – ა), ბ) და გ) გამოსახულებების განზომილება ერთნაირია და ტოლია 128×128 პიქსელის. ამასთან, 1.8,ბ სურათზე მოცემული დეფორმირებული გამოსახულების მარჯვენა მხარეს არსებული სამკუთხედი შავი ფერისაა იმის გამო, რომ გამოსახულები (დეფორმირებული) გამოსახულების ამ უბანში საწყისი გამოსახულების ამოკრეფითი მნიშვნელობებით შედგენილი პარალელოგრამი არ ემთხვევა საწყისი გამოსახულების საზღვრებს და შესაბამის პიქსელებში სიკაშკაშის მნიშვნელობა ნულის ტოლი აიღება.



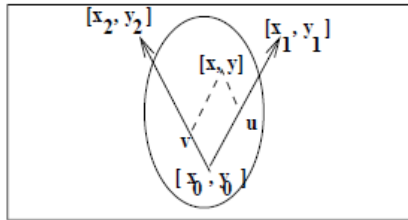
სურ. 1.8

ასეთივე მიდგომაა გამოყენებული 1.9,ა სურათზე მოცემული გამოსახულების შემთხვევაშიც, სადაც მომხმარებლის მიერ მოცემული სამი წერტილი გამოყენებულ იქნა საწყისი გა-

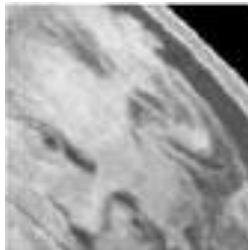
მოსახულებიდან (დოლარის ბანკნოტი) პარალელოგრამის ფორმის ფრაგმენტის სივრცითი გარდაქმნისთვის. დეფორმირებული გამოსასვლელი გამოსახულების (პორტრეტის) მისაღებად გამოყენებული იქნა **წანაცვლების** აფინური გარდაქმნა. მიღებული გამოსასვლელი გამოსახულება შეიცავს $[r, c]$ კოორდინატების მქონე $n \times m$ (მაგალითად, 512×512) პიქსელს. მიღებული გამოსასვლელი გამოსახულების თითოეულ $[r, c]$ პიქსელში სიკაშკაშის მნიშვნელობად აიღება ანათვალის საწყისი გამოსახულების $[x, y]$ კოორდინატის მქონე პიქსელიდან.



ა



ბ



გ

სურ. 1.9

საწყისი გამოსახულებიდან აღებული ამოკრეფითი პიქსელის კოორდინატების გამოსათვლელ განტოლებას ბაზისური ვექტორების გამოყენებით შემდეგი სახე აქვს:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \frac{r}{n} \left(\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \right) + \frac{c}{m} \left(\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \right);$$

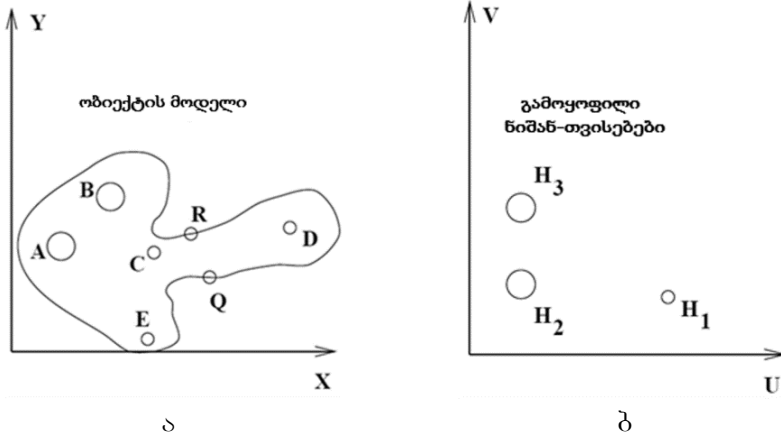
ხოლო მატრიცული ფორმით კი ასეთი:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_1 - x_0)/n & (x_2 - x_0)/m & x_0 \\ (y_1 - y_0)/n & (y_2 - y_0)/m & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ c \\ 1 \end{bmatrix}.$$

როგორც ვხედავთ, შესასვლელი გამოსახულების პიქსელის $[x, y]$ კოორდინატები განისაზღვრება იმ ახალი დერძების ერთეულოვანი ვექტორების საშუალებით, რომლებიც მომხმარებლის მიერ მითითებული წერტილებით იყო მოცემული. ამასთან, უნდა მოხდეს მიღებული კოორდინატების მნიშვნელობების დამრგვალება, რათა I^1 ციფრულ გამოსახულებაზე პიქსელის კოორდინატებისთვის მივიღოთ მთელრიცხვა მნიშვნელობები. თუ გარდაქმნის (აფინური დეფორმაციის) შედეგად x ან y კოორდინატის მნიშვნელობა ცდება გამოსახულების საზღვარს, მაშინ გამოსასვლელი გამოსახულების შესაბამის პიქსელში სიკაშკაშის მნიშვნელობა ნულის (შავი ფერის) ტოლია, ანუ $I^2[r, c] = 0$ (შავი სამკუთხედი 1.9, გ სურათის ზედა მარჯვენა კუთხეში. საწინააღმდეგო შემთხვევაში $I^2[r, c] = I^1[x, y]$.

ობიექტის ამოცნობა და ადგილმდებარეობის განსაზღვრა.

ამ ამოცანების გადასაწყვეტად განვიხილოთ იმ გარდაქმნასთან დაკავშირებული გამოთვლები, რომელიც 1.10 სურათზე წარმოდგენილი ა) ობიექტის მოდელის და ბ) გამოსახულებაზე არსებული ობიექტის სივრცითი შეთავსებისთვისაა (matching) საჭირო.



სურ. 1.10

დავუშვათ, რომ ამოცნობისთვის საჭირო ნიშან-თვისებების გამოყოფისას ობიექტის გამოსახულებაზე აღმოჩენილი იქნა მხოლოდ სამი – H_1 , H_2 და H_3 ნახვრეტის ცენტრის კოორდინატები. აღნიშნული სივრცითი გარდაქმნისას უნდა მოხდეს მოდელის $[x, y]$ წერტილების ასახვა გამოსახულების $[u, v]$ წერტილებზე. ვთქვათ, რომ ჩვენთვის ცნობილია ის გარემო, სადაც გამოსახულების ფორმირება ხდება და შესაბამისი მასშტაბის კოეფიციენტიც. ასევე ვუშვებთ, რომ პიქსელური კოორდინატების მიმართ წინასწარ განხორციელდა მასშტაბირების გარდაქმნა, რის შედეგადაც მიღებული იქნა u და v კოორდინატების მნიშვნელობები.

ობიექტის მოდელის წერტილების და გამოსახულების შესაბამისი წერტილების სივრცითი შეთავსების პროცედურის განხორციელებისთვის საჭირო მობრუნებისა და გადატანის გარდაქმნების პარამეტრების მისაღებად, რომლებიც ამ წერტილების შეთავსებას უზრუნველყოფენ, საკმარისია გამოსახულების მხოლოდ ორი წერტილი. 1.1 და 1.2 ცხრილებში მოცემულია

შესაბამისად ობიექტის მოდელისა და გამოსახულების წერტილების კოორდინატები და მათ შორის მანძილები.

ცხ. 1.1

წერტილი	კოორდინატები	A	B	C	D	E
A	(8,17)	0	12	15	37	21
B	(16,26)	12	0	12	30	26
C	(23,16)	15	12	0	22	15
D	(45,20)	37	30	22	0	30
E	(22,1)	21	26	15	30	0

ცხ. 1.2

წერტილი	კოორდინატები	H1	H2	H3
H1	(31,9)	0	21	26
H2	(10,12)	21	0	12
H3	(10,24)	26	12	0

სივრცითი გარდაქმნის პარამეტრების გამოთვლისთვის დაიშვება ჰიპოტეზა (A, H_2) და (B, H_3) წერტილების წყვილების შესაბამისობის შესახებ. ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ ეს ჰიპოტეზა ემყარება წერტილებს შორის უკვე ცნობილი მანძილების შესახებ მონაცემებს.

მოდელის A და B წერტილებს შორის ვექტორის მიმართულება ტოლია $\theta_1 = \arctg(9.0/8.0) = 0.844$. გამოსახულებაზე H_2 და H_3 წერტილებს შორის შესაბამისი ვექტორის მიმართულება ტოლია $\theta_2 = \arctg(12.0/0.0) = \pi/2 = 1.571$. აქედან გამომდინარე, ვექტორის მობრუნების კუთხე $\theta = 0.727$ რადიანს. თუ (1.2) განტოლებაში ჩავსვამთ მოდელის და გამოსახულების შესაბამისი A და H_2 წერტილების ცნობილ კოორდინატებს, მივიღებთ 2 წრფივი განტოლებისგან შედგენილ სისტემას:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 12 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & u_0 \\ \sin \theta & \cos \theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 8 \\ 17 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

სადაც, u_0 და v_0 წარმოადგენენ გამოსახულების სიბრტყეზე გადატანის უცნობ პარამეტრებს. რაც შეეხება $\sin \theta$ და $\cos \theta$ მნიშვნელობებს, ისინი ადვილად გამოითვლება, რადგანაც ცნობილია θ კუთხის სიდიდე.

მოცემული წრფივი განტოლებათა სისტემის ამონახსნია $u_0 = 15.3$ და $v_0 = -5.95$. მიღებული შედეგის შესამოწმებლად შეიძლება გამოვიყენოთ შესაბამისი წერტილების მეორე წყვილი – B და H_3 წერტილები. მათთვისაც გამოთვლებით მიიღება გადატანის პარამეტრების მსგავსი მნიშვნელობები. თუ ასეთივე გამოთვლებს მოვახდენთ სხვა შესაბამისი წერტილების მიმართაც, მიღებული შედეგები ერთმანეთისგან მცირედით იქნება განსხვავებული. ცხადია, რომ რაც უფრო მეტი იქნება იმ წერტილების რიცხვი, რომელთა მიმართაც განხორციელდა სივრცითი გარდაქმნა, მით უფრო ზუსტად მოხდება მოდელისა და ობიექტის გამოსახულების ორგანზომილებიანი წერტილების შეთავსება.

სივრცითი გარდაქმნის პარამეტრების განსაზღვრის შემდეგ უკვე შეიძლება გამოითვალოს მოდელის ნებისმიერი წერტილის კოორდინატები გამოსახულების სიბრტყეზე. მაგალითად, 1.10, ა სურათზე მოცემული ობიექტის – „სახელურის“ მოდელის R და Q წერტილების კოორდინატებია შესაბამისად [29,19] და [32,12]. (1.5) განტოლებაში უკვე გამოთვლილი პარამეტრების – u_0 , v_0 , θ კუთხის და მოდელის R წერტილის კოორდინატების მნიშვნელობების ჩასმით მიიღება ამ წერტილის კოორდინატები გამოსახულების სიბრტყეზე – $R^i = [24.4, 27.4]$:

$$\begin{bmatrix} u_R \\ v_R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 24.4 \\ 27.4 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 15.3 \\ \sin \theta & \cos \theta & -5.95 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 29 \\ 19 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

იგივე გარდაქმნის ჩატარება მოდელის $Q = [32,12]$ წერტილისთვის მოგვცემს ამ წერტილის $Q^i = [31.2,24.2]$ კოორდინატებს გამოსახულებაზე.

სივრცითი გარდაქმნის პარამეტრების ცოდნა საშუალებას იძლევა ობიექტის გამოსახულების წერტილების კოორდინატების საშუალებით განისაზღვროს ობიექტის შესაბამისი წერტილების კოორდინატები კოორდინატთა მსოფლიო სისტემაში. ამავე დროს მხედველობაში მისაღებია ის გარემოება, რომ გამოსახულებაზე არსებული სხვადასხვა დამახინჯების, ნიშან-თვისების განსაზღვრისას დაშვებული უზუსტობებისა და გამოთვლების ცდომილებების გამო გამოთვლილი კოორდინატების მნიშვნელობები შესაძლებელია არ იყოს ზუსტი. მაგალითად, მანიპულაციური რობოტის ფუნქციონირება ხდება უწყვეტ მუშა სივრცეში, მაშინ როდესაც გამოსახულებაზე კოორდინატები დისკრეტულია. ამიტომ რობოტის ხელის მიერ გამოსახულებაზე ხილული ობიექტის ასაღებად რობოტის ხელი უფრო ფართოდ უნდა გაიშალოს, ვიდრე ეს $R^i Q^i$ წერტილების საშუალებით გამოთვლილი ობიექტის „სახელურის“ სისქეა.

როგორც ვიცით, ციფრულ გამოსახულებაზე სიკაშკაშის მნიშვნელობები განსაზღვრულია მხოლოდ დისკრეტული მთელი რიცხვა ბადის კვანძებში. ვთქვათ, ჩვენ გვინდა დავადგინოთ C^i და D^i ნახვრეტების არსებობა 1.10, ა სურათზე მოცემულ მოდელზე ამ ნახვრეტების მიდამოში ღია ფერის სიკაშკაშის მნიშვნელობის მქონე პიქსელების მოძიებით. გამოსახულებაზე აღნიშნული ნახვრეტების ცენტრების კოორდინატების განსაზღვრისთვის საჭიროა მოდელის წერტილების სივრცითი გარდაქ-

მნის შედეგად მიღებული კოორდინატების მნიშვნელობები დავამრგვალოთ მთელ რიცხვამდე; ან იქნებ გამოსახულებაზე შემოწმდეს არა ერთი პიქსელი ნახვრეტის ცენტრში, არამედ რაღაც მიდამო ცენტრით გარდაქმნით მიღებული ნამდვილი მნიშვნელობის კოორდინატების მქონე წერტილში. წარმოდგენილი მაგალითი გვიჩვენებს ორგანზომილებიანი ობიექტების ამოცნობის პოტენციურ შესაძლებლობას ობიექტის მოდელის წერტილების ობიექტის გამოსახულებაზე არსებულ მნიშვნელოვანი ნიშან-თვისებების წერტილებთან სივრცითი **თანხვედრის** საფუძველზე.

განსაზღვრება 1.6. *თანხვედრით ამოცნობა (recognition-by-alignment) ეწოდება ობიექტის ამოცნობის მეთოდს, რომელშიც მობრუნების, მასშტაბირებისა და გადატანის გარდაქმნის გამოყენებით ხორციელდება მოდელის გარდაქმნილი მახასიათებელი ნიშან-თვისებების სივრცითი შეთავსება გამოსახულების ნიშან-თვისებებთან.*

1.6. აფინური გარდაქმნის ზოგადი სახე

ჩვენ განვიხილეთ ხუთი სახის აფინური გარდაქმნა – მობრუნება, მასშტაბირება, გადატანა, წანაცვლება და ღერძის მიმართ სიმეტრია. თითოეულ ამ გარდაქმნას აქვს ისეთივე ტიპის უკუგარდაქმნა. თუ განვიხილავთ ზოგადი სახის ორგანზომილებიანი აფინური გარდაქმნის მატრიცას, ჩაწერილს ზემოაღნიშნული გარდაქმნების კომპოზიციის სახით, რომელიც აღწერს ერთი ორგანზომილებიანი სივრცის ასახვას მეორეზე, მაშინ იგი წარმოადგენს განტოლებას, რომელიც შეიცავს 6 პარამეტრს.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

ამ პარამეტრების მნიშვნელობები გამოითვლება სამი, ერთმანეთის შესაბამისი არაკოლინეარული წერტილების წყვილის საშუალებით. შესაბამისად გვექნება ექვსი წრფივი განტოლებისგან შედგენილი სისტემა, რომელიც მიიღება, თუ (1.6) განტოლებას ჩავწერთ წერტილთა თითოეული წყვილისთვის. თუ აღნიშნული შესაბამისი წყვილებია $([x_j, y_j], [u_j, v_j])$, $j = \overline{1,3}$ წერტილები, მაშინ (1.6) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

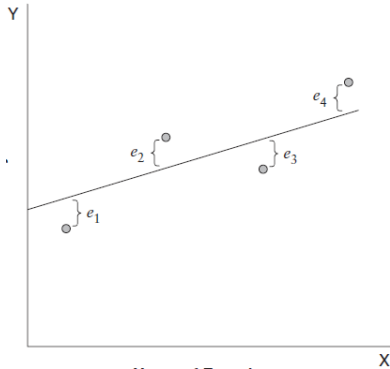
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.7)$$

ნებისმიერი ამ წერტილის კოორდინატების გამოთვლისას წარმოშობილი ცდომილებების გამო გარდაქმნის პარამეტრების მნიშვნელობებიც გარკვეული ცდომილებით მიიღება. პარამეტრებისთვის ბევრად უკეთესი შედეგი მიიღება, თუ გამოთვლისთვის გამოვიყენებთ უმცირესი კვადრატების მეთოდს დიდი რაოდენობის შესაბამისი საკონტროლო წერტილების წყვილებისთვის.

ცნობილია, რომ სიბრტყეზე მონაცემთა n რაოდენობის საწყისი $\{(x_j, y_j), j = \overline{1, n}\}$ წერტილების წრფით აპროქსიმაციის ამოცანაში ამ წერტილების $y = f(x)$ მოდელთან (წრფესთან) თანხვედრის საზომად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს საწყისი წერტილების მოდელისგან $e_j = y - y_j$ გადახრის კვადრატების ჯამი (სურ. 1.11):

$$Sum = \sum_{j=1}^n (f(x_j) - y_j)^2.$$

საუკეთესოდ ჩაითვლება ისეთი პარამეტრების მქონე $y = f(x)$ მოდელი, რომელიც გადახრის კვადრატების ჯამის (Sum) მინიმუმს იძლევა.



სურ. 1.11

მსგავსი მიდგომა გამოიყენება ცდომილების ფუნქციის განსაზღვრისთვისაც. კერძოდ, ცდომილების მინიმალური სიდიდის მისაღებად ცდომილების ფუნქცია ასეთნაირად განისაზღვრება

$$\varepsilon(a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}) = \sum_{j=1}^n \left((a_{11}x_j + a_{12}y_j + a_{13} - u_j)^2 + a_{21}x_j + a_{22}y_j + a_{23} - v_j \right)^2 \quad (1.8)$$

გამოვთვალოთ ამ ფუნქციის ექვსი $\partial\varepsilon/\partial a_{ij}$ კერძო წარმოებული თითოეული 6 უცნობი a_{ij} პარამეტრის მიხედვით და გაუტოლოდ ისინი ნულს. შედეგად მივიღებთ მატრიცულ ფორმაში ჩაწერილ შემდეგ ექვს განტოლებას:

$$\begin{bmatrix} \sum x_j^2 & \sum x_j y_j & \sum x_j & 0 & 0 & 0 \\ \sum x_j y_j & \sum y_j^2 & \sum y_j & 0 & 0 & 0 \\ \sum x_j & \sum y_j & \sum 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum x_j^2 & \sum x_j y_j & \sum x_j \\ 0 & 0 & 0 & \sum x_j y_j & \sum y_j^2 & \sum y_j \\ 0 & 0 & 0 & \sum x_j & \sum y_j & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum u_j x_j \\ \sum u_j y_j \\ \sum u_j \\ \sum v_j x_j \\ \sum v_j y_j \\ \sum u_j \end{bmatrix}.$$

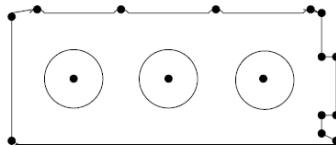
საზოგადოდ, გამოსახულებასა და რუკას ან ორ გამოსახულებას შორის შესაბამისობის დადგენისთვის იყენებენ დიდი რაოდენობის საკონტროლო წერტილებს.

1.7. აფინურ გარდაქმნაზე დამყარებული 2D ობიექტების ამოცნობის მეთოდები

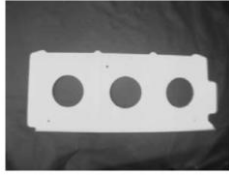
§1.5.1-ში ჩვენ უკვე განვიხილეთ აფინური გარდაქმნის გამოყენებით ორგანზომილებიან გამოსახულებაზე ობიექტის ამოცნობის ერთ-ერთი მეთოდი – **ამოცნობა გამოსახულებათა თანხვედრით**, რომელიც ემყარება ობიექტის მოდელის წერტილების გამოსახულების წერტილებზე ასახვას. ამოცნობის ზოგადი სახის მეთოდების გამოყენებისას ნიშან-თვისებად შეიძლება გამოყენებულ იქნას წერტილის ნებისმიერი ზოგადი ნიშან-თვისება. მაგრამ თუ საქმე გვაქვს რომელიმე გამოყენებით სფეროსთან, რომელიც ხასიათდება გამორჩეულად დამახასიათებელი განსხვავებული თვისებებით, მაშინ საჭიროა ამ ნიშან-თვისებების კლასიფიცირება და, აქედან გამომდინარე, მათთვის შესაბამისი ჭდეების მინიჭება. კონკრეტულ ამოცანებში, მაგალითად, ობიექტების შემადგენელი ცალკეული ნაწილების დახარისხების ამოცანაში ასეთი ჭდეები შეიძლება აღნიშნავდნენ მათ კუთხეებს ან ნახვრეტების ცენტრებს, ხოლო რუკების დამუშავების ამოცანაში კონტურების გადაკვეთის წერტილებს ან მაღალი სიმრ-

უდის მქონე წერტილებს მიწისა და მდინარის ზედაპირების შესხების საზღვარზე.

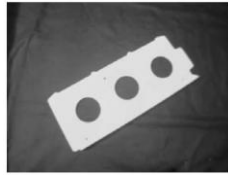
წინასწარ ცნობილ მოდელზე დამყარებული ობიექტების ამოცნობის მეთოდის არსი მოცემულია 1.12 სურათზე, სადაც თვითმფრინავის დეტალი წარმოდგენილია კონტურული მოდელის სახით (სურ. 1.12,ა). კონტურულ მოდელზე არსებული პატარა წრეები შეესაბამება იმ მახასიათებელ ნიშან-თვისობრივ წერტილებს, რომლებიც შეიძლება გამოყენებული იქნეს დეტალის მოდელისა და გამოსახულების შეთანადებისთვის. 1.12,ბ, გ,დ სურათზე წარმოდგენილია სამი განსხვავებული ხედიდან მიღებული რეალური დეტალის გამოსახულება. კერძოდ, ბ) წარმოადგენს რეალური დეტალის გამოსახულებას, რომლის ორიენტაცია თითქმის ემთხვევა მოდელის ორიენტაციას; გ) დეტალი შემობრუნებულია 45° -ით და დ) გამოსახულება მიღებულია დეტალის სიბრტყის მიმართ დახრილი კამერის საშუალებით, რის გამოც დეტალი გამოსახულებაზე შემობრუნებულია და დამრეცად ჩანს. ამოცანა მდგომარეობს იმის განსაზღვრაში, შეიცავს თუ არა წარმოდგენილი გამოსახულებებიდან რომელიმე (მაგალითად, 1,12,ბ,გ,დ) მოცემული მოდელის (სურ. 1.12,ა) შესაბამისი ობიექტის სახეს. ასეთი გამოსახულების აღმოჩენის შემდეგ უკვე შესაძლებელია განისაზღვროს ობიექტის კამერის მიმართ მდებარეობის (pose) პარამეტრები – ლოკალიზაცია და ორიენტაცია.



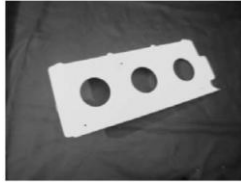
ა



ბ



გ



დ

სურ. 1.12

განვიხილოთ გამოსახულებაზე ობიექტის ამოცნობის რამდენიმე მეთოდი.

ბაზურ ლოკალურ ნიშან-თვისებებზე დამყარებული მეთოდი. ბაზური ლოკალური ნიშან-თვისებების მეთოდი ობიექტის ამოცნობისთვის (local-feature-focus method) მხედველობაში იღებს ობიექტის ლოკალურ მახასიათებელ ნიშან-თვისებებს და მათ ურთიერთგანლაგებას. აღნიშნული მეთოდის გამოყენებისას თითოეული ამოსაცნობი ობიექტისთვის წინასწარ ხდება თითო მოდელის ფორმირება. თითოეული მოდელი თავის მხრივ აღიწერება **ბაზური ნიშან-თვისებების (focus features)** გარკვეული სიმრავლით, რომლებიც ობიექტის ძირითად და ამასთან ერთად ადვილად აღმოსაჩენ – მკაფიო ლოკალურ მახასიათებლებს წარმოადგენენ (იგულისხმება, რომ ობიექტები ერთმანეთს არ ფარავს). ამავე დროს მოცემული მოდელი შეიცავს თითოეული ბაზური ლოკალური ნიშან-თვისების სიახლოვეში არსებული

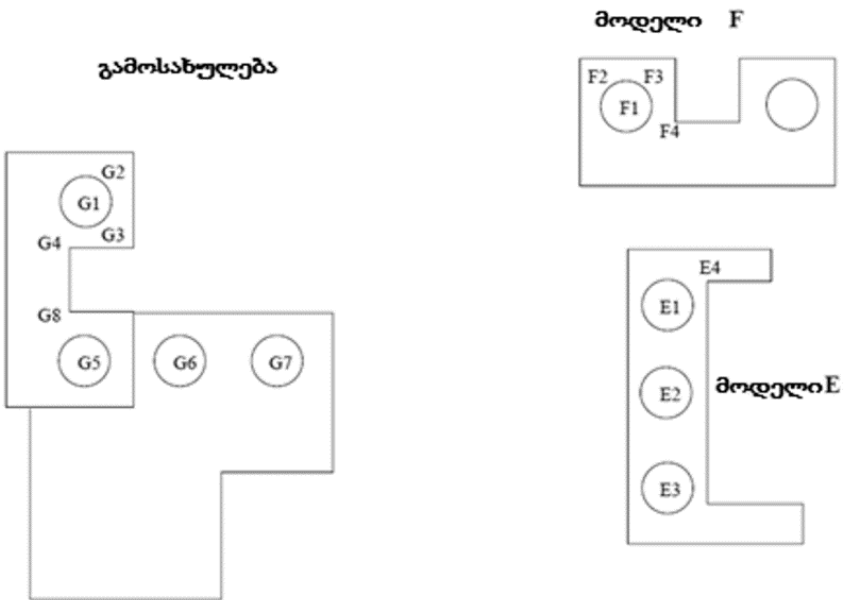
მახასიათებელი ნიშან-თვისებების სიმრავლესაც – კლასტერს. ნიშან-თვისებების ეს კლასტერი გამოიყენება იმის ვერიფიკაციისთვის (დადასტურებისთვის), სწორად იქნა თუ არა ნაპოვნი შესაბამისი ბაზური ნიშან-თვისება და ასევე გამოიყენება სივრცეში ობიექტის მდებარეობის (კოორდინატების) და ორიენტაციის განსასაზღვრად.

განვიხილოთ გამოსახულებათა შეთავსებით ობიექტის ამოცნობის ალგორითმი ბაზური ლოკალური ნიშან-თვისებების მეთოდის გამოყენებით. ალგორითმი ახდენს წინასწარ მოცემული ობიექტის \mathbf{F} მოდელის და გამოსახულების შეთავსებას $\{\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_M\}$ ბაზური ნიშან-თვისებების საფუძველზე. ობიექტის მოდელის თითოეული \mathbf{F}_m , $m = \overline{1, M}$ ბაზური ნიშან-თვისებისთვის ასევე განსაზღვრულია მის მიმდებარედ არსებული $\mathbf{S}(\mathbf{F}_m)$ ნიშან-თვისებების სიმრავლე ამ ბაზური ნიშან-თვისების ვერიფიკაციისთვის, ანუ მისი სწორად აღმოჩენის დასადასტურებლად. ამავე დროს გამოსახულებაზე, რომელიც ვთქვათ ერთ ან რამდენიმე ობიექტს შეიცავს ხდება მახასიათებელი $\{\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_I\}$ ნიშან-თვისებების გამოყოფა. ამასთან, თითოეული \mathbf{G}_i , $i = \overline{1, I}$ ნიშან-თვისებისთვის განისაზღვრება გამოსახულებაზე მის სიახლოვეში არსებული $\mathbf{S}(\mathbf{G}_i)$ ნიშან-თვისებების სიმრავლე. შედარების ალგორითმი ჯერ იწვევს ობიექტის მოდელის ბაზური ნიშან-თვისებების ძიებას. მოცემული მოდელის შესაბამისი \mathbf{F}_m , $m = \overline{1, M}$ ბაზური ნიშან-თვისების აღმოჩენის შემდეგ ალგორითმი ცდილობს ამ ბაზური ნიშან-თვისების სიახლოვეში აღმოაჩინოს გამოსახულების $\mathbf{S}(\mathbf{G}_i)$ ნიშან-თვისებები. ამასთან, რაც შეიძლება მეტი. თუ გამოსახულებაზე აღმოჩნდა მოდელის ბაზური ნიშან-თვისების სიახლოვეში არსებული $\mathbf{S}(\mathbf{F}_m)$ ნიშან-თვისებების მსგავსი $\mathbf{S}(\mathbf{G}_i)$ ნიშან-თვისებები, მაშინ ნიშან-თვისებათა ამ ორ სიმრავლეს შორის შესაბამისობის და-

დგენის შემთხვევაში ალგორითმი აყალიბებს ჰიპოთეზას გამოსახულებაზე მოცემული ობიექტის არსებობის შესახებ. აღნიშნული ჰიპოთეზის შემოწმებისთვის გამოიყენება ვერიფიკაციის პროცედურა, რომელმაც უნდა განსაზღვროს დაკვირვებულ სცენაზე მოცემული ობიექტის არსებობის საფუძვლიანობა. მაგალითად, ბრტყელი წახნაგების მქონე ობიექტების ამოცნობისას ვერიფიკაციის პროცედურაში როგორც შესაფერისი მტკიცებულება ხშირად გამოიყენება ობიექტის საზღვრები. მოდელისა და გამოსახულების შესაბამისი ნიშან-თვისებების სიმრავლეების საშუალებით განისაზღვრება აფინური გარდაქმნის ის პარამეტრები, რომლითაც მოხდება მოდელის წერტილების გამოსახულების წერტილებზე ასახვა. ეს გარდაქმნა გამოიყენება ობიექტის მოდელის საზღვრის თითოეული მონაკვეთის კოორდინატების გამოსახულების სივრცეში შესაბამისი მონაკვეთის კიდურა წერტილების კოორდინატებში ასახვისთვის. მოდელის საზღვრის გარდაქმნილი მონაკვეთები თითქმის უნდა ემთხვეოდეს შესაბამის მონაკვეთებს გამოსახულებაზე თუ ობიექტი სხვა ობიექტებით არ არის გადაფარული. თუმცა გამოსახულებაზე ხმაურის არსებობისა და ნიშან-თვისებების გამოყოფის და მათი შესაბამისობის დადგენის პროცესში წარმოშობილი ცდომილებების გამო მცირეა იმის ალბათობა, რომ მოდელის გარდაქმნილი მონაკვეთები ზუსტად თანხვედრილი იქნება შესაბამის მონაკვეთებთან გამოსახულებაზე. ამის გამო გამოსახულებაზე მსგავსი მონაკვეთების მოძიება შეიძლება განხორციელდეს მოდელის ყოველი გარდაქმნილი მონაკვეთის ირგვლივ არსებულ მართკუთხა არეში. ძიების პროცესში დამთხვევის არსებითი ნიშნების პოვნის შემთხვევაში მოდელის მონაკვეთი მოინიშნება როგორც ვერიფიცირებული. საკმარისი რაოდენობის მოდელის ვერიფიცირებული მონაკვეთების არსებობის შემთხვევაში ჩაითვლება, რომ ობიექტი გამოსახულებაზე არსებობს, ანუ ის

ნაპოვნი იქნა. რაც შეეხება ობიექტის მდებარეობას გამოსახულებაზე, ის განისაზღვრება აფინური გარდაქმნით გამოთვლილი პარამეტრების მეშვეობით.

ბაზური ლოკალური ნიშან-თვისებების მეთოდის საილუსტრაციოდ განვიხილოთ გამოსახულებაზე ორი, E და F მოდელის შესაბამისი ობიექტების მოძიების მაგალითი (სურ. 1.13).



სურ. 1.13

გამოსახულებაზე გამოყოფილ მახასიათებელ ნიშან-თვისებებს წარმოადგენენ მასზე არსებული მრგვალი ხვრელები და მახვილი კუთხეები. გამოსახულებაზე მოდელების შესაბამისი ობიექტების მოძიებისთვის შემოთავაზებული იქნა ჰიპოთეზა F მოდელის F_1 ლოკალური ნიშან-თვისების და გამოსახულების G_1 ნიშან-თვისების შესაბამისობის შესახებ. ამისათვის მოდელ-

ის F_1 ნიშან-თვისების სიახლოვეს არსებული F_2 , F_3 და F_4 ნიშან-თვისებებისთვის გამოსახულებაზე ნაპოვნი იქნა G_1 ნიშან-თვისებასთან ახლომდებარე შესაბამისი G_2 , G_3 და G_4 ნიშან-თვისებები. გამოსახულებაზე F მოდელის შესაბამისი ობიექტის არსებობა კი დადასტურებული იქნა ვერიფიკაციის გამოყენებით.

მეორე, E მოდელის შემთხვევაში შემოთავაზებული იქნა ჰიპოთეზა, ერთი მხრივ, E_1 ლოკალურ ნიშან-თვისებასა და მის სიახლოვეს განლაგებულ E_2 , E_3 და E_4 ნიშან-თვისებებს და, მეორე მხრივ, გამოსახულების G_5 , G_6 , G_7 და G_8 ნიშან-თვისებებს შორის შესაბამისობის შესახებ. მაგრამ ეს ჰიპოთეზა უარყოფილი იქნა იმის გამო, რომ ვერიფიკაციის პროცესში ვერ მოხერხდა E მოდელის საზღვრის და გამოსახულებაზე არსებული მონაკვეთების ერთმანეთთან საკმარისად კარგი შეთავსება. ამის მიზეზია ის, რომ გამოსახულებაზე F მოდელის შესაბამისი ობიექტი ნაწილობრივ ფარავს E მოდელის შესაბამის ობიექტს.

კლასტერიზაცია მდებარეობის მიხედვით. როგორც აღვნიშნეთ, მოდელისა და გამოსახულების ნიშან-თვისებათა თანხვედრა შეიძლება განხორციელდეს გადატანის, მობრუნებისა და მასშტაბირების (გმმ) აფინური გარდაქმნის ერთობლივი გამოყენებით, რომლის პარამეტრების განსაზღვრისათვის საკმარისია ორი საკონტროლო წერტილის შეთავსება. კერძოდ, თუ გამოსახულების ორი ასეთი წერტილი შეუთავსდა მოდელის ორ შესაბამის წერტილს, მაშინ გარდაქმნის პარამეტრები გამოითვლება (1.2) განტოლების საშუალებით. მაგრამ საკონტროლო წერტილების ავტომატური განსაზღვრა არ არის მარტივი ამოცანა, რადგანაც შეიძლება ადგილი ჰქონდეს შეთავსების

არაცალსახა ვარიანტების არსებობას. ამისთვის იყენებენ მდებარეობის (პოზის) მიხედვით კლასტერიზაციის მეთოდს. აღნიშნული მეთოდის გამოყენებისას მოდელისა და გამოსახულების შეთავსებისთვის გმმ აფინური გარდაქმნები ხორციელდება საკონტროლო წერტილების ყველა შესაძლო წყვილისთვის. გარდაქმნების შედეგად მიღებული პარამეტრების სიმრავლის კლასტერიზაციით მიღებული კლასტერებიდან ხდება იმ კლასტერის გამოყოფა, რომელიც ყველაზე ახლოს მყოფი პარამეტრების მნიშვნელობებს შეიცავს. ასეთი კლასტერი მაშინ არსებობს, თუ მოდელსა და გამოსახულებას შორის შეთავსებული მახასიათებელი ნიშან-თვისებების წერტილების რაოდენობა ბევრია. ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ ნიშან-თვისებების წერტილების ყველა შესაძლო წყვილის დამუშავება გამოთვლების დიდ ფასთან არის დაკავშირებული.

ვთქვათ, გვაქვს რაღაც აფინური გარდაქმნა T , რომლითაც ხდება M მოდელის O ობიექტთან თანხვედრა I გამოსახულებაზე. მაშინ

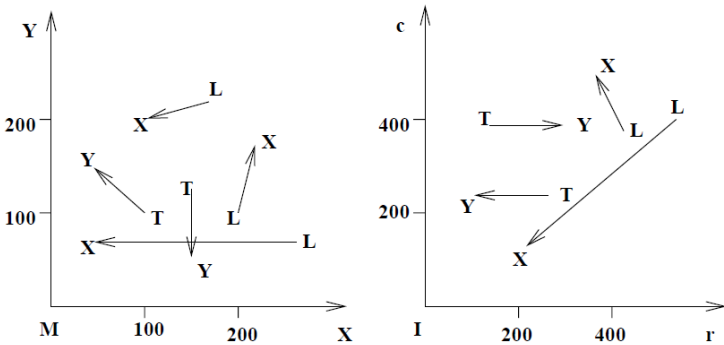
განსაზღვრება 1.7. T აფინური გარდაქმნის α პარამეტრებით განსაზღვრულ O ობიექტის ლოკალიზაციას და ორიენტაციას ამ ობიექტის მდებარეობა ანუ პოზა ეწოდება.

ჩვენ მიერ ზემოგანხილულ აეროფოტოსურათებისა და რუკების შეთავსების ამოცანაში ნიშან-თვისებების წერტილებად შეიძლება გამოვიყენოთ გამოსახულების სეგმენტაციის შედეგად გამოვლენილი მონაკვეთების, მაგალითად, გზების გადაკვეთის წერტილები, ან გამოყოფილი არეების კუთხეები, მაგალითად, მინდვრების. პრაქტიკაში შეთავსებისთვის ხშირად იყენებენ მონაკვეთების შეერთების სხვადასხვა ტიპს, მაგალითად, 'L', 'Y', 'T', 'ისარი', და 'X' (სურ. 1.14).



სურ. 1.14

განვიხილოთ სეგმენტების შეერთების სხვადასხვა ტიპის გამოყენება გამოსახულებისა და მოდელის შეთავსების ამოცანაში. ვთქვათ, რომ შეთავსებისთვის ვიყენებთ მონაკვეთების შეერთების მხოლოდ LX ან TY ტიპის წყვილებს (სურ. 1.15). მოცემულ მაგალითში მონაცემთა შეთავსებისათვის გვაქვს მოდელის წერტილების 5 წყვილი და გამოსახულების 4 წყვილი. მართალია, ამ მონაცემებს შორის ყველა შესაძლო წყვილების რაოდენობა $5 \times 4 = 20$ -ის ტოლია, მაგრამ მათგან მხოლოდ 10 წყვილი შეესაბამება ჩვენ მიერ არჩეული მონაკვეთების შეერთების ტიპებს გამოსახულების და მოდელის შეთავსების ამოცანაში. თუ თითოეული ამ წყვილისთვის გამოვითვლით აფინური გარდაქმნის პარამეტრების მნიშვნელობებს (ცხ. 1.3), ვნახავთ, რომ ისინი საკმაოდ განსხვავდება ერთმანეთისგან და პარამეტრების სივრცეში არ ქმნის კლასტერებს გარდა სამი წყვილისა, რომლებიც ცხრილის ბოლო სვეტში აღნიშნულია “*” სიმბოლოთი.



სურ. 1.15

ცხ. 1.3

მოდელის წერტილების წყვილები	გამოსახულების წერტილების წყვილები	θ	s	u_0	v_0	
L(170,220),X(100,200)	L(545,400),X(200,120)	0.403	6.1	118	-1240	
L(170,220),X(100,200)	L(420,370),X(360,500)	5.14	2.05	-97	514	
T(100,100),Y(40,150)	T(260,240),Y(100,245)	0.663	2.05	225	-48	*
T(100,100),Y(40,150)	T(140,380),Y(300,380)	3.87	2.05	166	669	
L(200,100),X(220,170)	L(545,400),X(200,120)	2.53	6.1	1895	200	
L(200,100),X(220,170)	L(420,370),X(360,500)	0.711	1.97	250	-36	*
L(260,70),X(40,70)	L(545,400),X(200,120)	0.682	2.02	226	-41	*
L(260,70),X(40,70)	L(420,370),X(360,500)	5.14	0.651	308	505	
T(150,125),Y(150,50)	T(260,240),Y(100,245)	4.68	2.13	3	568	
T(150,125),Y(150,50)	T(140,380),Y(300,380)	1.57	2.13	407	60	

გამოთვლილი პარამეტრების ეს სამი სიმრავლე ქმნის კლასტერს, რომელშიც მათი საშუალო მნიშვნელობები ტოლია:

$$\theta = 0,68, s = 2,01, u_0 = 233, v_0 = -41.$$

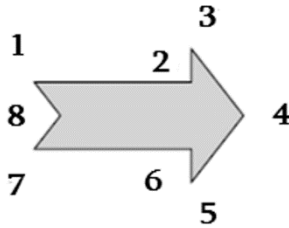
ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ რაც უფრო ზუსტად მოხდება მოდელისა და გამოსახულების მახასიათებელი ნიშან-თვისებების წერტილების ერთმანეთთან შეთავსება, მით უფრო ახლოს იქნება ერთმანეთთან აფინური გარდაქმნის პარამეტრების მნიშვნელობებიც. შეთავსების პროცესში წარმოშობილი ცდომილებები ძირითადადში გამოწვეულია ნიშან-თვისებების წერტილების მდებარეობის განსაზღვრის უზუსტობით და გამოსახულების ფორმირებისას წარმოშობილი არაწრფივი დამახინჯებებით. თუ აფინური გარდაქმნის პარამეტრები გამოითვლება საკმარისი სიზუსტით, მაშინ ისინი შეიძლება გამოყენებული იქნეს შეთავსებული წერტილების ვერიფიკაციისთვის. ასეთი წერტილები კი შემდეგ უკვე შეიძლება გამოვიყენოთ როგორც საკონტროლო წერტილები ისეთი არაწრფივი ან აფინური გარდაქმნისთვის (პარამეტრების უფრო დიდი რაოდენობით, ვიდრე

გამ გარდაქმნისას), რომელიც საკონტროლო წერტილების უფრო მაღალი სიზუსტით შეთავსებას უზრუნველყოფს.

გეომეტრიული ჰეშირება. ჩვენ მიერ განხილული ბაზური ლოკალური ნიშან-თვისებებისა და მდებარეობის მიხედვით კლასტერიზაციის მეთოდები გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როცა გამოსახულებას უნდა შეუთავსდეს ერთი მოდელი. რამდენიმე ობიექტის მოდელის შემთხვევაში კი შეთავსება უნდა განხორციელდეს რიგრიგობით, რისთვისაც ზემოაღწერილი მეთოდები არ გამოდგება. მოდელების დიდი მონაცემთა ბაზის შემთხვევაში შეთავსების ამოცანის გადასაწყვეტად გამოიყენება **გეომეტრიული ჰეშირების** მეთოდი, რომელიც მოითხოვს წინასწარი დამუშავების დიდი რაოდენობის ოპერაციების ჩატარებას და დიდ მეხსიერებას, თუმცა საბოლოოდ უზრუნველყოფს სწრაფ ამოცნობას და ობიექტის მდებარეობის პარამეტრების განსაზღვრას.

ვთქვათ, რომ გვაქვს მოდელების დიდი მონაცემთა ბაზა და უცნობი ობიექტი, რომლის მახასიათებელი ნიშან-თვისებები გამოსახულებაზე გამოყოფილია და მოთხოვნაა, რომ მისი მოძიება გამოსახულებაზე მოხდეს მოდელებიდან ერთ-ერთის აფინური გარდაქმნის შედეგად. ამგვარად, ამოცანა იმაში მდგომარეობს, რომ განისაზღვროს თუ რომელია ეს მოდელი და რა გარდაქმნა უნდა გამოვიყენოთ მოდელისა და გამოსახულებაზე არსებული უცნობი ობიექტის შეთავსებისთვის.

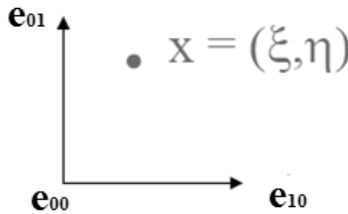
დავუშვათ, \mathbf{M} მოდელი მოცემულია p_i , $i = \overline{1,8}$ მახასიათებელი წერტილების მოწესრიგებული სიმრავლის სახით (სურ. 1.16), ანუ $\mathbf{M} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8\}$.



სურ. 1.16

ამ მოდელის ნებისმიერი სამი არაკოლინეარული წერტილის $E = \{e_{00}, e_{01}, e_{10}\}$ ქვესიმრავლე შეიძლება გამოყენებული იქნეს აფინური გარდაქმნის ბაზისის ფორმირებისთვის, რომლითაც კოორდინატთა სისტემა მოიცემა M მოდელზე (სურ. 1.18,ა). შესაბამისად, კოორდინატთა ამ სისტემაში ნებისმიერი $x \in M$ წერტილი შეიძლება წარმოვადგინოთ აფინური (ξ, η) კოორდინატებით (სურ. 1.17), სადაც

$$x = \xi(e_{10} - e_{00}) + \eta(e_{01} - e_{00}) + e_{00}.$$

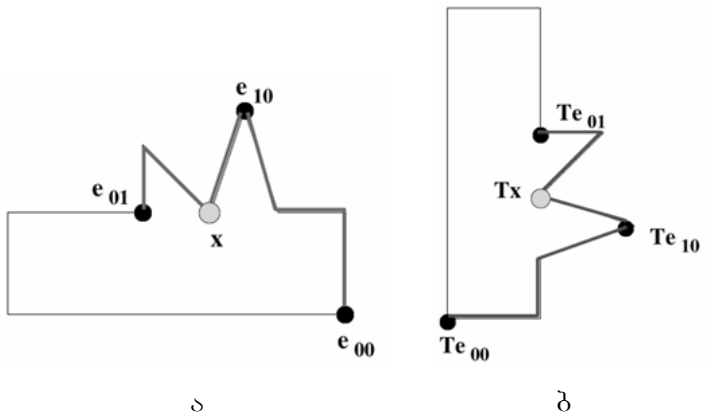


სურ. 1.17

თუ ახლა x წერტილის მიმართ გამოვიყენებთ T აფინურ გარდაქმნას, მივიღებთ:

$$Tx = \xi(Te_{10} - Te_{00}) + \eta(Te_{01} - Te_{00}) + Te_{00}.$$

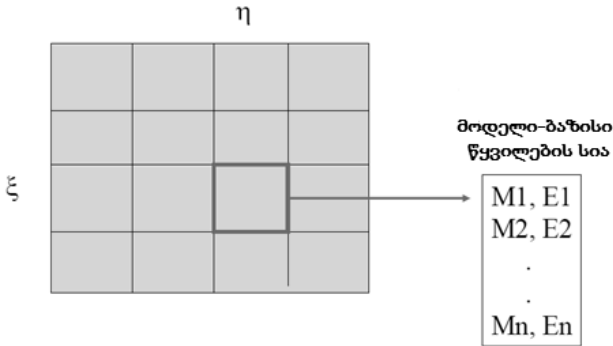
როგორც ვხედავთ, T აფინური გარდაქმნის შედეგად მიღებულ Tx წერტილს $(Te_{00}, Te_{01}, Te_{10})$ ბაზისის მიმართ აქვს იგივე (ξ, η) აფინური კოორდინატები, რაც x წერტილს ჰქონდა T გარდაქმნამდე (e_{00}, e_{01}, e_{10}) ბაზისის მიმართ. T აფინური გარდაქმნის შედეგად მიღებული ობიექტი წარმოდგენილია 1.18,ბ სურათზე.



სურ. 1.18

წინასწარი დამუშავების ეტაპზე ხდება ჰემ-ცხრილის ფორმირება, რომელიც მონაცემთა ბაზაში არსებულ ყველა მოდელს შეიცავს. ჰემ-ცხრილი ისეთნაირად იგება, რომ თითოეული მისი ელემენტის ინდექსს წარმოადგენს აფინური (ξ, η) კოორდინატების წყვილი. ამ ელემენტში ინახება (M, E) მოდელი-ბაზისი წყვილების სია (სურ. 1.19). ეს წყვილები წარმოადგენენ ისეთ M მოდელებს, რომლებშიც რომელიმე $x \in M$ წერტილის აფინური კოორდინატები E ბაზისის მიმართ (ξ, η) -ს ტოლია.

ჰეშ-ცხრილის ფორმირებისთვის არსებობს სპეციალური ალგორითმი.



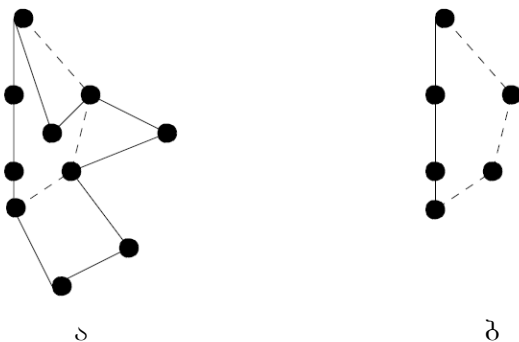
სურ. 1.19

ასეთი წესით აგებული ჰეშ-ცხრილი შემდეგში უკვე გამოიყენება ობიექტების ამოცნობისთვის. ასევე ამოცნობის პროცესში გამოიყენება აკუმულატორული A მასივი, რომლის ინდექსებს წარმოადგენს მოდელი-ბაზისი წყვილები. თითოეული (M, E) წყვილის მასივის ელემენტების ინიციალიზაცია ხდება ნულოვანი მნიშვნელობებით და გამოიყენება ხმის მიცემის პროცედურაში იმ ჰიპოთეზის მხარდასაჭერად, რომლის თანახმადაც არსებობს ისეთი T გარდაქმნა, რომელიც (M, E) წყვილს ასახავს გამოსახულებაზე. ხმის მიცემის შემდეგ პარამეტრები გამოითვლება მხოლოდ იმ მოდელი-ბაზისი წყვილებისთვის, რომლებმაც ხმების დიდი რაოდენობა დააგროვეს. ასეთი წყვილები ასევე გამოიყენება როგორც ერთ-ერთი ეტაპი ვერიფიკაციის პროცედურაში.

ამავე დროს უნდა აღინიშნოს, რომ გეომეტრიული ჰეშირების ალგორითმის მუშაობისას დამუშავების სხვადასხვა ეტაპზე შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ცდომილებებს, გამოწვეულს შემდეგი მიზეზებით:

- ცდომილებები ნიშან-თვისებათა წერტილების კოორდინატების განსაზღვრისას;
- გამოტოვებული ან ზედმეტი ნიშან-თვისებათა წერტილები;
- ობიექტების ურთიერთგადაფარვა;
- არამდგრადი ბაზისები;
- ნიშან-თვისებების წერტილების სიმრავლეზე მცდარი აფინური გარდაქმნების შესრულება.

კერძოდ, ჰეშირების ალგორითმმა შეიძლება მოახდინოს მცდარი გარდაქმნები ისეთ წერტილთა ქვესიმრავლეზეც კი, რომლებმაც ვერიფიკაცია გაიარა, მაგრამ არასწორ შედეგს იძლევა. 1.20 სურათზე ნაჩვენებია შემთხვევა, როცა ალგორითმმა არასწორად განსაზღვრა მოცემული მოდელის არსებობა გამოსახულებაზე. წარმოდგენილ მაგალითში გამოსახულების ნიშან-თვისებათა წერტილების 60%-მა (სურ. 1.20,ა) დაადასტურა ჰიპოთეზა გამოსახულებაზე იმ ობიექტის (სურ. 1.20,ბ) არსებობის შესახებ, რომელიც სინამდვილეში გამოსახულებაზე (სურ. 1.20,ა) არ არსებობს.



სურ. 1.20

მსგავსი ტიპის ცდომილებები დამახასიათებელია ასევე მდებარეობის მიხედვით კლასტერიზაციისა და ბაზური ლოკალური ნიშან-თვისებების მეთოდებისთვისაც.

1.8. 2D ობიექტების ამოცნობა რელაციური მოდელების გამოყენებით

ზემოთ ჩვენ მიერ განხილული იყო გამოსახულებისა და მოდელის წერტილების შეთავსების სამი მიდგომა, მაგრამ აღნიშნული მიდგომები შეიძლება გამოყენებული იყოს 2D გამოსახულებაზე ობიექტების ამოცნობისთვისაც. განიხილავენ ობიექტების ამოცნობის სამ ზოგად მიდგომას, რომელშიც ამოცნობის ამოცანა წარმოდგენილია როგორც მოდელის სტრუქტურული კომპონენტების ასახვა გამოსახულების სტრუქტურულ კომპონენტებზე. კერძოდ, იმ შემთხვევაში, თუ გამოსახულებაზე ნიშან-თვისებების მარკირების ხერხი შეთანხმებულია მოდელის ნიშან-თვისებების მარკირების ხერხთან, მაშინ ამოცნობის პროცესი ეკვივალენტურია მოდელის საკმარისი რაოდენობის ნიშან-თვისებების ასახვისა გამოსახულების დაკვირვებულ ნიშან-თვისებებზე. გამოსახულებაზე ობიექტების ამოცნობის ზემოაღნიშნული სამი მიდგომის არსებობა სწორედ ასახვის განსხვავებული ხერხითაა განპირობებული. ჩვენ განვიხილავთ ობიექტების ამოცნობის ინტერპრეტაციის ხეზე დამყარებულ მიდგომას.

გამოსახულებისა და მოდელის შეთავსების მეთოდების განხილვისთვის საჭიროა შემოვიტანოთ შემდეგი ოთხი მნიშვნელოვანი ცნება:

- **ნაწილი (part)** – სცენის გამოსახულებაზე არსებული ობიექტი ან რომელიმე სტრუქტურული ელემენტი, მაგალითად, გამოსახულების სეგმენტაციის შედეგად გამოყოფილი არ-

ის სეგმენტი, კიდის (საზღვრის) სეგმენტი, ნახვრეტი, კუთხე ან ლაქა;

- **ჭდე (label)** – დამუშავების რაღაც ეტაპზე ობიექტის ნაწილისთვის რაიმე სიმბოლოს მიკუთვნება მისი იდენტიფიკაციის/ამოცნობის მიზნით;
- **მიკუთვნება (assignment)** – ობიექტის ნაწილების ჭდეებზე ასახვა. თუ, მაგალითად, რუკის გამოსახულებაზე P_1 -ით აღნიშნულია რომელიმე არის სეგმენტი, ხოლო L_1 და L_2 ტბისა და მინდვრისთვის მიკუთვნებული სიმბოლოებია (ჭდეებია), მაშინ **მიკუთვნება** შეიძლება შეიცავდეს (P_1, L_2) წყვილს, ან შესაძლოა $(P_1, \{L_1, L_2\})$ დარჩენილი განუზღვრელობის (არაცხადობის) მისათითებლად. თუ გვაქვს (P_1, NIL) , მაშინ ეს იმას ნიშნავს, რომ რუკის გამოსახულებაზე P_1 ნაწილს ჭდეების მიმდინარე სიმრავლეზე ინტერპრეტაცია არ აქვს. შესაბამისად, **სცენის ინტერპრეტაცია** წარმოადგენს მიკუთვნების წარმომქმნელი ყველა წყვილის სიმრავლეს;
- **მიმართება (relation)** – წარმოადგენს აბსტრაქტულ მათემატიკურ ცნებას. მიმართებების მოძებნა და გამოთვლა ხდება სცენის ობიექტებს შორის და მათ ინახავენ ობიექტების მოდელისთვის. მაგალითად, ჩანაწერი $R4(P_1, P_2)$ ნიშნავს, რომ გამოსახულებაზე P_1 და P_2 გამოყოფილი არეები მომიჯნავეა.

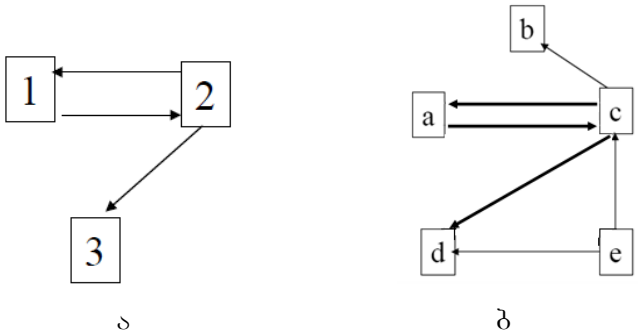
წარმოდგენილი ცნებები საშუალებას იძლევა განისაზღვროს **შეთანხმებული მარკირების (consistent labeling)** ცნება. ვთქვათ, მოცემულია სცენის გამოსახულების ნაწილების P სიმრავლე (მაგალითად, მონაკვეთების, ან რკალების სიმრავლე გამოსახულებაზე), ამ ნაწილების ჭდეების L სიმრავლე, R_p მი-

მართება P სიმრავლეზე და R_L მიმართება L სიმრავლეზე. მაშინ,

განსაზღვრება 1.8. შეთანხმებული მარკირება f ეწოდება გამოსახულების ნაწილებისთვის ისეთი ჭდეების მიკუთვნებას, რომელიც აკმაყოფილებს შემდეგ პირობას:

$$\text{თუ } (p_i, p_i') \in R_P, \text{ მაშინ } (f(p_i), f(p_i')) \in R_L,$$

რაც ნიშნავს, რომ შეთანხმებული მარკირებისას ის მიმართებები, რომელიც არსებობს ნაწილებს შორის, უნდა შენარჩუნდეს მათ ჭდეებს შორისაც. სხვა სიტყვებით, შეთანხმებული მარკირება წარმოადგენს P სიმრავლის L სიმრავლეზე ასახვას, რომელიც აკმაყოფილებს ზემოთ მოყვანილ პირობას. განვიხილოთ 1.21 სურათზე წარმოდგენილი მაგალითი, სადაც მოცემულია ა) სცენის გამოსახულების შემადგენელი ნაწილების სიმრავლე, ბ) ამ ნაწილებისთვის ჭდეების სიმრავლე და შესაბამისად მათ შორის ბინარული მიმართებები:



სურ. 1.21

ა) შემთხვევაში

$$P = \{1,2,3\} \text{ და } R_p = \{(1,2), (2,1), (2,3)\},$$

ბ) შემთხვევაში

$$L = \{a, b, c, d, e\} \text{ და} \\ R_L = \{(a, c), (c, a), (c, b), (c, d), (e, c), (e, d)\}.$$

მაშინ შეთანხმებული მარკირება იქნება:

$$\{(1, a), (2, c), (3, d)\}.$$

მეორე მაგალითად განვიხილოთ 1.10, ა სურათზე წარმოდგენილი ობიექტის ამოცნობის ამოცანა, რომლის ნიშან-თვისებებიც მოცემულია 1.1 ცხრილში. ობიექტების შეთავსებისთვის გამოვიყენოთ „მიმართება“ – მანძილი, რომელიც განსაზღვრულია წერტილების ნებისმიერი წყვილისთვის. კერძოდ, ნახვრეტების ნებისმიერ წყვილს შორის მიმართება განისაზღვრება მათ შორის მანძილით, რომელიც ინვარიანტულია გადაადგილების და მობრუნების, მაგრამ არა მასშტაბირების მიმართ. იმის საჩვენებლად, რომ მოდელის A და B და B და C წერტილებს შორის მანძილი 12-ის ტოლია, გამოვიყენოდ აღნიშვნები – $12(A, B)$ და $12(B, C)$. როგორც მანძილების ცხრილიდან ჩანს, მიმართება $12(C, D)$ არ არის სწორი. მაგრამ თუ გავითვალისწინებთ ცდომილებებს, გამოწვეულს მცირე დამახინჯებებით და ასევე წარმოშობილს ნიშან-თვისებათა გამოყოფისას, მიმართება $12(C, D)$ შეიძლება ჩაითვალოს ჭეშმარიტად მაშინაც კი, თუ

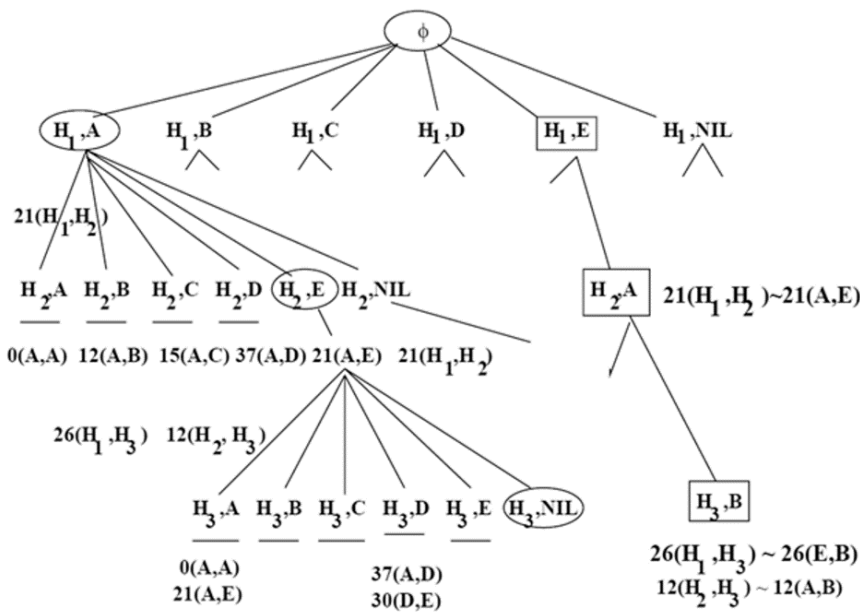
მანძილი C და D შორის რეალურად $12 \pm \Delta$ ტოლია, სადაც Δ რაღაც მცირე სიდიდეა.

ინტერპრეტაციის ხე (interpretation tree, IT). როგორც აღინიშნა, გამოსახულებაზე ობიექტის ამოცნობის ამოცანაში გამოსახულებისა და მოდელის შეთანადების ეტაპზე ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ნაბიჯს წარმოადგენს ობიექტის ნაწილებისთვის შესაბამისი ჭდეების მიკუთვნების პროცედურა. შეთანადების პროცესში შეთანხმებული მარკირების თანამიმდევრული წარმოდგენის ერთერთ ხერხად გამოიყენება **ინტერპრეტაციის ხე**.

განსაზღვრება 1.9. ხეს, რომელზეც წარმოდგენილია ობიექტის ნაწილებისთვის ჭდეების მიკუთვნების ყველა შესაძლო ვარიანტი, ინტერპრეტაციის ხე ეწოდება.

ინტერპრეტაციის ხეზე თითოეული შტო მთავრდება მაშინ, თუ ადგილი აქვს სრულ შეთანხმებულ მიკუთვნებას ან თუ შესაბამისი არასრული (ნაწილობრივი) მიკუთვნებისთვის არ სრულდება რომელიმე მიმართება. 1.22 სურათზე წარმოდგენილია 1.10, ა სურათზე მოცემული გამოსახულების მონაცემების ინტერპრეტაციის ხის ფრაგმენტი. მოცემული ხე 3 დონიანია, რომელთაგანაც თითოეული შეესაბამება გამოსახულებაზე არსებული 3 – H_1, H_2, H_3 ნახვრეტიდან ერთ-ერთისთვის ჭდის მიკუთვნების პროცესს. პირველ დონეზე იმის გამო, რომ მანძილის მიხედვით არ არის შეზღუდვა, შეუთანხმებლობებს ადგილი არ აქვს, მაგრამ მეორე დონეზე შესაძლო ჭდეების უმეტესობისთვის ხეზე მოძრაობის გზები მანძილის ერთი შემოწმების შემდეგ წყდება. მაგალითად, იმის გამო, რომ $21(H_1, H_2)$ მიმართება ირღვევა $O(A, A)$ მიმართებით, არასრული მიკუთვნება $\{(H_1, A), (H_2, A)\}$ შეუთანხმებელია. ინტერპრეტაციის ხეზე მარ-

თკუთხედებით აღნიშნული ჭდეების გზა შეესაბამება სრულ შეთანხმებულ მიკუთვნებას. შეთანხმებულია ასევე ელიფსებით აღნიშნული ჭდეების გზაც, მაგრამ იმის გამო, რომ იგი შეიცავს ერთ ცარიელ ჭდეს – NIL, შესაბამისად შემოწმებისთვის ნაკლები შეზღუდვები აქვს. ეს მიკუთვნება შეიცავს სრული მიკუთვნების (აღნიშნულია მართკუთხედებით) პირველ ორ წევრს გადასმული ჭდეებით და მანძილის ერთი შემოწმებას. უნ-



სურ. 1.22

და აღინიშნოს, რომ ბევრი შტო ინტერპრეტაციის ხეზე წარმატებულად მთავრდება (ადგილი აქვს სრულ შეთანხმებულ მიკუთვნებას) მიმართებათა სიმეტრიულობის გამო. მართალია ხე პოტენციურად შეიძლება შეიცავდეს მასზე გადასადგილებული გზების ექსპონენციალურ რაოდენობას, მაგრამ რეალურად

მათი უმეტესობა მთავრდება მესამე დონეზე შემზღუდავი მიმართებების არსებობის გამო. რაც შეეხება NIL ცარიელ ჭდეს, მისი გამოყენება საშუალებას გვაძლევს, მოვნიშნოთ არტეფაქტები ან სცენის სხვა ობიექტის ნიშან-თვისებები.

II თავი. 3D სცენების აღქმა 2D გამოსახულებებზე დაყრდნობით

2.1. შესავალი

რეალობაში ხშირად გვხვდება შემთხვევები, როცა ორგანზომილებიანი გამოსახულების სტრუქტურის ინტერპრეტაციისთვის საჭიროა გათვალისწინებული იქნას სამგანზომილებიანი სცენის ობიექტების სამივე განზომილება. მაგალითად, ადამიანს აქვს თვისება აღიქვას და გაანალიზოს 3D სცენის სტრუქტურა მხედველობითი ანალიზატორის ბადურაზე პროეცირებული 2D გამოსახულებაზე დაყრდნობით. ასეთ შემთხვევაში 3D ობიექტის ამოცნობის ამოცანა გაცილებით რთული ხდება. კერძოდ, სცენაზე განათებულობის ცვალებადობის (მაგალითად, ჩრდილების არსებობის გამო) და ობიექტის ზედაპირის სიკაშკაშის მის ორიენტაციაზე დამოკიდებულების გამო რთული ხდება ნიშან-თვისებების გამოყოფისა და სეგმენტაციის პროცედურების განხორციელება. ასევე, იმის გამო, რომ დაკვირვების წერტილის ცვლილებასთან ერთად იცვლება სცენის გამოსახულების თვისებები, ობიექტების ორიენტაცია, ადგილი აქვს ობიექტების ურთიერთგადაფარვას, რთული ხდება გამოსახულებაზე გაზომვების ჩატარება.

ისევე როგორც 2D შემთხვევაში, აქაც 3D ობიექტები განიხილება როგორც სივრცულად ურთიერთდაკავშირებული ნაწილების ერთობლიობა, რომელთა თვისებები და ურთიერთმიმართებები აკმაყოფილებენ მოცემულ შეზღუდვებს. შესაბამისად, მოცემული კლასის ობიექტის ამოცნობისთვის საჭიროა გამოსახულებაზე მოიძებნოს ისეთი ნაწილების ერთობლიობა, რომლებიც შეესაბამება გარკვეული დაკვირვების წერტილიდან

სცენაზე დანახული ობიექტის ნაწილებს (ზედაპირებს). გამოსახულებაზე ასეთი ნაწილების პოვნის ამოცანა გაადვილდება, თუ გამოსახულების თითოეული წერტილისთვის ცნობილია ზედაპირის მიმართ ნორმალის ორიენტაცია სცენის შესაბამის წერტილში (იგულისხმება, რომ ობიექტი გაუმჭვირვალეა და გამოსახულების თითოეული წერტილი შეესაბამება სცენის ერთადერთი ზედაპირის წერტილს). თუ ცნობილია ზედაპირის ორიენტაცია, მაშინ გამოსახულებაზე შესაძლებელია ერთნაირი ორიენტაციის მქონე არეების პოვნა, ანუ სეგმენტაციის პროცედურის ჩატარება და იმ არეების გამოყოფა, რომლებიც სცენაზე გლუვ ზედაპირებს შეესაბამება. თითოეული ასეთი არე კი ობიექტის გარკვეულ ნაწილს წარმოადგენს.

3D სცენების ანალიზისათვის საჭიროა განხილულ იქნეს ის სამგანზომილებიანი თანაფარდობები, რომლებიც არსებობს კამერას, სცენის ობიექტებსა და თვით ობიექტებს შორის. ამ უკანასკნელს გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება ისეთი ამოცანების გადაწყვეტისას, როგორცაა, მაგალითად, ობიექტის მდებარეობისა და ორიენტაციის განსაზღვრა კამერის (დაკვირვების წერტილის) მიმართ, ისეთი გამოსახულებების დამუშავება, რომლებზედაც ობიექტები ერთმანეთს მთლიანად ან ნაწილობრივ ფარავენ, ან ობიექტის მხოლოდ ერთი მხარე ჩანს. ასეთი ამოცანების გადაწყვეტისას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება 3D სცენების 2D გამოსახულებების ფორმირების მათემატიკურ მოდელებს და მათ საფუძველზე განსაზღვრულ სამგანზომილებიან თანაფარდობებს. არსებობს გამოსახულებების ფორმირების სხვადასხვა მეთოდი, რომლებიც მიმართულია 3D ობიექტის გამოსახულების სიბრტყეზე პროექცირებისას დაკარგული სიღრმის კოორდინატის აღდგენისაკენ. მათი საშუალებით ხდება სცენის ან სიღრმისეული ან მოცულობითი სურათის აღდგენა. შესაბამისად, **3D სცენის უწყვეტი გამოსახულ-**

ების ფორმირების მოდელები იყოფა ორ კატეგორიად: გამოსახულების სიღრმისეული ფორმირების და გამოსახულების მოცულობითი ფორმირების მოდელებად.

2.2. შინაგანი გამოსახულებები

3D სცენის 2D გამოსახულებების ფორმირებისას მნიშვნელოვანია, რომ შევინარჩუნოთ რაც შეიძლება მეტი ინფორმაცია სცენის სამგანზომილებიანი ბუნების შესახებ, რათა შემდგომ სცენის შესახებ ვიმსჯელოთ მის 2D გამოსახულებებზე დაყრდნობით. ამისთვის შემუშავებული იქნა 2 მიდგომა:

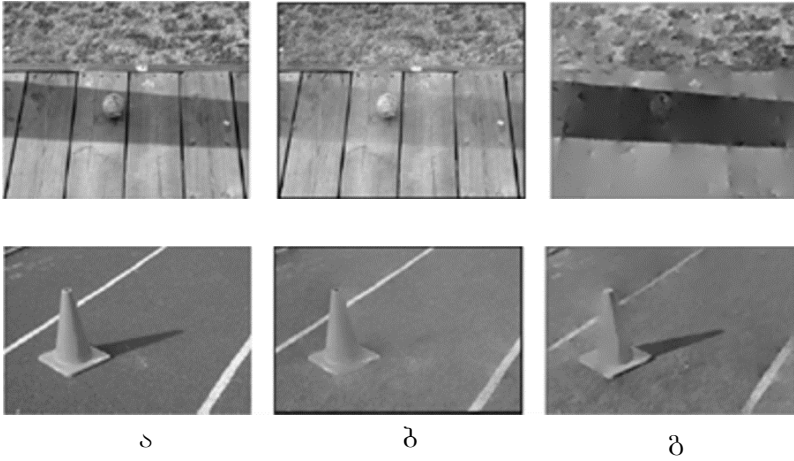
1. 3D სცენის წარმოდგენა ისეთი ერთი ან რამდენიმე 2D გამოსახულებით, რომლებშიც შენახული იქნება სცენისთვის დამახასიათებელი ნიშან-თვისებები;
2. 3D ობიექტის ფორმის განსაზღვრა რომელიმე ნიშან-თვისებაზე დაყრდნობით – სიღრმის შესახებ ინფორმაციის მიღება სხვადასხვა წყაროდან.

აქედან გამომდინარე, 3D სცენის ასეთი 2D გამოსახულებების მისაღებად შეიძლება გამოყენებული იქნეს გამოსახულების აღქმის ისეთი სხვადასხვა ტიპის საშუალებები, რომლებზე დაყრდნობითაც საწყისი გამოსახულებიდან მოხდება ე. წ. შინაგანი გამოსახულებების (intrinsic images) ფორმირება. ეს უკანასკნელი წარმოადგენს 3D სცენის ისეთ 2D შუალედურ წარმოდგენას, რომელშიც ინახება სცენის შინაგანი არსებითი ლოკალური მახასიათებლები. ფაქტობრივად, სცენის გამოსახულება იშლება ახალი გამოსახულებების სიმრავლედ, რომლებშიც ასახულია საწყისი გამოსახულების შინაგანი ბუნების სხვადასხ-

ვა ასპექტი. ამ სიმრავლის თითოეული შინაგანი გამოსახულების ყოველ პიქსელში შეიძლება ინახებოდეს ამ პიქსელის შესაბამისი სცენის ობიექტის ზედაპირული ელემენტის შემდეგი ოთხი შინაგანი მახასიათებლიდან ერთ-ერთი:

- **სიღრმე (დაშორება)** – მანძილი გამოსახულების პიქსელიდან სცენის შესაბამის ზედაპირულ ელემენტამდე;
- **ნორმალი** – სცენის ზედაპირული ელემენტის ნორმალის მიმართულება ანუ ორიენტაცია;
- **განათებულობა** – სცენის ზედაპირული ელემენტის განათებულობა;
- **ალბედო** (ობიექტის ზედაპირიდან არეკლილი სინათლის სხივის ნაკადის ფარდობა დაცემული სხივის ნაკადთან) ან სცენის ზედაპირული ელემენტის სხვა რომელიმე **არეკელის მახასიათებელი**.

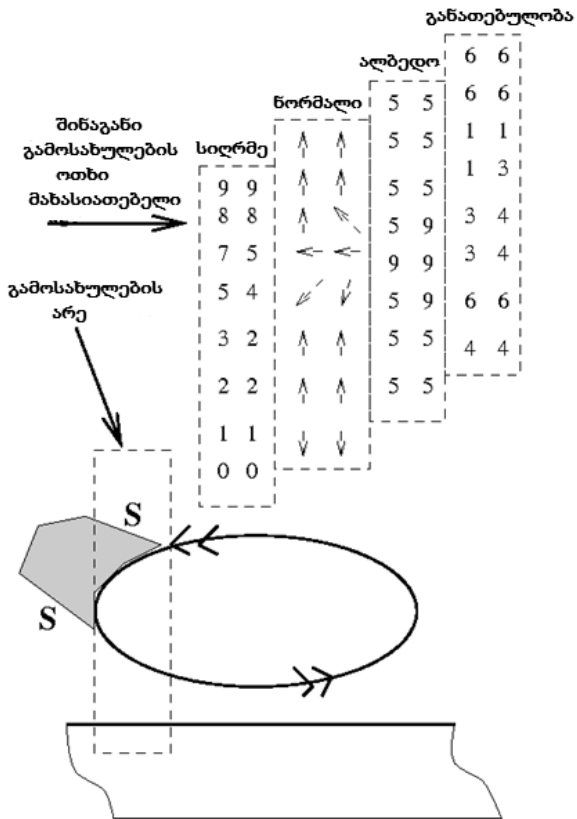
ამასთან, 3D სცენის რაც შეიძლება ზუსტი აღქმისთვის შინაგანი გამოსახულებები დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან უნდა იყოს მიღებული. ადამიანები ადვილად ახდენენ ზემოაღნიშნული მახასიათებლების შეფასებას, თუმცა შინაგანი გამოსახულებების ავტომატური აგება ჯერ კიდევ კვლევის საგანს წარმოადგენს. 2.1 სურათზე მოცემულია 2 მარტივი სცენის გამოსახულების შესაბამისი შინაგანი გამოსახულებები, სადაც ა) სცენის გამოსახულებაა, ბ) არეკელის გამოსახულება და გ) განათებულობის გამოსახულება.



სურ. 2.1

შინაგანი გამოსახულების მეორე მაგალითად განვიხილოთ 2.2 სურათზე წარმოდგენილი სცენის გამოსახულების ფრაგმენტი, რომელიც მოიცავს კვერცხის კიდის ვიწრო ზოლს. ამ ფრაგმენტის ყოველი პიქსელი შეიცავს შიგა გამოსახულების ოთხი შინაგანი მახასიათებლის შესახებ ინფორმაციას. კერძოდ, მნიშვნელობებს ზედაპირის სიღრმის, მისი ორიენტაციის, განათებულობის და ალბედოს შესახებ (სურ. 2.2). სურათიდან ჩანს, რომ მაგიდაზე განივი მიმართულებით მოძრაობისას სიღრმის სიდიდის ცვლილება ხდება თანდათანობით, ხოლო მაგიდის კიდისკენ კი – უფრო სწრაფად. სიღრმის წყვეტას ადგილი აქვს იქ, სადაც კვერცხის ზედაპირი მაგიდას ფარავს. მაგიდის ზედაპირის ორიენტაცია (ზედაპირის ნორმალის მიმართულება) ერთნაირია მის ყველა წერტილში, გარდა კიდისა, სადაც ის მკვეთრად იცვლება. რაც შეეხება კვერცხის ზედაპირის ორიენტაციას, ის მდორედ იცვლება წერტილიდან წერტილამდე. ალბედოს მნიშვნელობები გვიჩვენებს, რომ მაგიდა უფრო მუქი (სიკაშკაშის მნიშვნელობა ტოლია 5-ის) მასალისგანაა დამზა-

დებული, ვიდრე კვერცი (სიკაშკაშის მნიშვნელობა ტოლია 9-ის). ჩრდილში მყოფი მაგიდის შესაბამისი პიქსელები უფრო ნაკლებადაა განათებული (სიკაშკაშის მნიშვნელობა უდრის 1),



სურ. 2.2

ვიდრე ჩრდილის გარეთ არსებული მაგიდის შესაბამისი პიქსელები. რაც შეეხება კვერცხის ზედაპირის იმ პიქსელებს, რომლებიც შეესაბამება განათების მიმართულებასთან მცირე კუთხით განლაგებულ ზედაპირულ ელემენტებს, ისინი უფრო

მუქად ჩანან (სიკაშკაშის მნიშვნელობა უდრის 3), ვიდრე უშუალოდ სინათლის წყაროს წინ არსებული ზედაპირული ელემენტების შესაბამისი პიქსელები:

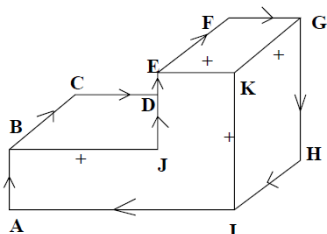
2.3. ბრტყელწახნაგიანი ობიექტების კონტურული გამოსახულებების მარკირება

დავუშვათ, რომ გვაქვს სამგანზომილებიანი ბრტყელწახნაგიანი ობიექტის ორგანზომილებიანი გამოსახულება. ასეთ გამოსახულებაზე კიდევების გამოყოფის ოპერატორის მოქმედებისა და ბინარიზაციის შედეგად მიიღება ობიექტის კონტურული ნახაზი – ესკიზი. ობიექტების ამ სახით წარმოდგენა მნიშვნელოვნად ამარტივებს გამოსახულების ანალიზის ამოცანას. მაგალითად, ადვილად შეიძლება ობიექტის წარმოდგენა და აღწერამისი წვეროების კოორდინატების, მათ შორის კავშირების არსებობის, მომიჯნავე წახნაგების მითითებით, და ა. შ. მაგრამ არსებობს შებრუნებული ამოცანაც – როგორ მოვახდინოთ კონტურული სურათიდან 3D ობიექტის რეკონსტრუქცია. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ – კონტურული ნახაზის როგორი „ინტერპრეტაცია“ უნდა მოახდინოს კომპიუტერმა, რომ აღდგეს 3D ობიექტის ფორმა.

ბრტყელი წახნაგების ორიენტაცია ერთნაირია მთელი ზედაპირის გასწვრივ. თეორიულად დაშვებულია, რომ გამოსახულებაზე ასეთ წახნაგებს სიკაშკაშის ერთნაირი მნიშვნელობის მქონე არეები შეესაბამება. წიბოები კი იმ ადგილებს, სადაც იცვლება ზედაპირის ორიენტაცია და შესაბამისად სიკაშკაშის მნიშვნელობა. ამგვარად, გამოსახულება შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც მრავალკუთხედის ფორმის და ერთმანეთისგან განსხვავებული სიკაშკაშის მნიშვნელობის მქონე არეებისგან

შედგენილი ქსოვილის ნაჭერი. თუმცა რეალურად, პრაქტიკაში, წახნაგების შესაბამის არეებს გამოსახულებაზე სიკაშკაშის ერთნაირი მნიშვნელობები არ აქვს და მომიჯნავე წახნაგების საზღვარი ხმაურის გამო გადარეცხილია და ამიტომ მკაფიოდ არ ჩანს.

ვთქვათ, რომ მოცემული გვაქვს 3D ობიექტი, რომლის სტრუქტურა მკაცრად არის განსაზღვრული. კერძოდ, ობიექტის კუთხეები სამწახნაგია, რომლებიც ბრტყელ ზედაპირებს წარმოადგენენ და ყველა კუთხე სამი ბრტყელი წახნაგის გადაკვეთითაა მიღებული. ასეთი ობიექტი მოცემულია 2.3 სურათზე.

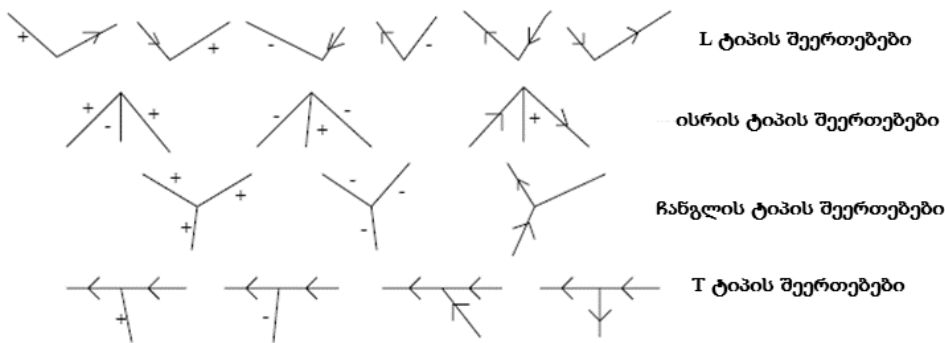


სურ. 2.3

მისი 3D სტრუქტურული კომპონენტების აღწერისთვის გამოვიყენოთ ტერმინები: წახნაგები, ნაკეცები (ზედაპირის ორიენტაციის მკვეთრი ცვლილების ადგილი, ან ორი სხვადასხვა ზედაპირის შეერთების არე) და კუთხეები, ხოლო მათი გამოსახულებებისთვის 2D გამოსახულებაზე კი ტერმინები: არეები, წიბოები და შეერთებები. დავუშვათ, რომ გვაქვს 3D ობიექტის 2D კონტურული გამოსახულება, რომელიც შედგება არეებისა, წიბოებისა და შეერთებებისაგან; ასევე ის, რომ დაკვირვების წერტილის მცირე ცვლილებისას გამოსახულებაზე კონტურული ნახაზის ტოპოლოგიური თვისებები პრაქტიკულად არ იცვლება. ეს უკანასკნელი ნიშნავს, რომ გამოსახულებაზე ახალი წა-

ხნაგები, წიბოები ან შეერთებები არც ქრება, და არც წარმოიშობა. ასეთ შემთხვევაში ამბობენ, რომ ობიექტი იმყოფება ე. წ. „სტანდარტულ მდგომარეობაში“.

3D ბრტყელწახნაგიანი ობიექტის რეკონსტრუქციისთვის მისი კონტურული ნახაზის სახით წარმოდგენის შემთხვევაში, საჭიროა კომპიუტერმა მოახდინოს ობიექტის სტრუქტურული კომპონენტების გამოსახულებების – არეების, წიბოების და შეერთებების ინტერპრეტაცია. ამისთვის კონტურულ ნახაზზე ხდება მათი შესაბამისი ჭდეებით მარკირება, რისთვისაც იყენებენ სპეციალურ აღგორითმებს. მარკირებული კონტურული ნახაზი კომპიუტერს აძლევს საშუალებას დაადგინოს შესაბამისობა 3D ობიექტის სტრუქტურულ კომპონენტებსა და მათ შესაბამის გამოსახულებებს შორის 2D კონტურულ გამოსახულებაზე როგორც ობიექტის ფორმის რეკონსტრუქციის, ასევე მისი ამოცნობის მიზნით. აღმოჩნდა, რომ ბრტყელწახნაგიანი ობიექტების, რომელთა ყველა კუთხე 3 წახნაგის გადაკვეთითაა ფორმირებული, გამოსახულებებზე შეერთებების წარმომქმნელი წიბოების ყველა შესაძლო კონფიგურაციის რაოდენობა შეზღუდულია. კერძოდ, ის 16-ის ტოლია. ისინი წარმოდგენილია 2.4 სურათზე.



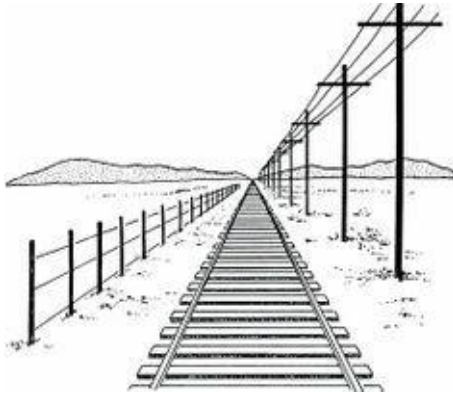
სურ. 2.4

როგორც ვხედავთ, ერთმანეთთან შეერთებული წიბოების რაოდენობიდან და მათ შორის კუთხეების სიდიდიდან გამომდინარე, განასხვავებენ შეერთებების 4 ტიპს. ესენია: *L ტიპის შეერთებები*, *ისრის ტიპის შეერთებები*, *ჩანვლის ტიპის შეერთებები* და *T ტიპის შეერთებები*.

2.4. 2D გამოსახულებებზე ასახული 3D სცენის ნიშან-თვისებები

ადამიანს 3D სცენის 2D გამოსახულებებზე დაკვირვებისას შეუძლია აღმოაჩინოს ისეთი ნიშან-თვისებები, რომელიც მას 3D სივრცის აღქმის შესაძლებლობას მისცემს. ასეთი ნიშან-თვისებების რაოდენობა საკმაოდ ბევრია. მაგალითად, როცა სცენის გამოსახულებაზე ერთი ობიექტი ფარავს მეორე ობიექტს, ხოლო ეს უკანასკნელი კი სხვა ობიექტს, ეს ნიშნავს, რომ აღნიშნული ობიექტები სცენაზე სხვადასხვა სიღრმეზეა განლაგებული; თუ ობიექტის ერთი მხარე უფრო განათებულია, ვიდრე მისი საპირისპირო, ასევე ობიექტის ჩრდილის სიდიდე და მდებარეობა გამოსახულებაზე საშუალებას იძლევა განისაზღვროს სცენის განათების წყაროს დაშორება და მდებარეობა მოცემული ობიექტის მიმართ; თუ გამოსახულებაზე გვაქვს, მაგალითად, რკინიგზის ლიანდაგის შპალებით შექმნილი ტექსტურული არე, მაშინ მისი პერიოდის თანდათანობით შემცირება მიუთითებს დამკვირვებლისგან სიღრმის მიმართულებით ამ არის თანდათანობით დაშორებას. ხოლო თუ ასეთი არე შეესაბამება ღობეს, რომელიც კონუსურად ვიწროვდება, ვთქვათ, მარცხნიდან-მარჯვნივ მიმართულებით, მაშინ ეს იმას მიუთითებს, რომ დამკვირვებლის მიმართ ღობის სივრცითი დაშორება დამკვირვებლიდან მარჯვენა მიმართულებით მოძრაობისას იზრდება.

3D სივრცის აღქმის ასეთი მაგალითები წარმოდგენილია 2.5 სურათზე.



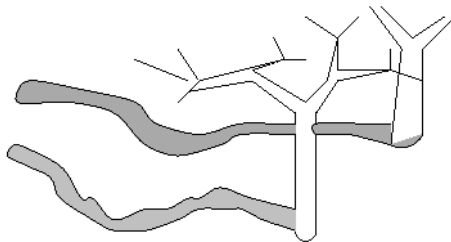
სურ. 2.5

აღნიშნული მაგალითები სივრცის მახასიათებელი ნიშან-თვისების სხვადასხვა გამოვლინებებს წარმოადგენენ. შესაბამისად ასეთ ნიშან-თვისებად შესაძლებელია შემოვიტანოთ:

განსაზღვრება 2.1. შუალედური მდებარეობა (interposition) წარმოადგენს სივრცის (დაშორების) მახასიათებელ ნიშან-თვისებას და გვხვდება მაშინ, როცა დამკვირვებელს სცენის გამოსახულებაზე ერთი ობიექტი უფარავს მეორე ობიექტს. ეს ნიშან-თვისება მიუთითებს, რომ დამფარავი ობიექტი უფრო ახლოსაა დამკვირვებელთან, ვიდრე დაფარული.

ამგვარად, ურთიერთგანლაგების გამოყენებით მნიშვნელოვნად შეიძლება გაადვილდეს სცენის გამოსახულებაზე არსებული ობიექტების ერთმანეთის მიმართ **სივრცითი განლაგების**, ანუ **ფარდობითი სიღრმის განსაზღვრა** და შესაბამისად გამო-

სახელების ინტერპრეტაცია. ამავე დროს, დამკვირვებლისგან რაც უფრო სიღრმეშია განლაგებული ობიექტი სცენის გამოსახულებაზე, მით უფრო მცირეა მისი ზომები (სურ. 2.6).



სურ. 2.6

შესაბამისად, განიხილავენ სიღრმის მახასიათებელ კიდევ ერთ ნიშან-თვისებას:

განსაზღვრება 2.2. *პერსპექტიული მასშტაბირების (perspective scaling) ნიშან-თვისება მიუთითებს, რომ სცენის გამოსახულებაზე ობიექტამდე მანძილი მისი განზომილების უკუპროპორციულია.*

აქ ტერმინი „მასშტაბირება“ გამოყენებულია იმ ობიექტების განზომილებების შესადარებლად, რომლებიც გამოსახულების სიბრტყის პარალელურ სიბრტყეში მდებარეობენ. როგორც ვხედავთ, ობიექტის განზომილება გამოსახულებაზე შეიძლება გამოყენებულ იქნეს 3D სცენაზე მისი მდებარეობის სიღრმის გამოსათვლელად.

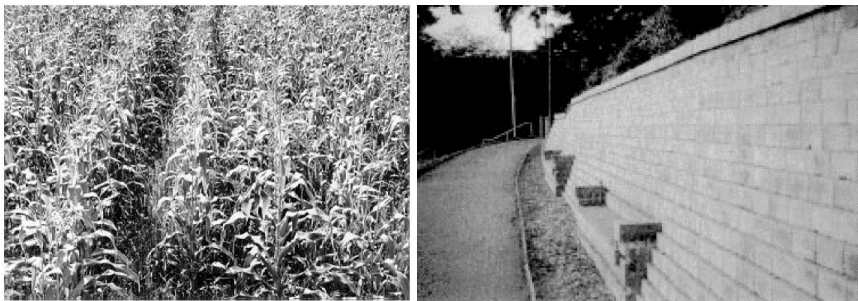
სცენის გამოსახულებაზე დაკვირვებისას აღმოვაჩინოთ, რომ ობიექტების განზომილება იცვლება იმის მიხედვით, ეს ობიექტი გამოსახულების სიბრტყის პარალელურად დევს თუ

არა. თუ ისინი გამოსახულების სიბრტყის პარალელურადაა მოთავსებული, მაშინ მათი განზომილება უფრო დიდია, ვიდრე იმ ობიექტების, რომლებიც სიბრტყის მიმართ მახვილი კუთხით არიან განლაგებული. ცხადია, რომ ასეთივე ეფექტს ექნება ადგილი გამოსახულების სიბრტყის მიმართ მახვილი კუთხით განლაგებული ღობის ვერტიკალური ელემენტების შემთხვევაშიც. კერძოდ, დამკვირვებელიდან დაშორების ზრდასთან ერთად ღობის ელემენტების სიჭიმდროვე სულ უფრო გაიზრდება (სურ. 2.5). მაგრამ რაკურსის ეფექტს ადგილი არ ექნება, თუ დამკვირვებელი ღობეს უყურებს ღობის სიბრტყის მართობული მიმართულებით. როგორც ვხედავთ, ასეთი ეფექტი ერთმანეთთან აკავშირებს 2D ობიექტის გამოსახულებას 3D ობიექტის სტრუქტურასთან. აღნიშნული ეფექტი განსაზღვრავს ნიშან-თვისებას:

განსაზღვრება 2.3. რაკურსის ეფექტი (foreshortening) გამოსახულებაზე წარმოიშობა მაშინ, როცა სცენის ობიექტზე დაკვირვება ხდება მისი სიმეტრიის ღერძის მიმართ მახვილი კუთხით.

დამკვირვებლის მიმართ ობიექტის განზომილების ცვლილებას ადგილი აქვს ასევე ტექსტურული გრადიენტის (texture gradient) შემთხვევაშიც. კერძოდ, თუ ტექსტურის ელემენტების მიმართ გამოვიყენებთ მასშტაბირების და რაკურსის ეფექტს, მაშინ ტექსტურულ სურათზე მიღებული ცვლილები დამკვირვებელს აძლევს ინფორმაციას ტექსტურული ზედაპირის დაშორებისა და ორიენტაციის შესახებ. აღნიშნული ეფექტი კარგად ჩანს, თუ, მაგალითად, აგურით აშენებულ სახლს ან რომელიმე მცენარის პლანტაციის გამოსახულებას დაკვირვებით. ტექსტურული გრადიენტი წარმოდგენილია 2.7 სურათზე. სიმინდ-

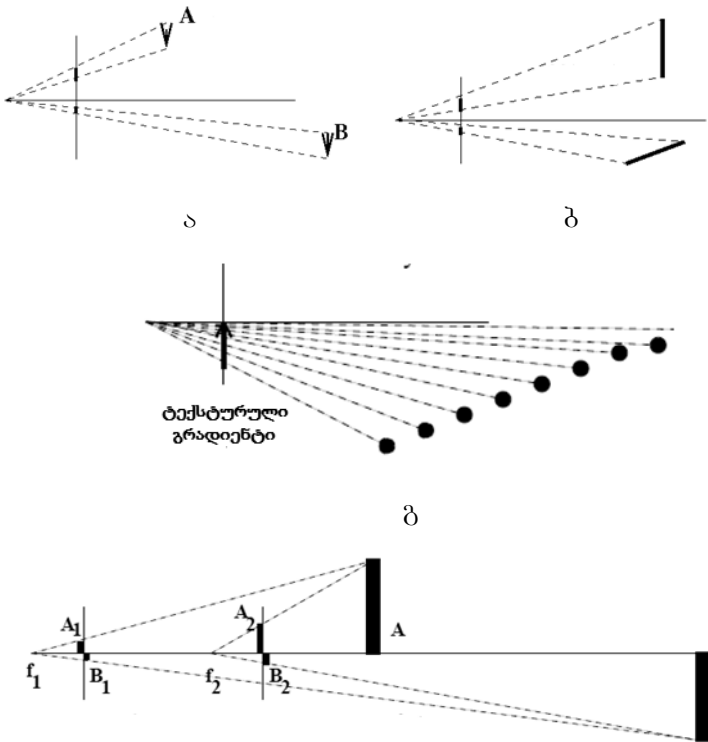
ის ყანის გამოსახულება შეიცავს რამდენიმე ტექსტურას (მცენარეები და კვალები) და ტექსტურულ გრადიენტს. გამოსახულებაზე ქვემოდან-ზემოთ მიმართულებით მოძრაობისას, იმის გამო, რომ სიმინდის ფურცლების რაოდენობა გამოსახულების ფართობის ერთეულზე სულ უფრო მეტი ხდება, ტექსტურის სიმკვრივეც შესაბამისად იზრდება. ასევეა აგურის კედლის შემთხვევაშიც, კერძოდ, სურათის სიღრმის მიმართულებით მოძრაობისას.



სურ. 2.7

ტექსტურული გრადიენტის არსის გასაგებად განვიხილოთ 2.8 სურათი, რომელზეც წარმოდგენილია დამკვირვებლის მოძრაობისას ა) სიჩქარის მასშტაბირება (ცვლილება): *A* ობიექტის გამოსახულება უფრო სწრაფად მოძრაობს, ვიდრე *B* ობიექტის, ბ) რაკურსის მასშტაბირება, გ) ტექსტურული გრადიენტი: მიუთითებს, რომ დამკვირვებლიდან დაშორებასთან ერთად ზედაპირი სულ უფრო მრუდე ხდება, და დ) პარალაქსის (მოძრაობის პარალაქსის) ეფექტების წარმოქმნის სქემა. თითოეულ სქემაზე გამოსახულების წინა სიბრტყე აღნიშნულია ვერტიკალური მონაკვეთით, ხოლო ობიექტები განლაგებულია მისგან მარჯვნივ. როგორც სურათიდან ჩანს, დამკვირვებლის ტექსტურ-

რული გამოსახულების ცენტრისკენ მოძრაობისას ტექსტების (ანუ ტექსტურის ელემენტების) სიმჭიდროვე სულ უფრო და უფრო იზრდება, რაც სცენაზე დამკვირვებლის მიმართ ობიექტების განლაგების სიღრმის ზრდაზე მიუთითებს. ზოგადად შეგვიძლია ვთქვათ, რომ გამოსახულებაზე ტექსტურის ცვლილება, როგორც ნიშან-თვისება შეიძლება გამოყენებული იქნეს ამ ტექსტურის შემცველი 3D ზედაპირის სიღრმის ან ორიენტაციის გამოსათვლელად.



დ
სურ. 2.8
71

განსაზღვრება 2.4. *გამოსახულებაზე დამკვირვებლის მიერ რომელიმე მიმართულებით აღქმულ ან გაზომილ ტექსტურის ცვლილებას, ტექსტურული გრადიენტი ეწოდება.*

ეს ნიშან-თვისება ხშირად განპირობებულია დამკვირვებლის მიმართ იმ 3D ზედაპირების სხვადასხვა დაშორებით (სიღრმით) ან ორიენტაციით, რომელთა ტექსტურაც გამოსახულებაზეა მოცემული.

იმ შემთხვევაში, თუ ტექსტურის შემცველი ზედაპირის მიმართ ნორმალს არ ემთხვევა დაკვირვების მიმართულებას, მაშინ ასეთი ზედაპირები გამოსახულებაზე იწვევენ ტექსტურული გრადიენტის ფორმირებას, თუმცა საწინააღმდეგოს ყოველთვის ადგილი არ აქვს.

დამკვირვებლის სივრცითი ობიექტის მიმართ მოძრაობისას წარმოიშობა **პარალაქსური წანაცვლება**. მსგავს ეფექტს ადგილი აქვს მაშინაც, როცა დამკვირვებელი უძრავია, ხოლო ობიექტი მოძრავი. ეს ეფექტი ახსნილია 2.8,დ სურათზე წარმოდგენილი სქემით. კერძოდ, დამკვირვებელს f_1 წერტილიდან f_2 წერტილში გადაადგილებისას ეჩვენება, რომ A და B ობიექტები ერთმანეთს შორდება და რომ მასთან უფრო ახლოს მყოფი A ობიექტი მოძრაობს უფრო სწრაფად, ვიდრე უფრო შორს მყოფი B ობიექტი. პარალაქსური წანაცვლების ეფექტს ვხვდებით მაგალითად, როცა ქუჩაში მივიღვართ და ვხედავთ სხვადასხვა ობიექტს. თუ ახლა ერთ თვალს დავხუჭავთ, მაშინ იმ ობიექტების გამოსახულებები, რომლებსაც გვერდზე ჩაუვლით, ჩვენი თვალის ბადურაზე უფრო სწრაფად მოძრაობს, ვიდრე იმ ობიექტების გამოსახულებები, რომლებიც ჩვენ წინ მდებარეობენ და საკმაო მანძილით არიან დაშორებული. ასევე აგტომობილით მოძრაობისას შორს მყოფი შემხვედრი მანქანების გამოსახულებები ბადურაზე სტაბილურად მდგრადად ფორმირ-

დება. მაგრამ ჩვენთან თანდათან მოახლოებისას მათი გამოსახულებები ჩვენს მიმართ ძალიან სწრაფად გადაადგილდება. მსგავს მოვლენას აქვს ადგილი მაშინაც, როცა დამკვირვებელი დგას. ამ დროს დამკვირვებლისთვის ავტომობილები, რომლებიც მის მიმართ ახლოს მოძრაობენ მას ეჩვენება უფრო სწრაფად მოძრავი, ვიდრე შორს მყოფი მოძრავი ავტომობილები.

ამგვარად, ზემოაღნიშნულის საფუძველზე შეიძლება განვიხილოთ სიღრმის მახასიათებელი შემდეგი ნიშან-თვისება:

განსაზღვრება 2.5. პარალაქსური წანაცვლება მოძრაე დამკვირვებელს აძლევს ინფორმაციას გამოსახულებაზე სცენის ობიექტების განლაგების სიღრმის შესახებ. დამკვირვებელთან უფრო ახლოს მყოფი ობიექტების გამოსახულებები მის მიმართ უფრო სწრაფად მოძრაობენ, ვიდრე უფრო დაშორებულეების.

2.5. ობიექტების სივრცითი მახასიათებელი თვისებების აღქმის ხერხები

ზემოთ განხილული იყო 2D გამოსახულებების მახასიათებელი ნიშან-თვისებები, რომლებიც შეიძლება გამოყენებული იყოს 3D სცენის სტრუქტურის ინტერპრეტაციისთვის, ობიექტების ზედაპირების ფორმის აღდგენისთვის. მაგრამ ობიექტის ფორმის აღდგენა შეიძლება მაშინაც, თუ გვაქვს ერთი გამოსახულება, რომელზედაც რომელიმე ერთი ნიშან-თვისებაა წარმოდგენილი. თუმცა ასეთ შემთხვევაში ამოცანის ამოხსნა უფრო რთული ხდება. ამოცანის ამონახსნის არსებობის და ერთადერთობის საკითხის გადაწყვეტა ძნელად მისაღწევია, თუ არ ვიცით ობიექტის ზედაპირის განათება, არეკვლისუნარიანობა და ნორმა-

ლის მიმართულება. ზედაპირზე დაცემული სინათლის არეკვლა დამოკიდებულია დაკვირვებისა და განათების მიმართულებაზე. გამოსახულებიდან 3D სცენის ზედაპირის ორიენტაციის შესახებ ინფორმაციის მოსაპოვებლად ბევრი მეთოდი იქნა შემუშავებული. ეს მეთოდები ცნობილია როგორც ფორმის განსაზღვრის მეთოდები X -ით, რომლებსაც მოკლედ ასე წერენ – „ფორმები X -ით“, სადაც X -ით აღნიშნულია ის საკვანძო მახასიათებელი ნიშან-თვისებები, რომელთა გამოყოფითაც გამოსახულებიდან შეიძლება 3D ობიექტის ფორმის განსაზღვრა.

განსაზღვრება 2.6. *გამოსახულებიდან 3D ობიექტის ზედაპირის ორიენტაციის განსაზღვრის პროცესს აღდგენა (recovery) ეწოდება.*

ამ პროცესის შედეგად მიიღება ე. წ. „ $2\frac{1}{2}$ -განზომილებიანი“ და არა „3-განზომილებიანი“ ესკიზი, რადგანაც მასზე 3D სცენა წარმოდგენილია არა მთლიანად, არამედ მხოლოდ მისი ხილული ზედაპირებით, ანუ არასრულად.

საზოგადოდ, ერთ გამოსახულებაზე დაყრდნობით ზედაპირის ორიენტაციის ცალსახად განსაზღვრა შეუძლებელია თუ არ შემოვიტანთ რაიმე დამატებით დაშვებებს. ამოცანა უფრო მარტივდება, თუ გვაქვს დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან მიღებული სცენის ორი ან მეტი გამოსახულება. თუ ცნობილია დაკვირვების წერტილების ურთიერთმდებარეობა, მაშინ შესაძლებელია შესაბამის გამოსახულებებზე ხილული სცენის ზედაპირის ნებისმიერ წერტილამდე მანძილის განსაზღვრა. მაგალითად, სტერეოსკოპული ხედვის სისტემის შემთხვევაში ამ მანძილის გამოთვლა შეიძლება ტრიანგულაციის მეთოდით, ან უშუალოდ გაზომვა სხვადასხვა ტიპის მანძილსაზომების გამო-

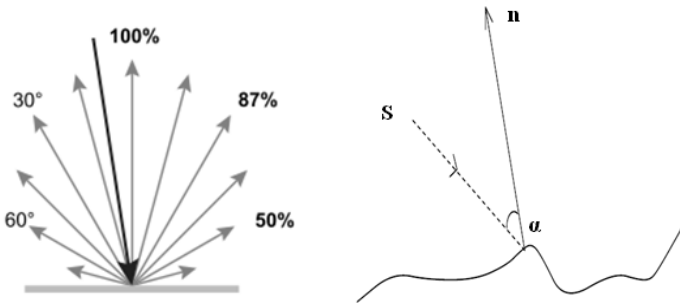
ყენებით. ასევე მანძილის გამოთვლა შეიძლება, თუ გვაქვს მოძრავი კამერით მიღებული სცენის გამოსახულებების მიმდევრობა. ამ შემთხვევაში გამოსახულებიდან შესაძლებელია როგორც კამერის მოძრაობის კანონის, ისე ფარდობითი მანძილების განსაზღვრა გამოსახულებაზე ხილული ობიექტების ზედაპირების წერტილებამდე.

განვიხილოთ ზოგიერთი ის ნიშან-თვისება, რომლის სცენის გამოსახულებიდან გამოყოფითაც შესაძლებელია 3D ობიექტის ფორმის აღდგენა.

2.5.1. ობიექტების ფორმის განსაზღვრა ერთ ნიშან-თვისებაზე დაყრდნობით

ფორმის განსაზღვრა განათებულობის მიხედვით (shape from shading). დამკვირვებლის მიერ ობიექტის აღქმა დამოკიდებულია სინათლის წყაროდან მასზე დაცემული და არეკლილი სინათლის რაოდენობასა და მიმართულებაზე. თავის მხრივ, არეკლილი სინათლის რაოდენობა განისაზღვრება **ზედაპირის არეკვლისუნარიანობით – ალბედოთი**. საზოგადოდ, ზედაპირის არეკვლისუნარიანობა არის არეკვლისა და დაცემის მიმართულებების ფუნქცია და, აქედან გამომდინარე, ის სინათლის მიმართულების (ორიენტაციის) მახასიათებელ თვისებას წარმოადგენს. ობიექტების ზედაპირების უმეტესობა ძირითადად შეიძლება დაიყოს სარკულ (ამრეკლავ) და დიფუზიურ (გამბნევე) ზედაპირებად. სარკული ზედაპირებისთვის, როგორცაა მინა ან გაპრიალებული მეტალი, არეკვლისუნარიანობა არეკვლის ყველა კუთხისთვის ნულთან ახლოსაა გარდა ზედაპირის ბრჭყვიალა (კაშკაშა) ნაწილის შესაბამისი არეკვლის კუთხისა. ხოლო დიფუზიურად ამრეკლავი, ან იდეალურად მქრქალი ზედაპირებისთვის არეკვლისუნარიანობა ყველა მიმართულებით

ერთნაირია, ანუ სინათლე ყველა მიმართულებით თანაბრად ან თითქმის თანაბრად აირეკლება. ასეთ ზედაპირებს **ლამბერტის ზედაპირებს** უწოდებენ (სურ. 2.9). ობიექტების უმეტესობას სარკული და დიფუზიური არეკვლის ზედაპირების გარკვეული ნაზავის თვისებები აქვს. ინტენსიობა ლამბერტის ზედაპირის რომელიმე (x, y, z) წერტილში დამოკიდებულია სინათლის S წყაროს განათების მიმართულებასა და ამ წერტილში აღმართულ n ნორმალს შორის α კუთხეზე (სურ. 2.9). ლამბერტის ზედაპირის სიკაშკაშე დაცემული სინათლის სხივის ენერჯიის პროპორციულია. გლუვი ზედაპირების მქონე ობიექტების შემცველი სცენების გამოსახულებებზე (მაგალითად, ბურთი) ხშირად ვხვდებით ათინათებს, რომლებიც განლაგებული არიან ზედაპირის იმ წერტილებზე, მიდამოში, რომლებშიც სინათლის წყაროდან წამოსული სხივი და დამკვირვებლის მიმართულებით არეკვლილი სხივი ამ წერტილებში ზედაპირის მიმართ აღმართულ ნორმალთან ერთნაირ კუთხეებს ქმნის.



სურ. 2.9

ამავე დროს განათებულობის მიმართულებასა და ზედაპირის ნორმალს შორის კუთხის ზრდასთან ერთად გლუვი ობიექტების ზედაპირული ელემენტები სულ უფრო მუქი ხდება.

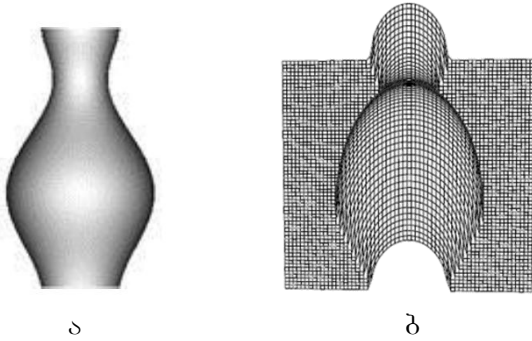
საზოგადოდ კი, სცენაზე არსებული ბრტყელი ზედაპირები გამოსახულებაზე ერთგვაროვნად გამოიყურება და მათი გამოსახულების ყოველ წერტილში ინტენსიობის მნიშვნელობა განათებულობის მიმართულებასა და სიბრტყის მიმართ ამ წერტილში აღმართულ ნორმალს შორის კუთხის პროპორციულია.

ზედაპირის ფორმის განსაზღვრისთვის გამოიყენება სხვადასხვა მათემატიკური მიდგომა, რომელზე დაყრდნობითაც ზედაპირის მიმართ ნორმალის გამოთვლა გამოსახულების პიქსელში ინტენსიობის მნიშვნელობის საფუძველზე ხდება. ასეთი მიდგომების უმეტესობა ეყრდნობა მოდელს, რომელიც აღწერს კავშირს განათებულობასა და ზედაპირის ორიენტაციას შორის. ამ შემთხვევაში პარამეტრების შეფასებისთვის საჭიროა კამერის კალიბრაცია. ზოგიერთი მეთოდი კი მოითხოვს რამდენიმე კამერის გამოყენებას. საზოგადოდ კი, განათებულობის მონაცემების მიხედვით ფორმის განსაზღვრის მოდელებში მოითხოვება შემდეგი სიდიდეების მნიშვნელობების ცოდნა:

- დაცემული და არეკვლილი სინათლის ენერჯის რაოდენობა;
- დაცემული და არეკვლილი სინათლის მიმართულება;
- ზედაპირული ელემენტის ორიენტაცია და არეკვლის კოეფიციენტი.

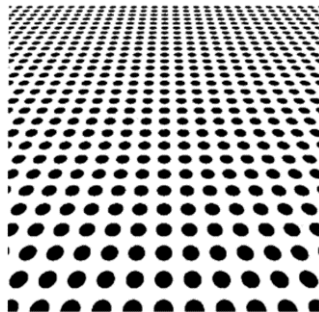
განათებულობის მონაცემების მიხედვით ფორმის გამოთვლისას ისეთ გარემოში, სადაც განათებულობის მართვა შესაძლებელია, დიდი რაოდენობის პარამეტრების მხედველობაში მიღებას აზრი არ აქვს. 2.10, ა, ბ სურათზე ნაჩვენებია კავშირი გამოსახულების პიქსელებში ინტენსიობის მნიშვნელობების სახით წარმოდგენილ განათებულობის მონაცემებსა და სინათლის წყაროდან განათებული ობიექტის (ლარნაკი) ფორმას შორ-

ის. როგორც ვხედავთ, სამგანზომილებიან სახეში წარმოდგენილი ინტენსიობის ფუნქციის გრაფიკი (სურ. 2.10,ბ) კარგად წარმოაჩენს ლარნაკის ზედაპირის ფორმას.



სურ. 2.10

ფორმის განსაზღვრა ტექსტურის მიხედვით (shape from texture). ცნობილია, რომ თუ გვაქვს ტექსტურული სამგანზომილებიანი ზედაპირი, მაშინ მის გამოსახულებაზე ტექსტურის აშკარა ცვლილებები იძლევა ინფორმაციას ამ ზედაპირის ორიენტაციისა და ფორმის შესახებ. 2.11 სურათზე წარმოდგენილია ერთგვაროვანი ტექსტურული ზედაპირის მქონე დახრილი სიბრტყის პერსპექტიული გამოსახულება.

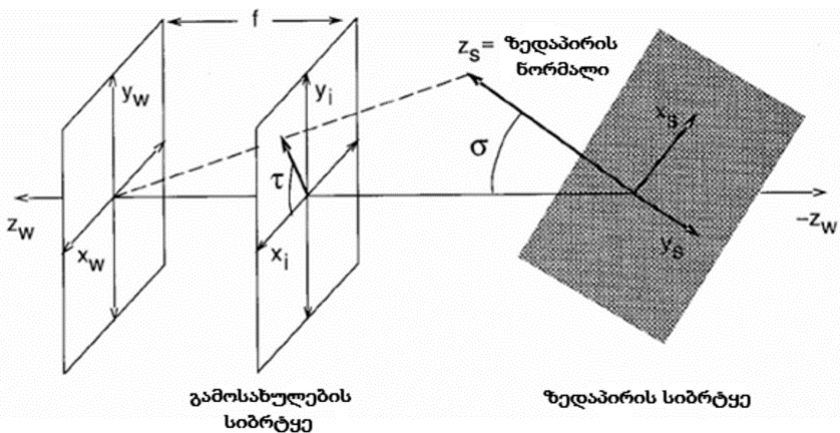


სურ. 2.11

როგორც ვხედავთ, სიბრტყის გამოსახულებაზე ადგილი აქვს ტექსტებს შორის როგორც მანძილის, ისე მათი ზომების, ორიენტაციისა და ფორმის (ექსცენტრისიტეტის) ცვლილებას.

ასეთი ზედაპირის ორიენტაციის გამოსათვლელად შეიძლება გამოვიყენოთ ჩვენთვის უკვე ცნობილი ტექსტურული გრადიენტის განსაზღვრება 2D გამოსახულების შემთხვევაში. განვიხილოთ ეს ამოცანა თითქმის ბრტყელი, ერთგვაროვანი ტექსტურის მქონე 3D ზედაპირისთვის, რომელზედაც გარკვეული კუთხით დაკვირვებისას მის ორგანზომილებიან გამოსახულებაზე ფორმირდება ტექსტურული გრადიენტი. დამკვირვებლის და ზედაპირის ურთიერთ მდებარეობის აღწერისთვის ასეთ შემთხვევაში გამოვიყენება ორი კუთხური სიდიდე – **დახრა** და **ცენტრობი**.

ტექსტურული ზედაპირის პროექციის მისაღებად გამოვიყენოთ ობსკურის კამერით მიღებული პერსპექტიული პროექციის მოდელი (სურ. 2.12):



სურ. 2.12

შევუთავსოთ $\mathbf{x}_w = (x_w, y_w, z_w)$ მსოფლიო კოორდინატთა სისტემა გამოსახულების ფორმირების ოპტიკურ სისტემას ისეთნაირად, რომ კოორდინატთა სათავე დაემთხვეს ფოკუსის წერტილს, ხოლო ოპტიკური ღერძი $-z_w$ მიმართულებას, ანუ კამერის (დამკვირვებლის) ოპტიკურ ღერძს; 3D ზედაპირის გამოსახულების სიბრტყის კოორდინატთა $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$ სისტემა მოთავსებულია $z = f < 0$ წერტილში, f ფოკუსური მანძილია, ისე, რომ $x_i = x_w$ და $y_i = y_w$; ტექსტურული ზედაპირი აღიწერება მასთან შეთავსებული $\mathbf{x}_s = (x_s, y_s, z_s)$ კოორდინატთა სისტემით, სათავეთ ზედაპირის და z_w ღერძის გადაკვეთაში.

ასეთნაირად წარმოდგენილი ტექსტურული ზედაპირის ორიენტაციის აღწერისთვის დახრა და ცერობი შემდეგნაირად განისაზღვრება:

განსაზღვრება 2.7. *ბრტყელი ზედაპირის დახრა τ (tilt) განისაზღვრება როგორც კუთხე გამოსახულების სიბრტყის x_i ღერძსა და ზედაპირის ნორმალის z_s პროექციას შორის.*

განსაზღვრება 2.8. *ზედაპირის ცერობი σ (slant) ეს არის კუთხე ზედაპირის z_s ნორმალსა და z_w ოპტიკური ღერძის მიმართულებას შორის.*

როგორც ვხედავთ, x_s ღერძი შეთანასწორებულია დახრის მიმართულებასთან, z_s ღერძი შეთანასწორებულია ზედაპირის ნორმალთან, ხოლო y_s ქმნის მარჯვენა ორთოგონალურ კოორდინატთა სისტემას.

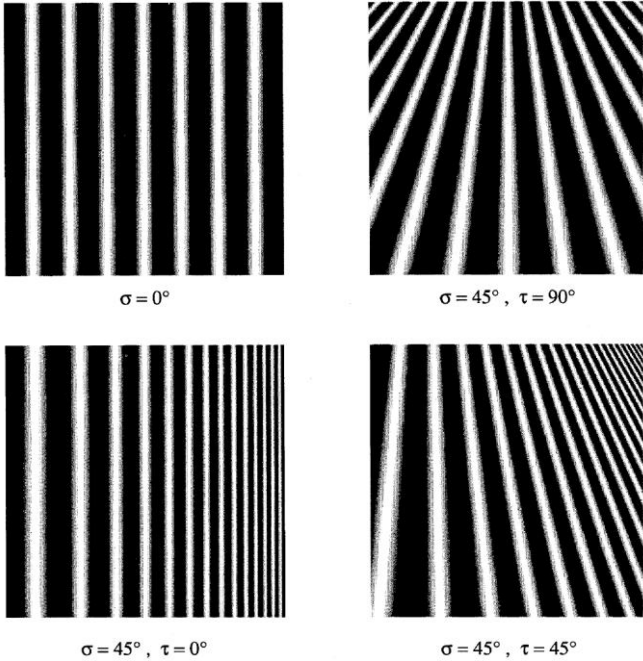
ამგვარად, 3D ზედაპირის ორიენტაციის განსაზღვრა შესაძლებელია ცერობი-დახრა სისტემის გამოყენებით. სურათიდან ჩანს, რომ ცერობის მნიშვნელობები იცვლება $[0^{\circ}, 90^{\circ}]$ ინტერვ-

აღში, ხოლო დახრის მნიშვნელობები კი $[-180^{\circ}, 180^{\circ}]$ ინტერვალში.

განვიხილოთ ცერობი-დახრა სისტემის გამოყენება ზედაპირის ორიენტაციის განსაზღვრისთვის კონკრეტულ მაგალითებზე. ვთქვათ სწორად მდგომი ადამიანი პირდაპირ უყურებს პურის ყანას, რომელსაც ის აღიქვამს როგორც ბრტყელ ზედაპირს. თავის ვერტიკალური მდგომარეობისას ყანის ბრტყელი ზედაპირის დახრა ტოლი იქნება 90° -ის. თუ ადამიანი შორს იყურება, მაშინ ცერობის სიდიდე ახლოს იქნება 90° -თან. თუ ადამიანი იყურება პირდაპირ ფეხებქვეშ, მაშინ ცერობის სიდიდე ახლოს იქნება 0° -თან. თავის მარცხნივ მობრუნებით 45° -ით ყანის ბრტყელი ზედაპირის დახრა ტოლი იქნება 45° -ის. ხოლო თავის მარჯვნივ მობრუნება 45° -ით გამოიწვევს ყანის ბრტყელი ზედაპირის დახრას 135° -ით.

2.13 სურათზე წარმოდგენილია დამკვირვებლის მიერ დაკვირვების სხვადასხვა კუთხიდან, რომლებიც დახრისა და ცერობის სხვადასხვა მნიშვნელობებს შეესაბამება, დანახული სინუსოიდური ბადით დაფარული ბრტყელი ზედაპირის განსხვავებული გამოსახულებები. როგორც ვხედავთ, დახრისა და ცერობის სხვადასხვა მნიშვნელობა სრულად განსაზღვრავს მოცემული ზედაპირის ორიენტაციას დამკვირვებლის მიმართ.

დახრა და ცერობი, როგორც ზედაპირის ორიენტაციის მახასიათებელი სიდიდეები, შეიძლება გამოყენებული იყოს ნებისმიერი ბრტყელი ზედაპირისთვის. მაგალითად, შენობების გარე და შიგა კედლებისთვის, ყუთებისა და ვაგონების გვერდებისთვის და ა. შ. მათი, როგორც მახასიათებლების გამოყენება შეიძლება ასევე მრუდე ზედაპირებისთვისაც, თუმცა იმის გამო, რომ ასეთი ზედაპირის ნორმალის მიმართულება ცვალებადია, ტექსტურული გრადიენტის გამოთვლაც უფრო რთულია.



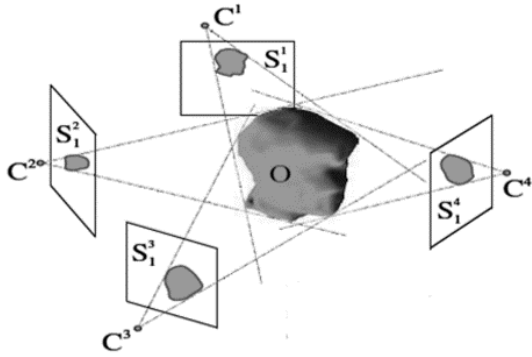
სურ. 2.13

ფორმის განსაზღვრა კონტურის მიხედვით (shape from boundary). ადამიანს შესწევს უნარი აღადგინოს 3D ობიექტის სივრცითი ფორმა გამოსახულებაზე მისი კონტურის მოხაზულობის – სილუეტის საფუძველზე. ასეთი მიდგომა ფართოდ გამოიყენება 3D სტატიკური ობიექტების რეკონსტრუქციისათვის. ამ მიზნით შემუშავებული იქნა სპეციალური მეთოდები გლუვი მრუდით შემოსაზღვრული არის შიგა წერტილებში ზედაპირის მიმართ ნორმლების მიმართულების გამოსათვლელად, რაც თავის მხრივ ობიექტის ზედაპირის ფორმის ხასიათს განსაზღვრავს. მაგალითად, ელიფსი გამოსახულებაზე ადამიანს მიუთითებს სივრცეში დისკოს ან სფეროს არსებობაზე. ვთქვათ, გამოსახულებაზე გვაქვს მარტივი გლუვი წრიული კონტურ-

რი. სიგლუვე აქ იმას ნიშნავს, რომ სამგანზომილებიან სივრცეში ობიექტის კიდის ზედაპირის მიმართ აღმართული ნორმალეები მართობული არის როგორც ხედვის მიმართულების, ისე გამოსახულებაზე ფორმირებული წრიული განივი კვეთის ელემენტების მიმართაც. ეს საშუალებას იძლევა გამოსახულების კონტურის წერტილებს მივაკუთვნოთ ერთადერთი (უნიკალური) ნორმალი. წრიული კონტურის დიამეტრის ბოლო წერტილებში ნორმალეების მიმართულებები ურთიერთსაწინააღმდეგოა. ამის შემდეგ უკვე შეიძლება დიამეტრის გასწვრივ ზედაპირის ნორმალეების მიმართულების გლუვად ცვლილებების ინტერპოლირება იმ პირობით, რომ დიამეტრის შუა წერტილის ნორმალი მიმართულია უშუალოდ დამკვირვებლისკენ. თუმცა ამის მისაღწევად საჭირო იქნება დამატებითი შეზღუდვების შემოტანა, მაგალითად, ელიფსურ და სფერულ ზედაპირებს შორის განსხვავების მხედველობაში მიღება, ან ის, რომ თუ დამკვირვებელი უყურებს ელიფსის ბოლოს, მაშინ ზედაპირი სფეროსგან განსხვავებული იქნება. ასეთი დაშვებები ზედაპირის ცალსახა განსაზღვრის შესაძლებლობას იძლევა. ნორმალის ზედაპირის მიმართ ინტერპოლაციისას, როგორც შეზღუდვა, შეიძლება გამოყენებული იქნეს ინფორმაცია განათებულობის შესახებ. საბოლოოდ, ყველა ამ მონაცემს შეუძლია დაგვეხმაროს, რომ ერთმანეთისგან განვასხვაოთ კვერცხი და ბურთი, მაგრამ არა ბურთის შიგა და გარე ზედაპირები.

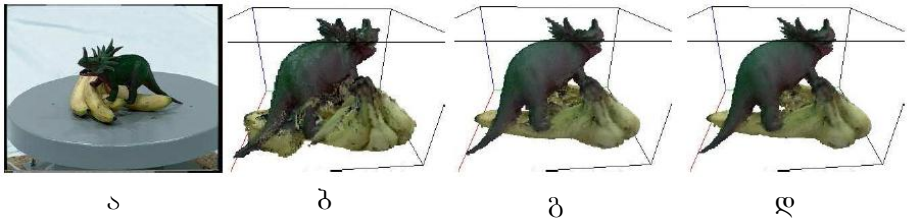
სილუეტის გამოყენებას 3D ობიექტის სივრცითი ფორმის განსაზღვრისთვის აქვს თავისი უპირატესობა. კერძოდ, სილუეტები ადვილად და მარტივად მისაღებია განსაკუთრებით მაშინ, როცა ობიექტი დახურულ გარემოში იმყოფება და გამოსახულებაზე მისი სილუეტის მისაღებად გამოყენებულია სტატიკური კამერები და მოძრავი ჩრდილებიც ცოტაა. ასეთი სისტემა წარმოდგენილია 2.14 სურათზე, სადაც, O ობიექტის S_1^k სილუეტის

გამოსახულების ფორმირება დაკვირვების სხვადასხვა C^k , $k = \overline{1,4}$ წერტილში მოთავსებულ k -ურ კამერაზე ხდება დროის t_1 მომენტში.



სურ. 2.14

ამასთან ობიექტის ფორმის აღდგენის ხარისხი მით უკეთესია, რაც მეტია სილუეტების გამოსახულების რაოდენობა. 2.15 სურათზე ნაჩვენებია ა) 3D ობიექტის სივრცითი ფორმის აღდგენის შემთხვევა ბ) 6 სილუეტის, გ) 36 სილუეტის და დ) 66 სილუეტის გამოსახულების შემთხვევაში. ამასთან, უნდა აღინიშნოს, რომ სილუეტის გამოყენებით 3D ობიექტის ფორმის რეკონსტრუქცია საჭიროებს კალიბრირებული კამერების გამოყენებას.



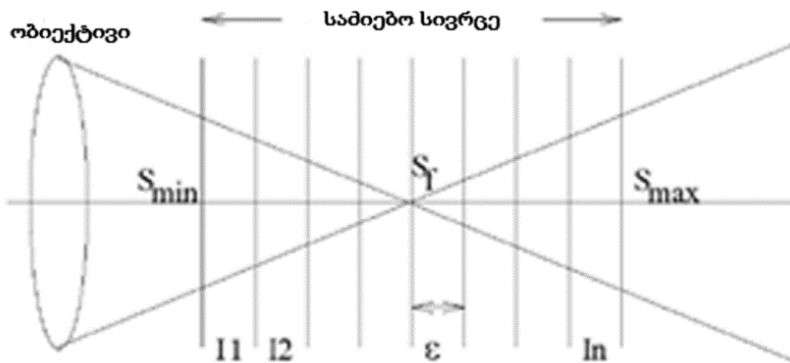
სურ. 2.15

სიღრმის განსაზღვრა ფოკუსირებით (depth from focus). როგორც ცნობილია, ადამიანი რაიმე ობიექტის მკაფიოდ დასანახად ახდენს მასზე თვალის ფოკუსირებას ფოკუსური მანძილის ცვლილებების საშუალებით. მსგავს მოქმედებას ადგილი აქვს დამკვირვებლიდან (კამერიდან) ობიექტის ზედაპირის რომელიმე ელემენტამდე, რომელსაც გამოსახულებაზე პიქსელი შეესაბამება, მანძილის (სიღრმის) განსაზღვრისას. ფოკუსირება საშუალებას იძლევა განისაზღვროს სცენაზე ობიექტის მდებარეობის სიღრმე დამკვირვებლის მიმართ. ამ პრინციპზე დაყრდნობით შემუშავდა სპეციალური მოწყობილობები, რომლებშიც კამერის ობიექტივის ფოკუსირება ავტომატურად ხორციელდება. გამოსახულებების პროექციული ფორმირების ერთ-ერთ შეზღუდვას წარმოადგენს ის, რომ ფოკუსირებით სიღრმის განსაზღვრის მეთოდი არ გამოდგება გამოსახულებების მოცულობითი ფორმირებისთვის, რადგანაც ამ დროს ქრება (აღარ ჩანს) ოპტიკური ღერძის მიმართულებით არსებული ფოკუსგარეშე სტრუქტურები. თუმცა ეს მეთოდი თავისი სიმარტივის გამო გაუმჭვირვალე ზედაპირების სიღრმის განსაზღვრისთვის საკმაოდ სასარგებლო მეთოდს წარმოადგენს.

სიღრმის განსაზღვრას საფუძვლად უდევს მიდგომა, რომლის მიხედვითაც ობიექტის წერტილის დაშორება d **ბაზისის სიბრტყის** (კამერის ობიექტივის ცენტრზე გამავალი და ოპტიკური ღერძის მართობული სიბრტყის) მიმართ წარმოადგენს გამოსახულების $[x, y]^T$ კოორდინატების ფუნქციას. ოპტიკიდან ცნობილია, რომ ფუნქცია, რომელიც აღწერს წერტილის გამოსახულების ფორმირებას წარმოადგენს გამოსახულების ფორმირების სისტემის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მახასიათებელს. მას **წერტილის გაბნევის ფუნქცია** ეწოდება. გაბნევის ფუნქციას მკაფიო მაქსიმუმი აქვს ფოკალურ სიბრტყეში, ხოლო ფოკალური სიბრტყიდან დაშორებასთან ერთად ინტენსიობის მნიშვნე-

ლობა მანძილის კვადრატის პროპორციულად მცირდება. ეს ნიშნავს, რომ გამოსახულების ოპტიკური ფორმირებისას ყველა იმ წერტილებს, მაგალითად, კონტურების, წირების, რომლებშიც წერტილების მკაფიო გამოსახულება მიიღება, ასევე სიკაშკაშის დონის ექსტრემუმი ექნებათ ფოკალურ სიბრტყეშიც. აქედან გამომდინარე, ოპტიკური სისტემის ობიექტზე ფოკუსირება შეიძლება განვიხილოთ როგორც პროცესი, რომლის დროსაც ობიექტივის ფოკუსური მანძილის გარკვეულ დიაპაზონში რაღაც მუდმივი ბიჯით ნაბიჯ-ნაბიჯ ცვლილებისას სიღრმის მიმართულებით, ობიექტის გამოსახულება ფოკუსურ სიბრტყეში ისევე მკაფიო რჩება.

ეს პრინციპი უდევს საფუძვლად კამერის ობიექტივის ფოკუსირების ავტომატური მართვის (ავტოფოკუსირების) ალგორითმს, რომლის მოქმედება ნაჩვენებია 2.16 სურათზე, სადაც, S_f – ფოკუსის წერტილია, $[S_{min}, S_{max}]$ – ფოკუსური მანძილის მნიშვნელობების ცვლილების დიაპაზონია, ε – ფოკუსური მანძილის ცვლილების ბიჯის სიდიდეა და I_1, I_2, \dots, I_n ფოკუსური მანძილის მნიშვნელობების შესაბამისი გამოსახულებებია. ალგორითმი ასე მუშაობს. f ფოკუსური მანძილის ყველა შესაძლო მნიშვნელობისთვის ხდება შესაბამისი გამოსახულებების ფორმირება, რომელთა მიმართაც გამოიყენება კიდის აღმოჩენის ოპერატორი. კიდის თითოეული პიქსელისთვის მესხიერებაში ინახება f ფოკუსური მანძილის ის მნიშვნელობა, რომელიც კიდის ყველაზე უფრო მკვეთრ გამოსახულებას იძლევა. ფოკუსური მანძილის ეს მნიშვნელობა გამოიყენება მოცემული პიქსელის შესაბამისი 3D ზედაპირის წერტილის სიღრმის განსაზღვრისთვის. მაგრამ გამოსახულების ყველა წერტილი არ შეესაბამება ზედაპირის კონტრასტულ არეებს. შესაბამისად ამ წერტილებში არ მიიღება კიდის სიმკვეთრის ის მნიშვნელობები, რომელიც სიღრმის გამოთვლისთვის იქნება გამოსადეგი.

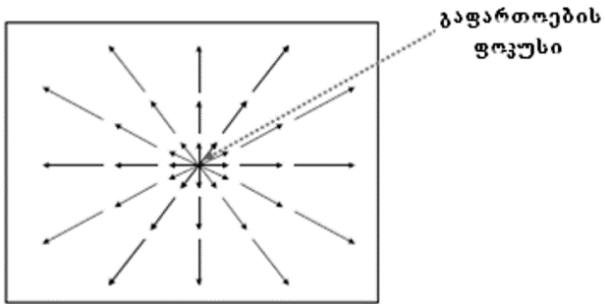


სურ. 2.16

მოძრაობის აღქმასთან დაკავშირებული ნიშან-თვისებები (motion phenomena). დამკვირვებლის 3D ობიექტის მიმართ ან პირიქით მოძრაობისას ადგილი აქვს შესაბამის ცვლილებებს გამოსახულებაზე, ანუ პარალაქსურ წანაცვლებას. ეს ცვლილებები კი შეიძლება გამოყენებული იქნეს ობიექტის სივრცითი ფორმის აღდგენისთვის. იმ შემთხვევაში, თუ მოძრავი კამერა უახლოვდება ობიექტს, მაშინ იქმნება შთაბეჭდილება, რომ თითქოს გამოსახულებაზე ამ ობიექტის წერტილები სხვადასხვა მიმართულებით იშლება, ხოლო პირიქით, თუ კამერა შორდება ობიექტს, მაშინ გამოსახულების წერტილები იკრიბება ერთ წერტილში. გამოსახულების იმ წერტილს, რომელიც ყველა დანარჩენი წერტილის გაშლის (ან შეკრების) ცენტრად აღიქმება, **გაფართობის ფოკუსი** ეწოდება (§12.3., I ნაწილი). 2.17 სურათზე წარმოდგენილია გაფართობის ფოკუსი კამერის ობიექტისკენ მოძრაობის შემთხვევაში.

ყველაზე უფრო ფართოდ გაფართობის ფოკუსი 3D სივრცის წერტილებამდე შესაბამისი მანძილების გამოსათვლელ-

ად გამოიყენება. ეს კი 2D გამოსახულების საფუძველზე ობიექტის ფორმის აღდგენის შესაძლებლობას იძლევა.



სურ. 2.17

III თავი. 3D გამოსახულებების აღქმა

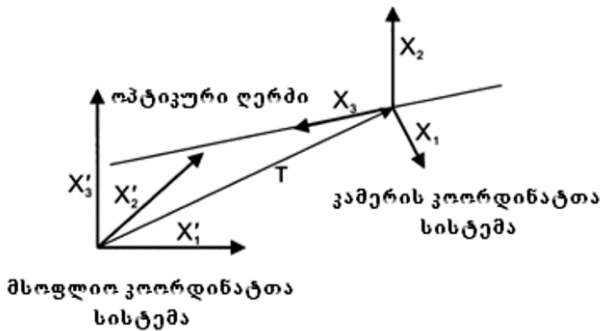
3.1. 3D სცენის 2D გამოსახულებების ფორმირების მათემატიკური მოდელები

3D სცენის 2D გამოსახულება არ იძლევა ინფორმაციას ობიექტების დამკვირვებლიდან დაშორების, მათი მდებარეობის, ზომების, ურთიერთგანლაგების, განათებულობისა და სხვა მახასიათებლების შესახებ. მაგრამ ასეთი ინფორმაციის მიღება შეიძლება ირიბი ნიშან-თვისებების დადგენის გზით. მაგალითად, სცენაზე ობიექტების განლაგების სიღრმის შესახებ ინფორმაციის მიღება შეიძლება, თუ გვექნება სცენის გამოსახულებები დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან. აღმოჩნდა, რომ ასეთი გამოსახულებების ერთმანეთთან შეთანადებით შესაძლებელია სცენის 3D სტრუქტურის რეკონსტრუქცია. კერძოდ, ობიექტების ფორმის, ზომების, სივრცითი განლაგების განსაზღვრა. ცხადია, რომ ეს მოითხოვს როგორც გამოსახულების ფორმირების პროცესის, ასევე სცენისა და მისი გამოსახულების წერტილების კოორდინატებს შორის თანაფარდობებისა და გამოსახულების აღქმის მოწყობილობების პარამეტრების განსაზღვრას.

3D უწყვეტი გამოსახულება, მსგავსად 2D უწყვეტი გამოსახულებისა, ფორმალურად აღიწერება როგორც ნამდვილი ცვლადის ნამდვილი ფუნქცია, რომელიც 3D სივრცის ნებისმიერ (x, y, z) წერტილში იღებს ნამდვილ მნიშვნელობას და განსაზღვრავს ინტენსიობის (სიკაშკაშის) $f(x, y, z)$ სიდიდეს ამ წერტილში.

3D სივრცეში ობიექტის მდებარეობის აღწერისთვის მოსახერხებელია ათვლის ორი სისტემის გამოყენება. მართალია, გამოსახულების სიბრტყესთან დაკავშირებული ათვლის სისტე-

მა მოსახერხებელია გამოსახულებაზე წერტილების მდებარეობის კოორდინატების განსაზღვრისთვის, მაგრამ მოუხერხებელია 3D ობიექტის წერტილების მდებარეობის კოორდინატების განსაზღვრისთვის, რისთვისაც საჭირო ხდება მანძილების გაზომვა კამერის მიერ განსაზღვრული გარკვეული მდებარეობის მქონე ღერძების მიმართ. ამის გამო ასეთი სისტემას პრაქტიკაში ხშირად არ იყენებენ. ამ მდგომარეობიდან იდეალურ გამოსავალს წარმოადგენს სწორედ კოორდინატა ორი სისტემის გამოყენება. პირველი არის დაკვირვებულ სცენასთან დაკავშირებული მსოფლიო კოორდინატა $\mathbf{X}' = (X'_1, X'_2, X'_3)^T$ სისტემა და მეორე – კამერასთან დაკავშირებული $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)^T$ კოორდინატა სისტემა (სურ. 3.1), რომლის X_3 ღერძი ემთხვევა კამერის ოპტიკურ ღერძს.



სურ. 3.1

გადაადგილება მსოფლიო კოორდინატა სისტემიდან კამერის კოორდინატა სისტემაში მოითხოვს გადატანის და მობრუნების გარდაქმნების შესრულებას. ამისთვის, ჯერ ხდება მსოფლიო კოორდინატა სისტემის სათავის გადატანა კამერის კოორდინატა სისტემის სათავეში გადატანის T ვექტორის სა-

შუალებით, ხოლო შემდეგ გადატანილი სისტემის მობრუნება კამერის შესაბამის ღერძებთან შეთავსებამდე (სურ. 3.1). მათემატიკურად გადატანა შეიძლება აღიწეროს ვექტორების სხვაობით, ხოლო მობრუნება კოორდინატების ვექტორის მატრიცაზე გამრავლებით:

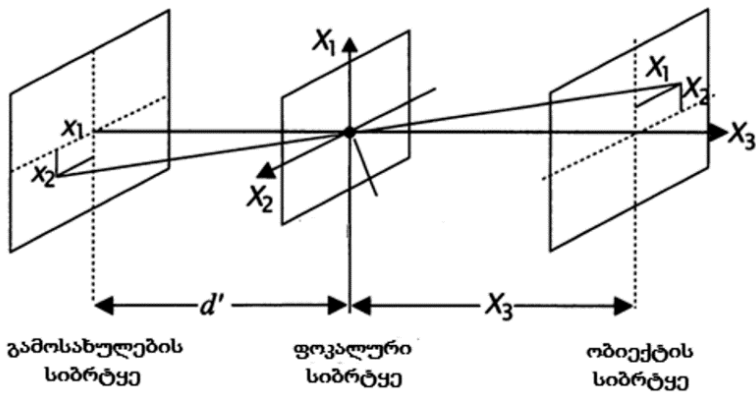
$$X = R(X' - T).$$

3.1.1. გამოსახულების ფორმირების პროექციული სისტემის მოდელი

საზოგადოდ, კამერის ოპტიკური სისტემის მიერ 3D სივრცის სხვადასხვა წერტილების გამოსახულებები გამოსახულების სივრცეში პროექცირდება ფოკალური სიბრტყიდან სხვადასხვა მანძილზე. მაგრამ, თუ მანძილი კამერასა და დაკვირვებულ სცენას შორის გაცილებით მეტია ოპტიკური სისტემის ფოკუსურ მანძილზე, მაშინ შეიძლება ჩაითვალოს, რომ გამოსახულების ფორმირება ხდება კამერის ფოკალურ სიბრტყეში. შესაბამისად, გამოსახულების ფორმირების მოდელად შეიძლება ავირჩიოთ კამერის პროექციული მოდელი, რომელშიც 3D სცენის 2D გამოსახულება მიიღება კამერის ობიექტივის ოპტიკური ცენტრის გავლით მისი პროექცირებით ფოკალურ სიბრტყეში (გამოსახულების სიბრტყეში). გამოსახულების ფორმირების **პროექციული მოდელის** გამოყენებით შეიძლება განისაზღვროს 3D სცენის წერტილებსა და 2D სიბრტყეზე მიღებულ მათ გამოსახულებებს (პროექციებს) შორის არსებული თანაფარდობები.

3D სცენის 2D გამოსახულების ფორმირების გეომეტრიული მოდელის როლში ჩვენ მიერ უკვე განხილული იყო ობსკურის კამერა (§2.2., I ნაწილი). ასეთი სისტემა **ცენტრალური (პერსპექტიული) პროექცირების ოპტიკურ სისტემას** წარმოადგენს,

რამდენადაც ყველა სხივმა ერთ ცენტრალურ წერტილში – ობსკურის კამერის ხერხელში უნდა გაიაროს. აღნიშნული სისტემა შეიცავს გამოსახულების სიბრტყის ცენტრში ცენტრირებულ ერთ კოორდინატთა სისტემას, რაც მოსახერხებელია გამოსახულებაზე წერტილების მდებარეობის განსაზღვრისთვის. მას „კამერაცენტრულ“ სისტემასაც უწოდებენ (სურ. 3.2). სურათზე წარმოდგენილია ასეთ სისტემაში ობიექტის წერტილის გამოსახულების ფორმირების გეომეტრია. როგორც ვხედავთ, ობიექტის $[X_1, X_2, X_3]^T$ წერტილიდან წამოსული სხივი გადის ობსკურის კამერის ნახვრეტში და კვეთს გამოსახულების სიბრტყეს $[x_1, x_2, -d']^T$ წერტილში.



სურ. 3.2

მაგრამ თუ ობიექტი გამჭვირვალეა, მაშინ ერთ კოორდინატთა სისტემა მოუხერხებელია 3D სივრცეში ობიექტის წერტილების მდებარეობის (კოორდინატების) ცალსახა განსაზღვრისთვის. ასეთ შემთხვევაში გამოსახულების ფორმირების აღნიშნული მოდელით ობიექტის ყველა წერტილი, რომლებიც ობიექტივზე გამავალ წრფეზე მდებარეობს, აისახება გამოსა-

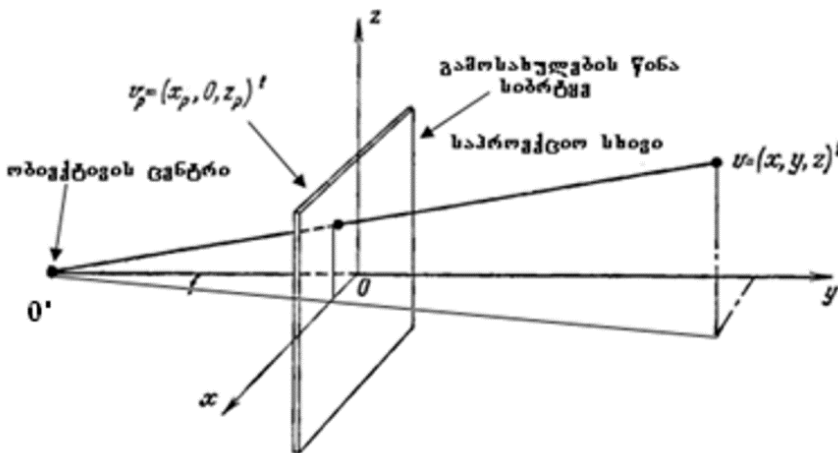
ხულების სიბრტყის ერთ წერტილში. ამგვარად, 2D გამოსახულების თითოეულ წერტილს 3D სივრცეში შეესაბამება ამ წერტილით და ობიექტივის ცენტრით განსაზღვრული წრფე, რომელზეც უნდა მდებარეობდეს ობიექტის შესაბამისი წერტილი. აქედან გამომდინარე, გამოსახულების მოცემული წერტილი ცალსახად არ განსაზღვრავს ობიექტზე შესაბამისი წერტილის მდებარეობას. შესაბამისად, 3D სცენის 2D გამოსახულების ფორმირებისას იკარგება სცენის სამგანზომილებიანი სტრუქტურის შესახებ მნიშვნელოვანი ინფორმაცია.

ზემოაღნიშნული განაპირობებს შემდეგი 2 ფუნდამენტური ამოცანის გადაწყვეტის აუცილებლობას:

- 3D ობიექტის ნებისმიერი მოცემული წერტილისთვის 2D გამოსახულებაზე მისი პროექციის მდებარეობის განსაზღვრა;
- 2D გამოსახულების ნებისმიერი მოცემული წერტილისთვის იმ წრფის განსაზღვრა, რომელზეც უნდა იდოს 3D ობიექტის შესაბამისი წერტილი.

ამ ამოცანების გადაწყვეტა მოითხოვს პირდაპირი და უკუპროექციული გარდაქმნების შესაბამისი თანაფარდობების განსაზღვრას. ამისთვის განვიხილოთ 3D სცენის 2D სიბრტყეზე პერსპექტიული პროექტირების ამოცანა 3.3 სურათზე წარმოდგენილი გამოსახულების ფორმირების მარტივი მოდელის საფუძველზე, სადაც $v(x, y, z)^t$ წერტილია 3D სივრცეში, $v_p(x_p, y_p, z_p)^t$ მისი პროექციაა გამოსახულების წინა სიბრტყეზე, ხოლო f ობიექტივის ფოკუსური მანძილია. გამოსახულების ფორმირების პროცესის განხილვა უფრო მოსახერხებელია გამოსახულების წინა სიბრტყეზე, ვიდრე ნამდვილ სიბრტყეზე.

რომელიც დაკვირვების ობიექტიდან ობიექტივის უკან მდებარეობს. ამასთან, ნამდვილ სიბრტყეზე ობიექტის გამოსახულება, განსხვავებით წინა სიბრტყისგან, გადაბრუნებულია, თუმცა გამოსახულებების განზომილება ორივე სიბრტყეზე ერთნაირია. გამოსახულების წინა სიბრტყე წარმოსახვითი სიბრტყეა, რომელიც ობიექტივის ცენტრიდან f მანძილითაა დაშორებული ობიექტის მიმართულებით.



სურ. 3.3

აღმოჩნდა, რომ სურათზე მოცემული მარტივი შემთხვევისთვის, სადაც y ღერძი კამერის ოპტიკურ ღერძს ემთხვევა და გამოსახულების სიბრტყის მართობულია, პირდაპირი პროექციული გარდაქმნის ფორმულების განსაზღვრისთვის საკმარისია განვიხილოთ საპროექციო სხივისა და v და v_p წერტილების კოორდინატებით შექმნილი სამკუთხედების მსგავსება, რომლის საფუძველზეც შესაძლებელია პირდაპირი გარდაქმნის ფორმულების მიღება. კერძოდ, სამკუთხედების მსგავსებიდან გამომ-

დინარე 3D სივრცის $\mathbf{v}(x, y, z)^t$ წერტილის გამოსახულების სიბრტყეზე $\mathbf{v}_p(x_p, y_p, z_p)^t$ პროექციის კოორდინატებისთვის გვექნება შემდეგი განტოლება:

$$\frac{x_p}{f} = \frac{x}{f+y} ; y_p = 0 ; \text{ და } \frac{z_p}{f} = \frac{z}{f+y} ;$$

საიდანაც,

$$x_p = \frac{fx}{f+y} ; y_p = 0 ; \text{ და } z_p = \frac{fz}{f+y} . \quad (3.1)$$

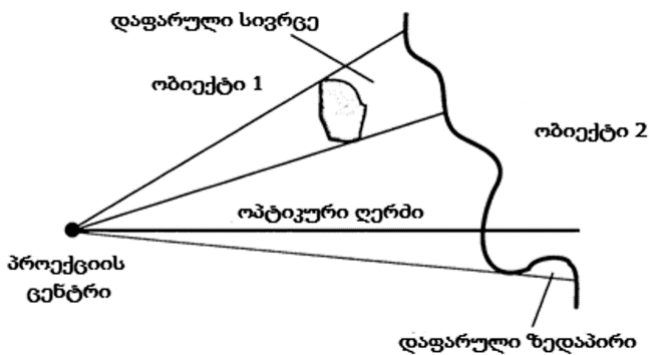
როგორც ვხედავთ, პირდაპირი გარდაქმნის (3.1) განტოლება შესაძლებლობას იძლევა 3D სივრცის ნებისმიერი \mathbf{v} წერტილის \mathbf{v}_p პროექციის კოორდინატები გამოსახულების სიბრტყეზე განისაზღვროს კამერის ფოკუსური მანძილისა და \mathbf{v} წერტილის მსოფლიო კოორდინატების საშუალებით. თუ (3.1) განტოლებიდან განვსაზღვრავთ x ცვლადს:

$$x = \frac{x_p}{f} (y + f) = \frac{x_p}{z_p} z, \quad (3.2)$$

მაშინ ეს უკანასკნელი გვაძლევს კამერის ობიექტივის $(0, -f, 0)^t$ ცენტრსა და გამოსახულების სიბრტყის $(x_p, 0, z_p)^t$ წერტილზე გამავალი წრფის განტოლებას და წარმოადგენს უკუპროექციული პერსპექტიული გარდაქმნის ერთ-ერთ სახეს, რომელიც გამოსახულების მოცემული $(x_p, 0, z_p)^t$ წერტილისთვის 3D სივრცეში განსაზღვრავს იმ წრფის განტოლებას, რომელზეც უნდა იდოს $(x_p, 0, z_p)^t$ წერტილის შესაბამისი ობიექტის წერტილი.

(3.1) განტოლებიდან ჩანს, რომ გამოსახულების სიბრტყეზე ν_p პროექციის კოორდინატები მხოლოდ ν წერტილის მსოფლიო კოორდინატებით და შესაბამისი $f/f + y$ პროპორციულობის კოეფიციენტით განისაზღვრება, რის გამოც შეუძლებელია განისაზღვროს დაკვირვების წერტილიდან ობიექტამდე მანძილი და ასევე ობიექტის ზომები.

მაგრამ ბუნებრივი სცენების უმრავლესობაში ობიექტები გაუმჭვირვალეა. ამ შემთხვევაში დაკვირვებული 3D სივრცე დადის 2D ზედაპირზე. სივრცითი ობიექტის ზედაპირი იმ შემთხვევაში პროეცირდება სრულად გამოსახულების სიბრტყეზე, თუ ობსკურის კამერის მცირე დიამეტრის ხვრელში გამავალ ერთი და იმავე სხივზე ამ ზედაპირის ერთ წერტილზე მეტი წერტილი არ დევს. თუ ეს პირობა არ სრულდება, მაშინ ზედაპირის შესაბამისი ნაწილები უხილავი რჩება. ამ ეფექტს **დაფარვას** უწოდებენ. დაფარული 3D სივრცე მაშინ შეიძლება გაგხადოთ ხილული, თუ სინათლის წერტილოვან წყაროს მოვათავსებთ კამერის მცირე დიამეტრის ხვრელში (სურ. 3.4). ასეთ შემთხვევაში სცენის უხილავი ნაწილები კამერასთან



სურ. 3.4

ახლოს მეოფი ობიექტების ჩრდილში იქნება მოთავსებული. ცხადია, რომ ასეთ შემთხვევაში 3D ობიექტის ფორმის სრული აღდგენა შეუძლებელია. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად იყენებენ გამოსახულებების სტერეოსკოპული ფორმირების მეთოდს.

3.1.2. გამოსახულების ფორმირების სტერეოსკოპული სისტემის მოდელი

3D ფორმის რეკონსტრუქციის ერთ-ერთ ხერხს წარმოადგენს გამოსახულებების ფორმირების სტერეოსკოპული მეთოდი, რომელიც ემყარება სცენის გამოსახულების ფორმირებას დაკვირვების სივრცის სხვადასხვა წერტილში მოთავსებული ორი გადამწოდის საშუალებით. აღსანიშნავია, რომ გამოსახულების ფორმირების ასეთ სისტემას წარმოადგენს ადამიანის მხედველობა.

ზემოთ აღინიშნა, რომ პროექციული გარდაქმნის გამოყენებით გამჭვირვალე ობიექტის გამოსახულების ფორმირებისას ადგილი აქვს მრავალი წერტილის ასახვას გამოსახულების სიბრტყის ერთ წერტილში. აქედან გამომდინარე ეს უკანასკნელი ცალსახად არ ასახავს 3D სივრცეში ობიექტის შესაბამის წერტილს. ასევე საზოგადოდ შეუძლებელია ცალსახად განისაზღვროს სივრცეში ობიექტის რომელიმე ზედაპირის ორიენტაცია მხოლოდ ერთ გამოსახულებაზე დაყრდნობით. მეორე მხრივ, თუ ცნობილია ობიექტის ორიენტაცია, მაშინ შესაძლებელია იმის წინასწარ თქმა, თუ როგორ გამოიყურება ის გამოსახულებაზე, რაც შემდგომ მისი ამოცნობის საშუალებას მოგვცემს. ამგვარად, ზემოაღნიშნული ცალსახობის მისაღწევად საკმარისი არ არის მხოლოდ ერთი გამოსახულება, არამედ საჭიროა კიდევ რაღაც დამატებითი მონაცემები. გაუმჭვირვალე ობიექტის შემთხვევაში ჩვენ ვხედავთ მხოლოდ მის 2D ზედაპირ-

რებს და არა რეალურ 3D ობიექტს. შესაბამისად, დამკვირვებლის მიმართ 3D ობიექტის ზედაპირის წერტილების სივრცითი განლაგების განსაზღვრისთვის საჭიროა ე. წ. **სიღრმის გამოსახულების ფორმირება**, რომელიც გარდა სიკაშკაშის მნიშვნელობისა გამოსახულების ყოველ პიქსელში მოითხოვს აგრეთვე დამატებით ინფორმაციას დაკვირვების წერტილიდან ზედაპირის თითოეულ წერტილამდე მანძილის (სიღრმის) შესახებ. ასეთი დამატებითი ინფორმაციის მიღების სტანდარტულ მეთოდს, რომელიც გამოსახულების თითოეული პიქსელისთვის ცალსახად ასახავს 3D სივრცეში ობიექტის შესაბამისი წერტილის მდებარეობას, წარმოადგენს **სტერეოსკოპია**.

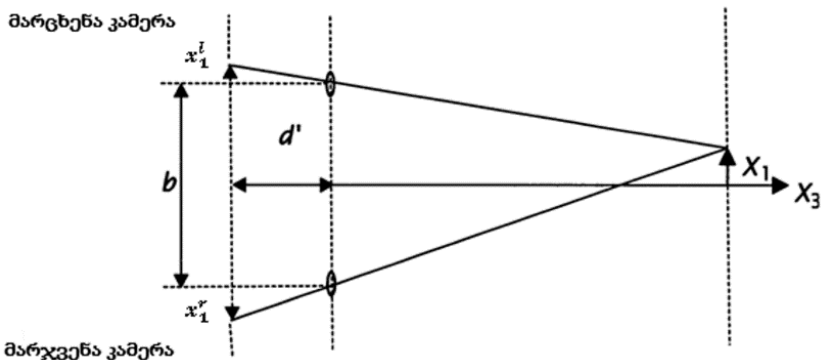
სტერეოსკოპული მეთოდით სიღრმის გამოსახულების, ანუ 3D სცენაზე ობიექტის დაკვირვების წერტილიდან დაშორების განსაზღვრისთვის დამატებითი მონაცემების მისაღებად სცენის გადაღება ხდება დაკვირვების ორი წერტილიდან და შესაბამისად მიიღება სცენის ორი გამოსახულება – სტერეოწყვილი. თუ ცნობილია დაკვირვების ორი წერტილის ურთიერთმდებარეობა, მაშინ **სტერეოსკოპული ტრიანგულაციის** პრინციპზე დაყრდნობით მანძილსაზომის გამოყენებით შეიძლება განისაზღვროს მანძილი (სიღრმე) იმ ზედაპირის თითოეულ წერტილამდე, რომელიც ორივე გამოსახულებაზე მოჩანს.

არსებობს სიღრმის გაზომვის სხვადასხვა მეთოდი, რომლებიც ე. წ. ტრიანგულაციის პრინციპზეა დამყარებული. კერძოდ, **სტერეოსკოპია**, **აქტიური ტრიანგულაცია**, **სიღრმის განსაზღვრა ფოკუსირებით**, **კონფოკალური მიკროსკოპია** და სხვ.

3.1.3. სიღრმის განსაზღვრის სტერეოსკოპული სისტემის მოდელი

სიღრმის აღქმის მარტივი სტერეოსკოპული სისტემის გეომეტრიული მოდელი წარმოდგენილია 3.5 სურათზე. სისტემა შედგება ორი, ერთმანეთთან ახლოს განლაგებული კამერისგან, რომელთა ოპტიკური ღერძები ერთმანეთის პარალელურია. კამერების გამოსახულების (სტერეოგამოსახულებების) სიბრტყეები ამ მოდელში კომპლანარულია (ერთ სიბრტყეში მდებარეობს). ათვლის სისტემის კოორდინატთა სათავედ აღებულია კამერების ობიექტივების ცენტრების შუამართებული წრფის, ე. წ. **ბაზისის სიგრძის შუა წერტილი**. სიღრმის აღქმის ასეთი სისტემა დამახასიათებელია მრავალი ბიოლოგიური ორგანიზმისათვის.

განსაზღვრება 3.1. *3D სცენის სტერეოსკოპული აღქმისას დაკვირვების წერტილებში მოთავსებული კამერების ოპტიკურ ღერძებს შორის მანძილის \mathbf{b} ვექტორს სტერეოსკოპული ბაზისი ეწოდება.*



სურ. 3.5

სცენის ობიექტზე დაკვირვება ერთმანეთისგან **b** ბაზის ვექტორით დაშორებული კამერებიდან იძლევა შესაბამისად დაკვირვების სხვადასხვა კუთხეს. ამ კუთხეებს შორის განსხვავების გამო გამოსახულებების სიბრტყეზე ფორმირდება სცენის წერტილების ერთმანეთის მიმართ წანაცვლებული ორი პროექცია.

განსაზღვრება 3.2. *სცენის წერტილის პროექციებს სტერეოგამოსახულებების სიბრტყეზე შეუღლებული წყვილი ეწოდება.*

3.5 სურათზე წარმოდგენილ შემთხვევაში x_1^I და x_1^J წარმოადგენენ სცენის X_1 წერტილის პროექციებს შესაბამისად მარჯვენა და მარცხენა კამერების გამოსახულებების სიბრტყეებზე. შესაბამისად, ისინი შეუღლებული წყვილია.

განსაზღვრება 3.3. *სცენის ობიექტზე ორი წერტილიდან დაკვირვების შედეგად გამოსახულებების სიბრტყეზე ფორმირებული პროექციების მდებარეობებს შორის განსხვავებას დისპარატულობა ან პარალაქსი ეწოდება.*

სწორედ დისპარატულობის სიდიდის საფუძველზე აღიქვამს დამკვირვებელი მის მიმართ სცენის ობიექტების სიღრმეს (დაშორებას). პარალაქსი წარმოადგენს ვექტორულ სიდიდეს და იგი **b** სტერეოსკოპული ბაზისის პარალელურია. შესაბამისად, თუ ორივე კამერა ზუსტად არის ორიენტირებული ობიექტზე, მაშინ დამკვირვებლისთვის პარალაქსის მიმართულება უკვე წინასწარაა ცნობილი, მაგრამ პარალაქსის გამოთვლა ყოველთვის არაა შესაძლებელი. კერძოდ, თუ გამოსახულების რომელიმე სექტორში სტერეობაზისის მიმართულებით სიკაშკაშის

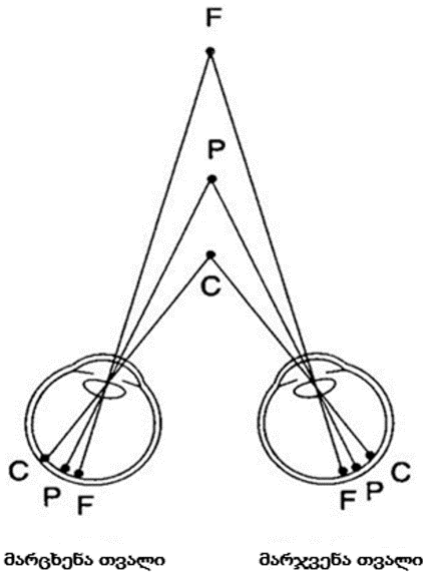
დონეების ცვლილების რაიმე ნიშანი არ ჩანს, მაშინ პარალაქსის გამოთვლა შეუძლებელია.

3.5 სურათზე მოცემულ შემთხვევაში სცენის ობიექტზე დაკვირვების კუთხეებს შორის განსხვავება უმნიშვნელოა. დისპარატულობის სიდიდე p კი ტოლია:

$$p = x_1^r - x_1^l = d' \frac{X_1 + b/2}{X_3} - d' \frac{X_1 - b/2}{X_3} = b \frac{d'}{X_3}, \quad (3.3)$$

სადაც, x_1^r და x_1^l ობიექტის X_1 წერტილის პროექციებია შესაბამისად მარჯვენა და მარცხენა კამერების გამოსახულებების სიბრტყეებზე, X_3 მანძილია კამერის ობიექტივიდან ობიექტამდე კოორდინატთა Z ღერძის გასწვრივ, ხოლო d' – მანძილი გამოსახულების სიბრტყესა და კამერის ობიექტივს შორის, ანუ f ფოკუსური მანძილი. როგორც ვხედავთ, დისპარატულობის სიდიდე p უკუპროპორციულია X_3 მანძილის (ნულის ტოლია უსასრულოდ დაშორებული ობიექტისთვის) და პროპორციულია b სტერეოსკოპული ბაზისის და კამერების f ფოკუსური მანძილის (დაშორებული ობიექტებისთვის $d' \approx f$). ამგვარად, ობიექტის დაშორების ზრდასთან ერთად კამერიდან ობიექტამდე მანძილის განსაზღვრა უფრო რთული ხდება. ამასთან, სცენის ობიექტის პარალაქსური წანაცვლება (დისპარატულობის სიდიდე) მით მეტია, რაც უფრო ახლოსაა ობიექტი კამერასთან. 3.6 სურათზე წარმოდგენილია ადამიანის მხედველობის მარცხენა და მარჯვენა ანალიზატორებზე ფორმირებული 3D სივრცის C , F და P წერტილების სტერეოგამოსახულებები. ამასთან, P ბიფიქსაციის (ინტერესის) წერტილია და წარმოადგენს ანალიზატორების მონოკულარული ხედვის ღერძების გადაკვეთის წერტილს. C წერტილი ანალიზატორებთან უფრო

ახლოსაა, ვიდრე ბიფიქსაციის P წერტილი, ხოლო F წერტილი კი უფრო შორს. როგორც ვხედავთ, C წერტილის სტერეოგამოსახულებებს შორის დისპარატულობის სიდიდე უფრო დიდია, ვიდრე F წერტილის.



სურ. 3.6

თუ (3.3) განტოლებას ზოგად სახეში ჩავწერთ, მაშინ გვექნება:

$$x^r - x^l = b \frac{f}{z} ; \tag{3.4}$$

აქედან კი შესაძლებელია განისაზღვროს Z მანძილი სტერეოსისტემის ბაზური სიბრტყიდან სივრცითი ობიექტის (X, Y, Z) წერტილამდე. კერძოდ, (3.4) განტოლებიდან გვექნება:

$$Z = \frac{bf}{x^r - x^l} ;$$

როგორც ვხედავთ, სცენის წერტილის დამკვირვებლიდან Z დაშორების – სიღრმის გამოსათვლელად საჭიროა სტერეოგამოსახულებებზე მის შესაბამის სტერეოწყვილებს – შეუღლებულ წყვილებს შორის დისპარატულობის სიდიდისა და ოპტიკური სისტემის კალიბრაციის პროცედურით მიღებული პარამეტრების ცოდნა. თუმცა იმის დადგენა, რომ სცენის წერტილებსა და მათ შესაბამის შეუღლებულ წყვილებს შორის ნამდვილად არსებობს შესაბამისობა, საზოგადოდ ადვილ ამოცანას არ წარმოადგენს.

თუ სცენის თითოეული წერტილისთვის ცნობილია მისი კამერის სიბრტყიდან დაშორება, მაშინ შესაძლებელია **სიღრმის რუკის – სიღრმის გამოსახულების** (range image) მიღება. ინტენსიობის გამოსახულებისგან განსხვავებით იგი წარმოადგენს გამოსახულებას, რომლის თითოეული პიქსელის მნიშვნელობა წარმოადგენს გადამწოდის საშუალებით გაზომილი მანძილის ფუნქციას, ანუ მანძილს კამერის სიბრტყიდან სცენის შესაბამის წერტილამდე.

სიღრმის რუკის მიღება შეიძლება როგორც სპეციალური სიღრმის კამერის, ისე სტერეოწყვილების გამოსახულებების საშუალებით. ამ უკანასკნელ შემთხვევაში სტერეოწყვილის ერთი გამოსახულების ნებისმიერი წერტილისთვის მეორე სტერეოწყვილის გამოსახულებაზე იძებნება მისი შესაბამისი შეუღლებული წერტილი. შემდეგ, ტრიანგულაციის მეთოდის გამოყენებით სტერეოწყვილებზე ნაპოვნი ყველა შეუღლებული წყვილისთვის 3D სივრცეში განისაზღვრება მათი შესაბამისი სივრცითი წერტილების კოორდინატები. ამ კოორდინატების

საშუალებით კი განისაზღვრება მანძილი ობიექტიდან კამერის ბაზურ სიბრტყემდე.

სცენის სიღრმის გაზომვა ასევე შესაძლებელია თუ სტერეოსკოპულ სისტემაში ერთ-ერთი კამერის ნაცვლად სინათლის წყაროს გამოვიყენებთ. ასეთ შემთხვევაში სცენის სიღრმის სურათის რეკონსტრუქციისთვის საჭიროა მიღებული გამოსახულების თითოეული პიქსელისთვის განისაზღვროს მასზე განათების (სხივების) დაცემის მიმართულება. ფაქტობრივად ეს მონაცემები დისპარატულობის შესახებ მონაცემების ეკვივალენტურია. სიღრმის განსაზღვრის ასეთ მეთოდს **აქტიური ტრიანგულაცია** ეწოდება.

რეალურ ოპტიკურ სისტემებს სიღრმის აღქმის შეზღუდული ველი აქვს. ეს იმას ნიშნავს, რომ 3D ობიექტის მკაფიო გამოსახულების მიღება მხოლოდ იმ შემთხვევაში ხდება, როცა მისი დაშორება კამერიდან – ანუ სიღრმე რაღაც გარკვეულ საზღვრებში მერყეობს. ამ საზღვრების გარეთ გამოსახულება უკვე ბუნდოვანი ხდება. სწორედ ამ პრინციპს ემყარება **ფოკუსის საშუალებით სიღრმის განსაზღვრის** მეთოდები. აღნიშნული მიდგომა ტრიანგულაციის მეთოდისთვის დამახასიათებელი ყველა ძირითადი თვისებით ხასიათდება. ერთადერთი განსხვავება იმაში მდგომარეობს, რომ აქ ორი სხივის ნაცვლად ბევრი სხივი გამოიყენება. ეს მიდგომა არ გამოდგება მოცულობითი გამოსახულებების ფორმირებისთვის, რადგანაც ამ დროს ოპტიკური ღერძის მიმართულებით განლაგებული დაკვირვების ობიექტისთვის დამახასიათებელი სტრუქტურები ქრება – არ ჩანს. ასეთი მეთოდები განსაკუთრებით გამოსადეგია წვრილი დეტალების შემცველი გაუმჭვირვალე ზედაპირების, მაგალითად, მეტალის დამუშავებული ზედაპირების სტრუქტურის განსაზღვრისათვის. აღნიშნული მეთოდი იმ შემთხვევაში მუშაობს, თუ ზედაპირი წვრილ დეტალებს შეიცავს.

საწინააღმდეგო შემთხვევაში გამოიყენება განათების კონფოკალური მეთოდი. ასეთი მიდგომის საჭიროება არსებობს მასალათმცოდნეობასა და სიცოცხლის შემსწავლელ მეცნიერებებში, სადაც ძალიან მნიშვნელოვანია ობიექტის სტრუქტურის მიკროსკოპული მოცულობითი გამოსახულების ფორმირება. ამისთვის გამოიყენება კონფოკალური მიკროსკოპია. ასეთი მიდგომის მთავარი პრინციპი მდგომარეობს იმაში, რომ ნათდება მხოლოდ ფოკუსურ სიბრტყეში არსებული წერტილები. ეს კი მიიღწევა გამოსახულების სიბრტყეზე ლაზერის სხივების კონის სკანირების გზით, რომლის ფოკუსირება ფოკუსურ სიბრტყეზე მიკროსკოპის ოპტიკური სისტემის მიერ ხდება.

3.14. სტერეოგამოსახულებები

სტერეოგამოსახულებები გამოიყენება მომხმარებლისთვის ინტერაქტულ რეჟიმში სამგანზომილებიანი სცენების წარმოდგენისთვის, რაც კომპიუტერული გრაფიკის ამოცანას წარმოადგენს. იგი კომპიუტერული ხედვის შებრუნებული ამოცანაა ანუ როცა ცნობილია სამგანზომილებიანი ზედაპირის ყველა (X, Y, Z) წერტილი და გრაფიკულმა სისტემამ უნდა მოახდინოს მისი მარცხენა და მარჯვენა გამოსახულებების ფორმირება. (16.3) განტოლებაზე დაყრდნობით, ობიექტის (X, Y, Z) წერტილის x^r და x^l პროექციები ზოგად სახეში შეიძლება ასე ჩაიწეროს:

$$\begin{aligned} x^r &= f \frac{X+b/2}{Z} ; \\ x^l &= f \frac{X-b/2}{Z} ; \\ y_r &= y_l = Yf/Z. \end{aligned} \tag{3.5}$$

(3.5) განტოლებები საშუალებას გვაძლევს გამოვთვალოთ სამგანზომილებიანი სცენის მოცემული (X, Y, Z) წერტილის მარცხენა (x_l, y_l) და მარჯვენა (x_r, y_r) გამოსახულებები ცნობილი b ბაზისის სიგრძისა და f ფოკუსური მანძილის შემთხვევაში. ამგვარად, გრაფიკული სისტემა ახდენს ცალ-ცალკე ორი გამოსახულების ფორმირებას. მომხმარებლისთვის მათი მიწოდება ხდება ორი ხერხიდან ერთერთით: ან ა) სპეციალური ჩაფხუტის მეშვეობით, რომელშიც ჩამონტაჟებული დისპლეებით ერთი გამოსახულება მიეწოდება მარცხენა თვალს, ხოლო მეორე მარჯვენას, ან ბ) ეკრანის მონიტორზე გამოსახულებები მიეწოდება რიგრიგობით დამატებით ფერებთან ერთად, ხოლო მომხმარებელი ამ გამოსახულებებს აკვირდება სხვადასხვა ფერადი ფილტრების მქონე სპეციალური სათვალის საშუალებით.

3.1.5. შესაბამისობის დადგენა სტერეოგამოსახულებებს შორის

სცენის წერტილების სიღრმის სწორად განსაზღვრა შეუძლებელია მანამ, სანამ სტერეოგამოსახულებებზე არ მოხდება შეუძლებელი წერტილების ნიშან-თვისებების მდებარეობის ზუსტად დადგენა. ცხადია, რომ საწინააღმდეგო შემთხვევაში სიღრმის მნიშვნელობებიც არასწორად იქნება განსაზღვრული. შეუძლებელი წყვილების დადგენა კი მათ შორის შესაბამისობის განსაზღვრის გზით ხდება, რის შემდეგაც უკვე შესაძლებელია სცენის წერტილების სიღრმის გამოთვლა.

კროს-კორელაციის მეთოდი. შესაბამისობის დადგენის ერთ-ერთ ტრადიციულ მეთოდს წარმოადგენს **კროს-კორელაციის მეთოდი**, რომელიც ემყარება დაშვებას, რომ სტერეოწყვილის პირველი I_1 გამოსახულების P_1 წერტილისთვის სტერეოწყვი-

ილის მეორე I_2 გამოსახულებაზე უნდა არსებობდეს ისეთი არე, რომელშიც მოიძებნება P_1 -ის შესაბამისი P_2 წერტილი. ძიების არის განზომილება განისაზღვრება გამოსახულებების მისაღებად საჭირო კამერის მომართვის პარამეტრების (მაგალითად, კალიბრაციის პარამეტრების, ეტალონური გამოსახულებების) საფუძველზე. ასეთი არის შიგნით ძიებისას ის P_2 პიქსელი, რომლისთვისაც კროს-კორელაციის ოპერატორს მაქსიმალური გამოძახილი ექნება, ჩაითვლება P_1 პიქსელისთვის საუკეთესო შესატყვის და შესაბამისად, შეუღლებულ პიქსელად. ამის შემდეგ P_1 და P_2 წერტილების წყვილის საშუალებით ტრიანგულაციის მეთოდის გამოყენებით გამოითვლება 3D სივრცის შესაბამისი წერტილის კოორდინატები. სიღრმე კი გამოითვლება როგორც მანძილი კამერის ბაზურ სიბრტყემდე.

სიმბოლოების შედარების მეთოდი. სტერეოგამოსახულებებს შორის ნიშან-თვისებათა შესაბამისობის დადგენის მეორე ხერხს წარმოადგენს სიმბოლოების შედარების მეთოდი. იგი გულისხმობს ერთ სტერეოგამოსახულებაზე რომელიმე ნიშან-თვისების მოძიებას და შემდეგ მის შედარებას მეორე სტერეოგამოსახულების ნიშან-თვისებასთან. აქ ხშირად გამოყენებული ტიპური ნიშან-თვისებებია: შეერთებები, მონაკვეთები და არეები გამოსახულებაზე. აღნიშნული ნიშან-თვისებების შედარების პროცესი მათ შორის შესაბამისობის დადგენის მიზნით შეიძლება აღიწეროს ჩვენ მიერ უკვე განხილული შეთანხმებული მარკირების ენაზე (§1.8).

ვთქვათ, გამოსახულების ნაწილების P სიმრავლის როლში განიხილება I_1 პირველი გამოსახულების ნიშან-თვისებათა სიმრავლე, ხოლო ჭდეების L სიმრავლის როლში კი I_2 მეორე გამოსახულების ნიშან-თვისებათა სიმრავლე. თუ გამოსახულე-

ბაზე ერთზე მეტი ტიპის ნიშან-თვისებაა, მაშინ თითოეულ ნაწილს შესაბამისი ჭდე უნდა ჰქონდეს. უფრო მეტიც, სივრცითი R_p მიმართებები P სიმრავლეზე უნდა ემთხვეოდეს სივრცით R_L მიმართებებს L სიმრავლეზე. ამასთან, მაგალითად, თუ ერთ გამოსახულებაზე 2 ტიპის შეერთება ერთმანეთთან მონაკვეთითაა დაკავშირებულია, მაშინ ასევე მონაკვეთით უნდა იყოს ერთმანეთთან დაკავშირებული შესაბამისი შეერთებები მეორე გამოსახულებაზე. თუ შესადარებელ ნიშან-თვისებებს წარმოადგენენ მონაკვეთები, მაშინ შედარებისთვის შეიძლება გამოყენებული იყოს პარალელურობისა და კოლინეარულობის მიმართებები. ხოლო არეების შედარებისთვის შეიძლება გამოყენებული იყოს არეების მომიჯნავეობის მიმართება.

სტერეოგამოსახულებების შედარებისას შესაბამისობის დადგენის პროცესში შეიძლება წარმოიშვას რიგი პრობლემა, მაგალითად, როცა ერთ-ერთ გამოსახულებაზე შეუღლებული ნიშან-თვისების აღმოჩენა შეუძლებელი ხდება ერთ-ერთი დაკვირვების წერტილის წანაცვლების გამო, ან როცა ერთ გამოსახულებაზე ნიშან-თვისებები ჩანს, ხოლო მეორეზე დაფარულია რომელიმე ზედაპირის მიერ, და ა. შ. ამგვარად, სიმბოლოების შედარების პროცედურით ვერ იძებნება საუკეთესო შეთანხმებული მარკირება, არამედ ხდება შედარების მიახლოებითი პროცედურის გამოყენება. ამიტომ შეუღლებულ ნიშან-თვისებათა შორის შესაბამისობის დადგენა სრულად ვერ ხერხდება, რის გამოც სიდრმის მნიშვნელობები მიიღება 3D სივრცის წერტილების მხოლოდ პატარა სიმრავლისთვის, შესაბამისობა მონაკვეთებს შორის განისაზღვრება მხოლოდ რამდენიმე წერტილის დონეზე, ვერ ხერხდება შესაბამისობის განსაზღვრა არეების ყველა წერტილისთვის. შედეგად მიიღება მეჩხერი სიდრმის რუკა, ანუ მეჩხერი მატრიცა, რომელშიც ელემენტების მნიშვნელობები ყველგან განსაზღვრული არაა. ასეთი სიდრმის

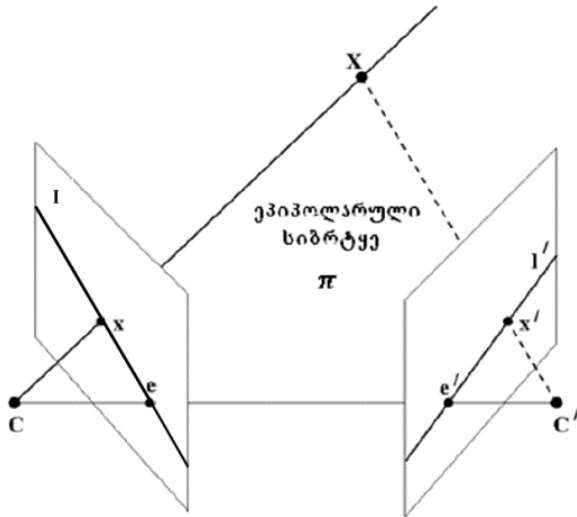
რუკიდან კორექტული სიდრმის რუკის – არამენხერი მატრიცის მისაღებად მატრიცის ცნობილ სიდიდეებს შორის მნიშვნელობების განსაზღვრისთვის იყენებენ წრფივი ინტერპოლაციის მეთოდს.

სიმბოლოების შედარების მეთოდის გამოყენებისას ცდომილებები ბევრ ეტაპზე წარმოიშობა. ამიტომ პრაქტიკაში უფრო ფართო გამოყენება აქვს კროს-კორელაციის მეთოდს.

ეპიპოლარული შეზღუდვა. სტერეოგამოსახულებების შედარების ამოცანა შეუდლებული ნიშან-თვისებების დადგენის მიზნით მარტივდება, თუ ცნობილია კამერების ურთიერთ ორიენტაცია. ასეთ შემთხვევაში პროეცირების გეომეტრიული თვისებები არ არის დამოკიდებული სცენის სტრუქტურაზე და დამოკიდებულია მხოლოდ კამერების შიგა პარამეტრებზე და მათ ურთიერთმდებარეობაზე (გარე პარამეტრებზე). მათ შეისწავლის **ეპიპოლარული გეომეტრია (epipolar geometry)**.

საერთოდ, ზოგადი სახის სტერეოსისტემის კონფიგურაცია უშვებს კამერების ნებისმიერ განლაგებას და ორიენტაციას. მაგრამ ამასთან ერთად თითოეული კამერის ხედვის ველი უნდა მოიცავდეს სცენის მნიშვნელოვან ნაწილს. აქედან გამომდინარე, ეპიპოლარულ გეომეტრიაზე დაყრდნობით შეიძლება ისეთი ეპიპოლარული კონფიგურაციის სტერეოსისტემის შექმნა, რომელიც შეუდლებული წყვილების ძიების პროცესს გაამარტივებს. ასეთი სტერეოსისტემა წარმოდგენილია 3.7 სურათზე, სადაც C და C' კამერების ოპტიკური ცენტრებია, ხოლო მათი შემაერთებელი წრფე კი სტერეოსისტემის ბაზისი. როგორც ვხედავთ, 3D სივრცის X წერტილის კოორდინატებს მარცხენა და მარჯვენა კამერების გამოსახულებების სიბრტყეზე შესაბამისად წარმოადგენენ x და x' პროექციები და ისმის კითხვა: რა მიმართება არსებობს ამ შეუდლებულ წერტილებს

შორის? როგორც სურათიდან ჩანს, სივრცის X წერტილი, მისი x და x' პროექციები და კამერების C და C' ოპტიკური ცენტრები კომპლანარულია.



სურ. 3.7

განსაზღვრება 3.6. სიბრტყეს, რომელიც გადის $3D$ სივრცის X წერტილზე, მის x და x' სტერეოპროექციებზე და კამერების C და C' ოპტიკურ ცენტრებზე, ეპიპოლარული სიბრტყე (epipolar plane) ეწოდება.

დავუშვათ, რომ ჩვენ ვიცით X წერტილის მხოლოდ x პროექციის მდებარეობა მარცხენა კამერის გამოსახულების სიბრტყეზე და გვაინტერესებს, სად მდებარეობს მისი შეუღლებული (უცნობი) x' პროექცია მარჯვენა კამერის გამოსახულების სიბრტყეზე (სურ. 3.7). ეპიპოლარული სიბრტყის განსაზღვრებიდან გამომდინარე x' პროექციის მაფორმირებელი სხივი π

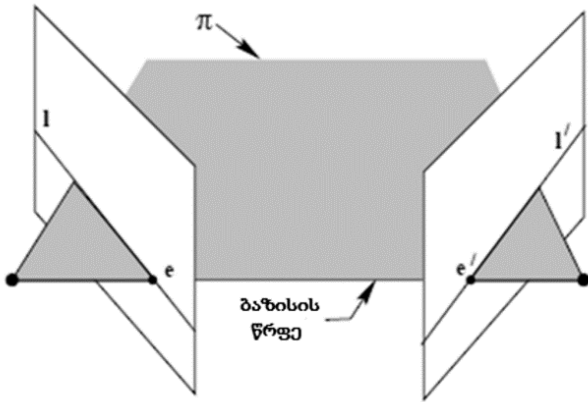
ეპიპოლარულ სიბრტყეზე დევს, ისევე როგორც x პროექციის. აქედან გამომდინარე, x' პროექცია π ეპიპოლარული სიბრტყის და მარჯვენა კამერის გამოსახულების სიბრტყის გადაკვეთის I' წრფეზე უნდა მდებარეობდეს. ეს წრფე წარმოადგენს x პროექციის მაფორმირებელი სხივის პროექციას მარჯვენა კამერის გამოსახულების სიბრტყეზე. I' წრფეს x პროექციის შესაბამისი ეპიპოლარული წრფე ეწოდება. ანალოგიურად გვექნება მარჯვენა კამერის შემთხვევაში. კერძოდ, როცა ვიცით X წერტილის x' პროექციის მდებარეობა მარჯვენა კამერის გამოსახულების სიბრტყეზე და ვეძებთ უცნობი x პროექციის მდებარეობას მარცხენა კამერის გამოსახულების სიბრტყეზე. ზემომოყვანილი მსჯელობის მსგავსად მივიღებთ, რომ უცნობი x პროექცია x' პროექციის შესაბამის და მარცხენა კამერის გამოსახულების სიბრტყეზე მყოფ I ეპიპოლარულ წრფეზე უნდა მდებარეობდეს. ამგვარად, 3D სივრცის X წერტილის x და x' პროექციების მდებარეობა სტერეოგამოსახულებებზე შეზღუდულია I და I' ეპიპოლარული წრფეებით. ეს მოვლენა ცნობილია როგორც ეპიპოლარული შეზღუდვა. როგორც ვხედავთ, ეპიპოლარულ გეომეტრიაზე დამყარებულ სტერეოსისტემაში შეუღლებული წერტილების ძიების ამოცანა 2D სივრციდან დაიყვანება ერთგანზომილებიან სივრცეზე, ანუ ეპიპოლარულ წრფეზე.

ზემოთქმულის საფუძველზე შეიძლება შემოვიტანოთ ეპიპოლარული სიბრტყის ზოგადი და წრფის შემდეგი:

განსაზღვრება 3.7. *სიბრტყეს, რომელიც გადის სტერეოსისტემის ბაზაზე და კვეთს სტერეოგამოსახულების სიბრტყეებს შესაბამის ეპიპოლარულ წრფეებზე, ეპიპოლარული სიბრტყე ეწოდება.*

განსაზღვრება 3.8. ეპიპოლარული სიბრტყის და სტერეოგამოსახულების სიბრტყის გადაკვეთის წრფეს, ეპიპოლარული წრფე ეწოდება.

ეპიპოლარული სიბრტყე (π) და წრფეები (Ie და $I'e'$) წარმოდგენილია 3.8 სურათზე.

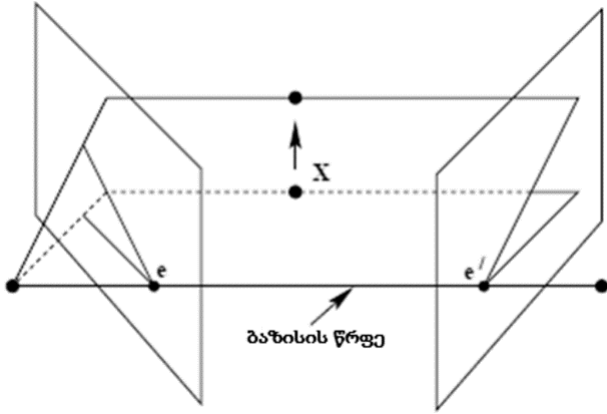


სურ. 3.8

ეპიპოლარული სიბრტყის განსაზღვრებიდან გამომდინარეობს, რომ 3D სივრცეში X წერტილის მდებარეობის ცვლილებასთან ერთად იცვლება ეპიპოლარული სიბრტყის მდებარეობაც, კერძოდ, ის იწვევს „ბრუნვას“ ბაზისის წრფის ირგვლივ (სურ. 3.9).

როგორც 3.8 სურათიდან ჩანს, ეპიპოლარული სიბრტყე სტერეოსისტემის ბაზისის კვეთს e და e' წერტილებში, რომლებიც ამავე დროს ეპიპოლარულ წრფეებზე მდებარეობენ. შესაბამისად გვაქვს შემდეგი:

განსაზღვრება 3.9. სტერეოსისტემის ბაზის წრფის და გამოსახულების სიბრტყის კვეთის წერტილს, ეპიპოლი ეწოდება.



სურ. 3.9

იმისთვის, რომ სტერეოგამოსახულებებიდან ავაგოთ სცენის ზუსტი მოდელი, საჭიროა მისი წერტილების სიღრმის ზუსტად გამოთვლა. ეს კი თავის მხრივ მოითხოვს შეუღლებული წყვილების მდებარეობის ზუსტად განსაზღვრას. იმისთვის, რომ შეუღლებული წყვილების ძიების პროცესი გაადვილდეს, ზუსტად იყოს განსაზღვრული მათი მდებარეობა, საჭიროა სტერეოგამოსახულებები ერთმანეთის მიმართ ისე მოვმართოთ (გაუსწოროთ), რომ ყველა ეპიპოლარული წრფე შესაბამისი გამოსახულების გვერდების (ძირითადადში იღებენ ჰორიზონტალურ გვერდებს) პარალელური იყოს. ასეთ შემთხვევაში, მეორე კამერის გამოსახულებაზე შეუღლებული წერტილი იმავე სტერიქონზე იქნება, რომელზეც ის არის პირველი კამერის გამოსახულებაზე. სტერეოგამოსახულებების მომართვის ამ პროც-

ესს რექტიფიკაცია-გასწორება (stereo rectification) ეწოდება. ამის შემდეგ უკვე შეიძლება ძიების პროცესის დაწყება.

3.2. მანძილსაზომები და სიღრმის გამოსახულებები

მანძილსაზომები წარმოადგენენ მოწყობილობებს, რომელთა საშუალებით შესაძლებელია დაკვირვების წერტილიდან მანძილის – სიღრმის გაზომვა სამგანზომილებიანი სცენის ობიექტების ზედაპირების ელემენტებამდე. მანძილსაზომით მიღებული გამოსახულება – **სიღრმის გამოსახულება** შეიცავს მონაცემებს უშუალოდ ობიექტის ზედაპირის ფორმის შესახებ. ასეთ ხელსაწყოს წარმოადგენს ლაზერული მანძილსაზომი – **ლიდარი** (LIDAR – Light Detection and Range – სინათლის აღმოჩენა და სიღრმის განსაზღვრა). მანქანური ხედვის სისტემებში ლიდარების საშუალებით ხდება 3D ზედაპირების სიღრმის გამოსახულების ფორმირება.

ლიდარის შემადგენლობაში შედის ლაზერული გამომსხივებელი, სკანერი და მიმღები. ლიდარი ამპლიტუდურ-მოდულირებული ლაზერული სხივის საშუალებით ანათებს 3D ობიექტის ზედაპირს და მიმღების საშუალებით აღიქვამს მისგან არეკლილ სიგნალს. შესაბამისად, მანძილი ობიექტის ზედაპირამდე იზომება გამოსხივებულ და არეკლილ სიგნალებს შორის ფაზათა სხვაობით (ფაზური წანაცვლებით) ანუ იმ დროზე დაყრდნობით, რომლის განმავლობაშიც ამპლიტუდურ-მოდულირებული ლაზერის სინათლის სხივი გაივლის მანძილს გამოსხივების მომენტიდან ობიექტის ზედაპირამდე და შემდეგ უკან მოძრაობისას მიმდებამდე. აქედან გამომდინარე, მანძილი d სკანერსა და ობიექტის ზედაპირს შორის გამოითვლება ფორმულით:

$$d = \frac{c \times t}{2},$$

სადაც c სინათლის სიჩქარეა, ხოლო t დრო, რომელსაც სინათლის სხივი ხარჯავს გამომსხივებლიდან მიმღებთან მისვლამდე.

ლიდარის ტექნოლოგიაზე დამყარებული **3D ლაზერული სკანერების** მუშაობის პრინციპი. ის ჩვეულებრივი ფოტოკამერის მსგავსია, მაგრამ ამ უკანასკნელისგან განსხვავებით, რომელიც თავის გამოსახულებაზე მხოლოდ ობიექტის ზედაპირზე ნახევარტონების განაწილების სურათს იძლევა, სკანერი გამოსახულების თითოეულ წერტილში ზედაპირამდე მანძილის მნიშვნელობასაც იძლევა, რის საფუძველზეც გამოითვლება ამ წერტილების სივრცითი კოორდინატები. ამგვარად, ლაზერული სკანერების შედეგად ობიექტის თითოეული სკანირებული წერტილისთვის გვექნება მონაცემები მისი სივრცითი X , Y , Z კოორდინატების, არეკვლის ინტენსიობის და ფერის შესახებ. ობიექტის სკანირების შედეგად მიიღება მონაცემების დიდი კრებული, რომელსაც **წერტილების ღრუბელს** უწოდებენ. ეს მონაცემები სკანერის გამოსასვლელზე წარმოდგენილია არასტრუქტურირებული კოორდინატების სახით დეკარტის კოორდინატთა სისტემაში. წერტილების ღრუბლების ყველაზე მეტად გავრცელებული ფორმატებია: TXT, IGS და ASCII. ასეთნაირად მიღებული მონაცემები შემდგომ გამოიყენება 3D ობიექტების ფორმის რეკონსტრუქციისთვის. მაგრამ ობიექტის ზუსტი 3D გამოსახულების ფორმირებისთვის ერთი სკანირება საკმარისი არ არის. საჭიროა რამდენიმე სკანირება, თანაც დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან. ამის შემდეგ ხდება დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან სკანირების შედეგად მიღებული მონაცემების დაყვანა ერთ საერთო კოორდინატთა სისტემაზე, რაც გულ-

ისხმობს მიღებული გამოსახულებების ერთმანეთზე მიბმას – შეთავსებას შეთანასწორების გზით, რის შედეგადაც მიიღება ობიექტის ზუსტი 3D სურათი. 3D ლაზერულ სკანერებს ფართო გამოყენება აქვს როგორც მრეწველობაში (დეტალების 3D მოდულების შექმნა, დეტალების ხარისხის შემოწმება, სამრეწველო მეტროლოგია), მშენებლობაში, ასევე, ვიზუალიზაციის ამოცანებში, ანიმაციაში, რენდერინგში, რელიეფის ციფრული მოდულის შექმნაში, სამედიცინო ვიზუალიზაციაში, არქეოლოგიაში და ა. შ.

3.3. გამოსახულებების მოცულობითი ფორმირების პრინციპები

ყველა ის მეთოდი, რომელსაც შეუძლია დამკვირვებლიდან 3D ობიექტამდე დაშორებების (სიღრმეების) სიმრავლის ერთდროულად გაზომვა, შეიძლება გამოყენებული იქნეს გამოსახულებების მოცულობითი ფორმირებისთვის. მაგრამ, გარდა სიღრმის გამოსახულებების ფორმირების მეთოდებისა, მოცულობითი გამოსახულებების მისაღებად დამატებით საჭიროა კიდევ ორი ბაზური პრინციპის შემოტანა. კერძოდ:

- **განათებულობის შრეებად დაშლა** – გამოსახულებების პროექციული ფორმირებისას ჩვენთვის უცნობია, თუ სცენის რა სიღრმიდანაა მოსული ის განათება, რომელიც გამოსახულების სიბრტყეზე გამოსახულებას იძლევა. ის შეიძლება მოდიოდეს პროექციული სხივის ნებისმიერ წერტილიდან (§3.1.1.). მაგრამ შესაძლებელია, რომ სცენის განათება ისეთნაირად ვარეგულიროთ, რომ სინათლე სიღრმის მხოლოდ გარკვეულ დიაპაზონს ეცემოდეს. ასეთ შემთხვევაში

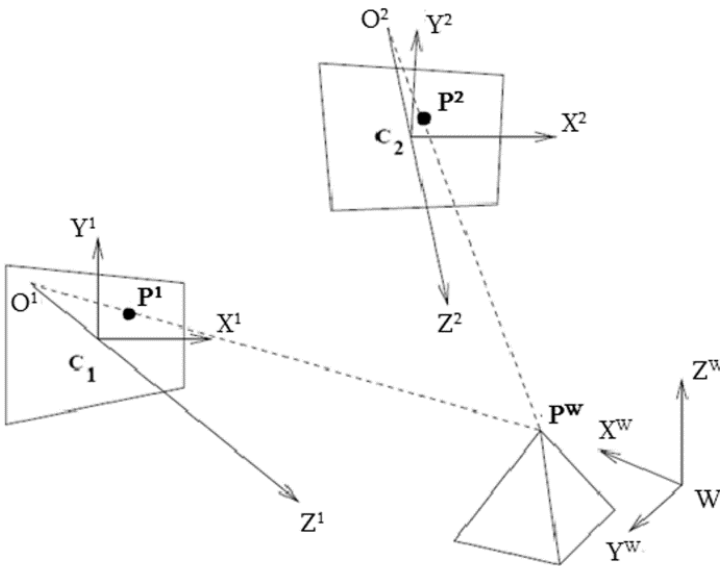
ჩვენთვის უკვე ცნობილი იქნება სცენის რა სიღრმიდან ხდება გამოსახულების სიბრტყის განათება;

- **სიღრმის განსაზღვრა პროექციათა სიმრავლით: ტომოგრაფია** – 3D ობიექტის ცალკეული პროექცია მხოლოდ ნაწილობრივ ინფორმაციას იძლევა მისი მოცულობითი სურათის შესახებ. ამიტომ დაისმის კითხვა, შესაძლებელია თუ არა დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან (ხედვის სხვადასხვა მიმართულებიდან) ცალკეული პროექციების მიღება და შემდეგ მათი გაერთიანებით ობიექტის სრული 3D გამოსახულების მიღება. მეთოდები, რომლებიც პროექციათა სიმრავლის საშუალებით სიღრმის განსაზღვრის შესაძლებლობას იძლევა, ცნობილია როგორც **ტომოგრაფია**.

IV თავი. ობიექტების მდებარეობის (პოზის) განსაზღვრა 3D სივრცეში

4.1. წერტილის 3D კოორდინატების გამოთვლა ზოგადი სახის სტერეოსკოპულ სისტემაში

4.1 სურათზე მოცემულია სტერეოსკოპული სისტემის ზოგადი სქემა. ორივე, C_1 და C_2 კამერა მიმართულია 3D სივრცის ერთი და იმავე მუშა ნაწილისკენ, რომელთანაც დაკავშირებულია მსოფლიო W კოორდინატთა სამგანზომილებიანი სისტემა. 3D სივრცის P წერტილის გამოსახულებებს C_1 და C_2 კამერებზე შესაბამისად წარმოადგენს P_1 და P_2 წერტილები.



სურ. 4.1

სურათიდან ჩანს, რომ მსოფლიო W კოორდინატთა სამგანზომილებიან სისტემაში P^w წერტილის კოორდინატები – $(P_x^w, P_y^w, P_z^w)^t$ შეიძლება გამოითვალოს C_1 და C_2 კამერებზე გამოსახულების მაფორმირებელი ორი, $P^w O_1$ და $P^w O_2$ სხივის გადაკვეთის წერტილის კოორდინატების საშუალებით.

ზოგადი სტერეოსკოპული სქემის მიხედვით (სურ. 4.1) 3D სივრცეში წერტილის კოორდინატების გამოსათვლელად საჭიროა:

- მუშა W კოორდინატთა სივრცეში C_1 კამერის მდებარეობის (პოზის) და ასევე კამერის რამდენიმე შიგა პარამეტრის, მაგალითად, ფოკუსური მანძილის ცოდნა. ყველა ეს პარამეტრი წარმოიდგინება ე. წ. კამერის მატრიცის საშუალებით, რომელიც მათემატიკურად აღწერს გამოსახულების თითოეული P_1 წერტილის ფორმირებისთვის საჭირო სხივს 3D სივრცეში.
- მუშა W კოორდინატთა სივრცეში C_2 კამერის მდებარეობის და შიგა პარამეტრების ცოდნა, ასევე C_2 კამერის მატრიცა.
- შესაბამისობის დადგენა მუშა სივრცის 3D P^w წერტილსა და მის ორ P_1 და P_2 შეუღლებულ 2D გამოსახულებებს შორის.
- P^w წერტილის კოორდინატების გამოთვლის ფორმულა პროექციული $P^w O_1$ და $P^w O_2$ სხივის საშუალებით.

უნდა აღინიშნოს, რომ 4.1 სურათზე მოცემული ორივე კამერა კალიბრირებულია მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემაში. იმ შემთხვევაში, თუ დაკვირვების ობიექტის მოდელი ცნობილია, მაშინ სტერეოსკოპულ სისტემაში წერტილის სამივე კო-

ორდინატის გამოსათვლელად ერთი კამერის გამოყენებაც კი საკმარისია. აღნიშნულის საჩვენებლად დავუშვათ, რომ 4.1 სურათზე არსებული პირამიდის სიმაღლე მოცემულია, ანუ ცნობილია P_z^w კოორდინატი. ეს ნიშნავს, რომ P წერტილის მდებარეობის მიმართ არსებობს შეზღუდვა, იგი უნდა იმყოფებოდეს $z = P_z^w$ სიბრტყეზე. მაშინ, დანარჩენი ორი, x და y კოორდინატების განსაზღვრა შესაძლებელია C_1 კამერიდან წამოსული გამოსახულების მაფორმირებელი სხივის აღნიშნულ სიბრტყესთან გადაკვეთის წერტილის საშუალებით. ამგვარად, მოდელის შესახებ ინფორმაცია უკვე თავისთავად იძლევა იმ შეზღუდვას, რაც საკმარისს ხდის ერთი კამერის გამოყენებას სამგანზომილებიან სივრცეში წერტილის კოორდინატების განსაზღვრისთვის.

4.2. აფინური გარდაქმნები 3D სივრცეში

I თავში ჩვენ განვიხილეთ აფინური გარდაქმნები ორგანზომილებიან სივრცეში. ასეთი გარდაქმნები სამგანზომილებიან სივრცეშიც გამოიყენება. მათ ფართო გამოყენება აქვთ არა მარტო 3D მანქანურ ხედვაში, არამედ რობოტოტექნიკაში და ვირტუალურ რეალობაში. აქაც ძირითად სივრცით გარდაქმნებს წარმოადგენენ გადატანა, მობრუნება, მასშტაბირება და წანაცვლება. ისევე როგორც ორგანზომილებიან შემთხვევაში, აქაც გამოთვლების სიმარტივისთვის გამოვიყენებთ ისეთივე აღნიშვნებს. კერძოდ, მაგალითად, P წერტილის კოორდინატები $[P_x, P_y, P_z]^t$ 3D სივრცეში წარმოდგენილი იქნება ოთხი ერთგვაროვანი $[sP_x, sP_y, sP_z, s]^t$ კოორდინატის სახით, სადაც s არანულოვანი მასშტაბირების კოეფიციენტია და ჩვეულებრივად უდ-

რის 1. ამასთან, წერტილის კოორდინატები ჩაიწერება ვექტორ-სვეტის სახით.

3D სივრცეში აფინური გარდაქმნების განხორციელება მოითხოვს წერტილის მდებარეობის განსაზღვრას სხვადასხვა კოორდინატთა სისტემის მიმართ. განვიხილოთ სცენა (სურ. 4.2), სადაც გვაქვს 4 კოორდინატთა სისტემა:

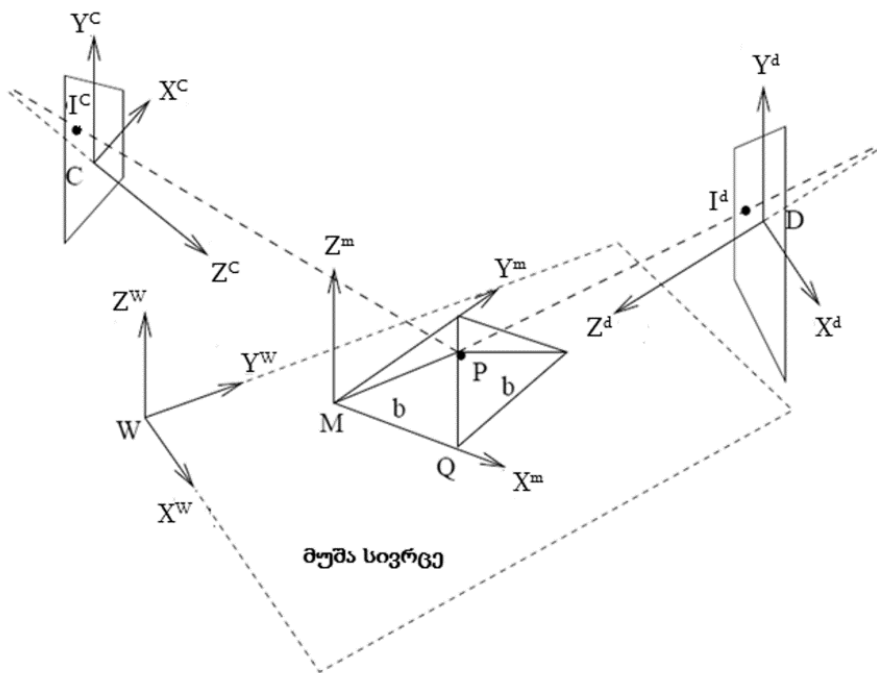
1. მოდელთან (ობიექტთან) დაკავშირებული **M** კოორდინატთა სისტემა;
2. მსოფლიო (მუშა სივრცის) **W** კოორდინატთა სისტემა;
3. **C** გადამწოდის კოორდინატთა სისტემა;
4. **D** გადამწოდის კოორდინატთა სისტემა.

შესაბამისად, სცენის **P** წერტილის (პირამიდის წვეროს) კოორდინატები ამ კოორდინატთა სისტემების მიმართ განსხვავებულია. მაგალითად, **P** წერტილი **C** გადამწოდის კოორდინატთა სისტემიდან **Q** წერტილის მარცხნივ ჩანს, ხოლო **D** გადამწოდის კოორდინატთა სისტემიდან კი **Q** წერტილის მარჯვნივ, ანუ ეს გადამწოდები პირამიდას სხვადასხვა მხრიდან ხედავენ. შესაბამისად, **P** წერტილის კოორდინატებიც ამ ოთხი კოორდინატთა სისტემის მიმართ განსხვავებული იქნება. კერძოდ, **C** გადამწოდის კოორდინატთა სისტემის მიმართ – $\mathbf{P}^C = [P_x^C, P_y^C, P_z^C]$, **D** გადამწოდის კოორდინატთა სისტემის მიმართ – $\mathbf{P}^D = [P_x^D, P_y^D, P_z^D]$, მოდელის **M** კოორდინატთა სისტემის მიმართ – $\mathbf{P}^M = [P_x^M, P_y^M, P_z^M] = [b/2, b/2, \frac{\sqrt{2}}{2}b]$, სადაც b პირამიდის ფუძის გვერდის სიგრძეა, ხოლო მსოფლიო **W** კოორდინატთა სისტემის მიმართ პირამიდის წვეროს კოორდინატები შეიძლება წარმოვადგინოთ როგორც **M** კოორდინატთა სისტემის **W** კოორდინ-

ატოა სისტემის მიმართ გადატანისა და მობრუნების გარდაქმნების კომბინაციის შედეგად მიღებული კოორდინატები:

$$P^W = [P_x^W, P_y^W, P_z^W] = TR \left[\frac{b}{2}, \frac{b}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2} b \right],$$

სადაც **TR** –ით აღნიშნულია გადატანის და მობრუნების გარდაქმნების კომბინაცია.



სურ. 4.2

გადატანა. გადატანის გარდაქმნის შესრულების დროს P^2 წერტილის კოორდინატების მისაღებად მეორე კოორდინატთა

სისტემაში გადატანის ვექტორის x_0, y_0, z_0 კოორდინატები ჯამდება P^1 წერტილის კოორდინატებთან პირველ კოორდინატთა სისტემაში (სურ. 4.1). მაგალითად, იმისთვის, რომ ერთმანეთთან დავაკავშიროთ მოდელის კოორდინატთა სისტემაში არსებული წერტილის კოორდინატები მის კოორდინატებთან მსოფლიო კოორდინატთა სისტემაში, საჭიროა შესრულდეს გადატანის (და ასევე მობრუნების) გარკვეული გარდაქმნა (სურ. 4.2), რომელიც მოკლედ ასე ჩაიწერება:

$$P^2 = T(x_0, y_0, z_0)P^1;$$

მატრიცულ ფორმაში კი მას ასეთი სახე ექნება:

$$P^2 = \begin{bmatrix} P_x^2 \\ P_y^2 \\ P_z^2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^1 \\ P_y^1 \\ P_z^1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

მასშტაბირება. სამგანზომილებიანი მასშტაბირების მატრიცის გამოყენება შესაძლებლობას იძლევა კოორდინატთა სისტემის თითოეული მიმართულების მიმართ გამოვიყენოთ განსხვავებული მასშტაბირების კოეფიციენტები, თუმცა ისინი შეიძლება ერთნაირებიც იყოს. მაგალითად, განზომილების ერთეულების ცვლილებისას ან ერთგვაროვანი მასშტაბირებისას, როცა განსაზღვრული ზომის მქონე მოდელის მიღებაა საჭირო. ზემოთქმული მოკლედ ასე შეიძლება ჩაიწეროს:

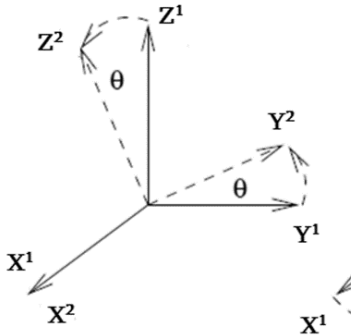
$$P^2 = SP^1 = S(s_x, s_y, s_z)P^1;$$

ხოლო მატრიცულ ფორმაში კი:

$$\begin{bmatrix} P_x^2 \\ P_y^2 \\ P_z^2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x P_x^2 \\ s_y P_y^2 \\ s_z P_z^2 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^1 \\ P_y^1 \\ P_z^1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

მობრუნება. მობრუნების მატრიცა ადვილად იწერება, თუ მობრუნებას ვახდენთ რომელიმე ერთ-ერთი კოორდინატა ღერძის მიმართ. ასეთი მატრიცის ვექტორ-სვეტების კომპონენტებად გახდებიან მობრუნების შედეგად მიღებული (გარდაქმნილი) ერთეულოვანი ბაზისური ვექტორების კომპონენტები. მაგალითად, OZ ღერძის ირგვლივ მობრუნება ორგანზომილებიანი გარდაქმნის მსგავსია (I თავი), მხოლოდ 3D შემთხვევაში მას ემატება წერტილის z კოორდინატი. 4.3 სურათზე ნაჩვენებია თუ როგორ ხდება ერთეულოვანი ბაზისური ვექტორების მდებარეობის ცვლილება შესაბამისად ა) OX , ბ) OY და გ) OZ კოორდინატა ღერძების მიმართ θ კუთხით მობრუნების შემთხვევაში:

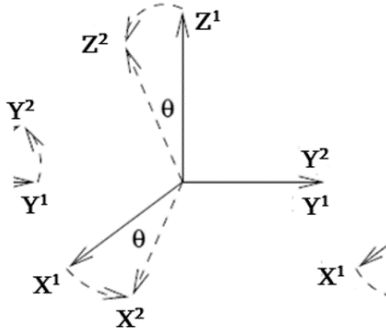
ა)



$$P^2 = R(X^1, \theta)P^1 ;$$

$$\begin{bmatrix} P_x^2 \\ P_y^2 \\ P_z^2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^1 \\ P_y^1 \\ P_z^1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

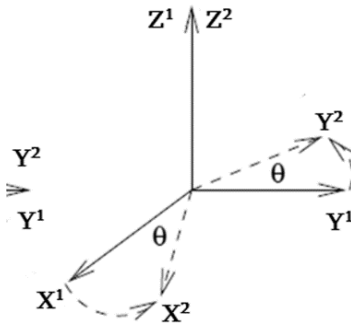
b)



$$P^2 = R(Y^1, \theta)P^1;$$

$$\begin{bmatrix} P_x^2 \\ P_y^2 \\ P_z^2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^1 \\ P_y^1 \\ P_z^1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

b)

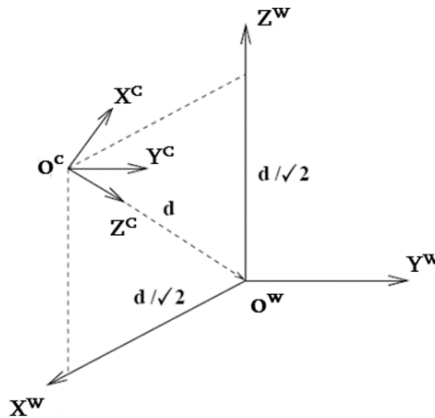


$$P^2 = R(Z^1, \theta)P^1;$$

$$\begin{bmatrix} P_x^2 \\ P_y^2 \\ P_z^2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^1 \\ P_y^1 \\ P_z^1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

სურ. 4.3

განვიხილოთ მაგალითი, რომელშიც მსოფლიო W კოორდინატების კამერის C კოორდინატებში გარდაქმნა მოითხოვს მობრუნებისა და გადატანის გარდაქმნების კომბინაციის შესრულებას (სურ. 4.4). როგორი იქნება ასეთი კომბინირებული გარდაქმნის მატრიცა?



სურ. 4.4

ჯერ ჩავწეროთ R მობრუნების გარდაქმნის მატრიცა. ამისთვის პირველად ჩავწეროთ მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემის ბაზისური ვექტორების კოორდინატები კამერის C კოორდინატებში. გარდაქმნის მატრიცა საშუალებას მოგვცემს მსოფლიო კოორდინატთა სისტემის ნებისმიერი წერტილის კოორდი-

ნატები გარდავქმნათ კამერის კოორდინატთა სისტემაში. კერძოდ:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^W &= \frac{-\sqrt{2}}{2} \mathbf{X}^C + 0\mathbf{Y}^C + \frac{-\sqrt{2}}{2} \mathbf{Z}^C; \\ \mathbf{Y}^W &= 0\mathbf{X}^C + 1\mathbf{Y}^C + 0\mathbf{Z}^C; \\ \mathbf{Z}^W &= \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{X}^C + 0\mathbf{Y}^C + \frac{-\sqrt{2}}{2} \mathbf{Z}^C. \end{aligned} \quad (4.1)$$

(4.1) ფორმულებით მიღებული \mathbf{W} კოორდინატთა სისტემის ბაზისური ვექტორების გარდაქმნილი კოორდინატები შეადგენენ მობრუნების მარტივის, რომელიც აღწერს კამერის \mathbf{C} კოორდინატთა სისტემის \mathbf{W} კოორდინატთა სისტემის მიმართ ორიენტაციას, სამ სვეტს. მაგრამ გარდა მობრუნებისა, \mathbf{W} კოორდინატთა სისტემის წერტილები ისეთნაირად უნდა გადავიტანოთ z ღერძის გასწვრივ, რომ \mathbf{W} კოორდინატთა სისტემის სათავეს \mathbf{C} კოორდინატთა სისტემაში $[0,0,d]^t$ -ს ტოლი კოორდინატები ჰქონდეს. აქედან გამომდინარე, კომბინირებული გარდაქმნის მატრიცას ასეთი სახე ექნება:

$$\mathbf{TR}_W^C = \begin{bmatrix} \frac{-\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{-\sqrt{2}}{2} & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

მობრუნება ნებისმიერი ღერძის ირგვლივ. მობრუნება ნებისმიერი ღერძის მიმართ შეიძლება წარმოდგენილი იყოს (4.2) განტოლების სახით, რომლის r_{ij} კოეფიციენტების მატრიცა ორთონორმირებულია. ეს ნიშნავს, რომ მატრიცის სტრიქონები (და სვეტები) წარმოადგენენ ურთიერთორთოგონალურ ერთეუ-

ლოვან ვექტორებს. ასეთივე თვისებებით ხასიათდება კოორდინატთა ღერძების მიმართ ელემენტარული მობრუნების ყველა მატრიცა.

ნებისმიერი მობრუნება 3D სივრცეში შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც მობრუნება რაღაც \mathbf{A} ღერძის ირგვლივ გარკვეული θ კუთხით. ეს შეიძლება იყოს ნებისმიერი ღერძი, ამასთან ისეთი, რომელიც არ ემთხვევა კოორდინატთა სისტემის რომელიმე ღერძს. ამის საჩვენებლად დავუშვათ, რომ ბაზისური \mathbf{X}^1 ვექტორი გარდაიქმნება მეორე ბაზისურ \mathbf{X}^2 ვექტორში. მობრუნების \mathbf{A} ღერძის საპოვნელად საჭიროა განისაზღვროს \mathbf{X}^1 და \mathbf{X}^2 ვექტორების ვექტორული ნამრავლი. იმ შემთხვევაში, თუ \mathbf{X}^1 ვექტორი მობრუნების დროს არ იცვლება, ეს ნიშნავს, რომ ის ემთხვევა ბრუნვის ღერძს. მოკლედ \mathbf{A} ღერძის ირგვლივ θ კუთხით მობრუნება ასე ჩაიწერება:

$$\mathbf{P}^2 = \mathbf{R}(\mathbf{A}, \theta)\mathbf{P}^1,$$

ხოლო მატრიცულად ასე:

$$\begin{bmatrix} P_x^2 \\ P_y^2 \\ P_z^2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^1 \\ P_y^1 \\ P_z^1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

იმ შემთხვევაში, თუ საქმე გვაქვს მოძრავ მყარ ობიექტთან, რომელიც სივრცეში გადაადგილდება t_1 მომენტიდან t_2 მომენტამდე, ასეთი გადაადგილების შედეგი შეიძლება წარმოვადგინოთ გადატანის ერთი ვექტორისა და მობრუნების ერთი მატრიცის საშუალებით, იმის მიუხედავად, თუ როგორი ტრაექტორია

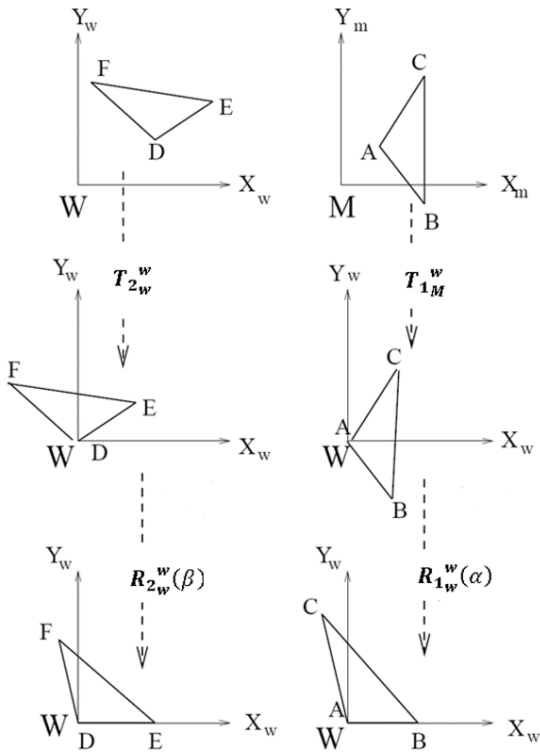
რია ჰქონდა აღნიშნულ ინტერვალში მოძრავ სხეულს. ასეთ შემთხვევაში გადატანისა და მობრუნების პარამეტრების შესანახად საკმარისია ერთგვაროვან კოორდინატებში ჩაწერილი გარდაქმნის ერთი მატრიცა, რომლის 9 ელემენტი შეესაბამება მობრუნებას, ხოლო 3 – გადატანას:

$$\begin{bmatrix} P_x^2 \\ P_y^2 \\ P_z^2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^1 \\ P_y^1 \\ P_z^1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

4.3. ობიექტების შეთანასწორება აფინური გარდაქმნების გამოყენებით

განვიხილოთ აფინური გარდაქმნის გამოყენებით ნებისმიერი მყარი სხეულის მოდელის (კოორდინატებით \mathbf{M} კოორდინატთა სისტემაში) და \mathbf{W} კოორდინატთა სისტემაში გაზომვის შედეგად მიღებული მონაცემებით აგებული ობიექტის სივრცითი შეთანასწორების ამოცანა სამ წერტილს შორის შესაბამისობის დადგენის საფუძველზე. აღნიშნული ამოცანა განვიხილოთ ორი კონგრუენტული, სამკუთხედის ABC მოდელის და გაზომვის შედეგად აგებული DEF სამკუთხედის გამოსახულების შეთანასწორების მაგალითზე. ამოცანა მდგომარეობს ისეთი \mathbf{T}_M^W გარდაქმნის პოვნაში, რომელიც მოდელური ABC სამკუთხედის A , B და C წვეროებს გარდაქმნის DEF სამკუთხედის D , E , F წვეროებად მუშა სივრცეში. ამისთვის ჯერ საჭიროა ისეთი გარდაქმნის განხორციელება, რომ სამკუთხედების A და D წვეროები გადაადგილდეს და შეუთავსდეს (დაემთხვეს) მსოფლიო \mathbf{W} კოორდინატთა სისტემის სათავეს, და შემდეგ, სამკუთხედების ის-

ეთნაირად მობრუნება X^W ღერძის ირგვლივ, რომ ორივე, AB და DE გვერდები მოთავსდეს W კოორდინატა სისტემის XY სიბრტყეზე და ამასთან დაემთხვეს X^W ღერძს (სურ. 4.5). იმისთვის, რომ სამკუთხედები მთლიანად აღმოჩნდნენ XY სიბრტყე-

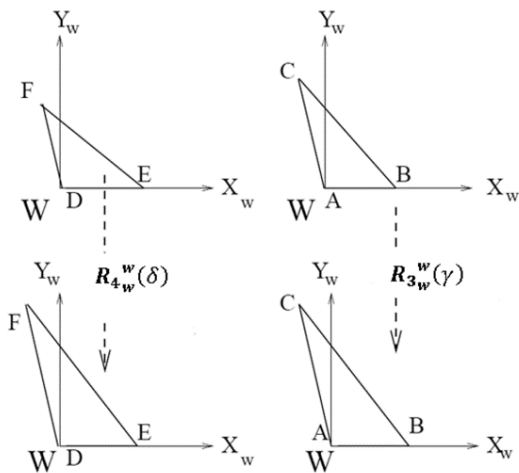


სურ. 4.5

ზე, საჭიროა მათი მობრუნება X^W ღერძის ირგვლივ. სამკუთხედების მობრუნების კუთხის სიდიდე განისაზღვრება კუთხის მნიშვნელობით AC და DF გვერდებსა და XY სიბრტყეს შორის. ასეთი გარდაქმნის შედეგად A და D წვეროების კოორდინატები და აქედან გამომდინარე, B და E , C და F წვეროების კოო-

რდინატებიც ერთმანეთის ტოლი იქნება (სურ. 4.6). გარდაქმნის განტოლება, რომელიც წვეროების შეთავსებას ახორციელებს, ისეთნაირად შეიძლება ჩაიწეროს, რომ მივიღოთ ჩვენთვის სასურველი ისეთი T_M^W გარდაქმნა, რომელიც P_i^M წერტილებს შესაბამის P_i^W წერტილებში ასახავს.

თეორიულად ნებისმიერი სამი წერტილის შეთავსება სრულიად საკმარისია ნებისმიერი ორი კონგრუენტული მყარი სხეულის შეთავსებისთვის, მაგრამ პრაქტიკაში გაზომვისა და გამოთვლების ცდომილების არსებობის გამო ობიექტების შეთავსებისთვის წერტილთა დიდ რაოდენობას იყენებენ.



სურ. 4.6

4.4. კამერის მათემატიკური მოდელი

3D სივრცეში არსებული ობიექტის კამერაზე პროექცირებისას მისი წერტილების კოორდინატების ცვლილების მოდელირება მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემიდან კამერის C კოორდი-

ნატოა სისტემაში გადასვლისას, ასევე პერსპექტიული პროექციონებისას მასშტაბისა და მსოფლიო კოორდინატების ცვლილების აღწერა მოითხოვს **კამერის მოდელის** ფორმალიზებულ წარმოდგენას. აღმოჩნდა, რომ **C** კამერის მათემატიკურ მოდელად შეიძლება აღებული იქნეს პერსპექტიული პროექციის მატრიცა:

$$P^I = C_W^I P^W,$$

რომელიც მატრიცულ სახეში ასე ჩაიწერება:

$$\begin{bmatrix} sP_r^I \\ sP_c^I \\ s \end{bmatrix} = C_W^I \begin{bmatrix} P_x^W \\ P_y^W \\ P_z^W \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^W \\ P_y^W \\ P_z^W \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

სადაც, s მასშტაბირების კოეფიციენტი, ხოლო

$$P_r^I = \frac{[c_{11} \ c_{12} \ c_{13} \ c_{14}] \circ [P_x^W \ P_y^W \ P_z^W \ 1]}{[c_{31} \ c_{32} \ c_{33} \ 1] \circ [P_x^W \ P_y^W \ P_z^W \ 1]},$$

$$P_c^I = \frac{[c_{21} \ c_{22} \ c_{23} \ c_{24}] \circ [P_x^W \ P_y^W \ P_z^W \ 1]}{[c_{31} \ c_{32} \ c_{33} \ 1] \circ [P_x^W \ P_y^W \ P_z^W \ 1]}.$$

აღმოჩნდა, რომ კამერის $[C_W^I]_{3 \times 4}$ მატრიცა წარმოადგენს პერსპექტიული პროექციის მატრიცას, რომელიც მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემის $P^W = [P_x^W, P_y^W, P_z^W]^t$ წერტილს გარდაქმნის 2D I -ური გამოსახულების $P^I = [P_r^I, P_c^I]^t$ წერტილში. სწორედ აღნიშნული მატრიცის პარამეტრები გამოიყენება კოორდინატების ცვლილების მოდელირებისთვის მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემიდან კამერის C კოორდინატთა სისტემაში გადა-

სვლისას, მასშტაბის ცვლილების აღწერისთვის, როგორც პერსპექტიული გარდაქმნის, ისე ობიექტის მსოფლიო კოორდინატების გამოსახულების სტრიქონებისა და სვეტების კოორდინატებში გარდაქმნისთვის.

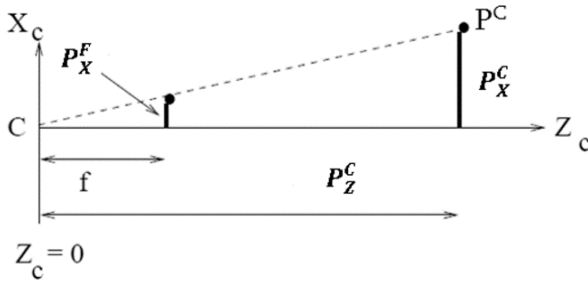
ახლა განვსაზღვროთ C_W^I პერსპექტიული მატრიცის ელემენტების მნიშვნელობები.

4.5. პერსპექტიული პროექციის მატრიცა

ჩვენ მიერ მიღებული პერსპექტიული პროექციის (3.1) განტოლებები განხილული იყო მარტივი შემთხვევისთვის (§3.1.1.), კერძოდ, როცა კამერის C კოორდინატთა სისტემა ემთხვეოდა მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემას. ასეთ შემთხვევაში გამოსახულების $[P_x^F, P_y^F]$ კოორდინატები წარმოდგენილია განზომილების იგივე ერთეულებში (F აღნიშნავს იმას, რომ კოორდინატები გაზომილია ნამდვილ რიცხვებში), რაც 3D სივრცის კოორდინატები, და არა პიქსელის კოორდინატებში (სტრიქონი, სვეტი). მსოფლიო და კამერის კოორდინატთა სისტემების აღმნიშვნელი ინდექსების გათვალისწინებით ეს განტოლებები შეიძლება ასე ჩაიწეროს:

$$\begin{aligned} P_x^F / f &= P_x^C / P_z^W & \text{ან} & P_x^F = (f / P_z^C) P_x^C; \\ P_y^F / f &= P_y^C / P_z^W & \text{ან} & P_y^F = (f / P_z^C) P_y^C; \end{aligned} \quad (4.4)$$

სადაც f – ფოკუსური მანძილია. იმ შემთხვევაში, თუ პერსპექტიული გარდაქმნისას კამერის კოორდინატთა სისტემის სათავე მოთავსებულია პროექციის ცენტრში, მაშინ $P_z^F = f$ ყოველთვის (სურ. 4.7).



სურ. 4.7

ამ შემთხვევაში პერსპექტიული პროექციის გარდაქმნა განისაზღვრება ერთადერთი პარამეტრით – f ფოკუსური მანძილით. შესაბამისად, პერსპექტიული პროექციის გარდაქმნის მატრიცას აქვს სახე:

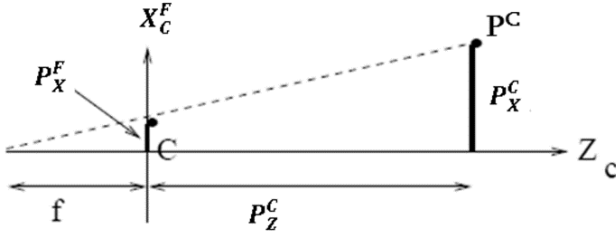
$$P^F = \Pi_C^F(f)P^C$$

$$\begin{bmatrix} sP_x^F \\ sP_y^F \\ sP_z^F \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^C \\ P_y^C \\ P_z^C \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

$\Pi_C^F(f)$ მატრიცის განზომილება უდრის (4×4) და ის შეიძლება გამოყენებული იქნეს აფინური გარდაქმნის სხვა მატრიცებთან კომბინაციაში. მაგრამ იმის გამო, რომ მესამე სტრიქონი, რომელიც იძლევა $P_z^F = f$, სინამდვილეში საჭირო არ არის, ის ხშირად არც იწერება. ამასთან, ამ მატრიცის რანგი 3-ის ტოლია და არა 4-ის. შესაბამისად, მას არ გააჩნია შებრუნებული მატრიცა.

პერსპექტიული პროექციის გარდაქმნის მატრიცის განსაზღვრა სხვაგვარადაც შეიძლება, თუ კამერის კოორდინატთა სი-

სტემის სათავეს მოვათავსებთ გამოსახულების ცენტრში, მაშინ $P_z^F = 0$ ყოველთვის (სურ. 4.8).



სურ. 4.8

ასეთ შემთხვევაში პერსპექტიული პროექციის გარდაქმნის მატრიცა მიიღებს სახეს:

$$P^F = \Pi_C^F(f) P^C$$

$$\begin{bmatrix} sP_x^F \\ sP_y^F \\ sP_z^F \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^C \\ P_y^C \\ P_z^C \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

აღნიშნული მატრიცის ასეთი სახით წარმოდგენის უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ როცა $f \rightarrow \infty$, მაშინ პერსპექტიული პროექცია უახლოვდება სწორკუთხა პროექციას.

ზოგად შემთხვევაში (სურ. 4.1) მსოფლიო W კოორდინატთა და კამერის C კოორდინატთა სისტემები ერთმანეთისგან განსხვავდება. 3D სივრცის P^W წერტილის მსოფლიო კოორდინატების (ნამდვილი რიცხვების) კამერის P^C კოორდინატებში გარდასაქმნელად როგორც ცნობილია საჭიროა გადატანისა და მობრუნების გარდაქმნების რთული კომბინაციის შესრულება.

ბა, რაც საბოლოოდ გვაძლევს გარდაქმნის მატრიცის ელემენტებს:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}^C &= \mathbf{T}(t_x, t_y, t_z) \mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) \mathbf{P}^W; \\
 \mathbf{P}^C &= \mathbf{T} \mathbf{R}_W^C(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z) \mathbf{P}^W; \\
 \begin{bmatrix} P_x^C \\ P_y^C \\ P_z^C \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^W \\ P_y^W \\ P_z^W \\ 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

როგორც ვხედავთ, კომბინირებული გარდაქმნა აღიწერება მობრუნების სამი (α, β, γ) პარამეტრისა და გადატანის სამი (t_x, t_y, t_z) პარამეტრის საშუალებით.

მსოფლიო \mathbf{W} კოორდინატთა სისტემიდან კამერის \mathbf{C} კოორდინატთა სისტემაში გადასვლისთვის და შემდგომ \mathbf{P}^C წერტილების გამოსახულების სიბრტყის \mathbf{P}^F წერტილებად პერსპექტიული პროექციის გარდაქმნისთვის შეიძლება მოვახდინოთ გარდაქმნათა კომპოზიციის ფორმირება. როგორც ზემოთ აღინიშნა, გარდაქმნის მატრიცის მესამე სტრიქონი შეიძლება უგულვებელყოთ, რადგანაც ის P_z^F -თვის ყოველთვის იძლევა მუდმივ მნიშვნელობას. გამოსახულების სიბრტყეზე \mathbf{P}^F წერტილის $[P_x^F, P_y^F]$ კოორდინატები წარმოადგენს ნამდვილ რიცხვებს. იმისთვის, რომ მოვახდინოთ ამ ნამდვილი კოორდინატების გარდაქმნა \mathbf{P}^F წერტილის შესაბამისი პიქსელის კოორდინატებად (სტრიქონისა და სვეტის ნომრებად), საჭიროა მოვახდინოთ მასშტაბირების გარდაქმნა, რაც მოგვცემს \mathbf{P}^I გამოსახულების წერტილის (პიქსელის) $[P_r^I, P_c^I]$ კოორდინატებს. ასეთი გარდაქმნის მატრიცას შემდეგი სახე ექნება:

$$\begin{aligned}
P^F &= \Pi_C^F(f)P^C = \\
\Pi_C^F(f)(TR_W^C(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)P^W) &= \\
(\Pi_C^F(f)TR_W^C(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z))P^W; & \\
\begin{bmatrix} sP_x^F \\ sP_y^F \\ s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^W \\ P_y^W \\ P_z^W \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.7)
\end{aligned}$$

როგორც ვხედავთ, მიღებულ მატრიცულ განტოლებაში მატრიცის ელემენტებია d_{ij} , და არა c_{ij} , როგორც ეს კამერის მატრიცაშია. ეს იმის გამოა, რომ აღნიშნულ განტოლებაში ელემენტების გაზომვის ერთეულებს ჯერ კიდევ წარმოადგენს არა კამერის კოორდინატთა სისტემის, არამედ მსოფლიო კოორდინატთა სისტემის გაზომვის ერთეულები, მაგალითად, მილიმეტრები ან დუიმი. იმისთვის, რომ განზომილების ამ ერთეულიდან გადავიდეთ კამერის კოორდინატთა სისტემის განზომილების ერთეულებზე, ანუ გამოსახულების სიბრტყეზე არსებული პიქსელების სტრიქონებისა და სვეტების ნომრების მნიშვნელობებზე, საჭიროა გამოსახულების წერტილების მიმართ მასშტაბირების გარდაქმნის გამოყენება. ამისთვის თუ (4.7) განტოლებაში შევიტანთ მასშტაბირების თანამამრავლებს, მაშინ აღნიშნული განტოლებით შესაძლებელი იქნება კამერის C მატრიცის და შესაბამისად პიქსელების სტრიქონებისა და სვეტების ნომრების განსაზღვრა. დაეუშვათ d_x და d_y წარმოადგენს გამოსახულების პიქსელის სიგანეს და სიმაღლეს მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემის ერთეულებში. ამოცანა იმაში მდგომარეობს, რომ გამოსახულების კოორდინატთა სისტემაში, სათავეთ (0,0) გამოსახულების ქვედა მარცხენა კუთხეში, მოცემული პიქსელების ნამდვილი $[P_x^F, P_y^F]$ კოორდინატებიდან გადავი-

დეთ მთელრიცხვა $[r, c]$ კოორდინატებში, რომლებიც გამოსახულების პიქსელების სტრიქონებისა და სვეტების ნომრებია, კოორდინატთა სათავით გამოსახულების ზედა მარცხენა პიქსელში. ნამდვილ რიცხვებში წარმოდგენილი კოორდინატების პიქსელურ კოორდინატებში გარდაქმნა ვერტიკალური ღერძის მიმართულების ცვლილების გათვალისწინებით ასე წარმოიდგინება:

$$P^I = \begin{bmatrix} Sr \\ Sc \\ S \end{bmatrix} = S_F^I \begin{bmatrix} SP_x^F \\ SP_y^F \\ S \end{bmatrix},$$

სადაც, S_F^I გარდაქმნას ასეთი სახე აქვს:

$$S_F^I = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{d_y} & 0 \\ \frac{1}{d_y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

ასეთი გარდაქმნით საბოლოოდ ვიდებთ კამერის სრულ მატრიცას, რომელიც მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემაში მოცემული წერტილების სამგანზომილებიან ნამდვილ კოორდინატებს გარდაქმნის გამოსახულების პიქსელურ კოორდინატებად. კამერის სრულ მატრიცას ასეთი სახე აქვს:

$$P^I = \left(S_F^I \Pi_C^F(f) TR_W^C(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z) \right) P^W;$$

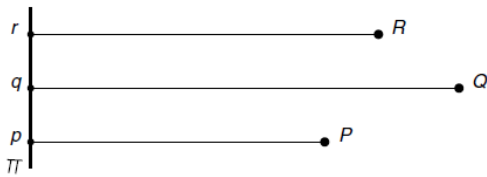
$$\begin{bmatrix} SP_r^I \\ SP_c^I \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^W \\ P_y^W \\ P_z^W \\ 1 \end{bmatrix}.$$

როგორც ვხედავთ, მიღებული მატრიცა ემთხვევა კამერის პერსპექტიული პროექციის (4.3) მატრიცას.

პრაქტიკაში კამერის მატრიცის მისაღებად ზემოაღწერილი გამოთვლების საკმარისი სიზუსტით ჩატარება სირთულეებთანაა დაკავშირებული, რადგანაც ძნელია მანძილებისა და კუთხეების ზუსტი გაზომვა. ამიტომ კამერის მატრიცის ელემენტების კონკრეტული მნიშვნელობების გამოთვლისთვის იყენებენ კამერის კალიბრაციის პროცედურას.

4.6. მართკუთხა და სუსტი პერსპექტიული პროექციები

მართკუთხა (ორთოგონალური – orthographic) პროექციებისას კამერის P^C წერტილის კოორდინატები ადვილად მიიღება, თუ შესაბამის წერტილს მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემაში ჩამოვაშორებთ z კოორდინატს. ეს ნიშნავს, რომ მართკუთხა პროექციებისას 3D სივრცის წერტილების პროექცირება კამერის ოპტიკური ღერძის პარალელური მიმართულებით ხორციელდება (სურ 4.9).



სურ. 4.9

მართკუთხა პროექციის მატრიცას ასეთი სახე აქვს:

$$P^F = \Pi_C^F(\infty)P^C;$$

$$\begin{bmatrix} P_x^F \\ P_y^F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^C \\ P_y^C \\ P_z^C \\ 1 \end{bmatrix}.$$

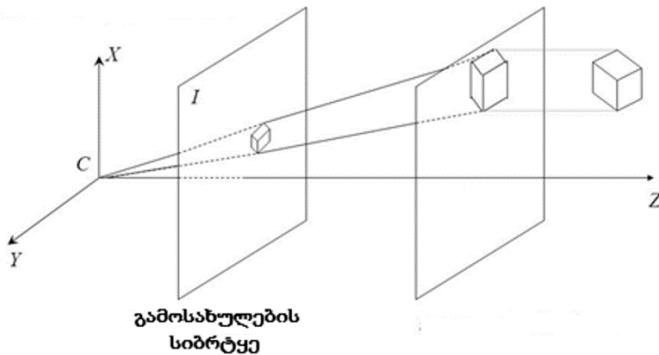
ობიექტის პერსპექტიული პროექციის კარგი მიახლოება მიიღება, თუ ჯერ მოვახდენთ მის მართკუთხა პროექცირებას და შემდგომ მიღებული შედეგის თანაბარ მასშტაბირებას ნამდვილი გამოსახულების სიბრტყეში. პერსპექტიული პროექცირების (არაწრფივი ასახვის) ასეთ მიახლოებით მოდელს, რომელიც მიიღება 3D სივრცის წერტილისთვის z კოორდინატის ჩამოშორებით და შემდეგ თანაბარი მასშტაბირების გამოყენებით, ეწოდება **სუსტი პერსპექტიული პროექცია** (weak perspective projection). იგი წარმოადგენს სრული პერსპექტიული პროექცირების წრფივ მიახლოებას (აპროქსიმაციას). მასშტაბირების s კოეფიციენტის მნიშვნელობად აიღება კამერის f ფოკუსური მანძილის ფარდობა პროექციასა და ობიექტს შორის d მანძილთან – $s = f/d$. ზემოაღწერილი გარდაქმნის შედეგად მიღებული სუსტი პერსპექტიული პროექციის მატრიცა ასე გამოიყურება:

$$P^F = \Pi_C^F(s)P^C;$$

$$\begin{bmatrix} P_x^F \\ P_y^F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^C \\ P_y^C \\ P_z^C \\ 1 \end{bmatrix}.$$

ობიექტის გამოსახულების ფორმირების პროცესი ორივე – მართკუთხა და პერსპექტიული პროექცირების სისტემების ერთდროული გამოყენებით წარმოდგენილია 4.10 სურათზე. როგორც სურათიდან ჩანს, მართკუთხა პროექცია შეიძლება წარმ-

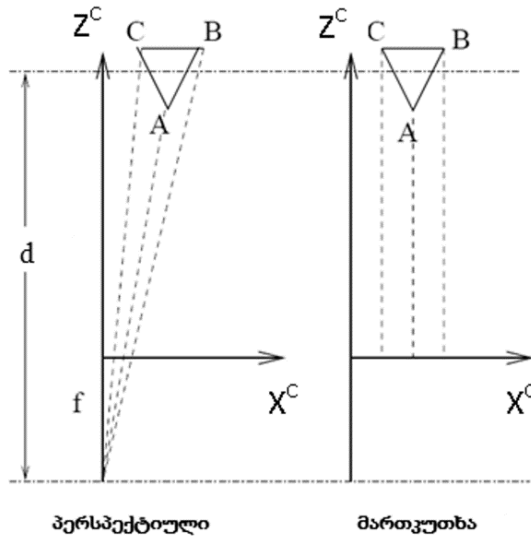
ოვიდგინოთ როგორც უსასრულო ფოკუსური მანძილის მქონე პერსპექტიული პროექცია. მართკუთხა პროექცია გამოიყენება მანქანურ გრაფიკაში, როცა საჭიროა ობიექტის განივი კვეთების სწორად ასახვა. ასევე ის გამოიყენება კომპიუტერულ ხელვაში თეორიული კვლევების ჩატარებისას, რადგანაც მისი გარდაქმნის მატრიცასთან მუშაობა უფრო ადვილია და ის კარგ მიახლოებას იძლევა თეორიული მოდელების შემოწმებისას.



სურ. 4.10

სუსტი პერსპექტიული პროექციის გამოყენების ვარგისიანობას აქვს თავისი საზღვარი, რომლის დასადგენად იყენებენ ემპირიულ ხერხს. კერძოდ, მანძილი (d) ობიექტამდე დაახლოებით 20-ჯერ უნდა აღემატებოდეს თვით ობიექტის ზომას. რაც შეეხება მიახლოების სიზუსტეს, ისიც კამერის ოპტიკურ ღერძსა და ობიექტს შორის დაშორებაზე დამოკიდებული. კერძოდ, რაც უფრო ახლოსაა ობიექტი ოპტიკურ ღერძთან, მით უფრო მაღალია სიზუსტე. ზემოთქმულის საილუსტრაციოდ განვიხილოთ 4.11 სურათზე წარმოდგენილი შემთხვევა. თუ სამკუთხა ობიექტი კამერის ოპტიკური ღერძიდან მარჯვნივ დაიწევს გადანაცვლებას, ამას მოჰყვება A და B წერტილების პერსპექტი-

ული პროექციების სულ უფრო მეტად ერთმანეთთან დაახლოება მანამ, სანამ საბოლოოდ B წერტილის პროექცია არ დაფარავს A წერტილის პროექციას. მაშინ როდესაც, მართკუთხა პროექციებისას ობიექტის ასეთი გადანაცვლების შემთხვევაში მანძილი A და B წერტილების პროექციებს შორის უცვლელი იქნება. ამიტომ ბევრ სამრეწველო ხედვის სისტემებში და ასევე აეროფოტოგადაღებების ჩატარების დროს ინტერესის ობიექტის აპარატურული ცენტრირება კამერის ხედვის ველში ხდება.



სურ. 4.11

4.7. წერტილის კოორდინატების გამოთვლა რამდენიმე კამერის შემთხვევაში

განვიხილოთ ორ კამერიანი მხედველობის სისტემის მოდელის შემთხვევაში სამგანზომილებიანი $[x, y, z]$ წერტილის მსოფლიო

კოორდინატების გამოთვლის ამოცანა ამ წერტილის 2 კალიბრირებული კამერის საშუალებით მიღებული ორი 2D გამოსახულების პიქსელური კოორდინატების $- [r_1, c_1]$ და $[r_2, c_2]$ გამოყენებით. სქემატურად ასეთი მხედველობის სისტემა მოცემულია 4.1 სურათზე. თითოეული კამერის მოდელი კი განისაზღვრება (4.3) განტოლებით. კამერებზე წერტილის გამოსახულებების ფორმირების პროცესი აღიწერება x, y და z ცვლადების 4 წრფივი განტოლებისგან შემდგარი ორი სისტემით (4.8).

$$\begin{bmatrix} sr_1 \\ sc_1 \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix};$$

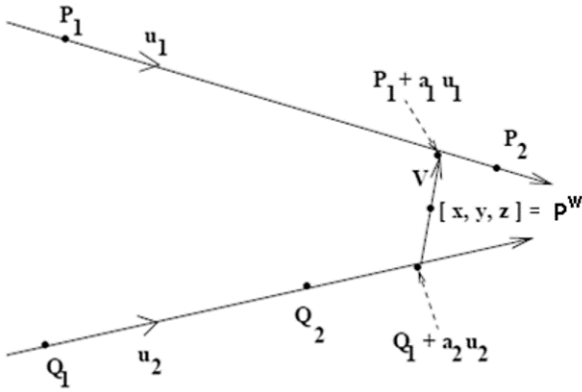
$$\begin{bmatrix} tr_2 \\ tc_2 \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

თუ ამ განტოლებებიდან გამოვრიცხავთ ერთგვაროვან s და t კოორდინატებს, მივიღებთ x, y, z სამი ცვლადის 4 წრფივ განტოლებას:

$$\begin{aligned} r_1 &= (b_{11} - b_{31}r_1)x + (b_{12} - b_{32}r_1)y + (b_{13} - b_{33}r_1)z + b_{14}; \\ c_1 &= (b_{21} - b_{31}c_1)x + (b_{22} - b_{32}c_1)y + (b_{23} - b_{33}c_1)z + b_{24}; \\ r_2 &= (c_{11} - c_{31}r_2)x + (c_{12} - c_{32}r_2)y + (c_{13} - c_{33}r_2)z + c_{14}; \\ c_2 &= (c_{21} - c_{31}c_2)x + (c_{22} - c_{32}c_2)y + (c_{23} - c_{33}c_2)z + c_{24}. \end{aligned}$$

x, y და z კოორდინატების გამოსათვლელად საკმარისია განტოლებათა ამ სისტემიდან ამოვხსნათ ნებისმიერი სამი განტოლება. თუმცა სისტემიდან აღებული 3 განტოლებისგან შედგენილი განტოლებათა სხვადასხვა ქვესიმრავლე x, y და z კო-

ორდინატების ერთმანეთისგან ცოტათი განსხვავებულ მნიშვნელობას მოგვცემს. ჩვეულებრივად, ერთად ოთხივე განტოლება არათავსებადია, რაც კამერის აღწერის მიახლოებითი მოდელის არსებობითაა გამოწვეული. ეს კი მისი პარამეტრების განსაზღვრისას თავის მხრივ განაპირობებს გარკვეულ ცდომილებებს, რასაც ემატება კამერაზე 3D სივრცის წერტილების გამოსახულებების კოორდინატების მნიშვნელობების გაზომვის ცდომილებები. ამის გამო 3D სივრცეში ორი პროექციული სხივი ერთმანეთს „აბსოლუტური სიზუსტით“ არ კვეთს. აღნიშნული პრობლემის რაც შეიძლება კარგად გადაწყვეტა ემყარება პროექციული სხივების „დაახლოების“ (წარმოდგენენ გადაჯვარედინებულ წრფეებს) განსაზღვრას, ანუ სხივების შემაერთებელი უმცირესი მონაკვეთის სიგრძის გამოთვლას. ასეთი მიდგომა წარმოდგენილია 4.12 სურათზე, სადაც P_1 და P_2 წერტილები ერთ წრფეზე მდებარეობს, ხოლო Q_1 და Q_2 წერტილები მეორეზე. u_1 და u_2 კი ამ წრფეების ერთეულოვანი მიმართველი ვექტორებია. ვექტორი $V = P_1 + a_1 u_1 - (Q_1 + a_2 u_2)$ წარმოადგენს ამ წრფეების შემაერთებელ უმოკლეს (თავისუფალ) ვექტორს, ხოლო a_1 და a_2 გამოსათვლელი სკალარული მამრავლებია. მათი მნიშვნელობების განსაზღვრისთვის საჭიროა ისეთი გამოთვლების ჩატარება, რომლებიც V ვექტორის სიგრძის მინიმუმირებას მოახდენს. მაგრამ გამოთვლების გაიოლებისთვის შესაძლებელია დავუშვათ შეზღუდვა, რომ V ვექტორი მართობული იყოს ორივე, u_1 და u_2 ვექტორის მიმართ. დაშვებული შეზღუდვიდან გამომდინარე, ამოცანა სწორედ სხივების შემაერთებელი უმოკლესი V ვექტორის განსაზღვრაში მდგომარეობს.



სურ. 4.12

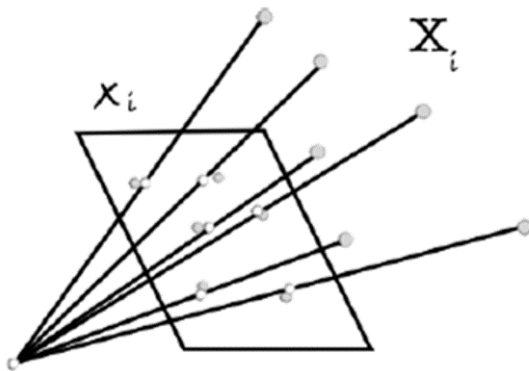
თუ V ვექტორის სიგრძე გარკვეულ ზღურბლზე ნაკლები, ანუ „საკმარისად მცირე“ აღმოჩნდა, მაშინ მისი შუაწერტილი შეიძლება აღებული იქნეს როგორც პროექცირებადი სხივების გადაკვეთის წერტილი, ანუ $[x, y, z]^t = (1/2)[(P_1 + a_1 u_1) + Q_1 + a_2 u_2]$ წერტილი. ხოლო თუ ეს მონაკვეთი საკმაოდ გრძელი აღმოჩნდა, მაშინ ჩაითვლება, რომ $[r_1, c_1]$ და $[r_2, c_2]$ კოორდინატების გამოთვლა გარკვეული ცდომილებებით მოხდა.

3D სივრცეში წერტილის კოორდინატების გასაზომად ხშირად ორი კამერის ნაცვლად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ერთი კამერა და მიმართული განათება. ამ შემთხვევაში მათემატიკური და გეომეტრიული გამოთვლები ისევე ხდება, როგორც ორი კამერის შემთხვევაში.

4.8. კამერის კალიბრაცია 3D სივრცის აღქმისას

კამერის ერთ-ერთ შემადგენელ ნაწილს წარმოადგენს ობიექტივი, რომლის ხარისხი მნიშვნელოვანწილად განსაზღვრავს მიღ-

ებული გამოსახულების ხარისხს. ობიექტივი შედგება ღინზე-
 ბისაგან, რომლებიც იმის გამო, რომ იდეალურები არ არის,
 გამოსახულების ფორმირებისას გარკვეულ აბერაციებს (დამახ-
 ინჯებებს) იწვევენ გამოსახულებებზე. შედეგად, გამოსახულებ-
 ის სიბრტყეზე კამერით მიღებული 3D სივრცის წერტილის რე-
 ალური გამოსახულების პროექცია არ ემთხვევა ცენტრალურ
 პროექციას. ეს შემთხვევა წარმოდგენილია 4.13 სურათზე, სად-
 აც, ჩანს განსხვავება 3D სივრცის X_i წერტილებიდან წამოსუ-
 ლი სხივების x_i იდეალური და რეალური პროექციების გეომე-
 ტრიულ მდებარეობას შორის. ამ განსხვავებების მინიმუმამდე
 დაყვანისთვის ღინზებს ისეთნაირად არჩევენ, რომ ჯამური და-
 მახინჯებები გაცილებით ნაკლები იყოს, ვიდრე ნებისმიერი მა-
 თგანის. თავის მხრივ, ეს დამახინჯებები 3D სივრცის აღქმისას
 ცდომილებებს იწვევს.



სურ. 4.13

კამერით გადაღებისას გამოწვეული ცდომილებების მინიმ-
 იზაციისთვის ახდენენ კამერის კალიბრაციას. კალიბრაციის
 ქვეშ იგულისხმება კამერის ისეთი მომართვის პროცესი, რის
 შედეგადაც კამერით მიღებული გამოსახულების ხარისხი მწა-

რმოებლის მიერ გარანტირებულ სპეციფიკაციას შეესაბამება. კერძოდ, იგულისხმება გადაღების შესაბამისი პირობებიდან გამომდინარე კამერით მიღებული გამოსახულებების ცენტრალური პროექციის მახასიათებელი სიდიდეების განსაზღვრა და ამ პროექციიდან გამოსახულების წერტილების გადახრა. ეს სიდიდეები შეიცავს პროეცირებული გამოსახულებების ცდომილებების მხოლოდ სისტემატურ ნაწილს (გამოწვეულს დამახინჯებებით, და კამერის სხვა დეფექტით) და მათ **კალიბრაციის პარამეტრები** ეწოდება. აქედან გამომდინარე, კამერის კალიბრაციის მიზანია რაც შეიძლება მაღალი სიზუსტით დაუკავშიროს ერთმანეთს მისი გამოსახულების სიბრტყეზე ფორმირებული ობიექტის გამოსახულების პიქსელური კოორდინატები (სტრიქონისა და სვეტის ნომრები) ობიექტის შესაბამისი წერტილების კოორდინატებს 3D სივრცეში. გამოსახულებების დამუშავების პროცესში კალიბრაციის პროცედურა წინ უსწრებს ისეთი ამოცანების გადაწყვეტას, როგორცაა ობიექტების სამგანზომილებიანი კოორდინატების, ორიენტაციის, ზომების და ტრიანგულაციურ მეთოდზე დამყარებული მანძილის გამოთვლა.

კამერის კალიბრაციის პროცედურა შედგება 2 ძირითადი კომპონენტისაგან:

- **სივრცითი კალიბრაციის სტენდი**, რომლის გამოსახულებებზე დაყრდნობით ხორციელდება ციფრული კამერების კალიბრაცია;
- **პროგრამული უზრუნველყოფა**, რომლითაც ხორციელდება კამერის კალიბრაციის პარამეტრის გამოთვლა.

კამერის მათემატიკური მოდელის (§4.4) განხილვისას ვნახეთ, რომ კამერის მატრიცას აქვს (4.3) განტოლებით წარმოდგენილი სახე, რომლის ამოხსნა მოითხოვს 11 პარამეტრის

განსაზღვრას. დაეუშვათ, რომ კამერის მდებარეობა დაკვირვებულ სცენის ობიექტის, ე. წ. კალიბრაციის სტენდის (calibration jig) მიმართ (რომლის ზომები წინასწარ ცნობილია) და ფოკუსური მანძილი ფიქსირებულია. შემოვიტანოთ n წვეილი წერტილისგან შემდგარი $\langle P_j^I, P_j^W \rangle$ სიმრავლე, რომელთა პიქსელური $P_j^I = [P_r^I, P_c^I]$ კოორდინატები გამოსახულების სიბრტყეზე და სამგანზომილებიანი $P_j^W = [P_x^W, P_y^W, P_z^W]$ კოორდინატები მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემაში მოცემულია. კალიბრაციის სტენდი საჭიროა იმისთვის, რომ n რაოდენობის კალიბრაციის წერტილების კრებულისთვის ადვილად იქნას დადგენილი მკაფიო 3D წერტილების $[P_x^W, P_y^W, P_z^W]$ კოორდინატები. ამასთან იგი ზედმიწევნით ზუსტად უნდა იყოს მოთავსებული მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემაში. ამის შემდეგ კამერის საშუალებით ხდება კალიბრაციის სტენდის გამოსახულების მიღება და განისაზღვრება კალიბრაციის წერტილთა $[P_r^I, P_c^I]$ პიქსელური კოორდინატები კამერის გამოსახულების სიბრტყეზე. აღსანიშნავია, რომ წერტილების რაოდენობა – n არ უნდა იყოს 6-ზე ნაკლები. ამასთან ყველაზე კარგი შედეგი მიიღწევა მაშინ, როცა $n \geq 25$. 3D კალიბრაციის სტენდის მაგალითი წარმოდგენილია 4.14 სურათზე. იგი შედგება 200-ზე მეტი მარკირებული საყრდენი წერტილისგან, რომელთა სივრცითი კოორდინატები ცნობილია. კალიბრაციის პროცესში კამერის საშუალებით ხდება საყრდენი წერტილების გამოსახულებების მიღება სივრცის რამდენიმე დაკვირვების წერტილიდან. ამასთან კამერის ოპტიკური ღერძის ორიენტაციის ცვლილება ხდება როგორც ვერტიკალურ, ისე ჰორიზონტალურ სიბრტყეში. ამის შემდეგ მიღებული კალიბრაციის გამოსახულებები ერთობლივად მათემატიკურად მუშავდება სპეციალური პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით.



სურ. 4.14

4.8.1. კალიბრაციის პარამეტრების გამოთვლა

აღნიშვნებისა და გამოთვლების სიმარტივისთვის მსოფლიო W კოორდინატთა სისტემაში კალიბრაციის j ($j = \overline{1, n}$) წერტილების $P_j^W = [P_x^W, P_y^W, P_z^W]$ კოორდინატები აღვნიშნოთ როგორც $[x_j, y_j, z_j]$, ხოლო მისი შესაბამისი $P_j^I = [P_r^I, P_c^I]$ პიქსელური კოორდინატები გამოსახულების სიბრტყეზე – $[u_j, v_j]$. მაშინ, კალიბრაციის თითოეული წერტილისთვის იწერება შემდეგი 2 განტოლება:

$$u_j = (c_{11} - c_{31}u_j)x_j + (c_{12} - c_{32}u_j)y_j + (c_{13} - c_{33}u_j)z_j + c_{14};$$

$$v_j = (c_{21} - c_{31}v_j)x_j + (c_{22} - c_{32}v_j)y_j + (c_{23} - c_{33}v_j)z_j + c_{24};$$

წარმოდგენილი წრფივი განტოლებები მიიღება გამოსახულებების ფორმირების მოდელიდან მასშტაბირების s კოეფიციენტის გამორიცხვის გზით. შესაბამისად, განტოლებები აღწერენ თითოეული პროექციული სხივის გეომეტრიულ თვისებებს და ამასთან კალიბრაციის თითოეულ წერტილს შეესაბამება ერთი პროექციული სხივი.

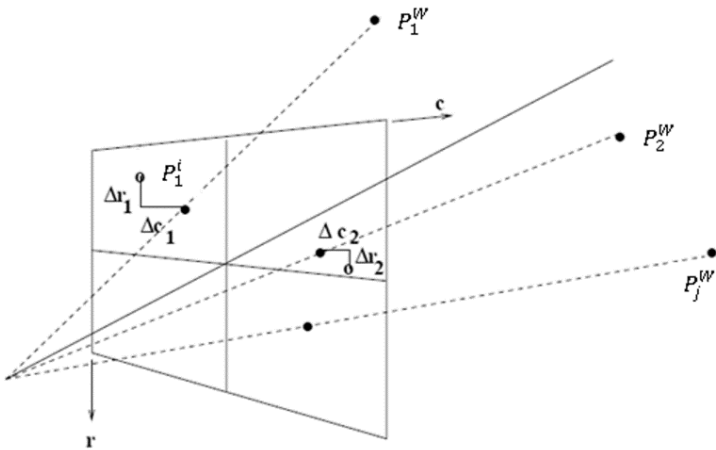
თუ ახლა განტოლებებში არსებულ ცნობილ და უცნობ წევრებს ერთმანეთისგან ცალკეულ ვექტორებში განვაცალკევებთ ისეთნაირად, რომ მარცხენა მხარეს აღმოჩნდეს ცნობილი სიდიდეები (n კალიბრაციის წერტილების წვეილებიდან), ხოლო მარჯვენა მხარეს c_{km} , $k = \overline{1,3}$, $m = \overline{1,4}$ უცნობები, რომელთა გამოთვლაც უნდა მოხდეს, მაშინ განტოლებები მატრიცულ სახეში ასე შეიძლება წარმოვადგინოთ:

$$\begin{bmatrix} x_j, y_j, z_j, 1, 0, 0, 0, 0, -x_j u_j, -y_j u_j, -z_j u_j \\ 0, 0, 0, 0, x_j, y_j, z_j, 1, -x_j v_j, -y_j v_j, -z_j v_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ c_{13} \\ c_{14} \\ c_{21} \\ c_{22} \\ c_{23} \\ c_{24} \\ c_{31} \\ c_{32} \\ c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_j \\ v_j \end{bmatrix}.$$

იქედან გამომდინარე, რომ პროექციის თითოეული სხივი იძლევა 2 ასეთ განტოლებას, შესაბამისად, კალიბრაციის n წერტილისთვის გვექნება $2n$ წრფივი განტოლებისგან შემდგარი სისტემა. ეს განტოლებები მოკლედ ასე ჩაიწერება:

$$A_{2n \times 11} \mathbf{x}_{11 \times 1} \approx \mathbf{b}_{2n \times 1},$$

სადაც, \mathbf{x} არის უცნობების ვექტორ-სვეტი, ხოლო \mathbf{b} გამოსახულების კოორდინატების ვექტორ-სვეტი. იმის გამო, რომ განტოლებათა სისტემა შეიცავს 11 უცნობს, ხოლო განტოლებათა რაოდენობა 12-ის ან მეტის ტოლია, გამოდის, რომ განტოლებათა სისტემა ე. წ. ზეგანსაზღვრული სისტემაა და ამიტომ არ არსებობს ისეთი \mathbf{x} ვექტორი, რომელიც დააკმაყოფილებს სისტემის ყველა განტოლებას. ასეთი სისტემის რაც შეიძლება ზუსტი, ანუ საუკეთესო ამონახსნის მოსაძებნად იყენებენ **უმცირეს კვადრატთა მეთოდს**. აღნიშნულ მეთოდზე დაყრდნობით უნდა განისაზღვროს უცნობი პარამეტრების ისეთი ნაკრები (ჩვენს შემთხვევაში უცნობი c_{km} პარამეტრების ისეთი \mathbf{x} ვექტორი), რომლისთვისაც დაკვირვებულ კოორდინატებსა და კამერის მატრიცის საშუალებით გამოთვლილ კოორდინატებს შორის სხვაობების (ეგკლიდური მეტრიკით) კვადრატების ჯამი (ყველა განტოლებისთვის) იქნება მინიმალური. კალიბრაციის 2 წერტილისთვის ასეთი 4 სხვაობა გამოსახულების სიბრტყეზე წარმოდგენილია 4.15 სურათზე. ამ სხვაობებს **ნაშთები** (residual)



სურ. 4.15
151

ეწოდება. სურათზე ისინი წარმოდგენილია დაკვირვების წერტილებსა (აღნიშნულია ღია წრეწირებით) და (4.3) განტოლებით მოცემული კამერის მატრიცის გამოყენებით გამოთვლილ წერტილებს (აღნიშნულია მუქი წრეწირებით) შორის სხვაობებით.

როგორც ვნახეთ, კამერის მათემატიკური მოდელი წარმოდგენილია 11 პარამეტრიანი კამერის მატრიცით (4.3), რომელთა მნიშვნელობების გამოთვლაც საჭიროა, რათა განისაზღვროს შესაბამისობა 3D სივრცეში ობიექტის წერტილების მსოფლიო კოორდინატებსა და მისი გამოსახულების პიქსელურ კოორდინატებს შორის კამერის გამოსახულების სიბრტყეზე. მაგრამ დაისმის კითხვა: საჭიროა თუ არა ყოველთვის ამ 11 პარამეტრის განსაზღვრა. ზემოთ ნახვენები იყო, რომ მსოფლიო კოორდინატთა სისტემაში კამერის მდებარეობის მოცემისთვის საკმარისია მობრუნებისა და გადატანის მატრიცების სამ-სამი დამოუკიდებელი პარამეტრის, გამოსახულების ნამდვილი კოორდინატებიდან პიქსელურ კოორდინატებში გადასასვლელად 2 მასშტაბის კოეფიციენტის და f ფოკუსური მანძილის მოცემა. როგორც ვხედავთ, კამერის მოდელის თერთმეტივე პარამეტრი არ არის დამოუკიდებელი. თუ მათ დამოუკიდებლედ ჩავთვლით, მაშინ შეიძლება დავუშვათ, რომ მობრუნების პარამეტრები აღიწერება არაორთონორმირებული მობრუნების მატრიცით. მაღალი ხარისხის კამერის შემთხვევაში ასეთი შეზღუდვა (პარამეტრების დამოუკიდებლობა) ზედმეტია, მაგრამ თუ გამოსახულების სიბრტყე ოპტიკური ღერძის მართობული არ არის, მაშინ ზედმეტი პარამეტრები კამერის უკეთეს მოდელს იძლევა. ხოლო ზედმეტი რაოდენობის პარამეტრების შეფასება კალიბრაციის მეტი წერტილის არსებობას მოითხოვს. ამასთან, ეს ზედმეტი პარამეტრები უშუალოდ კამერის შიგა მახასიათებლებს არ წარმოადგენს. მიუხედავად აღნიშნულისა, აფინურ გარდაქმნას რამდენიმე უპირატესობაც აქვს. კერძოდ, ის კარგ-

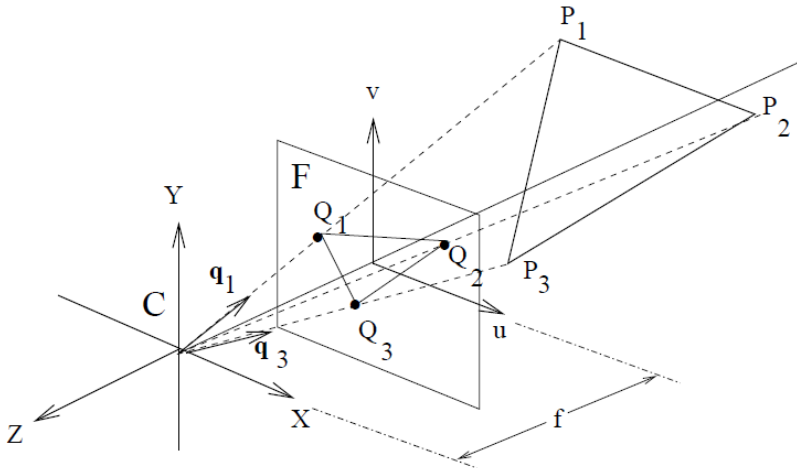
ად მუშაობს, თუ: გამოსახულების სტრიქონებსა და სვეტებს ან გამოსახულების სიბრტყესა და ოპტიკურ ღერძს შორის არსებობს დახრა; ის კარგად მუშაობს როგორც პიქსელურ, ისე ნამდვილ კოორდინატებთან გამოსახულების სიბრტყეზე; ასევე გამოთვლებისთვის არ არის საჭირო იტერაციული მეთოდების გამოყენება.

4.9. 3D სივრცეში დაკვირვებული ობიექტის მდებარეობის განსაზღვრის მარტივი მეთოდი

3D სივრცეში დაკვირვებული ობიექტის მდებარეობა (პოზა) და გეომეტრიული თვისებები შეიძლება განისაზღვროს კამერის გამოყენებით. განვიხილოთ ობიექტის მდებარეობის განსაზღვრის მარტივი ხერხი გამოსახულების სიბრტყეზე მისი სამი წერტილის კოორდინატების საფუძველზე. აღნიშნული მეთოდის ღირსება ისაა, რომ პრაქტიკულ გამოყენებასთან ერთად მას შემოაქვს რამდენიმე მნიშვნელოვანი ცნების იდეა. ერთ-ერთი მათგანია **უკუპერსპექტიული გარდაქმნა**, რომლის არსი მდგომარეობს ობიექტების სამგანზომილებიანი თვისებების გამოთვლაში პერსპექტიული პროექციით მიღებული მათი ორგანზომილებიანი გამოსახულებების თვისებებზე დაყრდნობით. ხოლო მეორე – **ოპტიმიზაციის** პროცედურის გამოყენება პარამეტრების იმ საუკეთესო ნაკრების მოსაძებნად, რომელიც ობიექტის სამგანზომილებიანი წერტილების გამოსახულების ორგანზომილებიან წერტილებთან შესაბამისობას უზრუნველყოფს. დავუშვათ, რომ ჩვენთვის ცნობილია ობიექტის გეომეტრიული მოდელი, კამერის ფოკუსური მანძილი და ასევე სიმარტივისთვის ვთქვათ, რომ მსოფლიო კოორდინატთა და კამერის კოორდინატთა სისტემები ერთმანეთს ემთხვევა. ამის გამო წერტილების აღნიშვნაში კოორდინატთა სისტემის მაჩვენებელი ინდექსები

ჩამოვაშორეთ, ანუ გვექნება $\mathbf{P}_i^W = \mathbf{P}_i^C \equiv P_i$. ამასთან განხილული იქნება წერტილების მხოლოდ ნამდვილი და არა პიქსელური კოორდინატები.

3D სივრცეში ობიექტის მდებარეობის შეფასების მარტივი მაგალითი მოცემულია 4.16 სურათზე.



სურ. 4.16

როგორც ვხედავთ, სცენის ობიექტს წარმოადგენს $P_1P_2P_3$ სამკუთხედი, რომლის გვერდების სიგრძე ცნობილია, ხოლო მისი პროექცია გამოსახულების $u-v$ სიბრტყეზე ისევ $Q_1Q_2Q_3$ სამკუთხედი. $P_i, i = \overline{1,3}$ წერტილების კოორდინატები უცნობია და ამოცანა მდგომარეობს ამ კოორდინატების გამოთვლაში, რაც საბოლოოდ სამკუთხედის მდებარეობას განსაზღვრავს სივრცეში. ჩვენ ვუშვებთ, რომ ვიცით თუ ობიექტის რომელ წერტილებს ვაკვირდებით და, აქედან გამომდინარე, ვიცით მათ წყვილებს შორის მანძილები. მყარი ობიექტის შემთხვევაში ეს მანძილები ობიექტის სივრცეში გადაადგილებისას არ იცვლება.

ბა. P_i , $i = \overline{1,3}$ წერტილების როლში შეიძლება განვიხილოთ მაგალითად ადამიანის პირისახის მახასიათებელი წერტილები, თვალები და ცხვირი. P_i წერტილების კოორდინატების განსაზღვრა შეიძლება გამოსახულებაზე Q_i , $i = \overline{1,3}$ წერტილების საშუალებით, რომელთა კოორდინატებიც გამოსახულების სიბრტყეზე ცნობილია. ფოკუსური f მანძილი წარმოადგენს მანძილს პერსპექტიული პროექციის ცენტრიდან გამოსახულების სიბრტყემდე. შესაბამისად, კამერის C კოორდინატა სისტემის მიმართ გამოსახულების Q_1, Q_2, Q_3 წერტილების კოორდინატები იქნება $Q_i = [u_i, v_i, -f]$, $i = \overline{1,3}$.

აღვნიშნოთ კამერის კოორდინატა სისტემის სათავიდან დაკვირვებული Q_i , $i = \overline{1,3}$ წერტილებისკენ მიმართული ერთეულოვანი ვექტორები q_i -ით. იგივე მიმართულებაზეა განლაგებული P_i წერტილებიც. აქედან გამომდინარე, P_i წერტილების კოორდინატების განსაზღვრა Q_i წერტილების კოორდინატებზე დაყრდნობით შესაძლებელია, თუ გამოვითვლით სამ a_i სკალარულ სიდიდეს განტოლებათა სისტემიდან:

$$P_i = a_i q_i. \tag{4.9}$$

რადგანაც ობიექტის წარმოდგენილ მოდელში P_1, P_2 და P_3 წერტილებს შორის მანძილები ცნობილია, (4.9) განტოლებებიდან შესაძლებელია ამ მანძილებთან დაკავშირებული შემდეგი სამი განტოლების მიღება:

$$d_{mn} = \|P_m - P_n\|, \tag{4.10}$$

სადაც $m, n = \overline{1,3}$ და $m \neq n$. თუ (4.10) -ში P_i წერტილების კოორდინატების ნაცვლად ჩავსვათ Q_i წერტილების ცნობილ კოორ-

რდინატებს და 3D სივრცეში წერტილებს შორის მანძილებს წარმოვადგენთ სკალარული ნამრავლის საშუალებით, იმის გათვალისწინებით, რომ $\mathbf{q}_i \circ \mathbf{q}_i = 1$, მივიღებთ:

$$\begin{aligned} d_{mn}^2 &= \|\mathbf{a}_m \mathbf{q}_m - \mathbf{a}_n \mathbf{q}_n\|^2; \\ d_{mn}^2 &= (\mathbf{a}_m \mathbf{q}_m - \mathbf{a}_n \mathbf{q}_n) \circ (\mathbf{a}_m \mathbf{q}_m - \mathbf{a}_n \mathbf{q}_n); \\ d_{mn}^2 &= a_m^2 - 2a_m a_n (\mathbf{q}_m \circ \mathbf{q}_n) + a_n^2. \end{aligned} \quad (4.11)$$

ჩვენ მივიღეთ სამი a_i ცვლადის სამი კვადრატული განტოლება, რომელშიც d_{mn} სიდიდეები ობიექტის მოდელიდანაა ცნობილი, ხოლო სამი სკალარული $\mathbf{q}_m \circ \mathbf{q}_n$ ნამრავლი ცნობილია Q_i წერტილების კოორდინატების მეშვეობით. ამგვარად, ჩვენ მიერ ზემოთ დასმული ამოცანა P_i , $i = \overline{1,3}$ წერტილების 3D კოორდინატების გამოთვლაზე დაყვანილ იქნა სამი ცვლადის სამი კვადრატული განტოლების ამოხსნაზე. თეორიულად (4.11) განტოლებათა სისტემას შეიძლება ჰქონდეს რვა $[a_1, a_2, a_3]$ სამეულისგან შემდგარი სხვადასხვა ამონახსნი. ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ მოცემული შემთხვევისთვის სივრცეში სამი წერტილის ნებისმიერი მდებარეობისთვის კოორდინატთა სისტემის მეორე მხარეს არსებობს ამ წერტილების სარკული ასახვები კოორდინატებით $[-a_1, -a_2, -a_3]$. აქედან გამომდინარე, თუ (4.11) განტოლებათა სისტემას აკმაყოფილებს კოორდინატების ერთი სამეული, მაშინ მას მეორე სამეულიც დააკმაყოფილებს. შესაბამისად თეორიულად შესაძლო 8 ამონახსნიდან ჩვენ რეალურად შეიძლება გვქონდეს ყველაზე დიდი მხოლოდ ოთხი, იმის გამო, რომ ობიექტი შეიძლება განლაგებული იყოს გამოსახულების სიბრტყის მხოლოდ ერთ მხარეს.

a_i , $i = \overline{1,3}$ სიდიდეების და შესაბამისად, P_i , $i = \overline{1,3}$ წერტილების კოორდინატების გამოსათვლელად საჭიროა (4.11) გან-

ტოლებათა სისტემის ამოხსნა, რისთვისაც იყენებენ არაწრფივი ოპტიმიზაციის მეთოდს. მათემატიკურად ეს ნიშნავს a_i , $i = \overline{1,3}$ ცვლადის ფუნქციების სამი ფესვის პოვნას:

$$f(a_1, a_2, a_3) = a_1^2 - 2a_1a_2(\mathbf{q}_1 \circ \mathbf{q}_2) + a_2^2 - d_{12}^2;$$

$$g(a_1, a_2, a_3) = a_2^2 - 2a_2a_3(\mathbf{q}_2 \circ \mathbf{q}_3) + a_3^2 - d_{23}^2;$$

$$h(a_1, a_2, a_3) = a_1^2 - 2a_1a_3(\mathbf{q}_1 \circ \mathbf{q}_3) + a_3^2 - d_{13}^2;$$

4.10. კამერის მახასიათებელი პარამეტრების ტიპები

კამერის კალიბრაცია ნიშნავს მისი იმ პარამეტრების დადგენას, რომლებიც ახასიათებენ მის გეომეტრიულ თვისებებს და მდებარეობას. აღნიშნული პარამეტრები იყოფა 2 ჯგუფად:

- გარე პარამეტრები;
- შიგა პარამეტრები.

გარე პარამეტრები აღწერენ კამერის კოორდინატთა სისტემის მდებარეობას და ორიენტაციას 3D მსოფლიო კოორდინატთა სისტემაში. ისინი განსაზღვრავენ გარდაქმნას 3D ობიექტის კოორდინატთა სივრციდან კამერის 3D კოორდინატთა სისტემაში (სურ. 4.17). ეს გარდაქმნა შედგება გადატანისა და მობრუნების გარდაქმნების პარამეტრებისგან:

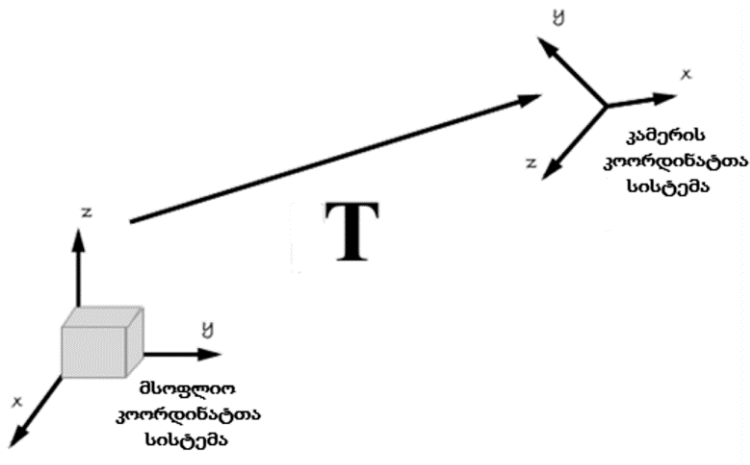
- გადატანის პარამეტრებია:

$$\mathbf{t} = [t_x \ t_y \ t_z]^T;$$

- მობრუნების პარამეტრებია:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

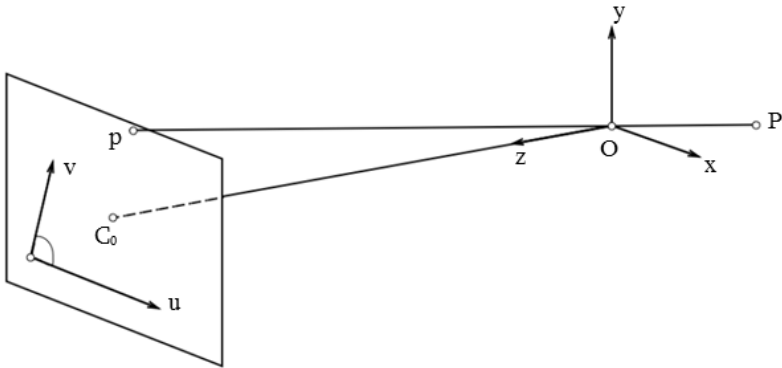
გადატანის პარამეტრები აღწერენ კამერის მდებარეობას მსოფლიო კოორდინატა სისტემაში, ხოლო მობრუნების პარამეტრები კი მის ორიენტაციას. შევნიშნოთ, რომ მობრუნების დამოუკიდებელ პარამეტრთა რაოდენობა სამის, და არა ცხრის ტოლია.



სურ. 4.17

შიგა პარამეტრები წარმოადგენენ კამერის მახასიათებლებს. ისინი დამოკიდებულია კონკრეტული კამერის თავისებურებებზე. ისინი განსაზღვრავენ გარდაქმნას კამერის 3D კოორდინატა სისტემიდან გამოსახულების 2D კოორდინატა სისტემაში (სურ. 4.18). ეს პარამეტრებია:

- მთავარი $[u_0, v_0]$ წერტილი – კამერის ოპტიკური ღერძის და გამოსახულების სიბრტყის გადაკვეთის წერტილი;
- მასშტაბის $\{d_x, d_y\}$ კოეფიციენტები – პიქსელის ჰორიზონტალური x და ვერტიკალური y ზომებისთვის;
- კადრის დამახინჯების (დისტორსიის) τ_1 კოეფიციენტი – მოცემული კამერის კადრის განზომილებებს შორის თანაფარდობის დამახინჯების აღმრიცხველი მასშტაბირების კოეფიციენტი;
- f ფოკუსური მანძილი – მანძილი კამერის ობიექტივის ოპტიკური ცენტრიდან გამოსახულების სიბრტყემდე;
- ობიექტივის დამახინჯების (k_1) კოეფიციენტი – კამერის ობიექტივის რადიალური დამახინჯების მოდელირებისთვის გამოყენებული მასშტაბირების კოეფიციენტი.



სურ. 4.18

აღსანიშნავია, რომ კამერის კოორდინატა სისტემის სათავე O მოთავსებულია მისი ობიექტივის ოპტიკურ ცენტრში, რომელზეც გადის ოპტიკური ღერძი. ეს უკანასკნელი კი გამო-

სახელების სიბრტყის მართობულია. რაც შეეხება მთავარ წერტილს – $C_0[u_0, v_0]$ ძირითადად ის მოთავსებულია გამოსახულების ცენტრში. ხოლო, d_x და d_y კი წარმოადგენენ მსოფლიო კოორდინატთა სისტემის ნამდვილ ერთეულებში გაზომილ, მაგალითად, მმ-ში, პიქსელის ზომების მასშტაბის კოეფიციენტებს ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მიმართულებით. დავუშვათ, რომ მოცემული კამერისთვის ცნობილია u_0, v_0, d_x, d_y და კადრის დამახინჯების τ_1 პარამეტრების მნიშვნელობები. მაშინ კამერის კალიბრაციის პროცესში საჭირო იქნება f ფოკუსური მანძილის და ობიექტივის დამახინჯების k_1 კოეფიციენტის განსაზღვრა.

4.11. 3D ობიექტების რეკონსტრუქცია

3D სცენის ობიექტების რეკონსტრუქცია წარმოადგენს კომპიუტერული ხედვის ერთერთ ცენტრალურ საკითხს, რომლის ამოცანაა ობიექტების ფორმის აღდგენა მათი ერთ ან რამდენიმე 2D გამოსახულებაზე დაყრდნობით. ობიექტების რეკონსტრუქცია ფართოდ გამოიყენება მედიცინასა და ტექნიკური ხედვის სისტემებში, კოსმოსურ კვლევებში, ვირტუალური რეალობის გარემოში ობიექტების მოდულების შექმნისთვის. ობიექტის რეკონსტრუქციის პროცესი შედგება 4 ძირითადი ნაბიჯისაგან:

1. 3D (სიღრმის) მონაცემების შეგროვება;
2. სიღრმის მონაცემების სივრცითი შეთანასწორება;
3. ზედაპირის აგება;
4. ოპტიმიზაცია.

დამკვირვებლიდან (კამერიდან) სცენის ობიექტის შესახებ 3D მონაცემების შეგროვებისას **სიღრმის მონაცემები** (range data) აღებული უნდა იქნეს დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან მიღებული ხედების ერთობლიობიდან, რომლებიც მთლიანობაში მოიცავს ობიექტის გარემომცველ მთელ ზედაპირს. ხშირად ამისთვის საკმარისია 8-10 ხედი, მაგრამ რთული ობიექტების შემთხვევაში, როცა საჭიროა მაღალი სიზუსტე, ასეთი ხედების რაოდენობა საკმაოდ დიდი უნდა იყოს. მეორე მხრივ, რაც უფრო მეტია ასეთი ხედების რაოდენობა, მით მეტია გამოთვლების ფასიც (დრო). ამიტომ კონკრეტული ამოცანების გადაწყვეტისას უნდა დავიცვათ გარკვეული ბალანსი ხედების რაოდენობასა და გამოთვლების ფასს შორის. თითოეული ხედიდან მიღებული მონაცემები შედგება ობიექტის ზედაპირის შესაბამისი ნაწილიდან აღებული ერთი სიღრმის გამოსახულებისგან (ბრტყელი გამოსახულება) და ასევე ხშირად ნახევარტონური ან ფერადი გამოსახულებისგან. სიღრმის გამოსახულება შეიცავს მონაცემებს კამერის ობიექტივიდან ობიექტის შესაბამისი ზედაპირის წერტილებამდე დაშორებების (სიღრმის) შესახებ. ასეთი გამოსახულების მიღების რამდენიმე გზა არსებობს. მაგალითად, რამდენიმე კალიბრირებული კამერიდან მიღებული კამერის მატრიცის გამოყენება. თუმცა ასეთი გზით აგებული ობიექტის მოდელი არ ხასიათდება მაღალი სიზუსტით, გამოყენებული კამერების ოპტიკური სისტემის დაბალი სიზუსტის გამო. მაღალი სიზუსტის მიღწევა შესაძლებელია ლაზერული გამანათებლისა და კამერისგან შემდგარი სისტემის გამოყენებით. ასეთი სისტემა საშუალებას იძლევა მაღალი სიზუსტით განისაზღვროს ლაზერული სხივის, ობიექტის ზედაპირის და კამერის ხედვის სხივის გადაკვეთის წერტილის კოორდინატები და შესაბამისად სიღრმის გამოსახულებაც. ობიექტის მთლიანი ზედაპირის მოდელის აგება შესაძლებელია სხვადასხვა ხედე-

ბიდან მიღებული ასეთი სიღრმის გამოსახულებების დამუშავებისა და გაერთიანების გზით მიღებული მონაცემების საფუძველზე. რაც შეეხება ინტენსიობის მნიშვნელობებს, ისინი შეიძლება გამოყენებული იქნეს სიღრმის მონაცემების შეთავსების პროცედურაში. ფერად გამოსახულებებთან შეთავსებული სიღრმის გამოსახულებების მიღება შესაძლებელია რამდენიმე სხვადასხვა კომერციული მოდელის ლაზერული სკანერის გამოყენებით.

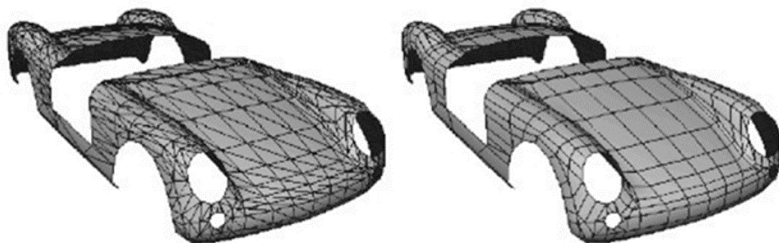
განსაზღვრება 4.1. *სიღრმის მონაცემების გაერთიანების პროცესს მათი ერთიან 3D კოორდინატთა სისტემაში გარდაქმნის (დაყვანის) გზით უწოდებენ შეთავსების პროცესს (registration).*

სიღრმის მონაცემების შეთავსების შემდეგ უკვე შეიძლება ობიექტის ზედაპირის რეკონსტრუქციის ეტაპის დაწყება. მაგრამ სხვადასხვა ხელიდან მიღებული სიღრმის მონაცემების შეთავსების (დაჯგუფების) შედეგად მიიღება 3D წერტილების გროვა (დრუბელი) და არა ობიექტის მოდელი. ამ უკანასკნელის მისაღებად საჭიროა მონაცემების შემდგომი დამუშავება. ობიექტი 3D სახეში შეიძლება წარმოდგენილი იყოს ორნაირად:

1. *3D წერტილების და მათი დამაკავშირებელი წიბოებისგან შედგენილი ბმული პოლიგონალური ბადის (connected polygon mesh) სახით, რომლითაც ობიექტის ზედაპირი წარმოდგინება;*
2. *სამგანზომილებიანი კუბების ანუ ვოქსელების (voxels – volume elements) სიმრავლის სახით, რომლითაც 3D ობიექტის მთლიანი მოცულობა წარმოდგინება.*

ამასთან ერთი წარმოდგენა შეიძლება გარდაქმნილი იქნეს მეორეში.

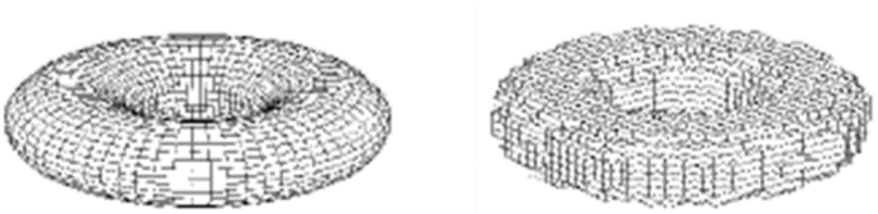
პოლიგონალური ბადე წარმოადგენს წვეროების, წიბოების და წახნაგების ერთობლიობას, რომელიც განსაზღვრავს მრავალწახნაგა ობიექტის ფორმას 3D სივრცეში. **პოლიგონი** (polygon) ეს არის ერთ სიბრტყეში მოთავსებული (კომპლანარული) წახნაგების კრებული. ჩვეულებრივად წახნაგები შეიძლება იყოს სამკუთხა, ოთხკუთხა, ან მარტივი ამოზნექილი მრავალკუთხედები (პოლიგონები). მაგრამ ბადე ასევე შეიძლება შედგებოდეს ყველაზე უფრო ზოგადი სახის ჩაზნექილი მრავალკუთხედებისგან, ან ხვრელების მქონე მრავალკუთხედებისგან. სამკუთხა და ოთხკუთხა ბადით წარმოდგენილი ზედაპირების მქონე ობიექტები მოცემულია 4.19 სურათზე.



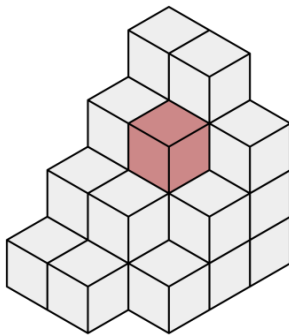
სურ. 4.19

ვოქსელებით წარმოდგენილი 3D ობიექტის მოდელი აგებულია ერთმანეთის იდენტური და ფიქსირებული რეგულარული ბადის უჯრედებში მოთავსებული სივრცითი (მოცულობითი) ელემენტებისგან. ამ პროცესს „**ვოქსელიზაცია**“ უწოდებენ. ამგვარად, ასეთი გარდაქმნის შედეგად მიიღება უწყვეტი 3D ობიექტის 3D დისკრეტული მოდელი გარკვეული მიახლოებით. 4.20 სურათზე წარმოდგენილია უწყვეტი ზედაპირი და მისი ერთნა-

ირი ზომის კუბებით ვოქსელიზაციის შედეგად მიღებული დისკრეტული ზედაპირი. ამასთან რაც უფრო მცირდება ვოქსელების ზომა, მით უმჯობესდება ობიექტის დისკრეტულ სახეში წარმოდგენის სიზუსტე, მაგრამ ეს თავის მხრივ მოითხოვს კომპიუტერის დიდ მეხსიერებას და გამოთვლების დიდ ფასს. ჩვეულებრივად ყველაზე სწორად იყენებენ მარტივ მოდელებს, მაგალითად, კუბებისაგან აგებულ მოდელებს (სურ. 4.21).



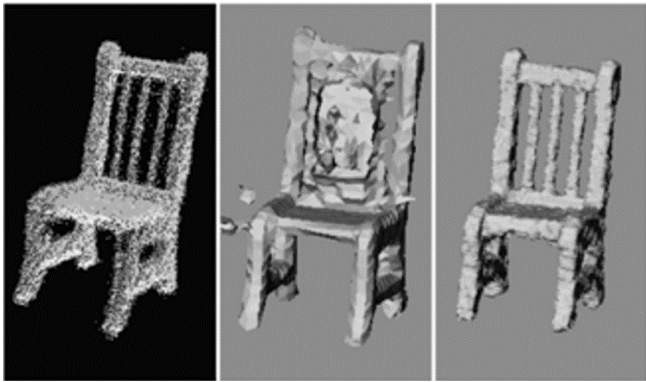
სურ. 4.20



სურ. 4.21

ამავე დროს ობიექტს შესაძლოა ჰქონდეს ისეთი დაფარული ზედაპირებიც, რომლებიც არც ერთი ხედიდან არ ჩანს. ობიექტის ზედაპირის რეკონსტრუქციის დროს სასურველია, რომ

რაც შეიძლება მეტი იყოს მსგავსება რეკონსტრუირებული და რეალური ობიექტის ფორმებს შორის და ამავე დროს შენარჩუნებულ იქნეს ამ უკანასკნელის ტოპოლოგია. მაგრამ რეკონსტრუქციის დროს შეიძლება წარმოიშვას ხმაურთან დაკავშირებული პრობლემა. განვიხილოთ ეს საკითხი სკამის რეკონსტრუქციის მაგალითზე (სურ. 4.22,ა). როგორც ვხედავთ, შეთავსებული სიღრმის მონაცემები ერთმანეთთან მჭიდროდაა განლაგებული, მაგრამ ამავე დროს ადგილი აქვს ხმაურსაც. კერძოდ, არსებობენ რეალური სკამის გარეთ განლაგებული ზედმეტი წერტილები, განსაკუთრებით სკამის ზურგის მხარეს, რომელიც წარმოდგენილია ერთი მთლიანი ნაწილის სახით. 4.22,ბ სურათზე მოცემულია მარტივი რეკონსტრუქციის შედეგი, რომე-



ა ბ გ

სურ. 4.22

ლშიც სიღრმის მონაცემები წარმოდგენილია ერთმანეთთან მჭიდროდ განლაგებული 3D წერტილების ღრუბელის სახით და არ არის გათვალისწინებული თვით ობიექტის გეომეტრია, ანუ ცალკეული ურთიერთკავშირები ობიექტის შემადგენელ ნა-

წილებს შორის. შესაბამისად, რეკონსტრუქციის შედეგში არ არის გათვალისწინებული ობიექტის ტოპოლოგია.

შეთავსებული სიღრმის მონაცემების შემდგომი დამუშავებით შესაძლებელია რეკონსტრუქციის უკეთესი შედეგის მიღება (სურ. 4.22,გ). როგორც ვხედავთ, რეკონსტრუქციის სკამი წარმოდგენილია 3D წერტილების კარკასის სახით, რომელშიც სკამის შემადგენელი ცალკეული ნაწილები ერთმანეთისგან გამოყოფილია, თითქმის მოშორებულია ხმაურის წერტილები და ზურგის ვერტიკალურად განლაგებულ თამასებს შორის არსებობს თავისუფალი შუალედები. 4.22,გ სურათზე წარმოდგენილი რეკონსტრუქციის შედეგი მიღებულია **სივრცითი ამოკვეთის (space carving)** მეთოდის გამოყენებით.

3D ობიექტების რეკონსტრუქციის მეთოდებს შორის მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავთ მიდგომებს, რომლებსაც ფოტოკამერებიდან და ვიდეოკამერებიდან მიღებული მონაცემების დამუშავება შეუძლიათ. ამ მიდგომებში 3D რეკონსტრუქციისთვის მესამე განზომილების აღდგენა კამერით მიღებულ ორგანოზომილებიან მონაცემებზე დაყრდნობით ხდება. კამერა ასეთ შემთხვევაში წარმოადგენს უკუპროექტირების მოწყობილობას, ანუ ის ახდენს 3D სცენის გადაყვანას 2D გამოსახულებაში. მაგრამ ასეთი გადასვლისას იკარგება ინფორმაცია ობიექტის კუთხეების, რეალური ზომების და ა. შ. შესახებ. სცენის 3D ფორმის შეფასებისთვის საჭირო ინფორმაციიდან გამომდინარე, რეკონსტრუქციის მიდგომები იყოფა ორ ჯგუფად:

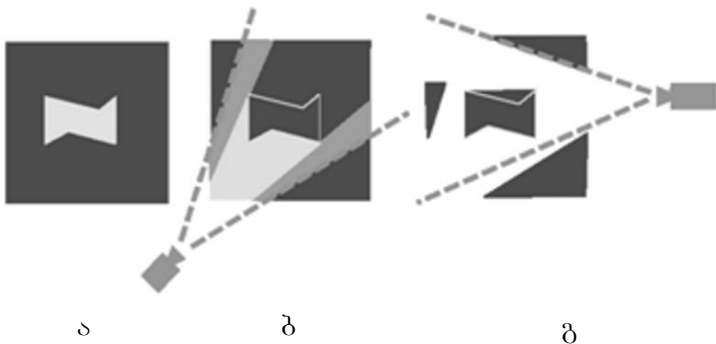
- სცენის ობიექტების გეომეტრიაზე დამყარებული მეთოდები;
- ფოტომეტრიულ ინფორმაციაზე დამყარებული მეთოდები.

ინფორმაციას ობიექტების გეომეტრიის შესახებ იყენებენ სცენაზე მარტივი ობიექტების (სფერო, კუბი, პრიზმა და ა. შ.) არსებობის შემთხვევაში. ხოლო რთული ფორმის ობიექტების შემთხვევაში კი იყენებენ **ფოტომეტრიულ ინფორმაციას** (ფიზიკური ოპტიკის ნაწილი, რომელიც შეისწავლის სინათლის წყაროს გამოსხივების ენერგეტიკულ რაოდენობრივ მახასიათებლებს, მაგალითად, სინათლის ძალას, განათებულობას, სიკაშკაშეს, და ა. შ.). ერთ-ერთ პოპულარულ სფეროს, რომელშიც ასეთი ინფორმაცია გამოიყენება წარმოადგენს სტერეოსედვა (§3.1.2).

4.1.1.1. სივრცითი ამოკვეთის ალგორითმი

სივრცითი ამოკვეთის ალგორითმი წარმოადგენს მეთოდს, რომლითაც 3D ობიექტების ფორმის რეკონსტრუქცია სცენიდან იმ არეების მოშორების გზით ხდება, რომლებიც არ შეესაბამებიან შესასვლელ გამოსახულებებს. ამ მიდგომის ძირითად არსში გასარკვევად განვიხილოთ 4.23 სურათი. ალგორითმის მიხედვით სცენის სივრცე ნაწევრდება **ელემენტარულ სივრცით კუბებად (ვოქსელებად)** და იგი წარმოიდგინება როგორც ასეთი კუბებისაგან შემდგარი ერთობლიობა, რომელთა დამუშავებაც ერთდროულადაა შესაძლებელი. იმ ობიექტის განივკვეთი, რომლის რეკონსტრუქციაც დაკვირვების სხვადასხვა წერტილში მოთავსებული კამერებიდან (სენსორებიდან) მიღებული ხედების კრებულის გამოყენებით უნდა მოხდეს, მოცემულია 4.23,ა სურათზე. ერთი კამერის გამოყენებით მიღებული ერთ-ერთი ხედი წარმოდგენილია 4.23,ბ სურათზე. სცენის სივრცე არასაჭირო ნაწილების (ვოქსელების გარეთ არსებულის და ხმაურით გამოწვეული) მოშორების მიზნით შეიძლება დაიყოს ცალკეულ არეებად, იქიდან გამომდინარე, თუ სად არის ობიექტთან

და კამერასთან მიმართებით განლაგებული სიდრმის მონაცემების შესაბამისი წერტილები. სურათიდან ჩანს, რომ კამერის ხედვის არეში ხედება ობიექტის ქვემოთ და მარცხნივ განლაგებული წერტილები. კამერის ხედვის კონუსურ არეში მოხვედრილი სივრცის ის ნაწილი, რომელიც მდებარეობს ობიექტის სკანირებულ ზედაპირსა და კამერას შორის (ღია რუხი ფერის) მოთავსებულია ობიექტის წინ და ამიტომ შეიძლება მოცილებული იქნას. ფონისა და ობიექტის შესახებ სიდრმის მონაცემების არსებობის შემთხვევაში დაკვირვებული სცენის სივრციდან ასევე შეიძლება მოცილებულ იქნას სივრცის დამატებითი ნაწილები (მუქი რუხი ფერის). მეორე მხრივ, არ შეიძლება ობიექტის უკან არსებული წერტილების მოშორება, რადგან ერთ კამერაზე დაყრდნობით არ შეიძლება იმის მტკიცება, ეს წერტილები ობიექტს ეკუთვნის თუ მის უკან არის განლაგებული, მაგრამ თუ ობიექტს შევხვდავთ მეორე კამერის საშუალებით (ანუ სხვა ხედიდან) (სურ. 4.23,გ), მაშინ ის საშუალებას მოგვცემს სცენის სივრცეს მოვაცილოთ დამატებით კიდევ რაღაც ახალი ნაწილი. ხედების რაოდენობის კიდევ უფრო გაზრდით

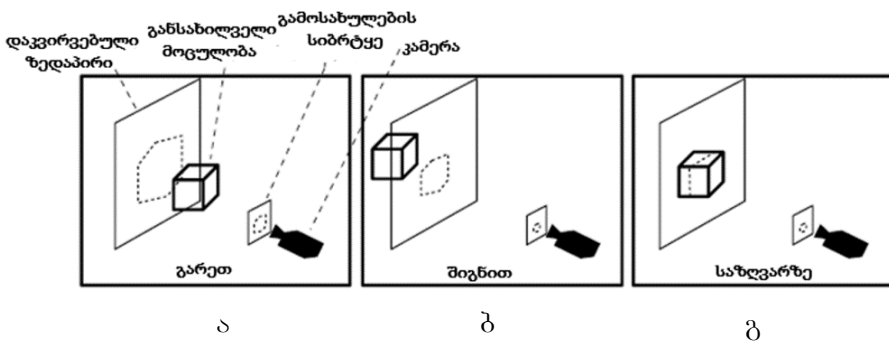


სურ. 4.23

შესაძლებელია სცენის სივრციდან თითქმის ყველა არასაჭირო ნაწილის მოშორება, რაც საბოლოოდ მიგვიყვანს იქამდე, რომ

ბოლოს დაგვრჩება მხოლოდ ვოქსელებით წარმოდგენილი ობიექტის მოდელი. მაგრამ თუ ვოქსელი არასწორად იქნა მოშორებული, მაშინ ამან შეიძლება ობიექტის სწორი ნაწილების მოშორებაც გამოიწვიოს.

4.24,ა,ბ,გ სურათზე ნაჩვენებია, თუ როგორ შეიძლება განისაზღვროს სცენის სივრციდან აღებული რომელიმე ერთეულოვანი სივრცითი კუბის მდებარეობა სცენაზე ერთი კამერიიდან მიღებულ ხედზე დაყრდნობით შესაბამისად 4.24 სურათზე მოცემულ ა), ბ) და გ) შემთხვევებისთვის:



სურ. 4.24

- ა) კუბი მოთავსებულია კამერასა და სიღრმის მონაცემებს შორის. ეს ნიშნავს, რომ კუბი მდებარეობს ობიექტის საზღვრებს გარეთ და ის შეიძლება მოშორებულ იქნას;
- ბ) კუბი მთლიანად მოთავსებულია სიღრმის მონაცემების უკან. ასეთ შემთხვევაში, კამერის მდებარეობის გათვალისწინებით, კუბი ობიექტის შიგნით მოთავსებულად ითვლება;

- *კ) კუბი მოთავსებულია ნაწილობრივ სიღრმის მონაცემების უკან და ნაწილობრივ წინ. ამ შემთხვევაში ითვლება, რომ ის კვეთს ობიექტის ზედაპირს.*

რაც შეეხება სცენაზე ერთეულოვანი კუბის მარკირებას მისი მდებარეობიდან გამომდინარე, ის შემდგენაირად შეიძლება განხორციელდეს. კუბის 8 კიდურა წვერო პროეცირდება კამერის გამოსახულების სიბრტყეზე და მათი ამოზნექილი გარსი საზოგადოდ ქმნის ექვსკუთხედს. კამერის ცენტრიდან ექვსკუთხედზე გამავალი სხივები ქმნის კონუსს, რომელიც ისეთნაირად არის წაკვეთილი, რომ ზუსტად მოიცვას კუბი. თუ ექვსკუთხედზე პროეცირებული სიღრმის მონაცემების ყველა წერტილი მოთავსებულია წაკვეთილი კონუსის უკან, ანუ წერტილები კამერიდან უფრო შორს არის ვიდრე კუბის ყველაზე კიდურა წვერო, მაშინ ითვლება, რომ კუბი ობიექტის საზღვრებს გარეთაა მოთავსებული. ხოლო, თუ ყველა ეს წერტილი კუბის ყველაზე უახლოეს წვეროზე უფრო ახლოსაა მოთავსებული ობიექტთან, მაშინ ითვლება, რომ კუბი მდებარეობს ობიექტის შიგნით. საწინააღმდეგო შემთხვევაში კუბი ობიექტის საზღვარზე დევს.

ჩვენ განვიხილეთ ერთი კუბისა და ერთი კამერის შემთხვევა და ვნახეთ, რომ სცენის სივრციდან ცარიელი ნაწილების მოსაშორებლად არა ერთი, არამედ რამდენიმე კამერაა საჭირო. ამასთან, კუბების მარკირებისას ზემოაღწერილი პროცედურა უნდა შესრულდეს თითოეული კამერისთვის ცალ-ცალკე და თუ ერთი კამერა მაინც ამბობს, რომ კუბი ობიექტის საზღვრებს გარეთაა მოთავსებული, მაშინ კუბი მართლაც ითვლება საზღვრებს გარეთ მოთავსებულად. თუ ყველა კამერა ამბობს, რომ კუბი დევს ობიექტის შიგნით, მაშინ ის ჯერ კიდევ ითვლება ობიექტის შიგნით მყოფად. რომელიმე ხელიდან შეიძლება

აღმოჩნდეს, რომ ის მართლაც დევს ობიექტის გარეთ, მაგრამ ეს ხელი განხილვაში არ მონაწილეობდა. მესამე შემთხვევაში, როცა კუბი ობიექტის არც შიგნითაა და არც გარეთ, ის ითვლება ობიექტის საზღვარზე მდებარე კუბად.

ამავე დროს უნდა აღინიშნოს სივრცითი ამოკვეთის ალგორითმისთვის დამახასიათებელი შეზღუდვებიც. კერძოდ:

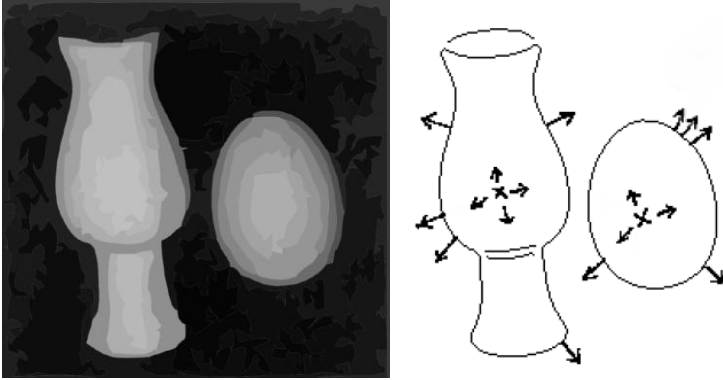
- შესასვლელი გამოსახულებები მიღებული უნდა იყოს კალიბრირებული კამერებიდან;
- ალგორითმის გამოყენება პრობლემატურია არალამბერტული ზედაპირების მქონე ობიექტების შემთხვევაში;
- ალგორითმის სიზუსტე შეზღუდულია ვოქსელების გარჩევისუნარიანობით – ამის გამო ვოქსელები პატარა უნდა იყოს.

4.12. ობიექტის ფორმის გამოთვლა განათებულობის მიხედვით

აღმოჩნდა, რომ ობიექტის განათებულობა გარკვეული გამოთვლების ჩატარების შედეგად შეიძლება გამოყენებული იქნეს მისი ფორმის გამოსათვლელად. ასეთი გამოთვლების საფუძველს წარმოადგენს ადამიანის მხედველობისთვის დამახასიათებელი თვისება – აღიქვას ობიექტის ზედაპირები, რომელთა განათებულობაც ხედვის მიმართულებით თანდათანობით მცირდება, როგორც ზედაპირები, რომლებიც მას თანდათან შორდება. მაგალითად, პირისახის ღოყაზე წასმული კანზე უფრო მუქი ფერის გრიმი პირისახეს უფრო ვიწროს აჩენს იმის გამო, რომ მუქი ფერის გრიმი დამკვირვებელს უქმნის ილუზიას, რომ ასეთი ზედაპირები მისგან უფრო შორსაა, ვიდრე ეს სინამდვილე-

შია. და პირიქით, კანზე უფრო ღია ფერის გრიმის წასმისას დამკვირვებელი პირისახეს როგორც უფრო სავსეს (სრულს) ხედავს. ცნობილია, რომ (§2.4.1.) ობიექტის ზედაპირის ელემენტში ინტენსიობის მნიშვნელობასა (განათებულობასა) და მასზე აღმართულ ნორმალს შორის არსებობს დამოკიდებულება, რომელიც აღიწერება ლამბერტის არეკვლის ფორმულის საშუალებით. მეთოდები, რომლებიც ზედაპირის მიმართ ნორმალის გამოთვლისთვის იყენებს მისი გამოსახულების განათებულობის ინტენსიობის შესახებ მონაცემებს, ცნობილია როგორც **ფორმის გამოთვლის მეთოდები ზედაპირის განათებულობის მიხედვით** (shape from shading). განათებულობის მიხედვით ობიექტის ფორმის გამოთვლის კლასიკურ მოდელებში ივარაუდება, რომ ცნობილია სინათლის წყაროების განათების მიმართულებები და ასევე ის, რომ ზედაპირი ლოკალურად გლუვია. ამ მიდგომის არსი ნაჩვენებია 4.25 სურათზე, სადაც მარცხნივ მოცემულია ლამბერტის ზედაპირის მქონე ობიექტების გამოსახულება, რომელიც მიღებულია კამერასთან ახლოს მოთავსებული სინათლის წყაროთი განათებისას. ამ შემთხვევაში ობიექტის ზედაპირის განათებულობის ინტენსიობა ზედაპირის ნორმალსა და დაცემული სინათლის მიმართულებას შორის კუთხის პროპორციულია. ხოლო მარჯვენა სურათზე მოცემულია ზედაპირის მიმართ ნორმალები ობიექტების კონტურის რამდენიმე წერტილში. სურათიდან ჩანს, რომ გამოსახულებაზე უფრო კაშკაშა წერტილები შეესაბამება იმ წერტილებს, რომელთა ნორმალები სინათლის წყარის მიმართულებითაა მიმართული. ხოლო ნორმალები, რომლებიც დამკვირვებლისკენაა მიმართული სურათზე აღნიშნულია ჯვრებით. რაც შეეხება დამკვირვებლიდან გამოსახულების თითოეული წერტილის z დაშორების (სიღრმის) განსაზღვრას, ამისთვის შეიძლება გამოსახულების ერთ-ერთ ყველაზე უფრო კაშკაშა წერტილს მივანიჭოთ სიღრმის რაღაც

z_0 მნიშვნელობა და შემდეგ, გამოსახულების გასწვრივ განლაგებული დანარჩენი წერტილების სიღრმის მნიშვნელობები განესაზღვროთ მათი ნორმალების მიმართულების ცვლილებიდან გამომდინარე.



სურ. 4.25

4.12.1. სტერეოფოტომეტრული მეთოდი

ამ მეთოდის გამოყენებით 3D ობიექტების რეკონსტრუქცია მოითხოვს სცენისკენ მიმართული 2 ან მეტი კალიბრირებული კამერის გამოყენებას. ამ დროს, იმის გამო, რომ ადგილი აქვს კამერების ხედვის ველების გადაკვეთას, დგება სტერეოწყვილის გამოსახულებებზე სცენის ერთსა და იმავე ნაწილებს შორის შესაბამისობების დადგენის ამოცანა. შესაბამისობის დადგენის შემდეგ სცენის თითოეული წერტილის წანაცვლების სიდიდისა და კამერების კალიბრაციის პარამეტრების ცოდნის საფუძველზე მიიღება სიღრმის გამოსახულება. სტერეოხედვის სისტემის საიმედოობის გაზრდისთვის ზრდიან კამერების რაოდენობას.

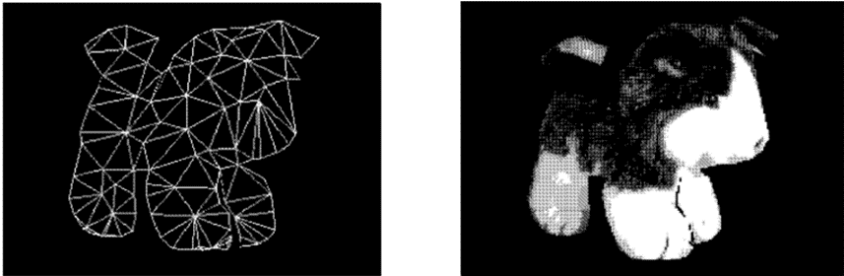
V თავი. 3D ობიექტების წარმოდგენის მოდელები

5.1. შესავალი

სამგანზომილებიანი ობიექტების მოდელები ფართოდ გამოიყენება როგორც კომპიუტერულ ხედვაში, ისე მანქანურ გრაფიკაში. ამ უკანასკნელში სამგანზომილებიანი ობიექტები წარმოდგენილი უნდა იყოს მონაცემთა ისეთი სტრუქტურის სახით, რომელიც მოსახერხებელი იქნება გრაფიკული სცენების გამოთვლისა და ეკრანზე ვიზუალიზაციისთვის. მოდელებიდან ერთერთი ყველაზე უფრო ფართოდ გავრცელებულია 3D პოლიგონალური ბადის ტიპის მოდელი, რომელიც წარმოადგენს მრავალკუთხედების კრებულს, აგებულს სამგანზომილებიანი წერტილებისა და მათი შემაერთებელი წიბოებისგან. გლუვი და მარტივი ზედაპირების აღწერისთვის მანქანურ გრაფიკაში ასევე შემუშავებულია სხვა მოდელებიც. კერძოდ, მეორე რიგის ზედაპირები (კვადრიკები), B – სპლაინ ზედაპირები და სხვა. გრაფიკული მოდელები გარდა ობიექტების სივრცითი ფორმის შესახებ ინფორმაციისა, ასევე შეიძლება შეიცავდნენ ინფორმაციას იმ ფერისა და ტექსტურის შესახებ, რომელიც ობიექტის ზედაპირს ვიზუალური ასახვისას ზემოდან ედება. 5.1 სურათზე წარმოდგენილია სათამაშო ძაღლის უხეში 3D პოლიგონალური ბადით აგებული მოდელი და იმავე მოდელის რენდერინგის შედეგად მიღებული გამოსახულება მასზე ტექსტურების დადების შემდეგ.

კომპიუტერულ ხედვაში ობიექტები ისეთი სახით უნდა იქნეს წარმოდგენილი, რომელიც გამოსახულებებზე მათი ამონიშნის ამოცანას გააადვილებს. ეს თავის მხრივ გულისხმობს

გარკვეული შესაბამისობის დადგენის შესაძლებლობას ობიექტის წარმოდგენის მოდელსა და გამოსახულებაზე ამ ობიექტიდან აღებულ მახასიათებელ ნიშან-თვისებებს შორის, მაგრამ სამგანზომილებიანი ობიექტების ამოცნობისას გამოსახულებები შეიძლება სხვადასხვა ფორმატის იყოს. კერძოდ, ნახევარტონური, ფერადი ან მანძილსაზომით მიღებული, ან კიდევ მათი კომბინაციები. ეს კი იწვევს ნიშან-თვისებათა მრავალფეროვნების და რაოდენობის ზრდას და შესაბამისად ართულებს ამოცანის გადაწყვეტას. მაგრამ ობიექტების სამგანზომილებიანი მოდელების უმეტესობა არ არის განკუთვნილი ნიშან-თვისებათა ასეთი რაოდენობისა და მრავალფეროვნებისთვის. ამიტომ კონკრეტული ტიპის ამოცანის გადასაწყვეტად საჭირო ხდება შესაბამისი მოდელის შემუშავება.



სურ. 5.1

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, სამგანზომილებიანი ობიექტების ამოცნობის ამოცანის განხილვამდე მიმოვიხილოთ ობიექტების წარმოდგენის ყველაზე უფრო მეტად გავრცელებული მოდელები. გამოარჩევენ ზოგადი სახის შემდეგ მოდელებს: **გეომეტრიული ტიპის მოდელები** (შედგება წერტილების, მონაკვეთებისა და ზედაპირებისაგან), **სიმბოლური ტიპის მოდელები** (შედგება ელემენტარული კომპონენტებისა და მათ შორის სივ-

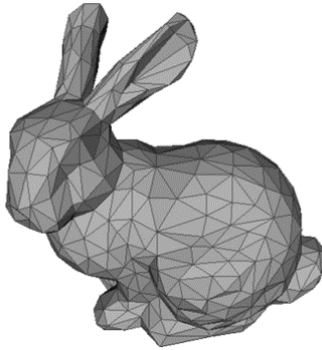
რცითი ურთიერთკავშირებისგან) და ფუნქციური ტიპის მოდელები (შედგება ფუნქციური ნაწილებისა და მათ შორის ფუნქციური კავშირებისგან). განვიხილოთ ეს მოდელები.

5.2. გეომეტრიული მოდელები

კომპიუტერულ ხედვაში ამ მოდელების გამოყენების პირველი მცდელობა ეკუთვნის ამერიკელ მეცნიერს ლ. რობერტს. იგი ეხება გამოსახულებაზე მრავალწახნაგა ობიექტების ამოცნობის პრობლემას. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად გამოყენებული იყო ობიექტების მარტივი კარკასული ტიპის (wire-frame models) მოდელები და გამოსახულებებიდან გამოყოფილი ცალკეული წრფივი მონაკვეთების ერთმანეთთან შეთანადების პროცედურა. წრფივი მონაკვეთების გამოყენებაზე დამყარებული მოდელები დღესაც პოპულარულია. გარდა ამისა, მრუდწირული და მეტრიც, ნებისმიერი ფორმის მქონე ზედაპირების უფრო ზუსტი წარმოდგენისთვის შემუშავებული იქნა სხვადასხვა ალტერნატივა. ჩვენ განვიხილავთ ბადის ტიპის მოდელებს, ზედაპირი – წიბო - წვერო ტიპის მოდელებს, ვოქსელური ტიპის მოდელებს, ოქტანტურ ხეებზე დამყარებულ მოდელებს, განზოგადებულ ცილინდრებზე დამყარებულ მოდელებს, სუპერკვადრებზე დამყარებულ და ლეფორმაციულ მოდელებს. ასევე ვაჩვენებთ განსხვავებას ჭეშმარიტ (ნამდვილ) სამგანზომილებიან მოდელებსა და მახასიათებელი ტიპის მოდელებს შორის, რომლებიც სამგანზომილებიან ობიექტს წარმოადგენენ დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან (ხედიდან) მიღებული მისი ორგანზომილებიანი გამოსახულებების სიმრავლის საშუალებით.

5.2.1. 3D ბადის ტიპის მოდელები

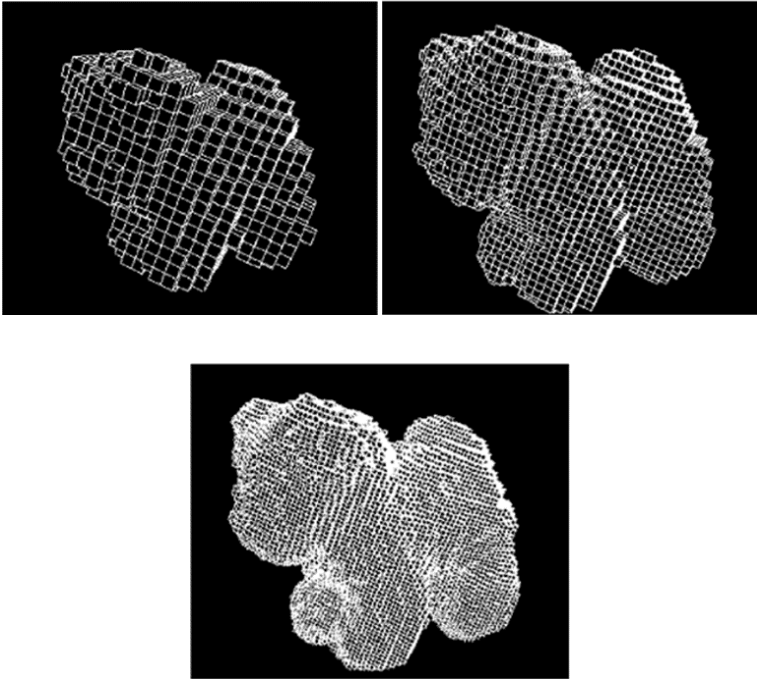
როგორც ვიცით, ობიექტები 3D სივრცეში შეიძლება აღიწეროს მრავალკუთხედების წარმომქმნელი წვეროების და მათი შემაერთებული წიბოების სიმრავლის საშუალებით (§2.3.). 3D სივრცეში ობიექტების წარმოდგენის ასეთ მარტივ გეომეტრიულ ხერხს **3D პოლიგონალური ბადის ტიპის მოდელს (3D mesh)** უწოდებენ. იმის გამო, რომ მრავალკუთხედი შეიძლება მრავალნაირი იყოს, შესაბამისად ასეთი ბადის ტიპის მოდელებიც ბევრია. თუ მოდელი შედგება ერთი ტიპის მრავალკუთხედებისგან, მაშინ გვაქვს **რეგულარული პოლიგონალური ბადის ტიპის მოდელი (3D regular mesh)**. თუ კარკასული მოდელი შედგება მხოლოდ სამკუთხედებისგან, მაშინ გვაქვს **სამკუთხა ბადის ტიპის მოდელი (triangular mesh)** (სურ. 5.2).



სურ. 5.2

იმის გათვალისწინებით, თუ რამდენად საჭიროა მხედველობაში მივიღოთ ობიექტის წვრილ-წვრილი დეტალები, მისი პოლიგონალური ბადის ტიპის მოდელით წარმოდგენის სიზუსტე შეიძლება განსხვავებული იყოს, დაწყებული უხეში სიზუს-

ტიდან და დამთავრებული მაღალ სიზუსტემდე. 5.3 სურათზე წარმოდგენილია სათამაშო ძაღლის სამი კარკასული მოდელი, რომლებიც შეესაბამება მისი წარმოდგენის სხვადასხვა გარჩევისუნარიანობას.



სურ. 5.3

აღნიშნული მოდელები შეიძლება გამოყენებული იქნეს როგორც გრაფიკული ვიზუალიზაციისთვის, ასევე ობიექტის ამოცნობისთვის სიღრმის მონაცემებზე დაყრდნობით. ამოცნობის ამოცანის ამოხსნისთვის მახასიათებელი ნიშან-თვისებების გამოყოფის ოპერატორებმა სიღრმის მონაცემებიდან ის ნიშან-

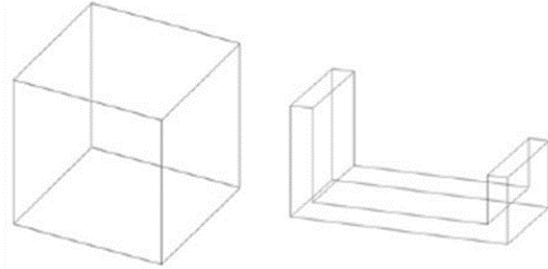
თვისებები უნდა გამოყონ, რომლებიც შესაფერისი იქნება პოლიგონალური ბადის ტიპის მოდელთან შეთანადებისათვის.

5.2.2. „ზედაპირი – წიბო – წვერო“ ტიპის მოდელები

სამგანზომილებიანი ხედვის სისტემები თავისი განვითარების ადრეულ ეტაპზე ძირითადადში მუშაობდნენ ბრტყელი წახნაგების მქონე მრავალწახნაგა ობიექტებთან. შესაბამისად ობიექტების ამოცნობისა და მათი მდებარეობის შეფასებისთვის მთავარ მახასიათებელ ნიშან-თვისებებად გამოყენებული იყო წიბოები.

განსაზღვრება 5.1. *ობიექტის სამგანზომილებიან მოდელს, რომელიც მხოლოდ წვეროებსა და წიბოებს შეიცავს კარკასული ტიპის მოდელი (wire-frame model) ეწოდება.*

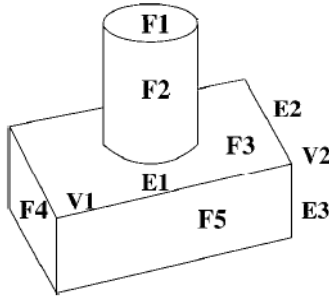
ის წარმოადგენს ობიექტის უმარტივესი სახის გეომეტრიულ მოდელს, რომელიც გამოიყენება კომპიუტერში ობიექტის მათემატიკური წარმოდგენისათვის. მას ასევე **კიდეების წარმოდგენის მოდელსაც** უწოდებენ. 5.4 სურათზე წარმოდგენილია კუბის ტიპური კარკასული ტიპის მოდელი. კარკასული ტიპის მოდელი შედგება *წერტილებისგან, წირებისგან, რკალებისა და წრეებისგან, კონიკებისა* (conics – კონუსისა და სიბრტყის გადაკვეთის შედეგად მიღებული განივკვეთის შემომსაზღვრელი კონტური) და *მრუდეებისგან*. ობიექტის ასეთი მოდელის სახით წარმოდგენისას იგულისხმება, რომ მისი ზედაპირები ბრტყელია, ხოლო ყველა კიდე წრფივია.



სურ. 5.4

კარკასული ტიპის მოდელის განზოგადებას წარმოადგენს **ზედაპირი – წიბო – წვერო** (surface–edge–vertex) ტიპის მოდელი. ამ მოდელის შემთხვევაში მონაცემთა სტრუქტურა შეიცავს მონაცემებს ობიექტის ყველა წვეროს, ზედაპირის და წიბოს შესახებ და ასევე ცნობებს მათი ტოპოლოგიური ურთიერთკავშირების შესახებ. ეს უკანასკნელი მიუთითებს, თუ რომელი ზედაპირებია განლაგებული წიბოს თითოეულ მხარეს და რომელი წვეროები წარმოადგენენ წიბოების დაბოლოებებს. მრავალწახნაგა ობიექტების შემთხვევაში ზედაპირები ბრტყელია, ხოლო წიბოები წრფივი მონაკვეთებია. მაგრამ მოცემული მოდელი შეიძლება განზოგადებული იყოს ისეთ მრავალწახნაგა ობიექტებზეც, რომელთა ზედაპირები და წიბოები მრუდწირულია. ასეთი მოდელის მონაცემთა სტრუქტურა წარმოადგენს იერარქიული ტიპის სტრუქტურას, რომელიც იწყება ყველაზე ზემოთა დონიდან, სადაც გვაქვს ამოსაცნობი ობიექტების სიმრავლე და გრძელდება ქვემოთ, სადაც დაბალ დონეებზე განლაგებულია ზედაპირები და რკალები.

ზედაპირი – წიბო – წვერო მოდელის გამოყენებით მოვახდინოთ 5.5 სურათზე მოცემული სამკანზომილებიანი ობიექტის აღწერა, რომელიც შედგება ბრტყელი და ცილინდრული ტიპის ზედაპირებისაგან.



სურ. 5.5

სიმარტივისთვის განვიხილოთ მხოლოდ რამდენიმე ხილული F_1, F_2, F_3, F_4 და F_5 ზედაპირი და მათი შესაბამისი წიბოები. აღნიშნული ზედაპირებიდან F_1, F_3, F_4 და F_5 ზედაპირები ბრტყელია, ხოლო F_2 ცილინდრულია. F_1 შემოსაზღვრულია ერთი საზღვრით, რომელიც შედგება ერთადერთი წიბოსგან, რომელიც შეიძლება წარმოვადგინოთ წრეწირის რკალის საშუალებით. F_2 -ს ორი ასეთი საზღვარი აქვს. F_3 -ს აქვს ოთხი წრფივი მონაკვეთისგან შედგენილი გარე საზღვარი და შიგა ნახვრეტის საზღვარი წრიული ტიპის რკალის სახით. F_4 და F_5 ზედაპირებს აქვთ ოთხი მონაკვეთისგან შედგენილი თითო-თითო საზღვარი. E_1 წიბო ერთმანეთისგან ყოფს F_3 და F_5 წახნაგს. თუ E_1 წიბოს საწყის წერტილად ავიღებთ V_1 წვეროს, ხოლო ბოლო წერტილად V_2 წვეროს, მაშინ F_3 ზედაპირი იქნება მარცხენა წახნაგი, ხოლო F_5 კი E_1 წიბოს მარჯვენა წახნაგი. V_2 წვეროსთან დაკავშირებულია სამი – E_1, E_2 და E_3 წიბო.

კარკასული ტიპის მოდელების ნაკლოვან მხარეს წარმოადგენს მათ მიერ რეალური ობიექტების წარმოდგენის არაცალსახობა (ორაზროვნება) და მათი მხოლოდ ადამიანის ინტერპრეტაციაზე სრული დამოკიდებულება, განსაკუთრებით რთული ობიექტების შემთხვევაში. ასევე ამ მოდელებით შეუძლებელია

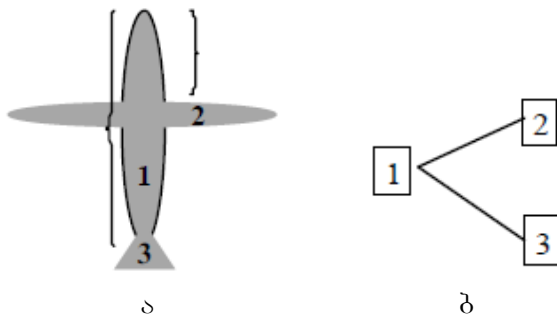
ობიექტის მოცულობის გამოთვლა, განიკვეთისა და სხვა მახასიათებლების განსაზღვრა.

5.2.3. განზოგადებულ ცილინდრზე დამყარებული მოდელები

ბუნებაში არსებული ბევრი ბიოლოგიური თუ ადამიანის მიერ წარმოებული ობიექტის მოცულობა წაგრძელებული ფორმისაა. შესაბამისად, ასეთი ტიპის ობიექტების აღწერისთვის იყენებენ განზოგადებულ ცილინდრზე დამყარებულ მოდელებს (generalized-cylinder models). განზოგადებული ცილინდრის მოდელი შეიცავს:

- განზოგადებული ცილინდრების სიმრავლეს;
- მათ შორის სივრცით მიმართებებს;
- ობიექტის გლობალურ თვისებებს.

5.6,ა სურათზე მოცემულია განზოგადებული ცილინდრის მოდელით წარმოდგენილი თვითმფრინავი, რომელიც შეიცავს 1, 2 და 3 ჭკლით მარკირებულ განზოგადებულ ცილინდრებს. მათ შორის სივრცითი მიმართებები მოცემულია 5.6,ბ სურათზე.

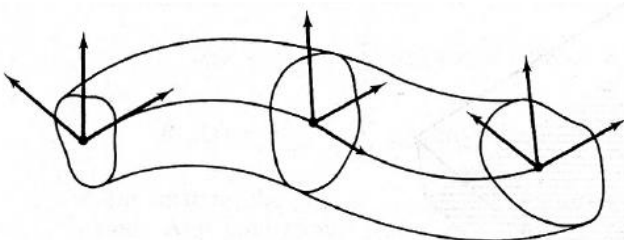


სურ. 5.6

ობიექტების ამოცნობისთვის ასეთი ტიპის მოდელების გამოყენების არსი იმაში მდგომარეობს, რომ მოახდინოს 3D ობიექტების დანაწევრება მარტივ გეომეტრიულ ფიგურებად, რაც ამოცნობის პროცესს გაამარტივებს.

განსაზღვრება 5.2. *განზოგადებული ცილინდრი ეწოდება მოცულობით მყარ სხეულს, რომელიც მოიცემა 3D მრუდწირული ღერძით და მის თითოეულ წერტილში განსაზღვრული განივკვეთის ფუნქციით.*

განივკვეთი წარმოადგენს შეკრულ ბრტყელ მრუდს, რომლის ფორმა უცვლელია, მაგრამ მასშტაბი ღერძის გასწვრივ შეიძლება იცვლებოდეს. ჩვეულებრივად, ასეთი მოდელის შეზღუდვა იმაში მდგომარეობს, რომ განივკვეთი ღერძის მართობული უნდა იყოს მის ყოველ წერტილში. განივკვეთი „გადაადგილდება“ ღერძის გასწვრივ, რის შედეგადაც ხდება ცილინდრული ფორმის სხეულის ფორმირება. 5.7 სურათზე წარმოდგენილია განზოგადებული ცილინდრი და მის განივკვეთებთან დაკავშირებული კოორდინატთა სისტემები.

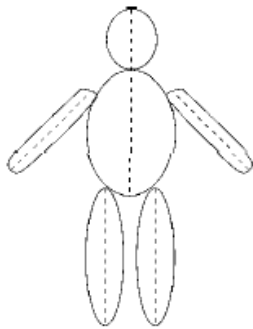


სურ. 5.7

მაგალითად, ჩვეულებრივი წრიული ცილინდრი წარმოადგენს განზოგადებულ ცილინდრს, რომლის ღერძი წრფივი მონაკვეთია, ხოლო განივკვეთი კი მუდმივი რადიუსის მქონე წრე; განზოგადებულ ცილინდრს წარმოადგენს კონუსი, რომლის ღერძი წრფივი მონაკვეთია, ხოლო განივკვეთი კი წრე, რომლის რადიუსი იზრდება ღერძის ერთ ბოლოში ნულოვანი მნიშვნელობიდან მაქსიმალურ მნიშვნელობამდე ღერძის მეორე ბოლოში. პარალელეპიპედიც წარმოადგენს განზოგადებულ ცილინდრს, რომლის ღერძი წრფივი მონაკვეთია, ხოლო განივკვეთი – ფიქსირებული ზომის სწორკუთხედი. განზოგადებული ცილინდრია ტორიც, რომლის ღერძი წრეა, ხოლო განივკვეთი მუდმივი რადიუსის წრე.

განზოგადებული ცილინდრის აღწერისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ მისი მახასიათებელი სხვადასხვა პარამეტრი. მაგალითად, მისი ღერძის სიგრძე, განივკვეთის საშუალო სიგანე, ორი განივკვეთის ფარდობა და კონუსურობის კუთხე (taper angle) – კონუსის წვეროს კუთხე. რაც შეეხება ცილინდრებს შორის სივრცით მიმართებებს, ამისთვის გამოიყენება ბმულობის ცნება, მაგრამ ცილინდრების შეერთების ბმულობის საშუალებით აღწერის გარდა, რომელიც ბოლო წერტილების თანხვედრის შემთხვევაში გამოიყენება, ცილინდრები შეიძლება ისეთნაირად იყოს შეერთებული, რომ ერთი ცილინდრის ბოლო წერტილი შეიძლება შეერთებული იყოს მეორე ცილინდრის რომელიმე შიგა წერტილთან. ასეთ შემთხვევაში ცილინდრების შეერთების აღწერისთვის შეიძლება გამოყენებული იქნას ისეთი პარამეტრები, როგორცაა ცილინდრების შეხების წერტილის კოორდინატები, ერთი ცილინდრის მეორის მიმართ დახრის ან მობრუნების კუთხე. რაც შეეხება ობიექტის გლობალურ მახასიათებლებს, ასეთად შეიძლება გამოდგეს ობიექტის მოდულში არსებული ცილინდრების შემადგენელი ნაწილების რაოდენობა.

დენობა, წავგრძელებული ნაწილების რაოდენობა და შეერთებუ-
ბის სიმეტრია. განზოგადებული ცილინდრების გამოყენებით
შესაძლებელია ასევე იერარქიული მოდელის აგებაც, რომელში-
ც ობიექტის დეტალიზაციის სხვადასხვა დონე წარმოდგენი-
ლი იქნება იერარქიის სხვადასხვა დონეზე. ასეთი სახით წარმ-
ოდგენილი ადამიანის სხეულის უხეში მოდელი მოცემულია 5.8
სურათზე (წყვეტილი ხაზებით აღნიშნულია ცილინდრების დე-
რძები). როგორც ვხედავთ, სხეული წარმოდგენილია დერძების
კრებულის ანუ ცილინდრების სახით, რომლებიც წარმოადგენ-
ენ ადამიანის თავს, სხეულს, ხელებსა და ფეხებს. იერარქიის
შემდეგ დონეზე სხეული შეიძლება დაიყოს კისრის და ტანის
ქვედა ნაწილებად, ხელები – მხრის, მკლავის და მტევნის ცი-
ლინდრებად. ასევე დაიყოფა ცალკეულ ცილინდრებად ფეხები.
იერარქიის შემდეგ დონეზე ხელის მტევანი დაიყოფა ხელისგუ-
ლად და 5 თითად, და ა. შ.



სურ. 5.8

განზოგადებული ცილინდრის, როგორც მყარი სხეულის
ცალსახა განსაზღვრისთვის გამოიყენება ორი მათემატიკური
ფუნქცია, რომლებიც ცილინდრის დერძსა და განივკვეთს აღ-

წერენ თითოეულ წერტილში. დეკარტის (x, y, z) კოორდინატთა სისტემაში ღერძი შეიძლება წარმოდგენილი იყოს პარამეტრულ სახეში, როგორც რკალის s სიგრძის ფუნქცია:

$$\mathbf{a}(s) = (x(s), y(s), z(s)).$$

ამასთან, მოსახერხებელია, რომ თითოეულ $\mathbf{a}(s)$ წერტილთან დაკავშირებული იყოს კოორდინატთა ლოკალური სისტემა სათავით ამ წერტილში. ამავე კოორდინატთა სისტემაშივე განისაზღვრება განივკვეთი. ის შეიძლება აღიწეროს როგორც განივკვეთის სიბრტყის წერტილების სიმრავლე, ან პარამეტრულ სახეში წარმოდგენილი მისი მომენტები კონტურით (მრუდით), პარამეტრით r :

$$\text{განივკვეთის საზღვარი} = (x(r, s), y(r, s)).$$

s პარამეტრზე დამოკიდებულება მიუთითებს იმ ფაქტზე, რომ განივკვეთის ფორმა ცილინდრის ღერძის გასწვრივ შეიძლება იცვლებოდეს. ზემომოყვანილი განზოგადებული ცილინდრის ღერძისა და განივკვეთის ფუნქციები მოცემულია კოორდინატთა მსოფლიო სისტემაში. მაგრამ შესაძლებელია მათი გარდაქმნა განზოგადებული ცილინდრის ღერძთან დაკავშირებულ კოორდინატთა ლოკალურ სისტემაშიც.

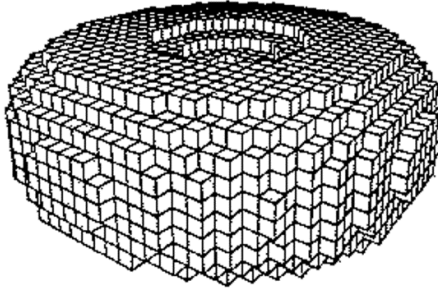
3D განზოგადებული ცილინდრის 2D გამოსახულებაზე პროექტირებისას მიიღება 2 ტიპის პროექცია: *ღებტი* და *ელისი*. *ღებტი* წარმოადგენს ცილინდრის „გრძელი“ ნაწილის პროექციას, ხოლო *ელისი* კი მისი განივკვეთის პროექციას, თუმცა იმის გამო, რომ განივკვეთი ყოველთვის შეიძლება არ იყოს წრეწირი, შესაბამისად მისი პროექციაც ყოველთვის არ იქნება

ელიფსი, მაგრამ ზოგიერთი განზოგადებული ცილინდრი მთლიანად სიმეტრიულია და ამის გამო მათ არ აქვთ „გრძელი“ ან „მოკლე“ ნაწილები. ხოლო იმ ცილინდრებისთვის, რომლებსაც ასეთი ნაწილები აქვთ, შემუშავებული იქნა ობიექტების გამოსახულებაზე ლენტების ძიების ალგორითმები, რომლებიც გამოსახულებაზე ცილინდრის ღერძის ფორმის მსგავს წაგრძელებულ არეებს ეძებენ.

3D ობიექტების განზოგადებული ცილინდრების სახით წარმოდგენის ერთ-ერთი უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ მისი საშუალებით ადვილად შესაძლებელი მყარი სხეულის ბევრი პარამეტრის გამოთვლა.

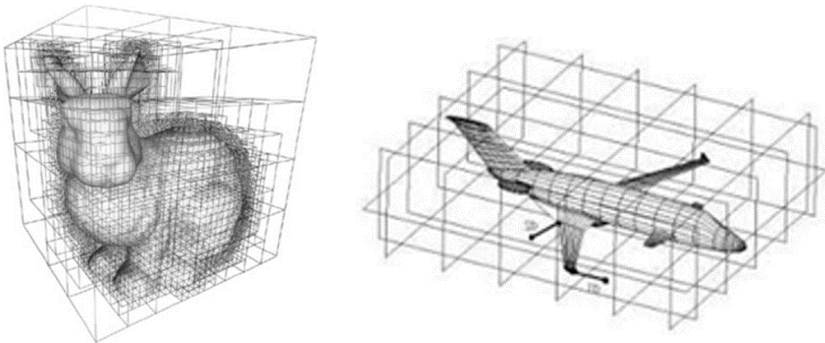
5.2.4. ოქტანტების ხეებზე დამყარებული მოდელები

დამკვირვებელი 3D ობიექტზე დაკვირვებისას მას ხედავს არა მთლიანად, არამედ მხოლოდ იმ ნაწილს, რომელიც მისი ხედვის კუთხური ველის არეშია. ამავე დროს, როგორც ვიცით, 3D რასტრი წარმოადგენს $(2^n \times 2^n \times 2^n)$, (n მთელი რიცხვია), განზომილების მქონე ვოქსელებად (voxel – volume element) წოდებული (მოცულობითი პიქსელი) ელემენტების (კუბების) მასივს (სიმრავლეს). შესაბამისად, 3D სივრცე შეიძლება წარმოვადგინოთ როგორც ვოქსელების კრებულიდან შედგენილი მოცულობა, რომლის თითოეული ელემენტი გვიჩვენებს, არის თუ არა მასში ობიექტის რომელიმე ნაწილი. ამგვარად, ვოქსელების საშუალებით შესაძლებელია 3D უწყვეტი სივრცის დისკრეტული წარმოდგენა გარკვეული მიახლოებით (სურ. 5.9).



სურ. 5.9

მაგალითად, 3D ბინარული გამოსახულება წარმოადგენს 3D რასტრს, რომელიც შედგება თეთრი და შავი ფერის ვოქსელებისგან. ვოქსეატ, შავი ვოქსელების სიმრავლე წარმოადგენს ობიექტს, ხოლო თეთრი ვოქსელების სიმრავლე კი ფონს. მაგრამ თუ 3D ბინარული გამოსახულება შედგება შავი ფერის ვოქსელების მსხვილი ბლოკებისაგან, მაშინ ის შეიძლება წარმოვადგინოთ ასეთი ცალკეული ბლოკებისგან (კვანძებისგან) შედგენილი ხის საშუალებით. აქედან გამომდინარე, შემუშავებული იქნა ისეთი მეთოდები, რომლებიც სცენის 3D არეებად დაყოფის (დეკომპოზიციის) შესაძლებლობას იძლევა (სურ. 5.10). ასეთი მიდგომის გამოყენებით შეიძლება დამუშავდეს სცენის მხო-



სურ. 5.10

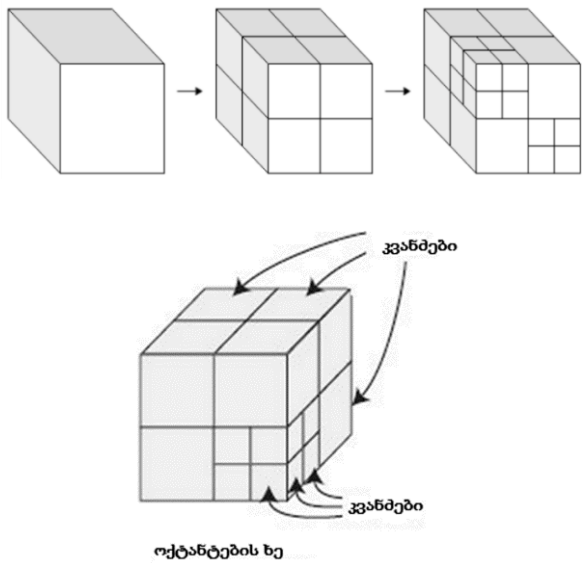
ლოდ ის ნაწილები, რომლებიც დამკვირვებლის ხედვის კუთხური ველის არეში არიან. ამის შედეგად, მკვეთრად მცირდება დასამუშავებელი მასივის მოცულობა, და შესაბამისად გამოთვლების ფასიც.

ამ იდეის რეალიზაციისთვის გამოიყენება ე. წ. **ოქტანტების ხე (octree)**, რომლის საფუძველზეც შესაძლებელია 3D სცენის იერარქიული აღწერა და მასზე დამყარებული ობიექტის მოდელის წარმოდგენა. ოქტანტების ხე წარმოადგენს 3D სივრცის შესახებ არსებული ინფორმაციის შესანახ მონაცემთა სტრუქტურას. საზოგადოდ, ის გამოიყენება მოცულობების ან ზედაპირების წარმოდგენისთვის. მათი უპირატესობა წარმოდგენის სხვა მოდელებთან შედარებით განსაკუთრებით გამოიხატება მაშინ, როცა 3D სივრცეში არსებული მოცულობები ერთმანეთთან უკიდურესად ბმულია. ასეთი ობიექტის მაგალითს წარმოადგენს ადამიანი, რომლის ზედაპირის არე მცირე რაოდენობის წერტილებს შეიცავს და მის ირგვლივ არსებული სივრცე არ წარმოადგენს ინტერესს. ოქტანტების ხეს შეუძლია დაიჭიროს ადამიანის ფორმის არსი მის ირგვლივ არსებული ცარიელი სივრცის ან ფორმის სრული შიგა სივრცის მოდელირებით და არ დახარჯოს ამისთვის ადგილი მეხსიერებაში. ოქტანტების ხის მოდელის გამოყენება სასარგებლოა მაგალითად, რობოტის მიერ გზის დაგეგმვის ამოცანაში. ამ დროს რობოტი ცდილობს მოძრაობისას რაიმეს არ დაეჯახოს. ამიტომ მას აინტერესებს ის ზედაპირები, რომელსაც უნდა შემოუაროს (თავი აარიდოს), და არა ის, რაც ამ ზედაპირების შიგნით ან გარშემო არის. ოქტანტების ხე წარმოადგენს კვადრი ხეების სამგანზომილებიან ანალოგს.

განსაზღვრება 5.3. ოქტანტების (რვაობითი) ხე (octree) ეწოდება იერარქიული ტიპის მონაცემთა ხისმაგვარ სტრუქტურ-

ას, რომლის თითოეული კვანძი – ოქტანტი შეესაბამება კუბური ფორმის არეს და რომელშიც თითოეულ ოქტანტს შეიძლება რვა განშტოება ჰქონდეს, რომლებიც კუბის ოქტანტებად დანაწევრებაზე მიუთითებენ.

ოქტანტების ხის გამოყენებით 3D სცენა რეკურსიულად (რეკურსია – თავის თავში განმეორებადი პროცედურა) იყოფა 8 3D ოქტანტად (სურ. 5.11).



სურ. 5.11

ოქტანტების ხის დასაწყისში გვაქვს კვანძი (ოქტანტი), რომელშიც სცენა მთლიანადაა მოთავსებული (სურ. 5.11). მას უნივერსალურ კუბს უწოდებენ. ამ კვანძს ხის ძირეული კვანძი (root node) ეწოდება. ამის შემდეგ ძირეული კვანძი თანამიმდევრულად იყოფა ჯერ 8 ქვეკუბად – ოქტანტად, შემდეგ ეტაპ-

ზე უკვე თითოეული ოქტანტი იყოფა 8 ოქტანტად და ა. შ. მანამ, სანამ არ იქნება მიღწეული სცენის სასურველი დეტალიზაცია. თითოეული ქვეკუბის მარკირება ხდება ჭდეების მნიშვნელობებით 0–7. შესაბამისად, გადასაწყვეტი ამოცანიდან გამომდინარე, ასეთი დაყოფით შესაძლებელია სცენის 3D სივრცის დეტალიზაციის სხვადასხვა ხარისხის მიღწევა.

ოქტანტების ხის თითოეულ ოქტანტს ენიჭება თავისი შესაბამისი ჭდე, რომელსაც სამი მნიშვნელობიდან ერთ-ერთის მიღება შეუძლია. კერძოდ:

F – შევსებულია (შეფერილია შავი ფერით) – ოქტანტი მთლიანად დევს 3D ობიექტის შიგნით;

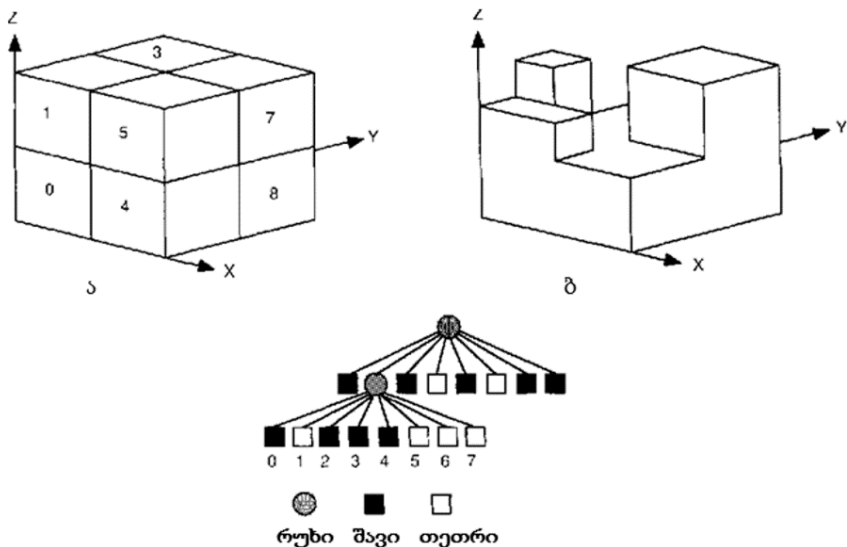
E – ცარიელია (შეფერილია თეთრი ფერით) – ოქტანტი მთლიანად დევს 3D ობიექტის გარეთ;

P – ნაწილობრივ შევსებულია (შეფერილია რუხი ფერით) – ოქტანტი ნაწილობრივ შეიცავს 3D ობიექტს;

ოქტანტებს ჭდეების მნიშვნელობებით – **შევსებულია** და **ცარიელია** არ გააჩნიათ შვილობილი კვანძები, რაც ნიშნავს, რომ შემდეგ დონეზე მათ განშტოებები არ გააჩნია. ხოლო **ნაწილობრივ შევსებულია** ჭდის მნიშვნელობის მქონე ოქტანტი ნაწევრდება რვა ნაკლები მოცულობის მქონე შვილობილ ქვე-ოქტანტად და თითოეული მათგანი მოწმდება იმის გასარკვევად, ის მთლიანად დევს ობიექტის შიგნით, თუ გარეთ. ოქტანტების დანაწევრება გრძელდება მანამ, სანამ ყველა მათგანი არ აღმოჩნდება ან ობიექტის შიგნით, ან გარეთ. ამგვარად, ობიექტის წარმოდგენის ასეთი მოდელი საშუალებას იძლევა შევინახოთ მხოლოდ იმ ბლოკებში არსებული ინფორმაცია, რომლებიც ობიექტს შეესაბამება. ეს კი თავის მხრივ მნიშვნელოვნად

ამცირებს მონაცემების მოცულობას და აადვილებს ამოცნობის ამოცანის ამოსხნას.

3D ობიექტის სივრცითი დეკომპოზიციის და შესაბამისი ოქტანტების ხის მაგალითი ნაჩვენებია 5.12 სურათზე. 5.12,ა სურათზე წარმოდგენილია მარტივი ობიექტი, რომელიც მთლიანადაა ჩასმული უნივერსალურ კუბში (სურ. 5.12,ბ), ხოლო შესაბამისი ოქტანტების ხე მოცემულია 5.12,გ სურათზე.



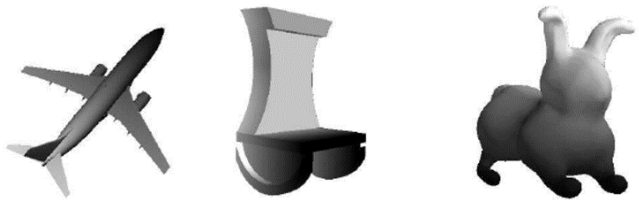
ბ
სურ. 5.12

5.2.5. სუპერკვადრებზე დამყარებული მოდელები

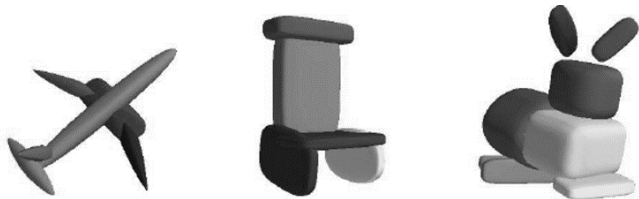
3D ობიექტების მოდელის ფორმირებისთვის სუპერკვადრების (superquadrics) გამოყენების არსი იმაში მდგომარეობს, რომ მა-

თი საშუალებით შესაძლებელია დეფორმირებადი გეომეტრიული ფიგურების მოდელირება ისეთი ტიპის დეფორმაციების მეშვეობით, როგორცაა გაჭიმვა, შევიწროება, დაგრესა და ღუნვა.

სუპერკვადრები წარმოადგენენ მეორე რიგის ზედაპირების (კვადრების) გაფართოებას, რომელშიც შედიან სუპერელიფსოიდები, სუპერტოროიდები და სუპერჰიპერბოლოიდები. ისინი შემუშავებული იქნა მანქანური გრაფიკის და კომპიუტერული ხედვის ამოცანებისთვის როგორც პრიმიტივები (უმარტივესი ბაზისური ელემენტები) 3D ფორმების წარმოდგენისთვის. სუპერკვადრები შეიძლება შევადაროთ თიხის ნაჭრებს, როგორც პროტოტიპებს, რომელთა დეფორმირებით (მათთვის სხვადასხვა ფორმის მიცემით) და შეწებებით შესაძლებელია ობიექტების მოდელის აგება. 5.13,ა,ბ სურათზე წარმოდგენილია სამი ობიექტი და სუპერკვადრების გამოყენებით აგებული მათი შესაბამისი მოდელები.



ა



ბ

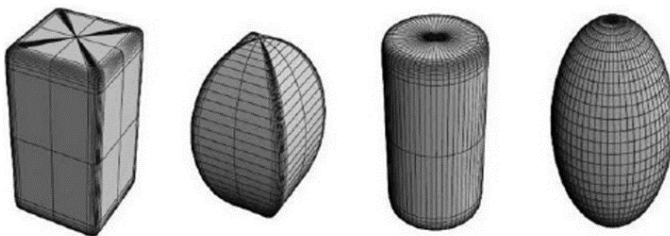
სურ. 5.13

მათემატიკურად სუპერკვადრები ქმნის გარკვეული პარამეტრების მიმართ პარამეტრიზებული ზედაპირების ოჯახს. სუპერკვადრი მათემატიკურად წარმოდგინება სამგანზომილებიანი $S(\eta, \omega)$ ვექტორის საშუალებით, რომლის x , y და z კომპონენტები მოიცემა როგორც η და ω კუთხეების ფუნქციები:

$$S(\eta, \omega) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos^{\epsilon_1}(\eta) \cos^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_2 \cos^{\epsilon_1}(\eta) \sin^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_3 \sin^{\epsilon_1}(\eta) \end{bmatrix},$$

სადაც, $-\frac{\pi}{2} \leq \eta \leq \frac{\pi}{2}$ და აღნიშნავს კუთხეს x ღერძსა და $x-y$ სიბრტყეში S ვექტორის პროექციას შორის, ხოლო $-\pi \leq \omega \leq \pi$ და აღნიშნავს კუთხეს S ვექტორსა და $x-y$ სიბრტყეში მის პროექციას შორის. a_1 , a_2 და a_3 პარამეტრებით მოიცემა სუპერკვადრის ზომები შესაბამისად x , y და z მიმართულებით. ϵ_1 და ϵ_2 პარამეტრები კი განსაზღვრავენ სუპერკვადრების ფორმას.

სუპერკვადრების საშუალებით შეიძლება ობიექტების შემაღლებელი ისეთი „საამშენებლო“ ბლოკების მოდელების აღწერა, როგორცაა სფეროები, ელიფსოიდები, ცილინდრები, პარალელეპიპედები და ასევე მათი „შუალედური“ ფორმები. მაგალითად, თუ $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$, მაშინ სუპერკვადრი წარმოადგენს ელიფსოიდს, ხოლო თუ ამასთან $a_1 = a_2 = a_3$, მაშინ გვაქვს სფერო; თუ $\epsilon_1 \ll 1$ და $\epsilon_2 = 1$, მაშინ ზედაპირი ცილინდრის მსგავსია. ამგვარად, პარამეტრებისთვის სხვადასხვა მნიშვნელობების შერჩევით შესაძლებელია სხვადასხვა 3D ფორმის ზედაპირების მიღება (სურ. 5.14).



სურ. 5.14

სუპერკვადრებზე დამყარებული მოდელები ძირითადად გამოიყენება მანძილსაზომებიდან მიღებული მონაცემების დამუშავებისთვის. ამ მიზნით სხვადასხვა ფორმის გლუვი ზედაპირების მისაღებად შემუშავებული იქნა პარამეტრების შერჩევის მთელი რიგი მეთოდი.

5.3. ხილვადობის კლასებზე დამყარებული მოდელები

3D ობიექტების ხილვადობის კლასებზე დამყარებული მოდელების (view classes models) საშუალებით აღწერა ემყარება ობიექტების არა სრული სივრცითი ფორმით, არამედ დაკვირვების ნებისმიერი წერტილიდან მიღებული ობიექტების 2D გამოსახულებებით წარმოდგენას. მართლაც, ობიექტები დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან ანუ ხედიდან სხვადასხვანაირად ჩანს. ამ ხედებს **მახასიათებელ ხედებს** (characteristic views) უწოდებენ. ცხადია, რომ ობიექტზე დაკვირვების ყველა წერტილიდან მიღებულ ხედებს შორის აღმოჩნდება ხედები, რომლებიც ერთმანეთის მსგავსი იქნება. მაგალითად, ობიექტზე დაკვირვების წერტილების ერთი სიმრავლისთვის ცილინდრის პროექცია გამოსახულების სიბრტყეზე შეიძლება წარმოადგენდეს რაღაც

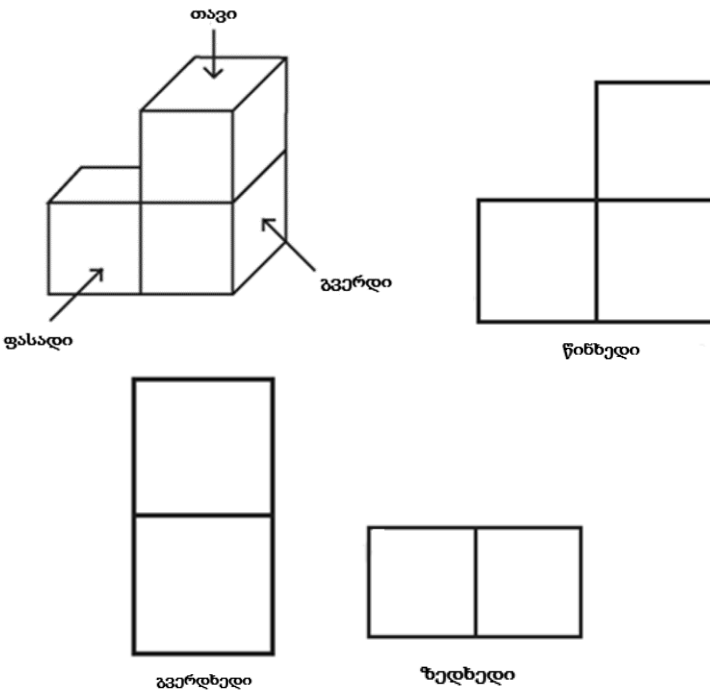
ზოლს, ხოლო დაკვირვების მეორე სიმრავლისთვის კი ელ-
იფსს. აქედან გამომდინარე, თუ კლასტერიზაციის ალგორითმი-
ის გამოყენებით მოვახდენთ დაკვირვების ყველა წერტილიდან
მიღებული ხედების დაჯგუფებას მათი მსგავსების მიხედვით,
რაც გამოსახულების სიბრტყეზე მათი პროექციების მსგავსება-
საც ნიშნავს, მაშინ მივიღებთ მახასიათებელი ხედების, ანუ
კლასების რაღაც სიმრავლეს. ამ კლასებს **ხილვადობის კლას-
ებს** (view classes) უწოდებენ. ამგვარად, ხილვადობის კლასი წა-
რმოადგენს დაკვირვების წერტილების რაღაც სიმრავლეს, რო-
მელსაც გამოსახულების სიბრტყეზე მსგავსი თვისებების მქო-
ნე ობიექტის პროექციები შეესაბამება. მაგალითად, ასეთ თვის-
ებას შეიძლება წარმოადგენდეს ის, რომ გამოსახულებაზე ხი-
ლული იქნება ობიექტის ერთი და იგივე ზედაპირები, ან ერთი
და იგივე მონაკვეთები, ან ერთი ხილვადობის კლასის თითოე-
ული დაკვირვების წერტილიდან ხილული ობიექტის გამოსახუ-
ლებაზე კონტურებში გამოყოფილ სტრუქტურებს შორის **ფარ-
დობითი მანძილი** (შეთანხმებული მარკირებისას ფარდობითი
მანძილით განისაზღვრება საუკეთესო ასახვა მიმართებათა ნე-
ბისმიერი რაოდენობის შემთხვევაში, §1.8) საკმაოდ მცირეა. ამ-
ასთან, ცხადია, რომ ერთი ხილვადობის კლასში შემავალი ობი-
ექტის ხედები ერთმანეთის უფრო მეტად მსგავსი უნდა იყოს,
ვიდრე სხვა ხილვადობის კლასში შემავალი ნებისმიერი ხედი.
საზოგადოდ, ხედების რიცხვი შეიძლება უსასრულო იყოს.

5.15 სურათზე ნაჩვენებია კუბის ხილვადობის 3 კლასი,
რომლებიც მიიღება დაკვირვების იმ წერტილების დაჯგუფებ-
ით (კლასტერიზაციით), რომლებიც წრფივი მონაკვეთებისგან
შედგენილ, ტოპოლოგიურად იზომორფულ – მსგავს სტრუქტურ-
ებს იძლევა. როგორც ვხედავთ, ხილვადობის თითოეულ კლა-
სი განსაზღვრავს კუბის ზედაპირების სხვადასხვა რაოდენობ-
ას.



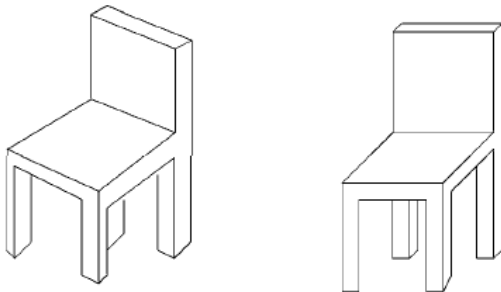
სურ. 5.15

5.16 სურათზე მოცემულია 3 კუბისგან შედგენილი გაუმჭვირვალე ობიექტი და გამოსახულების სიბრტყეზე 3 განსხვავებული: წინა, გვერდითი და ზედა ხედიდან მიღებული პროექციები.



სურ. 5.16

ხოლო 5.17 სურათზე მოცემულია 2 განსხვავებული ხედიდან დანახული სკამის გამოსახულება, რომლებიც მათ შორის ფარდობითი მანძილის სიმცირის გამო ერთსა და იმავე ხილვადობის კლასს მიეკუთვნება.



სურ. 5.17

მას შემდეგ, რაც 3D ობიექტისთვის კორექტულად განისაზღვრება ხილვადობის კლასი, ობიექტის მდებარეობის (პოზის) განსაზღვრისთვის შეთავსების ამოცანა მოდელსა და გამოსახულებას შორის შესაბამისობების დადგენის მიზნით დაიყვანება 2D შეთავსების შემთხვევაზე.

5.4. ობიექტების ფიზიკაზე დამყარებული და დეფორმირებადი მოდელები

ფიზიკაზე დამყარებული მოდელები (physics-based models) გამოიყენება ელასტიკური მასალისგან დამზადებული ფიზიკური ობიექტების გარეგანი ფორმის (გეომეტრიის) და ქცევის მოდელირებისთვის. კერძოდ, თუ როგორ იქცევა ელასტიკური ობიექტი მასზე ძალების, ბრუნვის მომენტების, შიგა დეფორმაციების, მაღალი ტემპერატურისა და სხვა ფიზიკური სიდიდეების

მოქმედების შემთხვევაში. ისინი უფრო რეალისტურად ასახავს რეალური სამყაროს ობიექტებს, ვიდრე გეომეტრიული მოდელები. ამის მაგალითს წარმოადგენს ადამიანის გულის მოდელი, რომლის მიზანია წარმოაჩინოს გულის ფორმისა და ქცევის მოდელირება დროის რაღაც გარკვეული პერიოდის განმავლობაში. ასეთი მოდელი საშუალებას იძლევა შევისწავლოთ და გავიგოთ გულის ფუნქციონირების თავისებურებები. ობიექტის ფიზიკაზე დამყარებული მოდელების მნიშვნელოვან კლასს წარმოადგენს **დეფორმირებადი მოდელები** (deformable models). ასეთი მოდელების არსებობა იმით არის გამოწვეულია, რომ ფიზიკური სხეულის ფორმა გარე ძალების ზემოქმედებით შეიძლება დროსა და სივრცეში იცვლებოდეს. ეს მოდელები ფართოდ გამოიყენება გამოსახულებათა სინთეზის (კომპიუტერული გრაფიკა), გამოსახულებათა ანალიზის (კომპიუტერული ხედვა), ფორმის დიზაინის (კომპიუტერული გეომეტრიული დიზაინი), გამოსახულებების დისპარატულობის (სტერეოხედვის) და გამოსახულებების ნაკადის ველების (გამოსახულების სიბრტყეზე მოძრავი ობიექტების გამოსახულებების პროექციების სინქარის ველი), უძრავი ან ვიდეო გამოსახულებებიდან ობიექტების ფორმისა და მოძრაობის განსაზღვრისათვის.

დეფორმირებადი მოდელები, განიცდის რა გარე ძალების ზემოქმედებას, თავის მხრივ, გამოსახულების მონაცემებიდან გამომდინარე, შეზღუდვებს ადებენ მათ. ამ ძალების მოქმედების შედეგად მოდელები გამოსახულებაზე აქტიურად ფორმირდება და გადაადგილდება, რათა ადვილად იქნას მიღწეული მათი მაქსიმალური თანხვედრა ინტერესის ობიექტების გამოსახულებებთან და შემდეგ შენარჩუნდეს გარკვეული დროის განმავლობაში. ასეთი ქცევის გამო დეფორმირებადი მოდელების გამოყენებამ დიდი ინტერესი გამოიწვია სამედიცინო გამოსახულებების ანალიზის სფეროში მათი გამოყენების თვალსაზრის-

ით. აქ დეფორმირებადი მოდელების გამოყენება სასარგებლო აღმოჩნდა ანატომიური სტრუქტურების სეგმენტაციის, ფორმის წარმოდგენის, გამოსახულებების შეთავსებისა და გამოსახულებების მიმდევრობაზე მოძრაობის თვალთვალის ამოცანებში იმ შეზღუდვების გათვალისწინებით, რომლებიც მომდინარეობს გამოსახულების მონაცემებიდან იმ აპრიორულ ცოდნასთან ერთად, რომელიც ამ სტრუქტურების მდებარეობასთან, ზომასთან და ფორმასთანაა დაკავშირებული. დეფორმირებად მოდელებზე დამყარებულ მიდგომაში ერთად გაერთიანებულია გეომეტრიის, ფიზიკისა და აპროქსიმაციის თეორიები. გეომეტრია გამოიყენება ობიექტის ფორმის წარმოდგენისთვის, ფიზიკა კი შეზღუდვებს ადებს მოდელის ფორმის ცვლილებას სივრცესა და დროში, ხოლო აპროქსიმაციის თეორია უზრუნველყოფს მოდელის გამოსახულების გაზომილ მონაცემებთან მორგების მექანიზმების ფორმალურ საფუძვლებს.

5.4.1. აქტიური კონტურის მოდელები

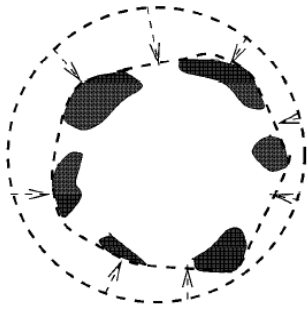
დეფორმირებადი მოდელები ობიექტის ფორმას წარმოადგენენ 2D მრუდის ან 3D ზედაპირის სახით, რომლებიც შეიძლება დეფორმირებული იყოს ამ კლასის ობიექტების კონკრეტულ ეგზემპლართან შესაბამისობის დადგენის მიზნით. მათ შეუძლიათ გადაადგილება შინაგანი ძალის, რომელიც ცდილობს დეფორმაციის დროს მოდელს შეუნარჩუნოს სიგლუვე, და გარეგანი ძალის, რომელიც განსაზღვრავს მოდელის გადაადგილებას ობიექტის საზღვრისკენ, გავლენით.

გამოსახულებათა ანალიზის ამოცანებში დეფორმირებადი მოდელებიდან ყველაზე მეტად გამოიყენება **დაკლაკნილი** ანუ **აქტიური კონტურის მოდელი** (snake or active contour model). მისი მოქმედება დაკავშირებულია ობიექტის გარშემომწერი კონტურ-

ის (სილუეტის) ფორმის ცვლილებასთან. გამოსახულებაზე აქტიური კონტურები წარმოადგენენ ბრტყელ კონტურებს. ისინი გამოიყენება ობიექტების საზღვრების მიახლოებითი მდებარეობისა და ფორმის განსაზღვრისათვის იმ დაშვებით – შეზღუდვით, რომ საზღვრები უბან-უბან უწყვეტია ან გლუვი. აქტიური კონტურის მოდელის გამოყენება სასარგებლოა ისეთი ამოცანების გადასაწყვეტად, როგორცაა სეგმენტაცია, მოძრავი ობიექტების თვალთვალი და სტერეოგამოსახულებების შერწყმა. მაგალითად, გამოსახულებების სეგმენტაციის ამოცანაში აქტიური კონტურის მოდელის გამოყენებას სეგმენტაციის სხვა მეთოდებისგან განსხვავებით აქვს გარკვეული უპირატესობები. კერძოდ, მისი გამოყენება მოითხოვს მხოლოდ გამოსახულების ლოკალური მახასიათებლების ცოდნას, რაც უფრო ზუსტი ამონახსნის მიღებას უზრუნველყოფს. ასევე ობიექტების საზღვრების დადგენისთვის არ მოითხოვს კიდევების და საზღვრების იდეალური მოდელების გამოყენებას; აქტიური კონტური ბმულობის (უწყვეტობის) გამო არ საჭიროებს საზღვრის ცალკეული ფრაგმენტების (საზღვრის წვეტების გამო) გაერთიანებას ერთ უწყვეტ კონტურში, ან ცალკეული არეების გაერთიანებას; გამოყოფილი კიდევები ერთი პიქსელის სისქისაა.

გამოსახულებაზე აქტიური კონტურის ქცევა ხელის მტეფნის თითებზე გაჭიმული რეზინის ლენტის ქცევის მსგავსია, სადაც თითები 2D ხუთი წერტილის როლს თამაშობს, ხოლო რეზინის ლენტი კი ამ ხუთ წერტილზე გამავალი შეკრული კონტურის. ამ დროს გაჭიმული რეზინის ლენტი ცდილობს შეიკუმშოს ისეთ მდგომარეობამდე, ანუ მიიღოს ისეთი ფორმა, რომლის დროსაც ის, ერთი მხრივ, მინიმალურად დაჭიმული იქნება (დრეკადობის ძალა მინიმალური იქნება) და, მეორე მხრივ, რეზინის მომჭიმავი დრეკადობის ძალები არ გაწონასწორდება მასზე მოქმედი გარე ძალით, კერძოდ, თითების წინააღმ-

დეგობის – რეაქციის ძალით. ეს პროცესი ნაჩვენებია 5.18 სურათზე, სადაც შავი არეები შეესაბამება ხელის მტევნის თითებს. როგორც ვხედავთ, რეზინის შეკუმშვის პროცესი მთავრდება მაშინ, როგორც კი ის შეეხება შავ არეებს.



სურ. 5.18

ამასთან, რეზინის ლენტს არ შეიძლება ჰქონდეს უსასრულოდ დიდი სიმრუდე და იმ წერტილსაც კი, რომელშიც მასზე დიდი ძალა მოქმედებს, ლენტი გლუვად უნდა შემოეგლოს. ეს ნიშნავს, რომ აქტიური კონტური მასზე გარე ძალების მოქმედების შედეგად გამოსახულებაზე გადაადგილებისას (რეზინის ლენტის მსგავსად) ცდილობს ისეთი ფორმის მიღებას (აქედან მომდინარეობს სახელი „აქტიური“), რასაც მისი მხრიდან მინიმალური ენერგიის დახარჯვა დასჭირდება. აქედან გამომდინარე, ასეთ კონტურს რაც შეიძლება გლუვი ფორმა უნდა ჰქონდეს. შესაბამისად, კარგი იქნება, თუ აქტიური კონტურის ქცევის მოდელირების ალგორითმების პარამეტრებში მისი ისეთი მახასიათებლები აისახება, როგორცაა, მაგალითად, გლუვობა, პარამეტრების მნიშვნელობების ცვლილების საზღვრები, ან კონტურის ფორმაზე დამატებით კიდევ სხვა რაიმე შეზღუდვა – ვთქვათ, რომ კონტურს ჰქონდეს რომელიმე მარტივი მრუდის

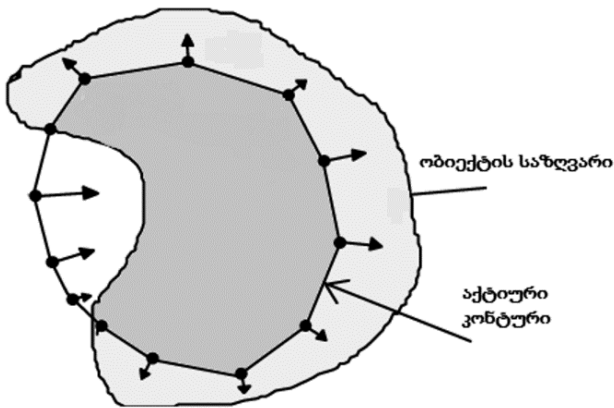
ფორმა. ზემოთქმულიდან გამომდინარე, აქტიური კონტურის ფორმის ქცევის მოდელირებით შესაძლებელია შევისწავლოთ ელასტიკური ფიზიკური სხეულების ფორმის ცვლილება მასზე რაიმე ძალის მოქმედების შედეგად. აქედან გამომდინარე, შეიძლება შემოვიტანოთ აქტიური კონტურის შემდეგი

განსაზღვრება 5.4. *დაკლაკნილი ან აქტიური კონტური ეწოდება ორგანზომილებიან დეფორმირებად კონტურს, რომელიც N რაოდენობის ფიქსირებული წერტილისგან შედგება:*

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}, P_i = (x_i, y_i), i = \overline{1, N}.$$

ფორმალურად აქტიური კონტური განისაზღვრება როგორც $I(x, y)$, $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ გამოსახულების სიბრტყეში ჩასმული პარამეტრულ სახეში წარმოდგენილი (პარამეტრიზებული) $P(s) = [x(s), y(s)]$ მრუდი, სადაც $x(s)$ და $y(s)$ კოორდინატების ფუნქციებია და $s \in [0, 1]$ – პარამეტრი, რომელიც წარმოადგენს ნამდვილ ცვლადს. ასეთი მრუდი ობიექტის საზღვრისკენ გადაადგილებისას ცდილობს მასზე მოქმედი შიგა და გარე ძალების ენერჯის ფუნქციონალის მინიმიზებას. $I(x, y)$ გამოსახულებაზე კონტურის ფორმას აღნიშნული ფუნქციონალი განსაზღვრავს. ფუნქციონალი აქ განიხილება როგორც აქტიური კონტურის ენერჯის წარმომადგენელი და კონტურის საბოლოო ფორმა ამ ენერჯის მინიმალური მნიშვნელობით განისაზღვრება. შიგა ძალები შეესაბამება კონტურის დეფორმაციის ენერჯიას და ცდილობს დაიცვას იგი ზედმეტი მოღუნვისაგან. ისინი ახასიათებენ მრუდის დაჭიმულობას, ელასტიკურობას, და შესაბამისად მრუდის ფორმას. გარე ძალები აქტიურ კონტურს აკავშირებენ გამოსახულების მონაცემებთან. ისინი ცდილობენ მი-

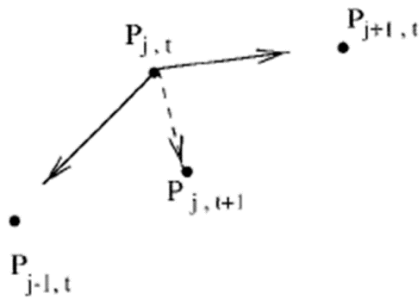
იზიდონ აქტიური კონტური ინტერესის ობიექტის საზღვრებისკენ. ამისთვის გარე ძალებს ისეთი ფუნქციის სახით წარმოადგენენ, რომლის ლოკალური მინიმუმები ემთხვევა ინტერესის არეში სიკაშკაშის მაქსიმალურ მნიშვნელობებს, კიდევებს და ინტერესის სხვა ნიშან-თვისებებს, რაც აქტიურ კონტურს აძიულებს გადაადგილდეს ობიექტის საზღვრის მიმართულებით მანამ, სანამ საბოლოოდ შიგა და გარე ძალების ენერჯის ფუნქციონალი მინიმუმს არ მიაღწევს. აქტიური კონტურის მოდელის ასაგებად უნდა ვიცოდეთ გამოსახულებაზე ობიექტის საზღვრის მოდელი. ამისთვის საჭიროა კიდის გამოყოფის რომელიმე ოპერატორის გამოყენებით სიკაშკაშეების ლოკალური ვარდნის ადგილების პოვნა. ხოლო აქტიური კონტურის შეთავსება ობიექტის საზღვართან შეიძლება განხორციელდეს როგორც ინტერაქტულ, ისე ავტომატურ რეჟიმში. ზემოაღწერილი პროცესი წარმოდგენილია 5.19 სურათზე



სურ. 5.19

აქტიური კონტურის ქცევის იმიტაციისთვის საჭიროა კონტურის ფორმისა და გამოსახულებაზე მისი მდებარეობის –

კოორდინატების შესახებ არსებული ინფორმაციის შესანახად მონაცემთა შესაბამისი სტრუქტურის შერჩევა. განვიხილოთ მარტივი შემთხვევა. ვთქვათ, დროის t მომენტისთვის კონტური შედგება N წერტილისგან. აღვნიშნოთ ისინი $P_{j,t}$ -თი. თითოეულ ასეთ წერტილს ჰყავს 2 უშუალო მეზობელი – $P_{j-1,t}$ და $P_{j+1,t}$. წარმოვიდგინოთ, რომ ამ N წერტილზე გაჭიმულია რეზინის ლენტი. მაშინ თითოეულ წერტილზე იმოქმედებს მისი ორი უშუალო მეზობლის რეაქციის (დაჭიმულობის) ძალა, რომელიც ცდილობს ამ წერტილის გადაადგილებას კონტურის შიგნითა მიმართულებით. შესაბამისად, ამ ძალების მოქმედების შედეგად $P_{j,t}$ წერტილი დაიწყებს აჩქარებულ მოძრაობას ახალი ადგილმდებარეობისკენ – $P_{j,t+1}$ წერტილისკენ (სურ. 5.20). ითვლება, რომ თითოეულ წერტილს ერთეულოვანი მასა აქვს. მაშინ, თუ ცნობილია წერტილის აჩქარება, შესაძლებელია მისი სიჩქარისა და მის საფუძველზე კი კოორდინატების განსაზღვრა.



სურ. 5.20

ამგვარად, დროის მოცემული t მომენტისთვის აქტიური კონტურის მონაცემთა სტრუქტურაში შენახული უნდა იყოს თითოეული წერტილის აჩქარება და სიჩქარე. უნდა აღინიშნოს,

რომ მოდელირების საწყის მომენტში არ არის აუცილებელი, რომ ისინი ნულის ტოლი იყოს. ამავე დროს, თითოეულ წერტილს საჭიროა მივაკუთვნოთ ასევე ლოგიკური ცვლადი – *დრო-შა-ჭდე*, რომლის მნიშვნელობა გვიჩვენებს – მოცემული წერტილი განაგრძობს მოძრაობას, თუ გაჩერდა – წააწყდა რომელიმე წერტილს, ე. წ. *ხისტ შეზღუდვას*. ზემოთქმულიდან გამომდინარე, კომპიუტერის მეხსიერება გარდა აქტიური კონტურის შესახებ მონაცემებისა უნდა ინახავდეს ასევე საწყის მონაცემებსაც. კერძოდ, ეს შეიძლება იყოს ნახევარტონური გამოსახულება, ორგანზომილებიანი კონტურის წერტილების სიმრავლე, ზედაპირის სამგანზომილებიანი წერტილების სიმრავლე და ა. შ.

განვიხილოთ აქტიური კონტურის გადაადგილების გამოთვლის მარტივი ალგორითმი, რომელიც დროის მოცემულ t მომენტში აქტიური კონტურის $P_{j,t}$, $j = \overline{1, N}$ წერტილების კოორდინატების საფუძველზე გამოითვლის დროის მომდევნო $t + 1$ მომენტში მათი ახალი მდებარეობის შესაბამისი $P_{j,t+1}$ წერტილების კოორდინატებს. კონტურის წერტილები გადაადგილდება მანამ, სანამ არ წააწყდება ხისტ შეზღუდვას, ანუ სხვა სიტყვებით, სანამ მათზე მოქმედი მარეზულტირებელი ძალა 0-ის ტოლი არ გახდება. ალგორითმი ციკლური ხასიათისაა და მას ასეთი სახე აქვს:

ალგორითმი

შესასვლელი მონაცემები: მოცემულია აქტიური კონტურის საწყისი მდებარეობის $P_{j,t}$, $j = \overline{1, N}$ წერტილის კოორდინატები დროის t მომენტში; თითოეული წერტილისთვის ცნობილია $V_{j,t}$ სიჩქარე და $A_{j,t}$ აჩქარება.

გამოსასვლელი მონაცემები: აქტიური კონტურის $P_{j,t+1}$, $j = \overline{1, N}$ წერტილის კოორდინატები დროის $t + 1$ მომენტში; თითოეული N წერტილისთვის გამოთვლილია $V_{j,t+1}$ სიჩქარე და $A_{j,t+1}$ აჩქარება.

მოცემულია დროის Δt ბიჯი. კონტურის თითოეულ $P_{j,t}$, $j = \overline{1, N}$ წერტილზე მანამ, სანამ ის არ წააწყდება ხისტ შეზღუდვას, ხორციელდება შემდეგი მოქმედებები:

$$j := 1;$$

1. გამოვთვალოთ კონტურის $P_{j,t}$ წერტილზე მისი მეზობელი წერტილების მხრიდან მოქმედი მარეზულტირებელი ძალის მნიშვნელობა;
2. მარეზულტირებელი ძალის მნიშვნელობის საფუძველზე გამოვთვალოთ აჩქარების $A_{j,t+1}$ ვექტორი;
3. $A_{j,t+1}$ აჩქარების საფუძველზე გამოვთვალოთ სიჩქარის $V_{j,t+1}$ ვექტორი:

$$V_{j,t+1} = V_{j,t} + A_{j,t}\Delta t;$$

4. გამოვთვალოთ კონტურის $P_{j,t}$ წერტილის ახალი $P_{j,t+1}$ წერტილის მდებარეობის კოორდინატები $V_{j,t}$ სიჩქარის საფუძველზე:

$$P_{j,t+1} = P_{j,t} + V_{j,t}\Delta t;$$

5. თუ $P_{j,t+1}$ წერტილი აღმოჩნდება მონაცემების რომელიმე წერტილის რაღაც მიდამოში (გამოთვლების სიზუსტე მოიცემა როგორც ალგორითმის პარამეტრი), შეეჯახება მონაცემების რომელიმე წერტილს, კიდევ ან აქტიური კონტურ-

ის მოდელის ზედაპირის ბოლო ნაწილს, მაშინ ამ წერტილს ედება ხისტი შეზღუდვა და მისი გადაადგილება წყდება.

6. გადავლივართ კონტურის შემდეგ

$$j := j + 1$$

წერტილზე და გამოთვლებს ვიმეორებთ ციკლურად მანამ, სანამ j არ გახდება N -ის ტოლი.

ამასთან, ალგორითმის მუშაობისას შეიძლება აღმოჩნდეს ისეთი შემთხვევა, როცა ის მუშაობას ვერ დაასრულებს. მაგალითად, როცა აქტიური კონტურის მოდელი გამოიყენება მოლაპარაკე ადამიანის ტუჩების გამოსახულების მოდელირებისთვის. ამასთან აუცილებელია გამოსახულებაზე კონტურის საწყისი მდებარეობის მოცემა.

აქტიური კონტურის მეთოდის ნაკლს რაც შეეხება, ის ფუნქციონალის წონითი კოეფიციენტების შერჩევის აუცილებლობასა და გამოსაყოფი ობიექტის საზღვრის საკმარისად მცირე მიდამოში კონტურის საწყისი მიახლოების მოცემაში მდგომარეობს.

5.4.1.1. აქტიურ კონტურის მოდელის გამოყენება სამედიცინო გამოსახულებების ანალიზის ამოცანებში

სამედიცინო გამოსახულებების ვიზუალიზაციის სხვადასხვა საშუალებების განვითარებამ დიდი გავლენა მოახდინა მედიცინის განვითარებაზე. სამედიცინო გამოსახულებები კლინიკისტებს საშუალებას აძლევს მიიღონ ის ინფორმაცია, რომელიც ხელს უწყობს ავადმყოფობის დიაგნოზის დასმას, მის მკურნა-

ლობას, დაავადების მიმდინარეობის თვალყურის დევნებას. მაგალითად, ანატომიური სტრუქტურების დეტალური ფორმის დადგენა ქირურგს საშუალებას აძლევს წინასწარ დაგეგმოს ოპერაციის ოპტიმალური სტრატეგია, რადიოთერაპიისას დასხივების იმ დოზის განსაზღვრას, რომელიც სიმსივნეს გაანადგურებს და ამავე დროს საშიში არ იქნება ახლო მყოფი ჯანმრთელი ქსოვილისთვის.

სამედიცინო გამოსახულებების ანალიზის სპეციალისტებისთვის რთული აღმოჩნდა კომპიუტერის დახმარებით ანატომიური სტრუქტურების რენტგენით, კომპიუტერული ტომოგრაფით (CT), მაგნიტურ-რეზონანსული ტომოგრაფით (MR), ულტრაბგერით და ვიზუალიზაციის სხვა საშუალებებით მიღებული სამედიცინო გამოსახულებებიდან სასარგებლო ინფორმაციის გამოყოფა. მიუხედავად იმისა, რომ ვიზუალიზაციის თანამედროვე საშუალებები შიგა ანატომიური სტრუქტურების არაჩვეულებრივად კარგ გამოსახულებებს იძლევა, კომპიუტერების გამოყენება შიგა სტრუქტურების ზუსტი და ეფექტური რაოდენობრივი შეფასების და ანალიზისთვის მაინც შეზღუდულია. მაღალი ხარისხის ბიოსამედიცინო კვლევებისა და მკურნალობისთვის, დაწყებული დიაგნოზის დასმიდან და დამთავრებული სხივური თერაპიით და ქირურგიული ჩარევით, საჭიროა ბიო-სამედიცინო გამოსახულებებიდან ეფექტურად გამოიყოს ზუსტი, განმეორებადი და რაოდენობრივი მონაცემები.

აქტიური კონტურის მოდელები დასაწყისში შემუშავებული იყო კომპიუტერული ხედვის და მანქანური გრაფიკის ამოცანების საჭიროებებისთვის, მაგრამ აღმოჩნდა, რომ მათი გამოყენება ასევე შესაძლებელია სამედიცინო დიაგნოსტიკის ამოცანებშიც. კერძოდ, რენტგენით, კომპიუტერული ტომოგრაფით (CT), მაგნიტურ-რეზონანსული ტომოგრაფით (MR), ულტრაბგე-

რით და ვიზუალიზაციის სხვა საშუალებებით მიღებული სამედიცინო გამოსახულებების ანალიზისთვის.

ორგანოზომილებიანი და სამგანზომილებიანი დეფორმირებადი მოდელები გამოყენებული იქნა სხვადასხვა სახის ანატომიური სტრუქტურის სეგმენტაციის, ვიზუალიზაციის, მათში მიმდინარე პროცესების თვალთვალისა და რაოდენობრივი შეფასებისთვის.

ანატომიური სტრუქტურების სეგმენტაცია, რაც გულისხმობს გამოსახულების დანაწევრებას სტრუქტურების შესაბამის ერთგვაროვან არეებად წარმოადგენს სამედიცინო გამოსახულებების ანალიზის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ეტაპს ისეთი ამოცანების შესასრულებლად, როგორცაა გამოსახულებების შეთავსება, მარკირება და მოძრაობის თვალთვალი. ეს ამოცანები მოითხოვს, რომ საწყის გამოსახულებაზე არსებული ანატომიური სტრუქტურები შემცირდეს მათი ფორმების კომპაქტურ, ანალიზურ წარმოდგენამდე. სეგმენტაციის პროცედურის ინტერაქტიულ რეჟიმში შესრულება ძალიან შრომატევადია და ასევე დროის დიდ დანახარჯს მოითხოვს. მაგალითად, გულის მარცხენა პარკუჭის სეგმენტაცია გულის გამოსახულებაზე. მარცხენა პარკუჭის სეგმენტაცია აუცილებელი წინაპირობაა დიაგნოსტიკისთვის ისეთი ინფორმაციის გამოსათვლელად, როგორცაა მაგალითად, განდევნის ფრაქციის თანაფარდობა, პარკუჭის მოცულობის თანაფარდობა, გულის გამომუშავება, კედლის მოძრაობა მისი გასქელების ანალიზისთვის, და ა.შ.

ამჟამად სამედიცინო გამოსახულებების სეგმენტაცია უმეტესად ინტერაქტიულ რეჟიმში ხორციელდება გამოცდილი ოპერატორის მეშვეობით. ოპერატორი ამ დროს კომპიუტერის თავის ან ტრეკბოლის გამოყენებით იკვლევს მოცულობითი (3D) გამოსახულების თითოეულ შრეზე არსებულ ინტერესის არეს. მაგრამ ასეთი მიდგომა ოპერატორის სუბიექტური თუ სხვადას-

ხვა ობიექტური მიზეზების გამო ნაკლებად პროდუქტიულია. გამოსახულების სეგმენტაციისთვის დამუშავების ისეთი დაბალი დონის მეთოდების გამოყენება, როგორცაა არეების დაგროვება, კიდევების აღმოჩენა და მათემატიკური მორფოლოგიის ოპერაციები, ასევე მოითხოვს მნიშვნელოვანი რაოდენობის ექსპერტების მხრიდან ინტერაქტიულ ჩარევას. მეტიც, ძნელია, მოდელის არმქონე (მოდელისგან თავისუფალი) ამ მიდგომების ავტომატიზება ანატომიური სტრუქტურების ფორმის სირთული-სა და ცვალებადობის გამო როგორც თითოეულ ინდივიდში, ასევე მათ შორის. ასევე გამოსახულებაზე ხმაურმა და არტეფაქტებმა შეიძლება გამოიწვიოს მცდარი არეების გამოყოფა ან საზღვრების წყვეტები ამ მეთოდებით აღდგენილ ობიექტებში.

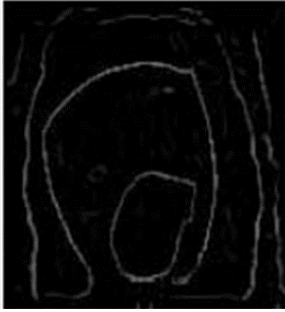
დეფორმირებად მოდელებზე დამყარებულმა სეგმენტაციის პროცედურამ გამოსახულების წინასწარი დამუშავების მეთოდებთან ერთობლიობაში შეიძლება გადალახოს ინტერაქტიულ და ტრადიციულ გამოსახულების დამუშავებასთან დაკავშირებული ბევრი შეზღუდვა. ეს ბმული და უწყვეტი გეომეტრიული მოდელები ობიექტის საზღვარს განიხილავს როგორც ერთ მთლიანს და საშუალებას იძლევა, რომ ობიექტის ფორმის შესახებ წინასწარი ცოდნა გამოყენებული იყოს როგორც სეგმენტაციის ამოცანის შემზღუდავი. ამ მოდელებისთვის დამახასიათებელ უწყვეტობას და სიგლუვებს შეუძლია დააკომპენსიროს ობიექტის საზღვრებზე არსებული ხმაური და სხვადასხვა დარღვევა. ამასთან, მოდელების პარამეტრული წარმოდგენა შესაძლებლობას იძლევა, რომ ობიექტის ფორმა კომპაქტურად და ანალიზურად აღიწეროს. დეფორმირებადი მოდელების ასეთმა თვისებებმა განაპირობა ისეთი მეთოდის შექმნა, რომელიც გამოსახულების გაბნეული ან ხმაურის შემცველი ლოკალური ნი-

შან-თვისებების ერთმანეთთან დაკავშირების გზით ახდენს ობიექტის ბმული და თანამიმდევრული მოდელის ფორმირებას.

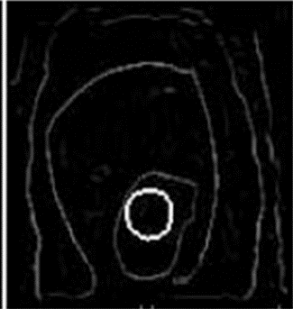
სამედიცინო გამოსახულებების ანალიზისთვის დეფორმირებადი მოდელების გამოყენების პირველ მაგალითს წარმოადგენს დეფორმირებადი აქტიური კონტურის მოდელი. საწყისი გამოსახულების სეგმენტაციის ან კიდის გამოყოფის ოპერატორის გამოყენების შემდეგ ბინარიზებულ გამოსახულებაზე მომხმარებელი ჩვეულებრივად ათავსებს აქტიური კონტურის მოდელს ინტერესის ობიექტის სიახლოვეს და დეფორმირებადობისთვის გამომიწვევს ინტერესის ობიექტს. მას მანამ, სანამ არ მიუსადაგებს ინტერესის ობიექტს. განვიხილოთ დეფორმირებადი აქტიური კონტურის მოდელის გამოყენების მაგალითი კომპიუტერული ტომოგრაფის (CT) საშუალებით მიღებული მოცულობითი გამოსახულების ერთი შრის სეგმენტაციის ამოცანაში (სურ. 5.21), სადაც ა) გულის მარცხენა პარკუჭის ერთი შრის კომპიუტერული ტომოგრაფით მიღებული საწყისი ინტენსიობის გამოსახულებაა, ბ) ამ უკანასკნელზე კიდის გამოყოფის ოპერატორის გამოყენებით და ბინარიზაციით მიღებული კონტურული გამოსახულება, გ) საწყისი დეფორმირებადი აქტიური კონტური, დ) – ვ) აქტიური კონტურის გადაადგილება მარცხენა პარკუჭის საზღვრისკენ ინტერესის ობიექტთან სრულ შეთავსებამდე. აქტიური კონტურის ერთი შრის საწყის გამოსახულებაზე მორგების შემდეგ ის შეიძლება გამოვიყენოთ როგორც საზღვრის საწყისი მიახლოება მეზობელი შრეებისთვისაც. ასეთნაირად მიღებული 2D კონტურების მიმდევრობის წევრების ერთმანეთთან დაკავშირებით მიიღება უწყვეტი 3D ზედაპირის მოდელი.



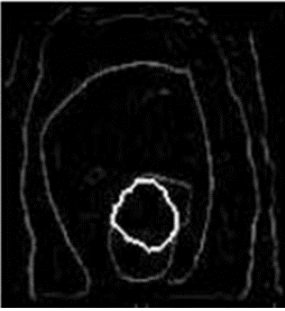
ა



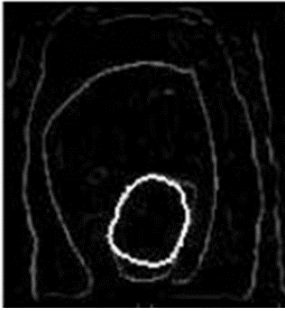
ბ



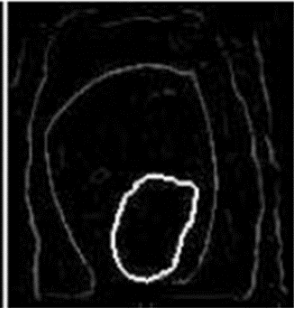
გ



დ



ე



ვ

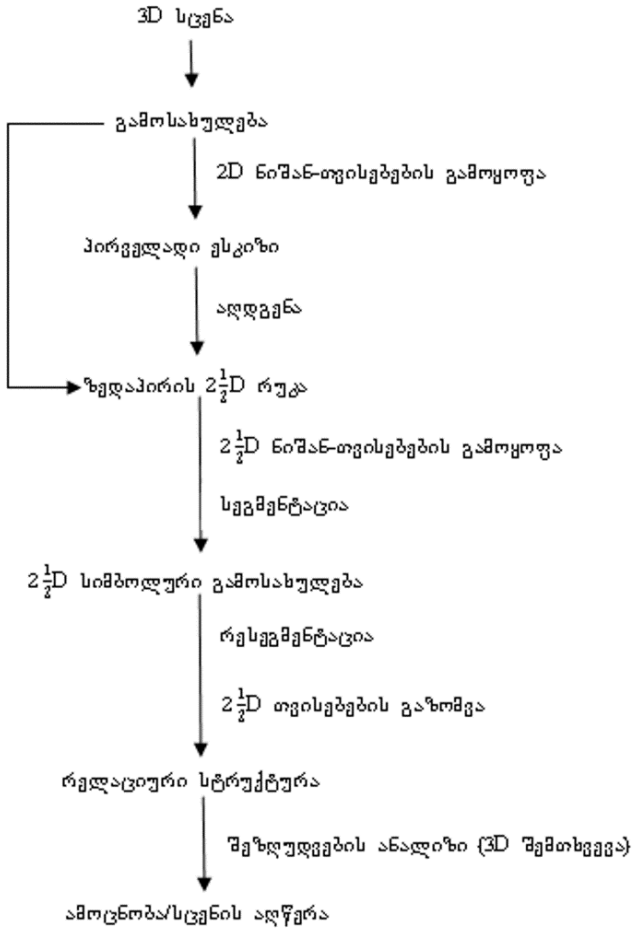
სურ. 5.21

VI თავი. 3D სცენის გამოსახულებებზე ობიექტების ამოცნობა მათი მოდელების საფუძველზე

6.1. ობიექტების ამოცნობის ზოგადი სტრუქტურა

კომპიუტერული ხედვის იმ ამოცანებში, სადაც შეუძლებელია ობიექტების სამგანზომილებიანი ხასიათის უგულვებელყოფა, მაგალითად, როცა სცენის ობიექტები დამკვირვებელთან ახლოს არის განლაგებული და საჭიროა დაკვირვების წერტილიდან მათი დაშორების (სიღრმის) განსაზღვრა, ობიექტების 3D ფორმის რეკონსტრუქცია, ამოცნობა მათი ფორმის მიხედვით, დედამიწის აეროფოტოსურათების ანალიზი რელიეფის გათვალისწინებით და ა. შ., მაშინ საქმე გვაქვს 3D სცენასთან. ასეთ შემთხვევაში, 2D სცენისგან განსხვავებით ამოცნობის ამოცანა რთულდება იმის გამო, რომ საჭირო ხდება ბევრი რამის გათვალისწინება, მაგალითად: ობიექტების განათების ცვალებადობით გამოწვეული ჩრდილების; დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან ობიექტის ხედების განსხვავებულობის; ობიექტების გადაფარვის და ა.შ. ობიექტების ზედაპირების სიკაშკაშის ორიენტაციაზე დამოკიდებულების გამო რთული ხდება მახასიათებელი ნიშან-თვისებებისა და სეგმენტაციის პროცედურების ჩატარება.

3D სცენის ერთადერთ ციფრულ გამოსახულებაზე (იგულისხმება, რომ არ გვაქვს სტერეოგამოსახულებები, ან მანძილსაზომით მიღებული მონაცემები) ობიექტების ამოცნობის ზოგადი სტრუქტურა წარმოდგენილია 6.1 სურათზე.



სურ. 6.1

3D სცენის ანალიზის ამოცანაში, ისევე როგორც ეს იყო 2D სცენის შემთხვევაში, ობიექტები განიხილება როგორც ერთმანეთთან სივრცულად დაკავშირებული ნაწილების ერთობლიობა. ამიტომ, მოცემული კლასის ობიექტის ამოცნობისთვის გამოსახულებაზე უნდა მოიძებნოს იმ ნაწილების კრებული,

რომლებიც დაკვირვების გარკვეული წერტილიდან დანახული ობიექტის ნაწილებს შესაბამება (გამოსახულების ან ობიექტის ნაწილების კრებული, მათი თვისებები და მათ შორის მიმართებები შეიძლება აღიწეროს მონიშნული გრაფის საშუალებით, სადაც კვანძები – ნაწილებს, კვანძების ჭდეები – თვისებების მნიშვნელობებს, ხოლო რკალების ჭდეები – მიმართებების მნიშვნელობებს შეესაბამება). მაგრამ, იმის გამო, რომ სშირად ობიექტის ზედაპირები მრუდწირულია და თითქმის თანაბარი განათების შემთხვევაშიც კი გამოსახულების ხილულ ნაწილებზე სიკაშკაშის მნიშვნელობის სიდიდე ცვალებადია – სეგმენტაციის ჩვეულებრივი მეთოდებით ამ ნაწილების გამოყოფა რთული ხდება.

გამოსახულებაზე ობიექტის ხილული ზედაპირების შესაბამისი არეების პოვნის ამოცანა მარტივდება, თუ გამოსახულების თითოეული წერტილისთვის (პიქსელისთვის) ცნობილია ზედაპირის ნორმალის ორიენტაცია სცენის შესაბამის წერტილში. აქ იგულისხმება, რომ ობიექტი გაუმჭვირვალეა და გამოსახულების თითოეულ წერტილს სცენის ერთადერთი ზედაპირის წერტილი შეესაბამება. აქედან გამომდინარე, თუ ვიცით სცენის ზედაპირის ორიენტაცია, მაშინ სეგმენტაციის პროცედურის გამოყენებით გამოსახულებაზე შეიძლება გამოვყოთ ერთნაირი ორიენტაციის მქონე არეები (სეგმენტები), რომლებიც სცენის გლუვ ზედაპირებს შეესაბამება და ვიპოვოთ ამ არეების საზღვრები კიდის გამოყოფის ოპერატორების გამოყენებით. ცნობილია, რომ თითოეული ასეთი ზედაპირი ობიექტის ერთ გარკვეულ ნაწილს შეესაბამება (ზედაპირის ორიენტაციის განსაზღვრის მეთოდები გამოსახულებაზე განხილულია II თავში). ამ მეთოდებში სცენის გამოსახულებაზე კიდების ან ტექსტურის ელემენტების გამოყოფისთვის იყენებენ ნიშან-თვისებათა აღმოჩენის მეთოდებს. ასეთი დამუშავების შედეგად მიიღება

ნიშან-თვისებათა რუკა, რომელიც აგებულია არა გამოსახულების პიქსელებში სიკაშკაშის მნიშვნელობების, არამედ გამოსახულების მიხედვით. ამ რუკას პირველადი ესკიზი ეწოდება და ის წარმოადგენს გამოსახულებიდან სცენის შესახებ ინფორმაციის მოპოვების პირველ ეტაპს. ობიექტის ზედაპირის ორიენტაციის განსაზღვრის პროცესს ადღგენა ეწოდება. ამ პროცესის შედეგად მიიღება არა 3D, არამედ ე. წ. **" $2\frac{1}{2}$ - განზომილების ($2\frac{1}{2}D$) ესკიზი"**. ესკიზი $2\frac{1}{2}$ - განზომილების იმის გამოა, რომ ის შეიცავს ინფორმაციას არა მთელი სცენის, არამედ მხოლოდ დაკვირვების წერტილიდან დანახული ზედაპირების შესახებ.

საზოგადოდ, ზედაპირის ორიენტაციის ცალსახად განსაზღვრა მხოლოდ ერთი გამოსახულებით შეუძლებელია. ამისთვის საჭიროა რაღაც დამატებითი მონაცემები. მაგალითად, თუ ცნობილია სცენის მიმართ დაკვირვების ორი წერტილის ურთიერთმდებარეობა, მაშინ შესაძლებელია ზედაპირის თითოეულ გამოსახულებაზე შესაბამის წერტილებამდე მანძილის განსაზღვრა ტრიანგულაციის მეთოდით. იმ შემთხვევაში, თუ გვაქვს სიღრმის გამოსახულება, მაშინ სეგმენტაციის პროცედურით შეიძლება დამკვირვებელიდან ერთნაირი მანძილით დაშორებული სცენის ცალკეული ნაწილების (სეგმენტების) პოვნა. აქაც ისევე როგორც 2D შემთხვევაში შედეგად მიიღება **სიმბოლური გამოსახულება**, სადაც პიქსელების ჭდეები აღნიშნავენ ნიშან-თვისებების (მაგალითად, ზედაპირის ორიენტაციის) ან ზედაპირების ტიპებს. საჭიროების შემთხვევაში სიმბოლური გამოსახულების მიმართ შეიძლება **რესეგმენტაციის** სხვადასხვა მეთოდების გამოყენება. მაგალითად, ბმული კომპონენტების მარკირება. ასევე შეგვიძლია სცენის ნაწილების სხვადასხვა ტიპისთვის, მაგალითად, ზედაპირის ფართობის, პერიმეტრის

ან მათ შორის მიმართებების გამოთვლა. 3D ობიექტის ამოცნობისთვის უფრო სასარგებლოა მისი ზედაპირების, და არა მისი გამოსახულების არეების აღმწერი თვისებებისა და სხვა მახასიათებლების ცოდნა.

მას შემდეგ, რაც 3D სცენის გამოსახულება დაიყოფა ობიექტის ზედაპირების შესაბამის ნაწილებად, გამოითვლება ამ ზედაპირების თვისებები და დადგინდება მათ შორის მიმართებები, ამოცნობის ამოცანის ამოსხნა ჯერ კიდევ ძნელი რჩება. ამის მიზეზი ისაა, რომ საზოგადოდ ობიექტის ორიენტაცია უცნობია, ანუ არ არის ცნობილი დაკვირვების წერტილის მდებარეობა სივრცეში. ამის გამო უცნობია თუ ობიექტის რომელი მხარე ჩანს გამოსახულებაზე.

6.2. 3D ობიექტების ამოცნობა უცნობი დაკვირვების წერტილის შემთხვევაში

როცა ობიექტის ორიენტაცია ცნობილია, მაშინ შეგვიძლია ვიწინასწარმეტყველოთ, თუ როგორ გამოჩნდება ის გამოსახულებაზე. ასეთ შემთხვევაში გამოსახულებაზე ობიექტის იმ ხილული ნაწილების შესაფერისი ნაწილების კონფიგურაციების მოძიების შედეგად, რომლებიც გამოსახულებაზე უნდა ჩანდეს, შეიძლება მოცემული ობიექტის ამოცნობა. მაგრამ ამოცნობისთვის ასეთი ხელსაყრელი შემთხვევა მაშინ გვექნება, თუ მოცემულია სიღრმის გამოსახულება ან გამოსახულების ორიენტაციის სურათი, და არა (ან არა მხოლოდ) მისი ინტენსიობის ფუნქცია. ასეთი საწყისი მონაცემების შემთხვევაში ამოცნობისთვის საჭიროა გამოსახულებაზე ობიექტის იმ ზედაპირების შესაფერისი კონფიგურაციების მოძიება, რომლებიც უნდა ჩანდეს დაკვირვების მოცემული წერტილიდან, თუმცა, თუ სცენაზე ობიექტს ნაწილობრივ მეორე ობიექტი ფარავს, მაშინ გამო-

სახელებზე მოსალოდნელი კომბინაციებიდან ყველა შეიძლება არ აღმოჩნდეს.

გაცილებით რთულდება ამოცნობის ამოცანა, როცა ობიექტის ორიენტაცია უცნობია. ამ შემთხვევაში შეიძლება პირდაპირი მიდგომის მეთოდი გამოვიყენოთ. ამისთვის უნდა წარმოვიდგინოთ, თუ როგორ გამოჩნდებოდა ობიექტი დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან მიღებულ გამოსახულებებზე და შემდეგ მოვიძიოთ გამოსახულების ნაწილების ან ზედაპირების საბოლოო კონფიგურაციები. მაგრამ იმის გამო, რომ დაკვირვების წერტილების რაოდენობა შეიძლება ბევრი აღმოჩნდეს, შესაბამისად გამოთვლების ფასიც დიდი იქნება.

ამოცნობის გამოთვლების ფასის შესამცირებლად შეიძლება გამოვიყენოთ ობიექტის ან მისი ნაწილების მარტივი ნიშან-თვისებების კრებული და არა ობიექტი მთლიანობაში. ამასთან, გამოსახულებაზე დაკვირვებული ნიშან-თვისება ან არე (შეიძლება იყოს ბინარული გამოსახულება, კოორდინატების სიმრავლე, ჯაჭვური კოდები და ა. შ) უნდა შეესაბამებოდეს ობიექტის ან მისი ნაწილის ნიშან-თვისებას. მაგრამ საზოგადოდ, ყოველთვის ასე არ ხდება, ანუ ობიექტის ყველა ნიშან-თვისება გამოსახულებაზე არ წარმოშობს შესაბამის ნიშან-თვისებას. ხოლო იმ ნიშან-თვისებების არსებობა, რომელთა ასახვაც შესაძლოა მოხდეს გამოსახულებაზე, მხოლოდ იმ შემთხვევაშია შესაძლებელი, თუ ობიექტს სივრცეში აქვს განსაზღვრული მდებარეობა და ორიენტაცია. ამგვარად, გამოსახულების თითოეული დაკვირვებული ნიშან-თვისება გარკვეულ **შეზღუდვას** ადებს როგორც სცენაზე არსებულ ობიექტებს, ისე მათ შესაძლო მდებარეობას და ორიენტაციას. თუ გამოსახულების ნიშან-თვისებათა სიმრავლისთვის ამ შეზღუდვების გადაკვეთა არაცარიელ სიმრავლეს წარმოადგენს, მაშინ ეს იმის მაჩვენებელია, რომ გარკვეული ობიექტი მართლაც იმყოფება

სცენაზე და უჭირავს სცენის სივრცეში განსაზღვრული მდებარეობა და ორიენტაცია. ობიექტების ამოცნობისთვის ნიშანთვისებებზე დამყარებული მიდგომის ეფექტურობა დამოკიდებულია ნიშან-თვისებების არჩევისას შემდეგი თავისებურებების გათვალისწინებაზე:

1. ზოგიერთი მათგანი ხილული უნდა იყოს ობიექტის ორიენტაციისგან დამოუკიდებლად;
2. ისინი ადვილად გამოსაყოფი უნდა იყოს გამოსახულებაზე;
3. ისინი უნდა გამოირჩეოდეს საკმაო ინფორმატიულობით, ანუ არ უნდა გვხდებოდეს ნებისმიერი ობიექტის ნებისმიერ ნაწილზე;
4. ისინი ძლიერ შეზღუდვებს უნდა ადებდეს ობიექტის მდებარეობასა და ორიენტაციას.

ამასთან, გავითვალისწინოთ, რომ 1) და 2) პირობის დაკმაყოფილებისთვის უნდა ავირჩიოთ მარტივი ტიპის ნიშან-თვისებები. მაგრამ, ამავე დროს 3) და 4) პირობის დაკმაყოფილებისთვის ისინი ამასთან ძალიან მარტივებიც არ უნდა იყოს.

ამოცნობის ამოცანა მარტივდება, თუ ობიექტი ცნობილია, ხოლო მისი მდებარეობა და ორიენტაცია უცნობი. მაგრამ კიდევ უფრო მარტივდება, თუ მდებარეობა და ორიენტაცია ნაწილობრივ შეზღუდულია. მიუხედავად ამისა, ზემოაღწერილ ნიშან-თვისებათა გამოყოფაზე დამყარებული მიდგომა ამოცნობის ასეთ შემთხვევებშიც კი შეიძლება გამოსადეგი აღმოჩნდეს.

6.3 3D ობიექტების ამოცნობის მეთოდების შერჩევის კრიტერიუმები

სამგანზომილებიანი ობიექტების წარმოდგენის მოდელების გაცნობის შემდეგ უკვე შესაძლებელია განვიხილოთ გამოსახულებაზე მათი ამოცნობის მეთოდები. მაგრამ იმის გამო, რომ ამოცნობის ამა თუ იმ მეთოდის გამოყენება მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული კონკრეტულ ამოცანაზე, მონაცემების ტიპზე და იმ მოთხოვნებზე, რომლებიც წაყენება ამოცნობის შედეგებს, ძნელი ხდება ობიექტების ამოცნობის საერთო მიდგომის ჩამოყალიბება. შესაბამისად, არსებობს ბევრი კრიტერიუმი ანუ შეზღუდვა, რომლებიც განსაზღვრავს, ამოცნობის რომელი მეთოდი იქნეს გამოყენებული კონკრეტული გამოყენებითი ამოცანის გადასაწყვეტად. განვიხილოთ ამ კრიტერიუმებიდან ზოგიერთი:

- **რომელ სფეროს მიეკუთვნება ამოცანა – საინჟინროსას თუ ფსიქოლოგიისას** – გამოყენებითი ტექნიკური ამოცანების გადაწყვეტისას ხშირად ვხდებით შემთხვევებს, როდესაც ამოცანის სპეციფიკიდან გამომდინარე, შესაძლებელია მისი გამარტივება. ასეთი ამოცანის მაგალითს წარმოადგენს რობოტიკის ისეთი მხედველობის სისტემის შემუშავება, რომელსაც დეტალების გროვიდან ერთი დეტალის აღება შეუძლია. ამ ამოცანის საპირისპიროს წარმოადგენს ამოცანა ფსიქოლოგიის სფეროდან, რომელიც ეხება ადამიანის მიერ ობიექტების ამოცნობის პროცესის გაგებას. ასეთი ამოცანები რთულია და მათი გადაწყვეტა მოითხოვს ისეთი ზოგადი თეორიის შემუშავებას, რომელშიც მრავალი ფსიქოლოგიური ფაქტორი იქნება გათვალისწინებული.

- **სცენაზე არსებული ობიექტები ქარხნულია თუ ბუნებრივი ?** – ადამიანის მიერ დამზადებული ბევრი ქარხნული წარმოების ობიექტისთვის შესაძლებელია ზუსტი კომპიუტერული მოდელის აგება. ასევე, ბუნებრივი ობიექტებისგან განსხვავებით ადვილად შესამჩნევი და აღმოსაჩენია ამ ობიექტების მახასიათებელი ნიშან-თვისებები. ამიტომ, ხელოვნური ობიექტებისთვის ადვილად მისასადაგებელია სახეთა ამოცნობის ცნობილი მეთოდები. მათგან განსხვავებით, ბუნებრივი ობიექტების ფორმირება ბუნებაში ხდება სხვადასხვა პროცესის ზეგავლენით. ამის გამო ისინი თვისებათა დიდი მრავალფეროვნებით გამოირჩევა (ერთი ტიპის ობიექტების შემთხვევაშიც კი). მაგალითად, მობილური რობოტის მართვისთვის ბუნებრივ გარემოში ამოცნობის ამოცანა გაცილებით უფრო რთულია, ვიდრე ამოცნობის ამოცანა და ობიექტების მდებარეობის განსაზღვრა საწარმოო ხაზის ავტომატიზაციის პროცესში.
- **ობიექტების ზედაპირები მრავალწახნაგაა, კვადრებია თუ ნებისმიერი ფორმისაა ?** – წინათ, ამოსაცნობად განიხილავდნენ მრავალწახნაგიანი ფორმის მქონე ობიექტებს. ასეთი ტიპის ობიექტების მოდელირება მარტივია, მაგრამ დღეს ინტერესი გაიზარდა კვადრების ტიპის ზედაპირების (n განზომილებიანი ჰიპერზედაპირი ($n + 1$) განზომილებიან სივრცეში) მქონე ობიექტების მიმართ, რომლებსაც მიეკუთვნება მრეწველობის სფეროში დამზადებული ობიექტების უმრავლესობა. აღმოჩნდა, რომ ასეთი ობიექტების მოდელის და გაზომვის შედეგად მიღებული მონაცემები შეიძლება აღიწეროს ერთნაირი პრიმიტივებით. რაც შეეხება ნებისმიერი ფორმის ზედაპირებს, ისინი შეიძლება შედგებოდნენ ერთმანეთთან გლუვად შეერთებული ზედაპირული ფრ-

აგმენტებისგან, რომელთა ელემენტარული ფორმის პრიმიტივებად სეგმენტირება სირთულეს წარმოადგენს.

- **ობიექტების რაოდენობა სცენაზე** – ხშირად დაკვირვებულ სცენაზე ობიექტების ამოცნობისას იგულისხმება, რომ ამოსაცნობი ობიექტები დაშორებული არიან სხვა ობიექტებისგან. მაგრამ ყოველთვის ეს ასე არ არის. სცენაზე რამდენიმე ობიექტის არსებობის დროს მათი მახასიათებელი ნიშან-თვისებები შეიძლება ერთმანეთს ფარავდეს ან ერთმანეთში აირიოს. ამიტომ, გლობალური ნიშან-თვისებების გამოყოფაზე დამყარებული მეთოდები კარგ შედეგს იძლევა ერთი ობიექტის შემცველი სცენებისთვის. სცენაზე ბევრი ობიექტის არსებობის შემთხვევაში კი განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს სეგმენტაციის პროცედურა, რომელიც ობიექტების ცალცალკე გამოყოფის და მათთან დამოუკიდებელი მუშაობის შესაძლებლობას იძლევა.
- **ამოცნობის შედეგების გამოყენების მიზანი** – იქიდან გამომდინარე, თუ რა მიზანს ემსახურება ობიექტის ამოცნობა – საინსპექციო კონტროლს, მანიპულაციური რობოტის მიერ ობიექტის ჩაბლუჯვას, მობილური რობოტის მიერ წინააღმდეგობის შემოვლას, თუ სხვას, ამოცანის გადაწყვეტისას ყურადღება უნდა გამახვილდეს შესაბამის ასპექტებზე. კერძოდ, მაგალითად, საინსპექციო კონტროლის ამოცანაში ობიექტის წვრილწვრილ დეტალებზე. ასეთ ამოცანაში მოდელირებისა და გაზომვის სიზუსტე მაღალი უნდა იყოს; მანიპულაციური რობოტის მიერ ობიექტის ჩაბლუჯვის ამოცანაში საჭიროა როგორც ობიექტის გეომეტრიული მახასიათებლების ცოდნა, ასევე ყურადღება უნდა მიექცეს მის წონას, სიმტკიცეს და რობოტის მუშა სივრცეში ობიექტის ხელმისაწვდომობის შესაძლებლობას; მობილურმა რობოტმა, რომელიც ობიექტებს ამოიცნობს მისი მოძ-

რაობის ტრაექტორიის სიახლოვეში და ამასთან თავი უნდა აარიდოს წინააღმდეგობებს, საკმარისია იცოდეს უხეში მონაცემები ობიექტის ზომების, ფორმისა და ადგილმდებარეობის შესახებ.

- **საწყისი მონაცემები ორგანზომილებიანია თუ სამგანზომილებიანი ?** – ადამიანი საკმაოდ კარგად აღიქვამს 3D სცენას ერთი თვალითაც. შემუშავებულია მხედველობითი სისტემები, რომელთა შესასვლელ მონაცემებს მხოლოდ 2D ნახევარტონური გამოსახულებები წარმოადგენს. სცენის ობიექტის გამოსახულებაზე გამოყოფილი 2D ნიშან-თვისებები ობიექტის 3D მოდელთან დაკავშირებულია პროექციული გარდაქმნის საშუალებით. ამოცნობის პროცესი გულსხმობს ამ გარდაქმნის გამოთვლას და ობიექტის იდენტიფიკაციის შემოწმებას. 3D მონაცემები ამოცნობის პროცესს ამარტივებენ. ამის გამო ბევრ თანამედროვე სისტემაში იყენებენ მანძილსაზომიდან მიღებულ მონაცემებს. ითვლება, რომ ეს მონაცემები საშუალებას იძლევა შეფასდეს ობიექტის ზედაპირის ფორმა და მდებარეობა, რაც აადვილებს შესაძლო ობიექტების მოდელების შერჩევას და ამცირებს არაცალსახობის ხარისხს იმ გარდაქმნის გამოთვლისას, რომლითაც ხდება სხვადასხვა მანძილსაზომიდან მიღებული პროექციების შეთავსება.
- **ობიექტების მოდელები გეომეტრიულია თუ სიმბოლური ?** – გეომეტრიული მოდელები ზუსტად აღწერენ 3D სივრცეში ობიექტის ფორმას. ასეთი მოდელები უფრო ხშირად გამოიყენება სამრეწველო დანიშნულების მანქანური ხედვის ამოცანებში, სადაც ამოსაცნობი ობიექტები წინასწარ მოცემულ მცირე სიმრავლეს მიეკუთვნება. სიმბოლური მოდელები კი ობიექტების მთელ კლასებს აღწერენ და გამო-

იყენება ისეთ ამოცანებში, სადაც ობიექტების რამდენიმე კლასია და ამასთან თითოეულ კლასში ობიექტებს შორის შეიძლება რაღაც განსხვავება იყოს. მაგალითად, სამედიცინო გამოსახულებების ანალიზის ამოცანებში, სადაც ადამიანის თითოეული ორგანო დაკავშირებულია ობიექტების ცალკე კლასთან, ხოლო თითოეული ადამიანის ორგანოს გამოსახულება მოცემული კლასის უნიკალურ ობიექტს წარმოადგენს. ასევე, მაგალითად, სავარძლებს შორის ბევრი ინდივიდუალური განსხვავებაა, რომელთა გათვალისწინება უფრო მოქნილი მოდელის გამოყენებას მოითხოვს, ვიდრე გეომეტრიული მოდელია.

- **გათვალისწინებულია თუ არა ობიექტების მოდელების ცვლილება სწავლებით, თუ ისინი წინასწარ განსაზღვრულია ?** – ობიექტების მოდელები შეიძლება შეიცავდნენ დიდი რაოდენობის ზუსტ მონაცემებს, რომელთა მომზადება ადამიანის მიერ ხელით სირთულეს წარმოადგენდეს. ასევე არასაკმარისი შეიძლება აღმოჩნდეს ავტომატიზებული პროექტირების სისტემიდან მიღებული მონაცემები და საჭირო გახდეს მათში გარკვეული დამატებების შეტანა ან მათი სტრუქტურის ცვლილება, მაგალითად, მონაცემებში ნიშან-თვისებების ხაზგასმა. ამასთან დაკავშირებით, კარგი იქნებოდა ამოცნობის სისტემაში სწავლების ისეთი პროცედურის განხორციელება, როდესაც სისტემა შეძლებდა ობიექტის გეომეტრიული თვისებების დამახსოვრებას.

6.4. ამოცნობა გეომეტრიული მოდელების სივრცითი შეთანასწორების გამოყენებით

3D ობიექტების ამოცნობისას, როცა მოდელის მონაცემების (მოდელის წერტილების) და გაზომვის მონაცემების (გამოსახუ-

ლების წერტილების) ერთმანეთთან შეთავსება ხდება სივრცითი შეთანასწორების ხერხით, იყენებენ ისეთივე მეთოდებს, როგორც ეს ორგანოზომილებიან შემთხვევაში იყო (I თავი). ასეთი ობიექტების ამოცნობის ალგორითმის მთავარი იდეა გამოსახულების წერტილების სიმრავლესა და ობიექტის 3D მოდელის წერტილების სიმრავლეს შორის შესაბამისობის დადგენაში მდგომარეობს. ამისთვის საჭიროა შემდეგი ნაბიჯების შესრულება:

1. ვუშვებთ ჰიპოთეზას, რომ წერტილების ორ სიმრავლეს შორის არსებობს შესაბამისობა;
2. შესაბამისობის დაშვებიდან გამომდინარე, გამოვთვალოთ მოდელის წერტილების გამოსახულების წერტილებში ასახვის გარდაქმნა;
3. გამოვიყენოთ მოდელის წერტილების მიმართ განხორციელებული გარდაქმნა მოდელის გარდაქმნილი წერტილების სიმრავლის მისაღებად;
4. მოდელის წერტილებისა და გამოსახულების წერტილების შესაბამისობის შესახებ დაშვებული ჰიპოთეზის დასადასტურებლად ან უარსაყოფად შევადაროთ ერთმანეთს მოდელის გარდაქმნილი წერტილები და გამოსახულების წერტილები.

განვიხილოთ სივრცითი შეთანასწორებით ამოცნობის ამოცანა 3D-3D და 2D-3D ტიპის შემთხვევებისთვის უფრო დეტალურად.

3D-3D სივრცითი შეთანასწორება. დავუშვათ, რომ ობიექტების 3D მოდელები წარმოდგენილია მოდელების წერტილებთან დაკავშირებული მახასიათებელ ნიშან-თვისებათა კრებულის

სახით. წამოყენებულია ჰიპოთეზა მოდელის წერტილებისა და გამოსახულების მონაცემთა წერტილების სიმრავლეებს შორის შესაბამისობის არსებობის შესახებ. თუ საწყის მონაცემებს მანძილსაზომიდან მიღებული სიღრმის (გაზომვის) მონაცემები წარმოადგენს, მაშინ ობიექტის ამოსაცნობად აუცილებელია 3D წერტილების შესაბამისი წყვილები – „მონაცემთა (გამოსახულების) წერტილი – მოდელის წერტილის ნიშან-თვისება“. სივრცითი შეთანასწორების პროცედურის გამოყენებით იძებნება შესაბამისობა მოდელის არჩეულ სამი წერტილის ნიშან-თვისებებსა და გაზომვების შედეგად გამოთვლილ შესაბამისი სამი წერტილის ნიშან-თვისებებს შორის. ასეთი სივრცითი შეთანასწორებით მიღებული შესაბამისობა განსაზღვრავს იმ სამგანზომილებიან გარდაქმნას, რომელიც თავის თავში შეიცავს 3D მობრუნების და 3D გადატანის ოპერაციებს. აღნიშნულ გარდაქმნას მოდელის სამი წერტილი გადაჰყავს გამოსახულების (მონაცემების) შესაბამის წერტილებში. ამავე დროს უნდა აღინიშნოს, რომ თუ წერტილების შესაბამისობა სწორად არის მოძებნილი და ხმაურს არ აქვს ადგილი, მაშინ მაღალი სიზუსტის 3D გარდაქმნის მისაღებად საკმარისია წერტილების სამ წყვილს შორის შესაბამისობის დადგენა. მაგრამ პრაქტიკაში ეს იშვიათად არის შესაძლებელი. ამიტომ შემუშავებულია უფრო საიმედო მეთოდები, რომლებიც ზუსტი გარდაქმნის მისაღებად ჩვეულებრივად წერტილების 10 წყვილს შორის შესაბამისობას იყენებენ. მას შემდეგ, რაც მიღებულია სასურველი გარდაქმნა, რომელიც კარგად ადგენს შესაბამისობას მოდელის წერტილებსა და გამოსახულების წერტილებს შორის, ის უკვე შეიძლება გამოყენებული იქნეს მოდელის ყველა სხვა დანარჩენი წერტილის მიმართ, და შესაბამისად, მოდელის გარდაქმნილი წერტილების სიმრავლის მისაღებად. მიღებული სიმრავ-

ლე უკვე უშუალოდ შეიძლება შედარდეს მონაცემების (გამოსახულების) წერტილების მთელ სიმრავლეს.

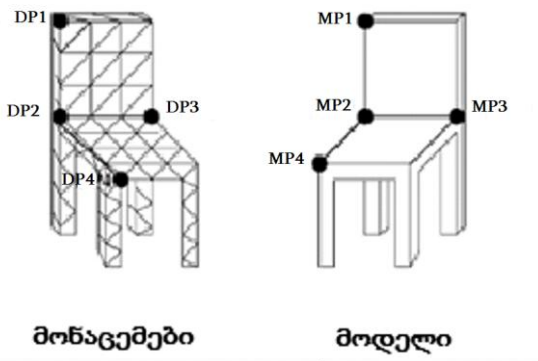
ისევე როგორც 2D შემთხვევაში, აქაც ვერიფიკაციის პროცედურით დგინდება, თუ რამდენად კარგად არის ერთმანეთთან სივრცობრივად შეთანასწორებული მოდელის გარდაქმნილი წერტილები და გამოსახულების წერტილები. ვერიფიკაციის შედეგით განისაზღვრება წარმატებით განხორციელდა შეთანასწორება, თუ საჭიროა გადასვლა შესაბამისი წერტილების შემდეგ შესაძლო კრებულზე.

შესაბამისი წერტილების წყვილების მოძიებისთვის შემუშავებული იქნა ალგორითმები, რომლებშიც ასეთი წერტილების შერჩევა ხდება მოდელის წერტილების და მონაცემთა წერტილების ლოკალური ნიშან-თვისებების გათვალისწინებით ან კონკრეტული ამოცანის სპეციფიკიდან გამომდინარე მონაცემთა დაჯგუფების რომელიმე ხერხის გამოყენებით.

3D-3D ტიპის ნიშან-თვისებათა შესაბამისობის მაგალითი წარმოდგენილია 6.2 სურათზე, სადაც ნაჩვენებია სკამის 3D მოდელის წერტილების და გაზომვებით მიღებული 3D მონაცემების საშუალებით აგებული სკამის კარკასული მოდელის წერტილების შესაბამისი წყვილები. მოცემული შესაბამისობა მიღწეული იქნა სკამის მოდელის 3 მონაკვეთით (MP1-MP2, MP3-MP2, MP4-MP2) შედგენილი 3D კვანძების (შეერთებების) – წერტილების და მისი 3D გაზომვების მონაცემებით აგებული კარკასული მოდელის წერტილების სივრცითი შეთანასწორების შედეგად. წერტილების ეს წყვილები შემდგომ შეიძლება გამოყენებული იყოს მოდელის წერტილების მონაცემთა წერტილებში გარდაქმნის გამოსათვლელად, რაც აუცილებელია 3D-3D სივრცითი შეთანასწორების პროცედურისთვის.

3D მოდელის წერტილების და გაზომვის მონაცემებს შორის შესაბამისობის დადგენის და მის საფუძველზე ობიექტ-

ების ამოცნობის პროცესის მნიშვნელოვან ეტაპს წარმოადგენს ნიშან-თვისებათა გამოყოფა. კერძოდ, ეს პროცედურა ეფექტური იქნება ისეთი ობიექტებისთვის, რომლებზეც ადვილად მოიძებნება ერთმანეთისგან განსხვავებული თვისებების მქონე წერტილები, მაგალითად, კუთხის წერტილები, შვერილების წვეროები, ჩაღრმავებები. მაგრამ თუ ობიექტის ზედაპირები გლუვია და მასზე ასეთი განსხვავებული წერტილები არ არის ან იშვიათია, მაშინ უფრო სრულყოფილი მეთოდების გამოყენება საჭირო.



სურ. 6.2

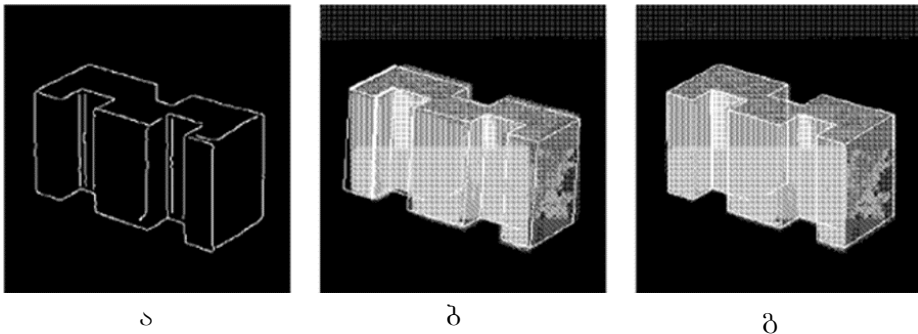
2D-3D სივრცითი შეთანასწორება. სივრცითი შეთანასწორება ასევე შეიძლება გამოყენებული იყოს 2D-3D ტიპის შეთავსებისთვის. ამ დროს საქმე გვაქვს შემთხვევასთან, როცა ობიექტის მოდელი სამგანზომილებიანია, ხოლო გაზომვის მონაცემები ადებულია ორგანზომილებიანი გამოსახულებიდან. ასეთი შეთავსების დროს მოდელის წერტილების გარდაქმნა მონაცემების წერტილებში რთულ ამოცანას წარმოადგენს. კერძოდ, გარდა 3D მობრუნებისა და 3D გადატანის გარდაქმნის კომპონენ-

ტებისა, ის ასევე შეიცავს პერსპექტიული პროექციის კომპონენტსაც. შესაბამისად, სრული გარდაქმნის შეფასება შესაძლებელია შესაბამისი წერტილების სიმრავლის, ან შესაბამისი მონაკვეთების სიმრავლის, ან 3D წრის 2D პროექციით სიბრტყეზე – ელიფსით და შესაბამისი წერტილების ერთი წყვილის დამატებით, ან ამ სამივე ტიპის ნიშან-თვისების კომბინაციის საფუძველზე. ასეთი მიდგომა მოდელისა და მონაცემების წერტილების სივრცითი შეთავსებისთვის კარგ შედეგს იძლევა. გარდაქმნა გამოიყენება 3D მოდელის ნიშან-თვისებების მიმართ, რათა მიღებულ იქნეს 2D მონაცემების (გამოსახულების) ნიშან-თვისებები, თუმცა სასურველი (პოტენციური) გარდაქმნის გამოსათვლელად ნიშან-თვისებებს შორის შესაბამისობები ყოველთვის შეიძლება არ იყოს ზუსტად არჩეული. ამის შემდეგ გამოთვლების შედეგად მიღებული გარდაქმნა უკვე გამოიყენება 3D მოდელის ნიშან-თვისებებზე იმ 2D ნიშან-თვისებების მისაღებად, რომლებიც შეიძლება აღმოჩენილი იყოს მონაცემებში. მაგრამ აქ, 2D-2D ან 3D-3D შეთანასწორების შემთხვევისგან განსხვავებით, ჩნდება ახალი პრობლემა. კერძოდ, ის, რომ 3D ობიექტის ნებისმიერ 2D პერსპექტიულ პროექციაზე გარდაქმნის (პროექტირების) შედეგად მიღებული ზოგიერთი ნიშან-თვისება შეიძლება აღმოჩნდეს ისეთ ზედაპირებზე, რომლებიც კამერიდან არ ჩანს, ან დაფარული არიან დამკვირვებელთან უფრო ახლოს მყოფი სხვა ზედაპირებით. ამის გამო, გარდაქმნის გამოყენების შედეგად მიღებული იმ გარდაქმნილი ნიშან-თვისებების სიმრავლის ზუსტად განსაზღვრისთვის, რომლებიც უნდა შედარდეს გამოსახულების ნიშან-თვისებებს, საჭიროა გამოვიყენოთ დაფარული ნიშან-თვისებების ძიების ალგორითმები. დაფარული ზედაპირების მოშორების მსგავსი ალგორითმები გამოიყენება მანქანურ გრაფიკაში, რომლებიც შესაბამის კარკასულ მოდელთან ერთად 3D სცენის სრული რენდერინგის

(გამოსახულების ვიზუალიზაცია მოდელის საფუძველზე) შესაძლებლობას იძლევა.

მაგალითისთვის განვიხილოთ ობიექტების ამოცნობის TRIBORS (A Triplet-Based Object Recognition System) სისტემის მუშაობა, რომელიც ბრტყელი წახნაგების მქონე მრავალწახნაგიანი ობიექტების ამოცნობისთვის იყენებს ხილვადობის კლასებზე დამყარებულ მოდელებს. სისტემა ეძებს შესაბამისობებს 3D მოდელის მონაკვეთების სამეულებსა (ტრიპლეტებს) და 2D გამოსახულებაზე მონაკვეთების სამეულებს შორის. შესაბამისობის დადგენის პროცესში მოდელის სამეულების დალაგება ისეთნაირად ხდება, რომ შეთავსების პროცესში პირველად აირჩეს აღმოჩენის მაღალი ალბათობის მქონე სამეულები, ხოლო აღმოჩენის დაბალი ალბათობის მქონე სამეულების დამუშავება საერთოდ არ მოხდეს. სამეულები ხილვადობის კლასში აღიწერება მათი მაიდენტიფიცირებელი 9 პარამეტრის მქონე ვექტორის საშუალებით. სივრცითი შეთანასწორებისას ერთმანეთს ედარება მსგავსი პარამეტრების მქონე მოდელისა და გამოსახულების სამეულები. წარმატებული შეთავსების შემთხვევაში გამოსახულების სამეულის მონაკვეთების შეერთების წერტილები წყვილდება მოდელის სავარაუდო შესაბამის 3D წვეროებთან. გარდაქმნის გამოსათვლელად გამოიყენება წერტილ-წერტილ შესაბამისობაზე დამყარებული იტერაციული ალგორითმი. ამის შემდეგ გარდაქმნა გამოიყენება 3D ობიექტის კარკასული ტიპის მოდელის მიმართ და დაფარული კიდეების აღმოჩენი ალგორითმის საშუალებით განისაზღვრება ხილული წიბოები. თითოეული ნაწინასწარმეტყველები კიდისთვის განისაზღვრება მისი უახლოესი მონაკვეთი გამოსახულებაზე და ვერიფიკაცია ხორციელდება იმის საფუძველზე, თუ რამდენად მსგავსია თითოეული ნაწინასწარმეტყველები კიდე მის უახლოეს მონაკვეთთან გამოსახულებაზე. წარმოდგენილი ამომცნობი

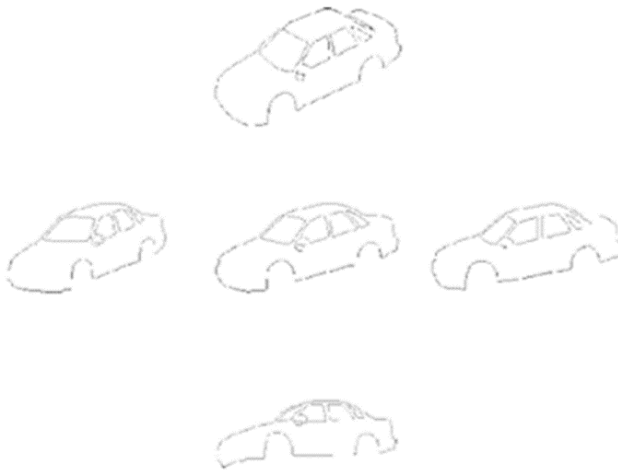
სისტემის მუშაობის პრინციპი ნაჩვენებია 6.3 სურათზე, სადაც ა) 3D ობიექტის გამოსახულებაზე გამოყოფილი კიდეებია; ბ) შეთავსებული მონაკვეთების სამეულები (აღნიშნულია მსხვილი წირებით) და ობიექტის მდებარეობის საწყისი შეფასება; გ) მოდელთან საბოლოო შეთავსება და მდებარეობის შეფასება.



სურ. 6.3

გლუვი ობიექტების სივრცითი შეთანასწორება. განვიხილოთ ნებისმიერი 3D ობიექტის ამოცნობის და მდებარეობის შეფასების ამოცანა ერთი 2D ნახევარტონური გამოსახულების მონაცემებზე დაყრდნობით. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად გამოიყენება **ხილვადობის კლასებზე** დამყარებული მოდელი. **ხილვადობის მოდელი** წარმოადგენს მოდელურ კლასს, რომელშიც მხოლოდ ის თვისებებია წარმოდგენილი, რაც საჭიროა 3D ობიექტის რომელიმე ხედით, ანუ **რაკურსით** დანახვისთვის. მაგრამ 3D ობიექტის ხილვადობის მოდელის საშუალებით წარმოდგენა საკმაოდ რთულ ამოცანას წარმოადგენს. ჩვენ განვიხილავთ გლუვი ზედაპირების მქონე 3D ობიექტების მდებარეობის განსაზღვრის ამოცანას. ასეთ შემთხვევაში 3D ობიექტის მოდელირება ხდება $2\frac{1}{2}$ - განზომილებიანი ხედების, ე. წ. **მოდ-**

ელის რაკურსების კრებულის (სიმრავლის) საშუალებით. თითოეული რაკურსი აიგება იმ 5 გამოსახულებაზე დაყრდნობით, რომლებიც შეესაბამება დაკვირვების ცენტრალურ წერტილს, და შემდგომ ამ წერტილის ზემოთ, ქვემოთ, მარცხნივ და მარჯვნივ მობრუნების შედეგად მიღებულ გამოსახულებებს. ავტომობილის მოდელის ერთი რაკურსის ასაგებად საჭირო ასეთი ხუთი გამოსახულება წარმოდგენილია 6.4 სურათზე. დაკვირვების ცენტრალური წერტილის შესაბამისი ავტომობილის სილუეტი (ცენტრალური გამოსახულება სურათზე) მიღებულია კიდეების გამოყოფისა და მათი მრუდწირულ მონაკვეთებად სეგმენტაციის შედეგად. ამ სეგმენტებისთვის გამოითვლება ინვარიანტული ნიშან-თვისებები, რომლებიც შემდეგ, ამოცნობის პროცესში გამოიყენება მოდელის რაკურსის ინდექსირებული წვდომისთვის (გამოსახულებების მონაცემთა ბაზაში გამოსახულებების მოძიებისთვის რომელიმე ატრიბუტის, როგორც ინდექსის გამოყენება).



სურ. 6.4

ცენტრალურ გამოსახულებაზე სილუეტის კიდის თითოეული $2D(u, v)$ წერტილის შესაბამისი $3D$ წერტილის (x, y, z) კოორდინატების გამოთვლა ხდება იმის მსგავსად, როგორც ეს სტერეოსისტემაშია. ზედა და ქვედა გამოსახულებები გამოიყენება ობიექტის კიდეების სიმრუდის გამოსათვლელად y ღერძის მიმართულებით, ხოლო მარცხენა და მარჯვენა გამოსახულებები – x ღერძის მიმართულებით. ასევე სტერეოსკოპული გამოთვლების მსგავსად განისაზღვრება ცენტრალურ კიდის გამოსახულებაზე ნაკეცი და მარკირებული წერტილების სივრცითი მდებარეობა. ამგვარად, მოდელის $2\frac{1}{2}$ - განზომილებიანი რაკურსი შედგება ობიექტის სილუეტის კიდეების $3D$ კოორდინატებისგან, ნაკეცი და მარკირებული წერტილებისგან, რომლებიც შეესაბამება ცენტრალურ გამოსახულებას გამოყოფილი კიდეებით (ცენტრალურ კიდის რუკა), დამატებული თითოეული ამ წერტილში სიმრუდეების მნიშვნელობებით x და y მიმართულებით. რაკურსის აღწერაში შემაჯავალ ამ მონაცემებზე დაყრდნობით შემდგომ უკვე შესაძლებელია კიდის რუკის გამოთვლა მოცემული ხილვადობის კლასში შემაჯავალი ნებისმიერი სხვა დაკვირვების წერტილისთვის. ამგვარად, ხილვადობის კლასი აღიწერება:

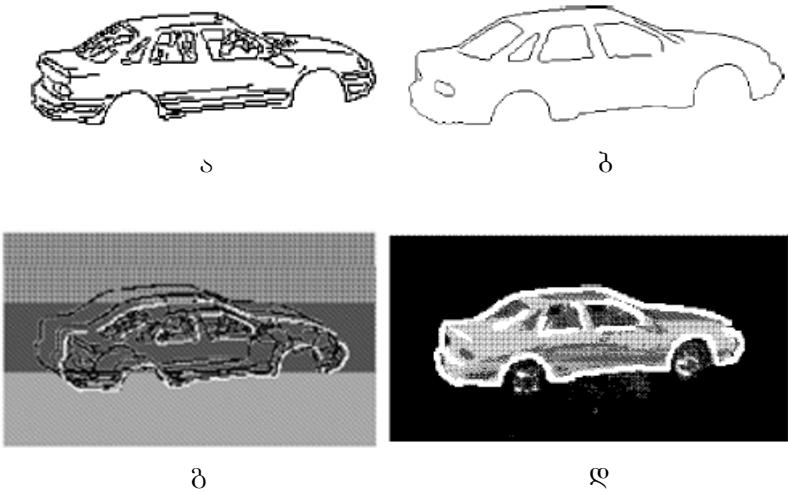
- ზემოაღწერილი $3D$ წერტილისა და სიმრუდის მნიშვნელობების სიმრავლით;
- ინვარიანტული ნიშან-თვისებების სიმრავლით, რომლებიც გამოიყენება მოდელის რაკურსების ინდექსირებული წვდომისთვის.

$3D$ წერტილების კოორდინატები, ისევე როგორც ეს სტერეოსისტემაშია, გამოითვლება ცენტრალური და მომიჯნავე

კიდის რუკებს შორის შესაბამისობის დადგენის საფუძველზე. ხოლო ინვარიანტული ნიშან-თვისებები გამოითვლება ცენტრალური გამოსახულების 2D კიდის რუკის მიხედვით.

გასაანალიზებელი გამოსახულების დამუშავების პროცესში მისთვის აიგება კიდის რუკა და ფორმირდება მრუდწირული მონაკვეთების სიმრავლე. მრუდწირული მონაკვეთები გამოიყენება მოდელის ხედების მონაცემთა ბაზის ინდექსირებისთვის, რათა მოხდეს „ობიექტი-ხედი“ ჰიპოთეზების ფორმირება. ინდექსირების სქემის საფუძველზე გენერირებული ჰიპოთეზები მოწმდება შეთავსების პროცედურაში. თითოეული ჰიპოტეზა შეიცავს ამოსაცნობი ობიექტის როგორც საიდენტიფიკაციო მონაცემებს, ასევე მის მიახლოებით მდებარეობას. ხოლო ვერიფიკაცია ხორციელდება სავარაუდო (კანდიდატი) ობიექტის თითოეული მოდელის მორგებით $2\frac{1}{2}$ - განზომილებიანი რაკურსის დაკვირვებული კიდის რუკაზე. იგულისხმება, რომ დასაწყისში სავარაუდო ობიექტს უჭირავს ის მდებარეობა, რომელიც შეესაბამება იმ მოდელის ცენტრალურ რაკურსს, რომლისთვისაც ხდება შეთავსება. მოდელის ამ რაკურსის შესაბამისი არსებული კიდის რუკა ედარება დაკვირვებულ კიდის რუკას. მაგრამ უმეტეს შემთხვევაში მათი სივრცითი შეთანხმწორება არ იქნება საკმარისად ზუსტი. ამის გამო, შეთავსების დროს საჭიროა მდებარეობის პარამეტრების დაზუსტება, რათა შევამციროთ 2D მანძილი სიბრტყეზე არსებულ კიდის რუკასა და დაკვირვებულ კიდის რუკას შორის. ასეთი შეთავსების პროცესის ნაბიჯები წარმოდგენილია 6.5 სურათზე. კერძოდ, კიდის რუკა გამოითვლება საწყისი (დაკვირვებული) გამოსახულების მიხედვით – *კიდეების აღმოჩენის ეტაპი* (სურ. 6.5,ა); ამის შემდეგ ინდექსირების ეტაპზე გამოითქმება ჰიპოთეზა ობიექტის მდებარეობის შესახებ – *მოდელის რაკურსის არჩევის ეტაპი* (სურ.

6.5,ბ); შემდეგ, რამდენიმე იტერაციის პროცედურის გამოყენებით ხდება მოდელის საზღვრის გენერირება – *მოდელის მორგების ეტაპი* (სურ. 6.5,გ); და ბოლოს, შეთავსების შედეგად მიიღება სივრცითი შეთანასწორების საბოლოო შედეგი (სურ. 6.5,დ).



სურ. 6.5

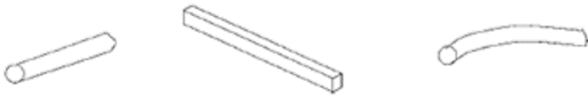
6.5. ამოცნობა საწყისი მონაცემებისა და რელაციური მოდელების შედარებით

იმისთვის, რომ 3D ობიექტების ამოცნობისას გადასვლა მოხდეს გეომეტრიული მოდელებიდან სიმბოლური ტიპის მოდელებისკენ, შეიძლება მსგავსად 2D შემთხვევისა, გამოყენებული იყოს რელაციური მოდელი. ამისთვის მიმართავენ საწყისი მონაცემების შეთანადებას რელაციურ მოდელებთან. შესაბამისი მოდელებისა და მეთოდების შერჩევა კი საწყისი მონაცემებიდან გამომდინარე ხდება.

3D რელაციური მოდელები. ასეთი ტიპის მოდელები შედგება 3D პრიმიტივებისა და მათ შორის სივრცითი მიმართებებისაგან. პრიმიტივების როლში შეიძლება იყოს მოცულობითი და ზედაპირული ტიპის ელემენტები, 3D წრფივი და მრუდწირული მონაკვეთების მახასიათებელი ნიშან-თვისებები. **მოცულობითი პრიმიტივების** მაგალითს წარმოადგენს განზოგადებული ცილინდრები 3D ბმულობის მიმართებებთან ერთად. მოცულობითი პრიმიტივების როლში ასევე იყენებენ ე. წ. **გეონებს** (geons, geometric ions), რომელთა შესახებაც არსებობს ვარაუდი, რომ მათ ადამიანის მხედველობის სისტემა იყენებს. წარმოებაში დამზადებული ობიექტები შეიძლება წარმოვადგინოთ მათი შემადგენელი ბრტყელი და ცილინდრული ტიპის ზედაპირების ჩამოთვლით და ზედაპირების მომიჯნაობის მიმართებებით. რელაციურ მოდელებში სივრცით მიმართებებთან (შეერთება, პარალელურობა და კოლინეარულობა) ერთად შეიძლება ასევე გამოიყენებული იყოს 3D წრფივი და მრუდწირული მონაკვეთები.

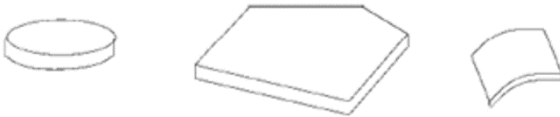
3D ობიექტების უხეში მოდელების ასაგებად შემუშავებული იქნა სამი ტიპის მოცულობითი ელემენტის – **ღეროების** (sticks), **ფირფიტების** (plates) და **წვეთების** (blobs) მოდელები (სურ. 6.6). ეს მოდელები გამოიყენება ადამიანის მიერ შექმნილი ობიექტების აღწერისა და ამოცნობისთვის, რომელთა შემადგენელ ნაწილებს შეიძლება ჰქონდეთ ბრტყელი ან მრუდწირული ზედაპირები. ამასთან დაიშვება ზემოაღნიშნული მოცულობითი ნაწილების ნაირსახეობების არსებობაც. ობიექტის უხეში ამოცნობისთვის მისი შემადგენელი თითოეული ნაწილის ზუსტი აღწერის ნაცვლად (როგორც ეს იყო „ზედაპირი-წიბო-წვერო“ შემთხვევაში) შეიძლება მისი თითოეული ნაწილი კლასიფიცირებული იქნეს როგორც **ღერო**, **ფირფიტა** ან **წვეთი**.

ღეროები



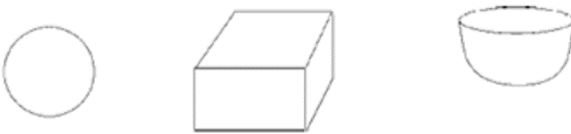
ა

ფირფიტები



ბ

წვეთები



ბ

სურ. 6.6

ღეროები წარმოადგენს გრძელ, წვრილ ნაწილებს, რომლებშიც შეიძლება მხოლოდ ერთი მნიშვნელოვანი განზომილების გამოყოფა. **ფირფიტები** ეს არის ბრტყელი, ფართო ნაწილები ერთმანეთთან ახლოს განლაგებული ბრტყელი ზედაპირებით, რომლებიც ერთმანეთთან თხელი კიდითაა შეერთებული. ფირფიტა ხასიათდება ორი მნიშვნელოვანი განზომილებით. **წვეთი** კი არის ნაწილი, რომელსაც აქვს სამი მნიშვნელოვანი განზომილება. ნაწილების სამივე ეს ტიპი წარმოადგენს „თითქ-

მის“ ამოზნექილს. აქედან გამომდინარეობს ის, რომ ღერო არ შეიძლება ძალიან მოიღუნოს, ნაოჭები ფირფიტის ზედაპირებზე არ შეიძლება ძალიან დიდი იყოს, ხოლო წვეთს არ უნდა ჰქონდეს ძალიან დიდი ჩაზნექილობები.

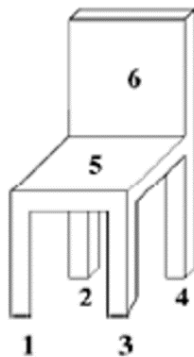
„ღეროები-ფირფიტები-წვეთები -ს“ ტიპის მოდელები აღწერენ თუ როგორ ხდება ღეროების, ფირფიტებისა და წვეთების გაერთიანებით ობიექტის ფორმირება, მაგრამ ასეთი მოდელები ობიექტების უხეშ აღწერას იძლევა. მათში არ არის ზუსტად მითითებული ნაწილების ფიზიკური შეერთების წერტილები. მაგალითად, ღეროს აქვს 2 ლოგიკური კიდურა წერტილი, მათ შორის არსებული შიგა წერტილების ლოგიკური სიმრავლე და ლოგიკური სიმძიმის ცენტრი. თითოეული ეს წერტილი შეიძლება განვიხილოთ როგორც შეერთების წერტილი. ასევე ფირფიტას აქვს კიდეების წერტილების სიმრავლე, ზედაპირის წერტილების სიმრავლე და სიმძიმის ცენტრი. წვეთსაც აქვს ზედაპირული წერტილების სიმრავლე და სიმძიმის ცენტრი. აი ასეთი მინიმალური ინფორმაცია გამოიყენება ობიექტების ამ ტიპის მოდელებში.

ჩვენ მიერ განხილული „ღეროები-ფირფიტები-წვეთები-ს“ ტიპის მოდელის რელაციური სტრუქტურა წარმოადგენს ობიექტის დეტალიზებული სიმბოლური მოდელის საკმაოდ კარგ მაგალითს. აღნიშნული რელაციური მოდელი შეიცავს 5 მიმართებას. კერძოდ, უნარული მიმართება – „მარტივი ნაწილები“ – წარმოადგენს ობიექტის ნაწილების სიას. თითოეულ ნაწილს აქვს რამდენიმე აღწერითი ატრიბუტი (ნიშან-თვისება) მისი ტიპის ჩათვლით (ღერო, ფირფიტა ან წვეთი). ასევე შესაძლოა შეიცავდეს ინფორმაციას ნაწილის ზომებისა და ფორმის შესახებ. მიმართება – „აერთებს/ვერდნობა“ შეიცავს ობიექტის სტრუქტურის შესახებ ყველაზე მეტად მნიშვნელოვანი ინფორ-

მაცის გარკვეულ ნაწილს. ის წარმოიდგინება 4-ელემენტური კორტეჟების – $(s_1, s_2, \text{ეყრდნობა, როგორ})$ სახით, რომლის s_1 და s_2 კომპონენტები აღნიშნავენ მარტივ ნაწილებს, მიმართება „ეყრდნობა“ იღებს ჭეშმარიტ (True) მნიშვნელობას, თუ s_1 წარმოადგენს s_2 -ის საყრდენს, და მცდარს (False), საწინააღმდეგო შემთხვევაში, ხოლო „როგორ“ აღწერს s_1 და s_2 -ს შორის შეერთების ტიპს.

დანარჩენი 4 მიმართებით მოიცემა შეზღუდვები. მიმართება „სამმაგი შეზღუდვა“ შეიცავს 4-ელემენტურ კორტეჟებს – $(s_1, s_2, s_3, \text{იგივე})$, სადაც s_2 მარტივი ნაწილი ეხება როგორც s_1 , ისე s_3 , ხოლო „იგივე“ იღებს ჭეშმარიტ მნიშვნელობას, თუ s_1 და s_3 ეხება s_2 -ის ერთსა და იმავე ბოლოს (ან ზედაპირს), და მცდარს საწინააღმდეგო შემთხვევაში. მიმართებები „პარალელური“ და „მართობული“ შეიცავს (s_1, s_2) ტიპის წყვილებს, რაც მიანიშნებს იმას, რომ მოდელის s_1 და s_2 მარტივი ნაწილები შესაბამისად პარალელურია ან მართობული.

6.7 სურათზე წარმოდგენილია ობიექტის - სკამის დეროები-ფირფიტები-წვეთები-ის ტიპის მოდელის სრული რელაციური სტრუქტურა, სადაც გვაქვს 2 ტიპის მარტივი ნაწილი.



მარტივი ნაწილები		აერთებს/ეყრდნობა				სამეულები			
ნაწილი ტიპი		SP1	SP2	ეყრდნობა	როგორ	SP1	SP2	SP3	იგივე
#									
1	ღერო	1	5	True	ბოლო-კიდე	1	5	2	True
2	ღერო	2	5	True	ბოლო-კიდე	1	5	3	True
3	ღერო	3	5	True	ბოლო-კიდე	1	5	4	True
4	ღერო	4	5	True	ბოლო-კიდე	1	5	6	False
5	ფირფიტა	5	6	True	კიდე-კიდე	2	5	3	True
6	ფირფიტა					2	5	4	True
						2	5	6	False
						3	5	4	True
						3	5	6	False
						4	5	6	False

პარალელური		მართობული	
SP1	SP2	SP1	SP2
1	2	1	5
1	3	2	5
1	4	3	5
2	3	4	5
2	4	5	6
3	4		

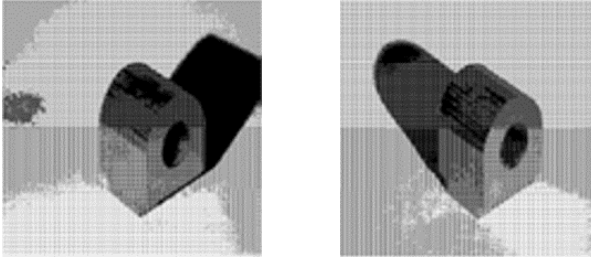
სურ. 6.7

ცხადია, რომ ყველა სკამმა, რომლის ნაწილებს შორისაც მსგავსი მიმართებები იქნება, უნდა დააკმაყოფილოს განხილული მოდელი.

ხილვადობის კლასებზე დამყარებული რელაციური მოდელები. იმ შემთხვევაში, თუ ობიექტების ამოცნობისთვის საწყის მონაცემებს წარმოადგენს ორგანოზომილებიანი გამოსახულებები, მაშინ ამოცნობისთვის სრული 3D მოდელების ნაცვლად საკმარისია ხილვადობის კლასებზე დამყარებული მოდელების გამოყენება. ასეთი მოდელების აგებისას ამოცნობის სისტემის სწავლება ხორციელდება ხელოვნურად აღებული მონაცემების ან ობიექტის რეალური გამოსახულებების გამოყენებით. ობიექტების გამოსახულებებზე გამოყოფილი 2D ნიშან-თვი-

სებების სიმრავლე დამოკიდებულია ობიექტების ხილვადობის კლასზე. სწავლების პროცესში სასწავლო ნაკრების თითოეული გამოსახულებიდან გამოყოფილი ნიშან-თვისებები გამოიყენება შესაბამისი რაკურსით დანახული ობიექტის რელაციური აღწერისთვის. ამის შემდეგ ობიექტის ხილვადობის კლასების ფორმირებისთვის ხდება რელაციური აღწერების კლასტერიზაცია. ხილვადობის თითოეული კლასი წარმოიდგინება კომბინირებული რელაციური აღწერით, რომელიც შეიცავს ხილვადობის ამ კლასში შემავალი ყველა ხედის გამოსახულებიდან გამოყოფილ ყველა ნიშან-თვისებას. მიღებული კომბინირებული რელაციური აღწერა კი წარმოადგენს ხილვადობის კლასის რელაციურ მოდელს. ჩვეულებრივად თითოეული ობიექტისთვის იგება ხუთი ხილვადობის კლასი შესაბამისი რელაციური აღწერით. ხილვადობის კლასებზე დამყარებული მოდელები შეიძლება გამოყენებული იქნეს სრული რელაციური შეთავსების გზით ამოცნობისთვის, რაც მონაცემთა ბაზაში დიდი რაოდენობის სხვადასხვა მოდელის არსებობისას დროის საკმაოდ დიდ დანახარჯს მოითხოვს. ამ პროცესის დაჩქარება შეიძლება რელაციური ინდექსაციის გამოყენებით.

ხილვადობის კლასებზე დამყარებული 3D ობიექტების ამოცნობის სისტემის მაგალითად შეიძლება განვიხილოთ რელაციური ინდექსირების სისტემა **RIO** (relational indexing of objects). ამ სისტემის მიერ მრავალობიექტიან სცენაზე 3D ობიექტების ამოცნობა ხდება მათ 2D გამოსახულებებზე დაყრდნობით. სისტემის შესასვლელს წარმოადგენს ერთი კამერიდან მიღებული ინტენსიობის გამოსახულებების წყვილები, რომელთაგან ერთი მიღებულია სცენის მარცხენა მხრიდან, ხოლო მეორე – მარჯვენა მხრიდან განათების შედეგად (სურ. 6.8).



სურ. 6.8

ამ ორ გამოსახულებაზე დაყრდნობით განისაზღვრება ჩრდილების და ათინათების (highlights) არეები, რაც მხოლოდ სცენის ობიექტების შესაბამისი მაღალი ხარისხის სიკაშკაშეების ვარდნების გამოსახულებას იძლევა. 6.9,ა სურათზე მოცემულია მარცხენა და მარჯვენა გამოსახულებებზე (სურ. 6.8) კიდის გამოყოფის ოპერატორის გამოყენების შედეგად მიღებული კიდის გამოსახულება (კიდის რუკა), რომლიდანაც მოშორებულია ჩრდილები და ათინათების უმეტესობა. ხოლო 6.9,ბ სურათზე კი მიღებული კიდის გამოსახულებიდან გამოყოფილი წრფივი მონაკვეთები და წრიული რკალები, რომელთა საფუძველზეც უკვე ხდება ობიექტების მახასიათებელი ნიშან-თვისებების (მონაკვეთების, წრიული რკალების და ელიფსების) ფორმირება (სურ. 6.9,გ).

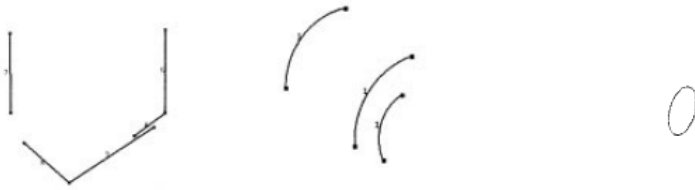


ა



ბ





ბ
სურ. 6.9

ამოცნობის RIO სისტემა განკუთვნილია ბრტყელი, ცილინდრული და კუთხილი (threaded) ზედაპირების მქონე ობიექტებთან სამუშაოდ. ასეთი შეზღუდვა განსაზღვრავს სისტემაში გამოსაყენებელი მაღალი დონის ნიშან-თვისებებს. RIO სისტემაში გამოიყენება შემდეგი 10 ნიშან-თვისება: ელიფსები, კოაქსიალური (საერთო ღერძის მქონე) რკალები (2, 3 და მრავალჯერადი), ერთმანეთთან ახლოს მყოფი და ერთმანეთისგან დაშორებული პარალელური მონაკვეთები, U და Z ფორმის სამეულეები, L, Y და V ტიპის შეერთებები. 6.10 სურათზე ნაჩვენებია 6.9 სურათზე წარმოდგენილი წრფივი და წრიული რკალების სეგმენტების, მონაკვეთების კომბინაციით მიღებული რამდენიმე ნიშან-თვისება. მონაკვეთების ტიპის ნიშან-თვისებები შეიცავს 2 L ტიპის შეერთებას და პარალელური ხაზების წყვილს, ხოლო წრიული რკალების სეგმენტი კი შედგება 3 კოაქსიალური რკალისგან. ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ ყველა რკალი ან მონაკვეთი საბოლოო ჯამში შეიძლება არ გახდეს ამოცნობისთვის აუცილებელი ნიშან-თვისებების ნაწილი.

ხილვადობის თითოეული მოდელის სტრუქტურული აღწერა ხდება გრაფის საშუალებით, რომლის კვანძები წარმოადგენს სხვადასხვა ტიპის ნიშან-თვისებას, ხოლო შემაერთებელი

რკალები მათ შორის მიმართებებს. გრაფის რელაციურ ინდექსაციაში გამოსაყენებლად ხდება მისი დეკომპოზიცია (დაშლა) ე. წ. 2-გრაფის სიმრავლეებად.



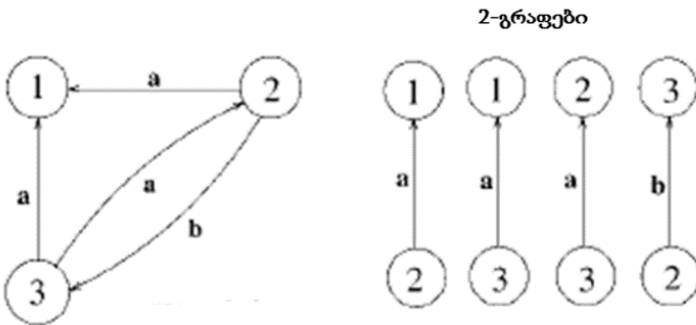
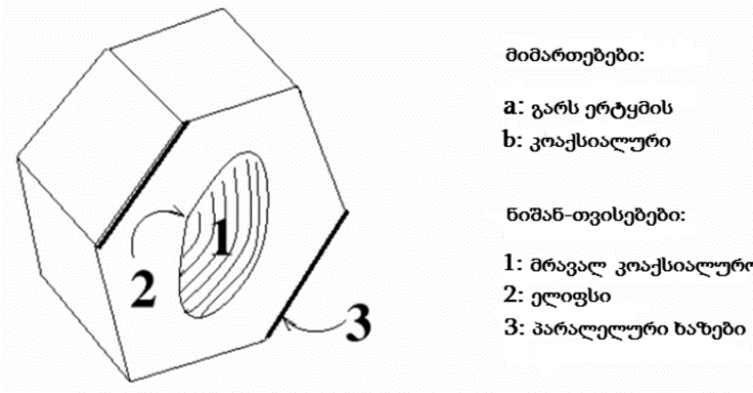
სურ. 6.10

განსაზღვრება 6.1. გრაფს, რომელიც შედგება რაღაც მიმართებით შეერთებული ორი კვანძისგან, 2-გრაფი ეწოდება.

6.11 სურათზე წარმოდგენილია 6 წახნაგიანი ობიექტის – ქანჩის ერთი ხილვადობის მოდელი, 3 ნიშან-თვისებისა და მათ შორის მიმართებების გამოყენებით აგებული სრული გრაფის ნაწილი და მისი დეკომპოზიცია 2-გრაფის სიმრავლეებად.

ამოცნობის პროცესში საჭირო ხდება უცნობი გამოსახულების შედარება მონაცემთა დიდ ბაზაში არსებული ობიექტების ხილვადობის მოდელებთან. რელაციური ინდექსაცია საშუალებას იძლევა, რომ ჩამოყალიბდეს ჰიპოთეზების პატარა კრე-

ბული იმის შესახებ, თუ რა ობიექტებია წარმოდგენილი მოცემულ გამოსახულებაზე. ინდექსაციის გამოყენება კი მოითხოვს



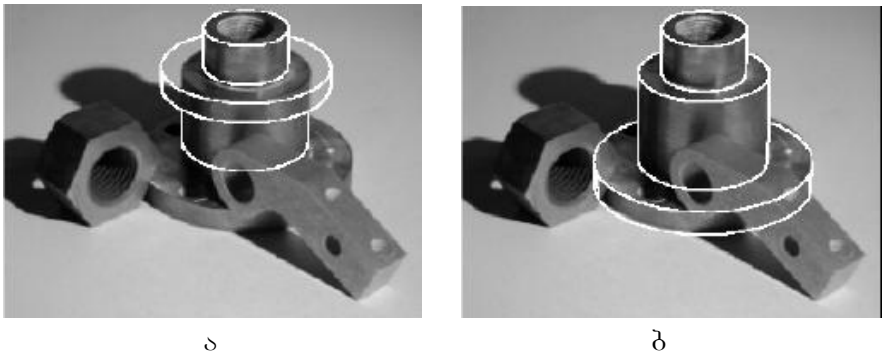
სურ. 6.11

მონაცემთა სტრუქტურის წინასწარ მომზადებას, კერძოდ, ჰეშ-ცხრილის შექმნას, რომელიც ამოცნობის პროცესში გამოყენებული იქნება მონაცემთა ბაზასთან მიმართვისთვის. ჰეშ-ცხრილის ფორმირების შემდეგ ის უკვე გამოიყენება ბაზასთან ოპერატიულ (on-line) რეჟიმში სამუშაოდ ამოცნობის ამოცანის გადა-

საწყვეტად. ასევე გამოიყენება ხმის დათვლის მოწყობილობების – დამგროვებელი ამჯამავების (accumulators for voting) ნაკრები მონაცემთა ბაზაში არსებული თითოეული ხილვადობის მოდელისთვის ცალ-ცალკე. სცენის ანალიზის პროცესში ჯერ ხდება ნიშან-თვისებათა (მონაკვეთები, წრიული რკალები და ელიფსები) გამოყოფა და რელაციური აღწერის აგება 2-გრაფების სიმრავლის გამოყებით. შემდეგ, ჰეშ-ცხრილში წვდომისთვის საჭირო ინდექსის მისაღებად ხდება ამ აღწერის თითოეული 2-გრაფის კოდირება. ცხრილის შერჩეულ ჯიბესთან (ხმის მიცემის მოწყობილობასთან) დაკავშირებულია სია. ის შეიცავს ყველა იმ ხილვადობის მოდელს, რომელშიც შედის მოცემული 2-გრაფი. ამის შემდეგ სიის თითოეული ხილვადობის მოდელისთვის ხორციელდება ხმის მიცემის პროცედურა. ზემოაღწერილი მოქმედებები ხორციელდება სცენის გასაანალიზებელ გამოსახულებაზე არსებული ყველა 2-გრაფისთვის. ბოლოს კი ამოცნობის ჰიპოთეზებად აირჩევა ის ხილვადობის მოდელები, რომლებიც ყველაზე მეტ ხმას მიიღებს.

ჰიპოთეზების გენერირების შემდეგ ამოცნობის RIO სისტემაში იწყება ვერიფიკაციის პროცესი. რელაციური ინდექსაციის დროს დგინდება შესაბამისობები გამოსახულების ორგანოზომილებიან ნიშან-თვისებებსა და ხილვადობის მოდელის ორგანოზომილებიან ნიშან-თვისებებს შორის. თავის მხრივ, 2D ხილვადობის მოდელის ნიშან-თვისებები დაკავშირებულია სავარაუდო (ჰიპოთეზური) ობიექტის 3D მოდელის ნიშან-თვისებებთან. RIO სისტემაში ვერიფიკაციისთვის გამოიყენება შესაბამისი 2D-3D ტიპის წერტილების წყვილები, 2D-3D მონაკვეთების წყვილები და 2D ელიფსი-3D წრეწირის წყვილები, რომლებზე დაყრდნობითაც გამოითვლება სავარაუდო ობიექტის 3D მოდელის გამოსახულების სიბრტყეზე გეომეტრიული ასახვა. ასეთი გარდაქმნის შედეგად მოხდება 3D მოდელის მონაკვეთების და

წერილი რკალების პროექტირება გამოსახულების სიბრტყეზე და გამოითვლება მანძილი სავარაუდო ობიექტსა და მონაცემთა ბაზაში არსებულ ხილვადობის მოდელებს შორის, რომლის სიდიდე განსაზღვრავს, ვერიფიკაცია წარმატებულია თუ ამონობის ჰიპოთეზაა არასწორი. 6.12,ა,ბ სურათზე ნაჩვენებია შესაბამისად არაკორექტული და კორექტული ჰიპოთეზების მაგალითები.



სურ. 6.12

ამგვარად, ვერიფიკაციის პროცედურით მოწმდება თუ რამდენად კარგად არის ერთმანეთთან სივრცობრივად შეთანასწორებული სავარაუდო ობიექტის 2D გამოსახულებაზე გამოყოფილი ნიშან-თვისებები სცენის ობიექტების კიდეების გამოსახულებასთან. ხოლო სავარაუდო ობიექტის შეთავსებული ნიშან-თვისებები კი გამოიყენება მისი მდებარეობის განსაზღვრისათვის.

6.6. ამოცნობა ფუნქციურ მოდელებზე დაყრდნობით

როგორც აღვნიშნეთ, გეომეტრიული მოდელების გამოყენებით ზუსტად შეიძლება აღიწეროს კონკრეტული ობიექტების ფორმები. ავტომატიზირებული პროექტირების სისტემის (computer-aided design) საშუალებით აგებული მოდელით შესაძლებელია ერთი ობიექტის აღწერა ყველა თავისი განსაკუთრებული წერტილებით და ზომებით. ამ შემთხვევაში იგულისხმება, რომ ამოცნობის სისტემისთვის სამყაროს ყველა ობიექტის გეომეტრიული მოდელი წინასწარაა ცნობილი. მაგრამ რეალურად ეს ასე არ არის და ამოცნობის რეალურმა სისტემამ უნდა შეძლოს ისეთი ობიექტების ამოცნობაც, რომელთა ფორმის მოდელები წინასწარ ცხადი არაა. რაც შეეხება რელაციურ მოდელებს, ისინი აღწერენ იმ ობიექტების კლასებს, რომლებსაც ერთი და იგივე რელაციური სტრუქტურა აქვთ. ამის გამო რელაციური მოდელები უფრო ზოგადი სახის მოდელებს წარმოადგენენ. განვიხილოთ მაგალითისთვის სკამი, რომელიც შეიძლება აღიწეროს როგორც ობიექტი, რომელსაც აქვს ზურგი, დასაჯდომი და ოთხი ფეხი, რომლებიც დასაჯდომის კუთხეებთან ქვემოდანაა მიერთებული. მაგრამ სკამი, რომელსაც ოთხი ფეხის ნაცვლად საჯდომთან ქვემოდან ტუმბო აქვს მიერთებული, არ შეესაბამება ჩვენთვის ნაცნობი სკამის აღწერას და დანიშნულებას. ობიექტის ფუნქციაზე დამყარებული მოდელები არ იძლევა მის რაიმე კონკრეტულ გეომეტრიულ ან სტრუქტურულ სქემას. ნაცვლად ამისა, **ობიექტის კატეგორია** (ანუ რომელ კატეგორიას მიეკუთვნება ობიექტი) განისაზღვრება იმ ცოდნიდან გამომდინარე, რომელიც აუცილებელია, რათა ობიექტმა იფუნქციონიროს როგორც აღნიშნული კატეგორიის ეგზემპლარმა. კატეგორიას წარმოადგენს *სკამი, მაგიდა, საწოლი, წიგნების*

თარო და ა. შ. უფრო მაღალი დონის კატეგორიაა ავეჯი, რომლის ბაზური დონის კატეგორიებს წარმოადგენენ ხემოჩამოთვლილი კატეგორიები. ცოდნის ბაზაში ბაზური წარმომადგენლობა წარმოდგენილია ობიექტების ფორმის, ფიზიკური და ფუნქციური თვისებების შესახებ ცოდნის პრიმიტიული (ელემენტარული) მსხვილი ნაჭრების სახით, რომლებიც შეიძლება გამოყენებული იყოს როგორც პრიმიტივები საჭირო ფუნქციის განსაზღვრისას. ამგვარად, ობიექტების ამოცნობისთვის მათ ფუნქციურ დანიშნულებაზე დამყარებული მიდგომა ხემოჩამოთვლილი მოდელების შემდგომ განვითარებას წარმოადგენს. ასეთი მიდგომისას განისაზღვრება ობიექტების კლასები მათი ფუნქციური დანიშნულებიდან გამომდინარე. ჩვენ მიერ განხილულ მაგალითში სკამი არის ობიექტი, რომელსაც ადამიანი იყენებს დასაჯდომად და რომელსაც შეიძლება ჰქონდეს რამდენიმე ერთმანეთისგან განსხვავებული რელაციური სტრუქტურა. თუმცა ყველა ისინი აკმაყოფილებდეს ფუნქციური შეზღუდვების ერთ კრებულს.

ობიექტის ფუნქციაზე დამყარებული ამოცნობის სისტემის მაგალითს წარმოადგენს ამოცნობის უნივერსალური სისტემა, რომელიც ამოცნობისთვის იყენებს ობიექტების ფორმის მახასიათებლებს და ფუნქციურ თვისებებს GRUFF (Generic Object Recognition Using Form and Function). ამოცნობისთვის აღნიშნულ სისტემაში გამოიყენება ცოდნის ბაზა, რომელშიც ცოდნა წარმოდგენილია 3 დონეზე:

1. ცოდნის ბაზაში არსებული ყველა ობიექტის კატეგორიების იერარქია;
2. თითოეული კატეგორიის განსაზღვრა მათი ფუნქციური თვისებების ტერმინებში;

3. ცოდნის პრიმიტივები, რომელსაც ეფუძნება ფუნქციური განსაზღვრებები.

ცოდნის პრიმიტივები. ფუნქციაზე დამყარებული ობიექტის კატეგორიის განსაზღვრის საფუძველს წარმოადგენს 6 ცოდნის პრიმიტივი.

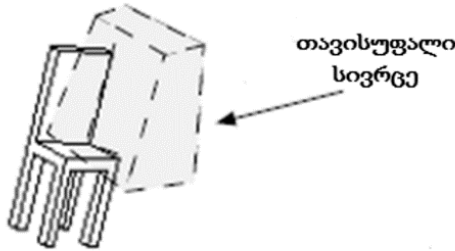
განსაზღვრება 6.2. *ცოდნის პრიმიტივი მოიაზრება როგორც პარამეტრიზებული პროცედურული ცოდნის მსხვილი ნაჭერი, რომელიც აყალიბებს გარკვეულ ბაზისურ წარმოდგენას – ცნებას (ცოდნის წარმოდგენის ელემენტი) ობიექტის ფორმის, ფიზიკური და ფუნქციური თვისებების შესახებ.*

თითოეული ცოდნის პრიმიტივი შესასვლელი მონაცემების სახით იღებს 3D ობიექტის ფორმის თვისებების გარკვეულ ნაწილს (პორციას) პრიმიტივის პარამეტრების მნიშვნელობებთან ერთად და უკან აბრუნებს **შეფასების ზომას**, რომლის მნიშვნელობათა დიაპაზონი მოთავსებულია 0 და 1 შორის, და მიუთითებს, თუ რამდენად კარგად აკმაყოფილებს შესასვლელი მონაცემები მოცემულ მოთხოვნებს. ამოცნობის GRUFF სისტემაში განიხილება 6 ცოდნის პრიმიტივი, რომლებიც განსაზღვრავს შემდეგ ცნებებს:

- **ფარდობითი ორიენტაცია (ნორმალი 1, ნორმალი 2, მნიშვნელობათა დიაპაზონი) (relative orientation)** – გამოიყენება იმის განსაზღვრავად, თუ რამდენად კარგად შეესაბამება ორი ზედაპირის ფარდობითი ორიენტაცია (ზედაპირების ნორმალებს შორის კუთხის სიდიდე) გარკვეულ სასურველ ურთიერთგანლაგებას (სასურველ დიაპაზონს). მაგალითად, ჩვენ მიერ განხილული სკამის შემთხვევაში დასაჯდომის

ზედაპირი თითქმის მართობული უნდა იყოს ზურგის ზედაპირის;

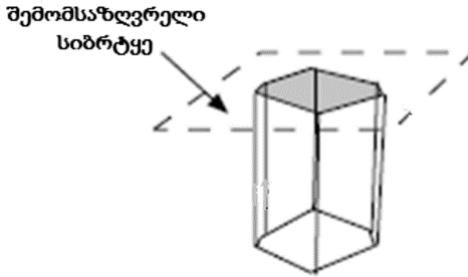
- **განზომილებები (ფორმის ელემენტი, განზომილების ტიპი, მნიშვნელობათა დიაპაზონი) (dimensions)** – გამოიყენება 6 ტიპის განზომილების: *სიგანე, სიღრმე, სიმაღლე, ფართობი, მომიჯნავე ზედაპირისა და მოცულობის* გაზომვისთვის. მაგალითად, დევს თუ არა, მაგალითად, ობიექტის ზედაპირის სიგანე ან სიღრმე სასურველ მნიშვნელობათა დიაპაზონში;
- **სიახლოვე (ფორმის ელემენტი ერთი, ფორმის ელემენტი ორი, მნიშვნელობათა დიაპაზონი) (proximity)** – ამოწმებს ობიექტის ფორმის ელემენტებს შორის თვისობრივ სივრცით მიმართებებს, როგორცაა: *ზემოთ, ქვემოთ და ახლოს*. მაგალითად, იმისთვის, რომ ჩანთა ადვილი ასაწევი იყოს, მას სახელური სიმძიმის ცენტრის ზემოთ უნდა ჰქონდეს;
- **თავისუფალი სივრცე (ობიექტის აღწერა, თავისუფალი სივრცის მოცულობა) (clearance)** – ამოწმებს თავისუფალია თუ არა ობიექტის შემადგენელ ნაწილებს შორის არსებული სივრცე რაიმე წინააღმდეგობისგან. მაგალითად, 6.13 სურათზე სკამზე დასაჯდომი სივრცე წარმოდგენილია მართკუთხა ფორმის მრავალწახნაგის მოცულობის სახით. ეს პრიმიტივი გამოიყენება ობიექტის ფორმის პოტენციური ფუნქციური ელემენტის ხელმისაწვდომობის შემოწმების მიზნით, ანუ ხელმისაწვდომია თუ არა იგი. შეფასების ზომა 1-ის ტოლია, თუ აღნიშნული მოცულობა თავისუფალია და 0-ის, თუ დაკავებულია.



სურ. 6.13

- მდგრადობა (ფორმა, ორიენტაცია, გამოყენებული ძალა) (stability) – ამოწმებს, დარჩება თუ არა მოცემული ფორმის ობიექტი მდგრად მდგომარეობაში, როცა ის მოთავსებულია რაიმე საყრდენ სიბრტყეზე მოცემული ორიენტაციით და მასზე რაღაც ძალა მოქმედებს;
- შემოსაზღვრა (ჩაზნექილობა, ორიენტაცია, შემოსაზღვრული სიბრტყე) (enclosure) – ამოწმებს ობიექტის ფორმაში საჭირო ღრუებისა და ჩაზნექილობების არსებობას მოცემული ორიენტაციის შემთხვევაში. მაგალითად, ღვინის ჭიქას ღვინის ჩასასხმელად უნდა ჰქონდეს ჩაზნექილობა. ხოლო ნორმალური ორიენტაციის შემთხვევაში (ვერტიკალურ მდგომარეობაში) ჭიქის ჩაზნექილობა შემოსაზღვრულია საყრდენი სიბრტყის პარალელური სიბრტყით (სურ. 6.14).

ფუნქციური თვისებები. ობიექტის ფუნქციური კლასის განსაზღვრა მიუთითებს იმ ფუნქციურ თვისებებზე, რომელსაც უნდა ფლობდნენ მოცემული კლასის ობიექტები ცოდნის პრიმიტივების ტერმინებში. GRUFF სისტემაში ობიექტების კლასებისთვის: *ავეჯო*, *ჭურჭელი* და *ხელსაწყოები*, გამოიყო ფუნქციური კატე-



სურ. 6.14

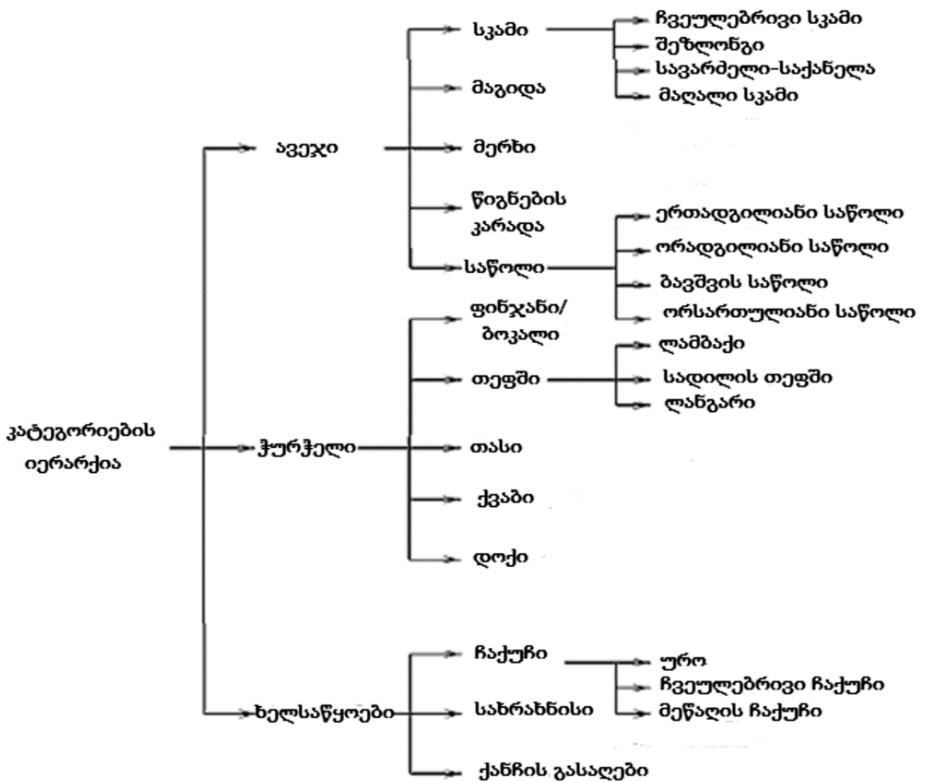
გორიები, რომლებიც განისაზღვრა შემდეგი 4 შესაძლო ტრაფარეტით:

- უზრუნველყოფს X -ის სტაბილურობას;
- უზრუნველყოფს X -თვის ზედაპირს;
- უზრუნველყოფს X -თვის საცავს;
- უზრუნველყოფს X -თვის სახელურს;

სადაც X წარმოადგენს ტრაფარეტის პარამეტრს. მაგალითად, სკამმა უნდა უზრუნველყოს მასზე მჯდომი ადამიანის სტაბილური სიმყარე და უნდა ჰქონდეს დაჯდომისთვის ვარგისი ზედაპირი; ზაფხულში ხილის შესანახად უნდა არსებობდეს შესაბამისი გრილი საცავი; ხოლო კარს უნდა ჰქონდეს კარგი სახელური, რომ ადვილად გაიღოს.

კატეგორიების იერარქია. ამოცნობის GRUFF სისტემაში ობიექტების ყველა კატეგორია გაერთიანებულია კატეგორიების ხეში. სისტემას მხოლოდ ამ კატეგორიების ამოცნობა შეუძლია. ხის ზედა დონეზე მოთავსებულია ყველაზე ზოგადი კატეგორიები, მაგალითად, *ავეჯი* და *ჭურჭელი*. ქვემოთ მოძრაობის-

ას ყოველ შემდეგ დონეზე ხდება კატეგორიების თანდათანობითი დეტალიზაცია. მაგალითად, კვანძს ავეჯი აქვს კონკრეტული ობიექტების კლასების შვილობილი კვანძები – სკამი, მაგიდა, მერხი, წიგნების კარადა, საწოლი, რომლებიც თავის მხრივ ასევე დეტალიზდება. მაგალითად, სკამი არსებობს სხვადასხვანაირი. კერძოდ: ჩვეულებრივი სკამი, შეზღონგი, სავარძელი-საქანელა, მაღალი სკამი. ასეთი ხის მაგალითი წარმოდგენილია 6.15 სურათზე.



სურ. 6.15

ამოცნობის წარმოდგენილ სისტემაში ობიექტების კატეგორიების ფუნქციური განსაზღვრება გამოიყენება არა ობიექტების ამოსაცნობად, არამედ გადაწყვეტილების მისაღებად იმის შესახებ, შეუძლია თუ არა ამ დაკვირვებულ 3D ობიექტს, მოცემულს სიღრმის მონაცემების სახით, იმოქმედოს როგორც მოცემული კატეგორიის ელემენტი. აქ ფუნქციაზე დამყარებული ანალიზის პროცესი შედგება ორი ეტაპისაგან:

- წინასწარი დამუშავება;
- ამოცნობა.

წინასწარი დამუშავების ეტაპზე ხდება 3D სიღრმის მონაცემების დამუშავება. დამუშავების პროცესი არ არის დამოკიდებული კატეგორიაზე – ყველა ობიექტი მუშავდება ერთნაირად. 3D სიღრმის მონაცემების ანალიზის შედეგად მათგან გადაირჩევა ყველა პოტენციური ფუნქციური ელემენტი. ამოცნობის ეტაპზე ეს ელემენტები გამოიყენება ინდექსების ასაგებად, რომელთა საფუძველზეც შემდეგ ხდება ობიექტების კატეგორიების რანჟირება (რაიმე ნიშნით განლაგება). ინდექსი შედგება ფუნქციური ელემენტისა და ასევე მისი ფართობისა და მოცულობისგან. ის კატეგორიები, რომელთა შედარება ინდექსის მონაცემების საფუძველზე შეუძლებელია, ძიებიდან გამოირიცხება. ხოლო დარჩენილი კატეგორიები კი მოწესრიგდება შემდგომი შეფასებისთვის. ობიექტის რომელიმე კლასისადმი კუთვნილების თითოეული ჰიპოთეზისთვის ჯერ გამოიძახება ამ კლასის ცოდნის პრიმიტივები. მათი საშუალებით გამოითვლება თუ რამდენად კარგად აკმაყოფილებს საწყის მონაცემებში მოძიებული ფუნქციური ელემენტი მოცემული კლასის მოთხოვნებს. თითოეული ცოდნის პრიმიტივი უკან აბრუნებს გამოთვლილი შეფასების რიცხვით მნიშვნელობას. ასეთნაირად მიღებული შეფასე-

ბები ერთიანდებიან ისეთნაირად, რომ მიღებულ იქნას საბოლოო ასოცირებული შეფასება, რომელიც აღწერს, თუ რამდენად კარგად შეესაბამება საწყისი მონაცემებიდან მიღებული ფუნქციური ელემენტების მთელი სიმრავლე სავარაუდო (ჰიპოთეზით დაშვებული) ობიექტის კატეგორიას.

6.7. ამოცნობა გარეგნულ სახეზე (გარეგნობაზე) დაყრდნობით

აქამდე ჩვენ მიერ განხილული ამოცნობის სისტემების უმეტესობაში ამოცნობა ემყარებოდა მიდგომას, როცა მოდელი განიხილებოდა როგორც ობიექტის 2D გამოსახულებებიდან განცალკევებული, დამოუკიდებლად არსებული ერთეული. ახლა განვიხილოთ მიდგომა, რომელიც ობიექტის ამოცნობისთვის იყენებს მის გარეგნულ სახეზე დამყარებულ მოდელებს (appearance-based models). ამ მოდელებში ობიექტები წარმოდგენილია მესხიერებაში შენახული მათი სხვადასხვა ხედიდან მიღებული 2D გამოსახულებების კრებულის სახით. უცნობი ობიექტის წარდგენის შემთხვევაში ამოცნობა ხდება მისი შედარებით მესხიერებაში არსებულ გამოსახულებებთან (recognition by appearance). ობიექტი წარმოდგენილია გადამწოდინიდან მიღებული საწყისი მონაცემების – **სიგნალის დონეზე**, ხოლო შედარება ხორციელდება ინტენსიობის სახით წარმოდგენილი გამოსახულებების უშუალო შედარების გზით. ამოცნობისთვის ამ დროს არ გამოიყენება უფრო მაღალი დონის ნიშან-თვისებები, მაგალითად, ობიექტების ნაწილებიდან გამოყოფილი. შესაბამისად, მცირეა ამოცნობისთვის საჭირო გამოთვლების ფასი და დრო. გარეგან სახეზე დამყარებული ამოცნობის მეთოდების სიმარტივემ განაპირობა მათი ფართო გამოყენება გამოსახულებების დიდ კრე-

ბულებზე. ამ მიდგომის საფუძველზე ყველაზე მნიშვნელოვანი შედეგები მიღებულ იქნა ადამიანის პირისახის ამოცნობის ამოცანაში.

ობიექტის გარეგნულ სახეზე დამყარებული ამოცნობის პროცესი შეიძლება დაიყოს ორ ეტაპად:

- სისტემის **დასწავლის ეტაპზე** იქმნება მარკირებული გამოსახულებების $DB = \{ \langle I_j [], L_j \rangle_{j=\overline{1,k}} \}$ მონაცემთა ბაზა, სადაც $I_j - j$ - ური სასწავლო გამოსახულებაა, ხოლო L_j კი ამ გამოსახულების ჭდეა;
- **ამოცნობის ეტაპზე** უცნობი ამოსაცნობი ობიექტის I_u გამოსახულება ედარება DB მონაცემთა ბაზაში არსებულ სასწავლო $I_j, j = \overline{1,k}$ გამოსახულებებს და ენიჭება მასთან ყველაზე ახლოს მყოფი (ყველაზე მსგავსი) სასწავლო გამოსახულების L_j ჭდე. გამოსახულებებს შორის მსგავსების (სიახლოვის) რაოდენობრივ საზომად გამოიყენება ევკლიდური მანძილი. $I_j, j = \overline{1,k}$ სასწავლო გამოსახულებებიდან I_u გამოსახულების ყველაზე უფრო მსგავს გამოსახულებად მიიჩნევა ის, რომელთა შორისაც $\|I_u [] - I_j []\|, j = \overline{1,k}$ ევკლიდური მანძილი მინიმალურია, ან $I_u \cdot I_j$ სკალარული ნამრავლია მაქსიმალური.

ამასთან ერთად, თითოეული ამ ეტაპისთვის აუცილებელია გათვალისწინებული იყოს შემდეგი დეტალები:

- **სასწავლო გამოსახულებები** რაც შეიძლება სრულად უნდა ასახავდნენ ამოსაცნობ ობიექტებს. მაგალითად, ადამიანის პირისახის (ასევე სხვა ობიექტების) შემთხვევაში სასწავლო გამოსახულებების სიმრავლე უნდა შეიცავდეს ადამია-

ნის პირისახის გამოსახულებებს სხვადასხვა გამომეტყველებით, სხვადასხვა განათებით, სხვადასხვა რაკურსით გადაღებულს და ა. შ.;

- ობიექტი უნდა იყოს მკვეთრად გამოყოფილი. კერძოდ, თითოეული პირისახის მდებარეობა და განზომილება პრაქტიკულად ერთნაირი უნდა იყოს. საწინააღმდეგო შემთხვევაში საჭირო გახდება მდებარეობისა და განზომილების პარამეტრების გამოთვლა ყოველი ცალკეული შემთხვევისთვის;
- იმის გამო, რომ წარმოდგენილი მიდგომა არ საჭიროებს ობიექტის ფონისგან გამოყოფას, ამიტომ ფონი მონაწილეობას უნდა იღებდეს როგორც გადაწყვეტილების მიღების, ისე სწავლების პროცესში;
- მცირე განზომილების გამოსახულებების, მაგალითად, (100x100) პიქსელის შემთხვევაშიც კი, რომელიც საკმარისია ადამიანის პირისახის ამოსაცნობად, გამოსახულება შეიცავს 10000 პიქსელს. სავარაუდოა, რომ სასწავლო ნიმუშების რაოდენობა ამ რიცხვზე ბევრად უფრო მცირე იქნება. შესაბამისად, საჭირო გახდება განზომილების შემცირების მეთოდის გამოყენება.

VII თავი. სცენის აღწერის მეთოდები

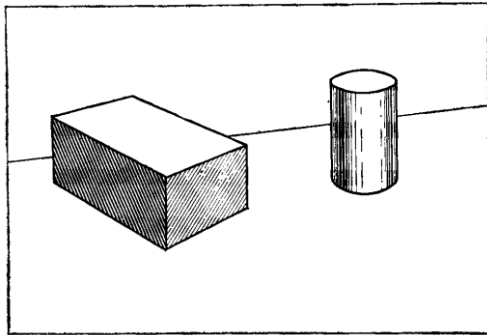
7.1. სცენათა ანალიზის მიზანი

სცენათა ანალიზის ამოცანა ზოგადად გულისხმობს არა მარტო გამოსახულებაზე არსებული ობიექტების 3D ფორმის რეკონსტრუქციას, მოძრაობის თვალთვალს, ან ობიექტების და სცენის კლასიფიკაციას, ანუ მათ მიკუთვნებას წინასწარ ცნობილი რომელიმე კლასისადმი, არამედ თვით სცენის სტრუქტურის აღწერის ამოცანასაც. არსებობს მრავალი პრაქტიკული ამოცანა, სადაც ეს უკანასკნელი უფრო მნიშვნელოვანია, ვიდრე კლასიფიკაცია. ასეთ შემთხვევასთან მაშინ გვაქვს საქმე, როცა კომპიუტერული ხედვის სისტემა მართვის ან გადაწყვეტილების მიღების სისტემის კომპონენტს წარმოადგენს. ასეთი სისტემის მაგალითია სატრანსპორტო საშუალების მართვის სისტემა, სადაც სცენის სტრუქტურის ცოდნა ძალიან მნიშვნელოვანია. ის საშუალებას იძლევა განისაზღვროს მოძრაობის შესაძლო მიმართულება და წინააღმდეგობები გზაზე. მაგრამ ამავე დროს 3D მახასიათებლების მიხედვით შეიძლება ერთმანეთისგან ძნელად გასარჩევი აღმოჩნდეს ტროტუარი ან გზისპირი საგალი ნაწილისგან. ამგვარად, ასეთი ამოცანების გადაწყვეტა მოითხოვს გამოსახულებებიდან არა ობიექტების ფიზიკური მახასიათებლების აღდგენას, არამედ უფრო მეტად სცენების გააზრებულ, ლოგიკურად გამართულ შინაარსობრივ აღწერას, სტრუქტურის არსის გაგებას. ამ დროს გამოიყენება მეთოდები, რომლებსაც საქმე აქვთ უშუალოდ სცენაზე არსებულ სტრუქტურულ მიმართებებთან. იგულისხმება, რომ ამ დროისთვის გამოსახულების დამუშავებისა და ანალიზის შედეგად უკვე მიღებულია სცენების შესახებ გარკვეული აპრიორული ინფ-

ორმაცია – ცოდნა მათი შემადგენელი ცალკეული ობიექტების (ან/და მათი ნაწილების) შესახებ და ის ჩაწერილია სიმბოლურ სახეში, ანუ ვიცით რას უნდა ველოდოთ სცენაზე. ობიექტის სიმბოლურ სახეში წარმოდგენა ნიშნავს მის აღწერას ისეთი სიმბოლური ტერმინების, როგორცაა „სიბრტყე“, „კვადრი“, „კუთხე“, ან „პირისახე“ და ა. შ. სიის, და არა თვით ფორმის შემადგენელი პიქსელების სახით. მოცემული სცენის სტრუქტურის აღწერისთვის საჭიროა სცენების კლასის შესახებ წინასწარი ცოდნა გავაერთიანოთ მოცემული სცენის შესახებ კონკრეტულ სიმბოლურ ინფორმაციასთან. მაგალითად, ვთქვათ, რომ სცენაზე არსებული ობიექტები წარმოადგენენ მრავალწახნაგებს. მაგრამ თუ დამკვირვებელმა არ იცის მრავალწახნაგის სტრუქტურა, მაშინ მისთვის შეუძლებელი იქნება ასეთი ობიექტების იდენტიფიკაცია და შესაბამისად სცენის აღწერა.

ხშირ შემთხვევაში გამოსახულების აღწერის ქვეშ იგულისხმება მისი აღწერა ნიშან-თვისებების საშუალებით, რომლებიც განისაზღვრებიან როგორც მთლიანად გამოსახულებისთვის (გლობალური ნიშან-თვისებები), ასევე მისი ცალკეული ქვესიმრავლეებისთვის (ლოკალური ნიშან-თვისებები). მაგალითად, ქვესიმრავლეების გეომეტრიულ ნიშან-თვისებები, ასევე მიმართებები ქვესიმრავლეებს შორის, რომელთა დახასიათება შეიძლება გამოთქმებით – „ზემოთ“, „მარცხნივ“, „ახლოს“, „მათ შორის“ და ა. შ. თუ მოცემულია ნიშან-თვისებათა და მიმართებათა ერთობლიობა, მაშინ უკვე შესაძლებელია გამოსახულების სიტყვიერი აღწერა გამოსახულების შესახებ კითხვა-პასუხების სახით და იმის განსაზღვრა, მართლაც გვაქვს თუ არა გამოსახულებაზე ქვესიმრავლეების ის კომბინაციები, რომლებსაც მოცემული თვისებები აქვს და რომელთა შორის მოცემული მიმართებები არსებობს.

სცენის აღწერა შეიძლება დეტალიზაციის სხვადასხვა დონეზე განხორციელდეს. მაგალითისთვის განვიხილოთ მარტივი სცენა, რომელიც შედგება ყუთისა და ცილინდრისგან (სურ. 7.1). სცენის დეტალიზაციის უხეშ დონეზე აღწერისას ჩვენ შეგვიძლია ვთქვათ, რომ სცენაზე არის ყუთი და ცილინდრი. მაგრამ თუ ჩვენ გვინტერესებს სცენის სტრუქტურა, მაშინ დეტალიზაციის ხარისხი უნდა გავზარდოთ და არსებულ აღწერას დაემატოთ, რომ ყუთი ცილინდრის მარცხნივ დევს. თუ განვაგრძობთ დეტალიზაციას, მაშინ ყუთი შეგვიძლია დავახასიათოთ როგორც 3 ოთხკუთხედისგან შემდგარი ობიექტი, და ა. შ. ამგვარად, ასეთი თანამიმდევრობით ჩვენ შეგვიძლია სრულად აღვწეროთ მოცემული სცენის სტრუქტურა. აქედან გამომდინარე,



სურ. 7.1

განსაზღვრება 7.1. *გამოსახულების გამოკვლევის პროცესს სცენის შესახებ ისეთი ინფორმაციის მიღების მიზნით, როგორცაა ხილული ზედაპირების ფორმა, ობიექტების იდენტიფიკაცია და მათი სივრცითი ან დინამიკური ურთიერთკავშირები, სცენათა ანალიზი ეწოდება.*

7.2. ცოდნის გამოყენების ადგილი კომპიუტერულ ხედვაში

მონაცემების დამუშავების თვალსაზრისით კომპიუტერულ ხედვაში განიხილება დამუშავების 3 დონე: დაბალი, საშუალო და მაღალი. დამუშავების უმაღლეს დონეს, რაც დაკავშირებულია გამოსახულების მონაცემების ინტერპრეტაციასა და განსჯასთან მიეკუთვნება **გამოსახულების გაგება**.

გამოსახულების გაგება, ანუ გამოსახულებიდან ან გამოსახულებების მიმდევრობიდან მაღალი დონის ინფორმაციის მიღება ხელოვნური ინტელექტის ერთერთ ყველაზე უფრო რთულ გამოწვევას წარმოადგენს. აღნიშნულში იგულისხმება დამუშავების დაბალ და საშუალო დონეზე მიღებულ მონაცემებზე დაყრდნობით გამოსახულების მონაცემების შინაარსის ხარისხობრივი აღწერა. გამოსახულების გაგება ფოკუსირებულია თითოეული ობიექტის და მათ შორის მიმართებების შესწავლაზე, რომელიც ეფუძნება გამოსახულების დამუშავებისა და ანალიზის შედეგებს და აერთიანებს ერთმანეთთან ხელოვნურ ინტელექტს და კოგნიტიურ თეორიას, რათა გამოსახულების შინაარსიდან გამომდინარე მოხდეს სცენის ინტერპრეტაცია. მის დეტალებში წვდომა მოითხოვს ხელოვნური ინტელექტის მნიშვნელოვანი შემადგენელი ნაწილების – ცოდნის წარმოდგენის მოდელების, პროდუქციული სისტემების, რელაციური სტრუქტურების, სემანტიკური ქსელების, შესაბამისობის დადგენის, განსჯის, პრობლემების გადაჭრის, სწავლების და ა. შ. არსში გარკვევას. ამგვარად,

განსაზღვრება 7.2. გამოსახულების გაგებაში იგულისხმება მაღალი დონის (აბსტრაქტული) ინფორმაციის მიღება გამოსახულებიდან ან გამოსახულებების მიმდევრობიდან.

კომპიუტერულ ხედვაში ცოდნა გამოიყენება დამუშავების სხვადასხვა ეტაპზე, დაწყებული ნიშან-თვისებათა გამოყოფიდან (მაგალითად, ცოდნა იმის შესახებ, რომ მრავალწახნაგას აქვს წრფივი კიდეები) და დამთავრებული სცენის სრული აღწერით.

სცენის შესახებ ცოდნას ხშირად უწოდებენ „მოდელს“. განასხვავებენ 2 ტიპის მოდელს: 2D და 3D მოდელებს. 2D მოდელით ხდება გამოსახულებების ან მათი ელემენტების წარმოდგენა. მაგალითად, „მანქანები გზაზე არიან“. ამ მოდელის უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ ის პირდაპირ შეიძლება შეუთავსდეს გამოსახულებებს ან მათ ნიშან-თვისებებს. ნაკლოვანება კი ისაა, რომ მისი საშუალებით შეუძლებელია ობიექტების 3D გეომეტრიის ან 3D მიმართებების წარმოდგენა. აქედან გამომდინარე, 2D მოდელის გამოყენება ეფექტურია მაშინ, როცა ობიექტების ორიენტაცია ან დაკვირვების წერტილი უცვლელია.

3D მოდელი შეიცავს ინფორმაციას სცენაზე ობიექტების 3D მდებარეობის, მიმართებების და ფორმის თვისებების შესახებ. აქედან გამომდინარე, 3D მოდელები ბევრ შემთხვევაში შეიძლება იყოს გამოყენებული. ამ მოდელების გამოყენების პრობლემა მათი მოქნილობიდან და აგების სირთულიდან მომდინარეობს. კერძოდ, მართალია მათი გამოყენება ეფექტურია ობიექტების სხვადასხვა ორიენტაციის შემთხვევაში, მაგრამ აღვილი არ არის სცენის აღწერის მოდელებთან შეთავსება.

ამგვარად, გამოსახულებაზე დაყრდნობით სცენის აღწერისთვის მას შემდეგ, რაც აიგება გამოსახულების შიგა მოდელი, ასევე საჭიროა გარკვეული ცოდნის არსებობა რეალური სცენის შესახებ. მაგალითად, თუ ჩვენ გვაქვს რომელიმე ქალაქის სატელიტური ან აეროფოტოგამოსახულება, მაშინ შესამის-

ობის დადგენა გამოსახულების მოდელსა და რეალობას შორის მოითხოვს ზოგად ცოდნას ქუჩების, სახლების, პარკების, მდინარეების და ა. შ. განლაგების შესახებ ქალაქებში, და აგრეთვე კონკრეტულ ცოდნას კონკრეტული სახლების, ქუჩების, პარკების, მდინარეების და ა. შ. წყობის შესახებ კონკრეტულ ქალაქში. თუ სცენის გამოსახულების მოდელი ემთხვევა რეალობას, მაშინ სცენა სწორად იქნება აღწერილი.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, გამოსახულების გაგების მიზანია გამოსახულებაზე დაყრდნობით სცენის გააზრებული, არსობრივი ფორმალური აღწერა. ხოლო ამოცანები, რომლებსაც ის მოიცავს ვარირებს დაწყებული გამოსახულებაზე ცალკეული ობიექტების ამოცნობიდან და დამთავრებული სცენის სრული აღწერით ცოდნის წარმოდგენის გარკვეული სისტემის ფარგლებში. თუ გამოსახულების გაგების ამოცანა კორექტულადაა შესრულებული, მაშინ კომპიუტერული ხედვის სისტემას „ესმის“ გამოსახულების არსი. მაგალითად, თუ რობოტს შეუძლია შეასრულოს ბრძანება – „კონვეიერზე არსებული დეტალების გროვიდან აირჩიე მხოლოდ 3 ნახვრეტის მქონე დეტალი“, მაშინ ეს იმას ნიშნავს, რომ რობოტის მიერ სწორად მოხდა გამოსახულების მონაცემების ინტერპრეტაცია.

გარესამყაროს აღქმისას მთავარი განსხვავება დამკვირვებელ-ადამიანსა და ხელოვნური ხედვის სისტემას შორის ამ უკანასკნელში რეალური სამყაროს შესახებ ცოდნის არსებობის ნაკლოვანებაში მდგომარეობს. კომპიუტერული ხედვის სისტემებმა, მას შემდეგ რაც მოახდენენ სცენის შიგა მოდელების აგებას, მის ვერიფიკაციას, განახლებას გარესამყაროს ცვლილებისას, დამუშავების შესაბამისი ოპერაციების განხორციელებას, უნდა მოახდინონ მათ წინაშე დასმული ამოცანის შესრულება. იმ შემთხვევაში, თუ შიგა მოდელი შეესაბამება რეალობას, მაშინ გამოსახულების ინტერპრეტაციის მიზანი მიღწეულ-

ია. გამოსახულების წარმოდგენების რაოდენობას აქვს მზარდი ხასიათი. დამუშავების პროცესში მიღებული ახალი მონაცემები დარდება არსებულ მოდელთან და შეუსაბამობის არსებობის შემთხვევაში ხდება მოდელის მოდიფიკაცია. გამოსახულების მონაცემების ინტერპრეტაცია არ არის ცალსახად დამოკიდებული მხოლოდ ამ ახალ მონაცემებზე. საწყის მოდელებს შორის განსხვავებები მონაცემების სხვადასხვანაირად ინტერპრეტაციის მიზეზი შეიძლება გახდეს მაშინაც კი, თუ ისინი ყოველთვის თავსებადია აგებულ მოდელთან. გამოსახულების საბოლოო ინტერპრეტაცია მაშინ შეიძლება ჩაითვალოს სწორად, თუ ფასდება მხოლოდ შესაბამისობა მოდელსა და გამოსახულების მონაცემებს შორის. სცენის შესახებ არსებული ცოდნის გამოყენებით გამოსახულებაზე გამოყოფილი ყველა ობიექტის ინტერპრეტაციის შემდეგ, მაგალითად, სცენაზე დიდი ცისფერი და მწვანე არეები ინტერპრეტირებული უნდა იყოს როგორც შესაბამისად ღრუბელი და ბალახი, ხდება ამ ობიექტების მარკირება, რის შედეგადაც მიიღება სცენის აღწერა.

გამოსახულების გაგების პროცესის მთავარ ამოცანას წარმოადგენს მართვის იმ სტრატეგიების განსაზღვრა, რომელიც დამუშავების პროცესში ნაბიჯების შესაბამის მიმდევრობას უზრუნველყოფს. უფრო მეტიც, კომპიუტერული ხედვის სისტემა ამ დროს უნდა შეძლოს გამკლავება ჰიპოტეტური და არაცალსახა ინტერპრეტაციების დიდ რაოდენობასთან.

7.3. გამოსახულების გაგების მართვის სტრატეგიები

ბიოლოგიური სისტემებისთვის დამახასიათებელია მათში მიმდინარე პროცესების მართვის რთული და კომპლექსური სტრატეგია, რომელიც მოიცავს ინფორმაციის პარალელურ დამუშავე-

ბას, დინამიკური აღქმის ქვესისტემის განაწილებას, ქცევის ცვლილებას და ა. შ. კომპიუტერული ხედვის, როგორც ხელოვნური ინტელექტის ერთერთი მიმართულების მთავარი მიზანია მიაღწიოს მანქანის ისეთ ქცევას, რომელიც ბიოლოგიური სისტემების ქცევის მსგავსი იქნება ტექნიკურად განხორციელებადი პროცედურების გამოყენებით. გამოსახულების გაგება მოითხოვს თანამშრომლობას ინფორმაციის დამუშავების რთულ ამოცანებსა და შესაბამის მართვას შორის. კერძოდ, მნიშვნელოვანია დამუშავების პროცესის ყოველი შემდგომი ნაბიჯის განსაზღვრა. იმისთვის, რომ გამოთვლები ეფექტურად განხორციელდეს (გამოთვლების ფასი დიდი არ იყოს), საჭიროა დამუშავების პროცესის მართვა. არსებობს მართვის სხვადასხვა სტრატეგია, რომელთა არჩევა დამოკიდებულია იმაზე, თუ რა მიზანს ისახავს კომპიუტერული ხედვის პროცესის მიმდინარეობა და რა სახის ცოდნა არსებობს სცენის შესახებ. გამოსახულების დამუშავების პროცესში მართვა იყენებს სცენის შესახებ არსებულ ცოდნას. განვიხილოთ კომპიუტერულ ხედვაში გამოყენებული მართვის სტრატეგიები.

7.3.1. პარალელური და მიმდევრობითი დამუშავების პროცედურების მართვა

გამოსახულების დამუშავებისთვის შეიძლება ორივე პროცედურის გამოყენება. მიმდევრობითი დამუშავებისას ოპერაციები ყოველთვის თანამიმდევრულად მიმდინარეობს. მიმდევრობითი მართვის სტრატეგია ბუნებრივია ტრადიციული, ფონ ნეიმანის არქიტექტურის (მიმდევრობითი მოქმედების) კომპიუტერებისთვის, მაგრამ არ გამოდგება ბიოლოგიური ორგანიზმებისთვის, სადაც ხშირად საჭიროა დიდი რაოდენობის ოპერაციების ერთდროული (პარალელური) შესრულება გარკვეული სიჩქარით.

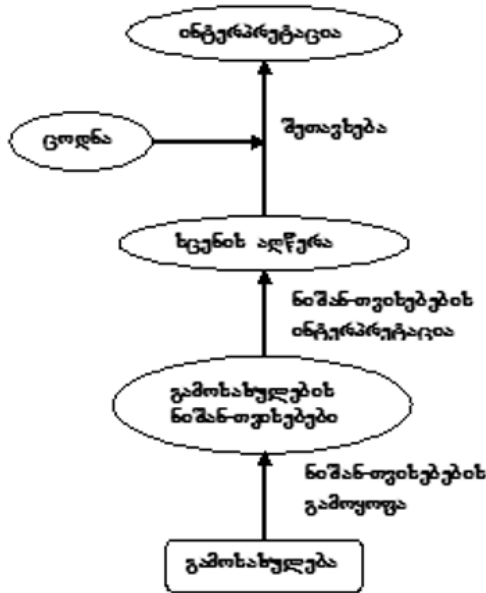
რაც შეეხება პარალელური მოქმედების კომპიუტერებს, მიუხედავად მათი პროგრამირების სირთულისა, დღეს უკვე ცნობილია, რომ გამოსახულების დამუშავების დაბალი დონის ოპერაციები პარალელურად შეიძლება შესრულდეს.

7.3.2. იერარქიული მართვა

კომპიუტერის მესხიერებაში გამოსახულება დამუშავების სხვადასხვა ეტაპზე სხვადასხვანაირად არის წარმოდგენილი. ამ დროს მონაცემების მართვასთან დაკავშირებით საკვანძო საკითხს წარმოადგენს ასეთი კითხვა: დამუშავება უნდა იმართებოდეს გამოსახულების მონაცემების შესახებ ინფორმაციის საფუძველზე, თუ უფრო მაღალი დონის ცოდნით? განსხვავება ამ მიდგომებს შორის შემდეგნაირად შეიძლება აღიწეროს:

- **მართვა გამოსახულების მონაცემებზე დაყრდნობით (ქვემოდან-ზემოთ მართვა)** (control by image data, bottom-up control): ქვემოდან-ზემოთ მართვის სტრატეგიები ემყარება მონაცემების სტრუქტურის აგებას დამუშავების შემდგომი ნაბიჯებისთვის (სურ. 7.2). იმის გამო, რომ ასეთი მართვა დამოკიდებულია საწყის მონაცემებზე, მას ასევე **მონაცემებით მართულ პროცესს** უწოდებენ. ამავე დროს ალგორითმის თითოეული ნაბიჯი შეიძლება შედგებოდეს რამდენიმე ქვენაბიჯისგან. ამასთან გამოსახულების წარმოდგენა ქვენაბიჯებზე უცვლელია. ალგორითმი იწყება რასტრული გამოსახულების წინასწარი დამუშავებით (გამოიყოფა უმარტივესი ნიშან-თვისებები – სიკაშკაშის მნიშვნელობები თითოეულ პიქსელში, კონტურების წერტილების კოორდინატები, ტექსტურის პარამეტრები და ა. შ.); შემდეგ ეტაპზე უმარტივესი ნიშან-თვისებების საფუძველზე ხდება სეგმენტების (ობ-

იექტების) გამოყოფა (ხდება თითოეული სეგმენტის შესაბამისი ჭლით მარკირება, მაგალითად, სიმბოლოთი), რომლებიც შეიძლება შეესაბამებოდეს რეალურ ობიექტებს ან მათ ნაწილებს; გამოსახულების გაგების ეტაპზე კი ხდება გამოყოფილი სეგმენტების ფორმალური აღწერა და მათი შედარება დასაშვებ არეში (არე, სადაც უნდა მოიძებნოს ამოცანის ამონახსნი) წარმოდგენილ რეალურ ობიექტებთან, რისთვისაც გამოიყენება სახეთა ამოცნობის მეთოდები. ობიექტების შესახებ ცოდნა (მოდელი) გამოიყენება მხოლ-



სურ. 7.2

ოდ სცენის აღწერების შედარებისას.

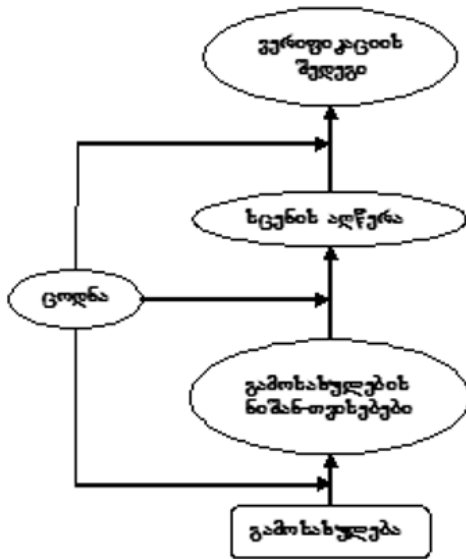
გამოსახულების გაგების ქვემოდან-ზემოთ მართვის სტრატეგიის შესაბამისი ალგორითმები ემყარება **დევიდ**

მარის მიდგომას, რომლის მიხედვითაც სცენის ანალიზის ამოცანა იწყება 2D ინტენსიობის გამოსახულების დამუშავებიდან და მთავრდება 3D გამოსახულების გაგებით გამოსახულების დამუშავების სხვადასხვა დონეზე მიღებული შუალედური წარმოდგენების მიმდევრობის გავლით. ქვემოდან-ზემოთ მართვის სტრატეგიის გამოყენება სასარგებლოა მაშინ, თუ გამოსახულების დამუშავებისთვის ხელმისაწვდომია მარტივი და ეფექტური მეთოდი, რომელიც არ იქნება დამოკიდებული გამოსახულების შინაარსზე.

- **მოდელზე დამყარებული მართვა (ზემოდან-ქვემოთ მართვა)** (top-down control): ზემოდან-ქვემოთ მართვის სტრატეგიის მთავარი პრინციპი მდგომარეობს გამოსახულების შიგა მოდელის აგებასა და მის ვერიფიკაციაში, რომლის ქვეშ იგულისხმება **მიზანზე ორიენტირებული დამუშავება** (სურ. 7.3). ასეთი მართვის შემთხვევაში გამოსახულების დამუშავება იმართება ცოდნის (მოდელის) გამოყენებით, ამიტომ მას **მოდელით მართულ პროცესს** უწოდებენ.

სცენის შესახებ ცოდნაზე დაყრდნობით ზემოდან-ქვემოთ მოძრაობისას მიზნები დამუშავების უფრო მაღალ დონეებზე იყოფა ქვემიზნებად უფრო დაბალ დონეებზე, რომლებიც შემდეგ ისევ იყოფა ქვემიზნებად მომდევნო ქვედა დონეებზე და ა. შ. მანამ, სანამ ქვემიზნები მიღებული ან უარყოფილი არ იქნება. ამისთვის დამუშავების თითოეულ დონეზე ხდება ჰიპოთეზის გენერირება სცენის გამოსახულებაზე კონკრეტული ობიექტის ან სტრუქტურის არსებობის ან არ არსებობის შესახებ ეტალონთან შედარების გზით და შემდგომ ამ ჰიპოთეზის ტესტირება. სცენის აღწერა მიიღება მასზე არსებული ობიექტების თანამიმდევრული ძიებით, რომლის დროსაც ითვალისწინებენ მანამდე მიღებულ წარმატებებს და წარუმატებლობებს, და შემ-

დევ კი ხდება აღმოჩენილ ობიექტებს შორის მიმართებების ინტერპრეტაცია. გამოსახულების გაგების პროცედურა მთავრდება შიგა მოდელის ვერიფიკაციით, რომლის შედეგადაც მოდელი მიიღება ან უარყოფილი იქნება. დამუშავების პროცესში შიგა მოდელის განახლება ხდება ჰიპოთეზის ტესტირების შედეგებიდან გამომდინარე. განვიხილოთ



სურ. 7.3

აღნიშნული მიდგომის მაგალითი. ვთქვათ, ადამიანი მივიდა სასტუმროში მანქანით და სთხოვა სასტუმროს თანამშრომელს თავისი მანქანის სასტუმროს წინ მდებარე დიდ ავტოსადგომზე სადმე პარკირება, თვითონ კი ავიდა თავის ნომერში და ახლა ფანჯრიდან ცდილობს მოძებნოს, თუ სად არის მისი რუხი ფერის ჯიპი ლიბერტი პარკირებული. შესაბამისად პირველი დონის მიზანს წარმოადგენს

სასტუმროს წინ ავტოსადგომის მოძებნა. ამ მიზნის შესრულების შემდეგ ქვემიზანს წარმოადგენს ავტოსადგომზე არსებულ მანქანებს შორის ყველა რუხი ფერის მანქანის მოძებნა და შემდეგ გადაწვევტილების მიღება, ამ რუხი ფერის მანქანებიდან რომელია ჯიპი ლიბერტი. თუ აღწერილი პროცესის დროს ყველა წინა მიზანი შესრულებულია, მაშინ ბოლო მიზანი მდგომარეობს იმის დადგენაში, არის თუ არა კონკრეტული რუხი ფერის ჯიპი ლიბერტი მისი მანქანა. ამ მიზნის შესასრულებლად აუცილებელია მისი მანქანის შესახებ კონკრეტული ცოდნა. იმ შემთხვევაში, თუ კონკრეტული თვისებების ტესტირება წარმატებული აღმოჩნდა, მაშინ მანქანა მიიჩნევა ამ აღამიანის კუთვნილად. თუ ტესტირება წარუმატებელი აღმოჩნდა, მაშინ საჭიროა ტესტირების განახლება უფრო მაღალ დონეზე და ჯერ კიდევ ტესტირება გაუვლელი მანქანის აღმოჩენა. ამგვარად, ყველა აღნიშნული მიზნის შესრულება შეიძლება სასტუმროს ნომრის ფანჯრიდან ყურებით და ავტომობილების, ფერებისა და ჯიპი ლიბერტების შესახებ ზოგადი და კონკრეტული ცოდნის – მოდელების გამოყენებით.

იმის გამო, რომ ცოდნა სცენის ან ობიექტების შესახებ გამოსახულების გაგების ბევრ პროცესში გამოიყენება, ზემოდან-ქვემოთ მართვა ძალიან ეფექტურია. ამის გამო მას ფართოდ იყენებენ კომპიუტერული ხედვის გამოყენებით სისტემებში.

ზემოაღწერილი იერარქიული მართვის სტრატეგიები გამოყენებული ოპერაციების ტიპების თვალსაზრისით ერთმანეთისაგან არ განსხვავდება. განსხვავება გამოიხატება ოპერაციების გამოყენების თანამიმდევრობაში ან ყველა გამოსახულების მონაცემების, ან მხოლოდ შერჩეული გამოსახულების მონაცემე-

ბის მიმართ. მართვის არჩეული მექანიზმი არ წარმოადგენს მხოლოდ გზას დამუშავების მიზნისკენ. ის გავლენას ახდენს მთელ მართვის სტრატეგიაზე. არც ქვემოდან-ზემოთ და არც ზემოდან-ქვემოთ მიდგომებს არ შეუძლია ახსნას ხედვის პროცესი ან ამოხსნას მხედველობით აღქმასთან დაკავშირებული რთული ამოცანები, თუმცა, ამ მიდგომების გარკვეული კომბინაციით შესაძლებელია გამოსახულების მონაცემების დამუშავებისთვის უფრო მოქნილი და ძლიერი მართვის სტრატეგის შემუშავება.

7.3.3. კომბინირებული მართვა

კომბინირებული მართვის მექანიზმი იყენებს ორივე, მონაცემებით და მოდულებით მართულ მართვის სტრატეგიებს. ის უკეთეს შედეგს იძლევა ვიდრე ზემოაღწერილი მიდგომები ცალ-ცალკე. იმისთვის, რომ დაბალ დონეზე გამოსახულების მონაცემების დამუშავება გაადვილდეს, გამოიყენება უფრო მაღალ დონეზე არსებული ინფორმაცია. მაგალითად, აეროფოტოსურათების გამოყენებით მანქანების ძებნისას აუცილებელია მონაცემებით მართული მართვა, მაგრამ ამავე დროს ამოცანის გამარტივების მიზნით შეიძლება გამოყენებული იყოს დამუშავების უფრო მაღალ დონეზე არსებული ცოდნა. კერძოდ ის, რომ გამოსახულებაზე მანქანები როგორც კონკრეტული ზომის მართკუთხა ობიექტები ჩანს, და ასევე, რომ ყველაზე მაღალი ალბათობით (ყველაზე ხშირად) მათი ნახვა გზებზე შეიძლება.

კომბინირებული მართვის გამოყენების მაგალითად შეიძლება განვიხილოთ გულის მკვებავი სისხლძარღვების (კორონარული არტერიების) საზღვრების ავტომატური გამოყოფის ამოცანა, სადაც გამოსახულება წარმოადგენილია რენტგენის სურათის სახით. სამწუხაროდ, ქვემოდან-ზემოთ ძიების ალგორი-

თმი ცუდად მუშაობს რთული და დაბალი ხარისხის გამოსახულებების შემთხვევაში, რომლებშიც სისხლძარღვები პარალელურია და ერთმანეთთან მჭიდროდაა განლაგებული, აქვთ ხშირი განტოტვა ან ერთმანეთს ფარავენ. ამის გამო, ასეთ რთულ გამოსახულებებზე საზღვრების საიმედოდ გამოყოფისთვის შემუშავებული იქნა ჰიბრიდული მართვის სტრატეგია, რომელშიც მონაცემების დამუშავება ქვემოდან-ზემოთ და ზემოდან-ქვემოთ მართვის სტრატეგიის ნაბიჯების კომბინაციით ხდება. ამ მიდგომაში შემდეგი პრინციპებია თავმოყრილი:

- **მოდელზე დამყარებული მიდგომა:** მოდელი უპირატესობას აძლევს სიმეტრიულ მარცხენა და მარჯვენა საზღვრებს, როგორც ყველაზე მეტად ტიპურს სისხლძარღვების გამოსახულებებისთვის.
- **ჰიპოტეზის აგების და ვერიფიკაციის მიდგომა:** ცვლადი გარჩევისუნარიანობის მქონე გამოსახულებების გამოყენებით ჯერ ხდება დაბალი გარჩევისუნარიანობის გამოსახულებაზე სისხლძარღვის მიახლოებითი საზღვრების გამოყოფა (რომელიც უფრო სწრაფი პროცესია), ხოლო შემდეგ კი ასეთნაირად მიღებული საზღვრების სიზუსტის გაზრდისთვის გამოიყენება მაქსიმალური გარჩევისუნარიანობის გამოსახულება.
- **აპრიორული ცოდნა:** გრაფზე დამყარებული ძიებისას მიზნის ფუნქციის მოდიფიცირებისთვის გამოიყენება ცოდნა სისხლძარღვის საზღვრების მაფორმირებელი კიდეების მიმართულეების შესახებ.
- **მრავალსაფეხურიანი მიდგომა:** დამუშავების მთელი პროცესის განმავლობაში გამოიყენება სხვადასხვა სიძლიერის მოდელი.

ჰიბრიდული მიდგომის შემთხვევაში სისხლძარღვის მარცხენა და მარჯვენა საზღვრები ერთდროულად იძებნება. ამისთვის ხორციელდება 3D გრაფზე დამყარებული ძიება და საზღვრის სიმეტრიის მოდელი შესაბამისად ჩართულია ძიების პროცესში. მოდელის სიმეტრიულობას საზღვრის ძიების საბოლოო შედეგზე უფრო დიდი გავლენა აქვს, ვიდრე არასიმეტრიულობას. მოდელი ძიების პროცესს მიმართავს ცუდი ხარისხის (მწირი) მონაცემების შემადგენლობის მქონე არეებისაკენ, ხოლო იქ, სადაც მონაცემების ხარისხი მისაღებია, ძიება გამოსახულების მონაცემებზე დაყრდნობით ხორციელდება.

7.3.4. არაიერარქიული მართვა

როგორც აღვნიშნეთ, იერარქიული მართვისას ყოველთვის არსებობს დამუშავების ზედა და ქვედა დონეები. არაიერარქიული მართვა კი, პირიქით, შეიძლება განვიხილოთ როგორც კონკურენტი ექსპერტების თანამშრომლობა დამუშავების იმავე დონეებზე. იგი გამოიყენება ისეთი ამოცანების გადასაჭრელად, რომლებიც შეიძლება დაიშალოს რამდენიმე ქვეამოცანად, რომელთაგან თითოეული მოითხოვს გარკვეულ ექსპერტულ შეფასებას. ამასთან, ექსპერტიზების რიგითობა არ არის განსაზღვრული. არაიერარქიული მართვის ძირითადი იდეა იმაში მდგომარეობს, რომ ამოცანის საბოლოო გადაწყვეტისთვის ექსპერტისგან მიიღოს რაც შეიძლება მეტი დახმარება. შესაბამისად არჩეული ექსპერტი ცნობილი უნდა იყოს თავისი უნარით, მაგალითად, მაღალი სანდოობით, ეფექტურობით და ა. შ. რათა მოცემულ პირობებში ამოცანის გადასაწყვეტად უზრუნველყოს რაც შეიძლება მეტი ინფორმაციის მიწოდება. ექსპერტებიდან რომელიმე ექსპერტის შერჩევის კრიტერიუმი შეიძლება განსხვავებული იყოს. ერთი ვარიანტია, რომ ექსპერტებს მიეცეთ შე-

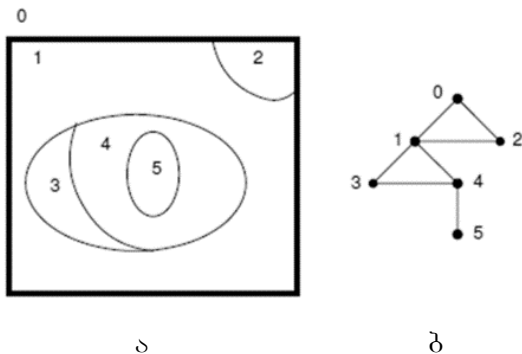
საძლებლობა თავად განსაზღვრონ საკუთარი შესაძლებლობები დასმული ამოცანის გადაწყვეტაში თავისი წვლილის შესატანად. მეორე ვარიანტია, რომ თითოეულ ექსპერტს წინასწარ მიეკუთვნოს ფიქსირებული შეფასება და შემდეგ მათგან აირჩეს ყველაზე მაღალი შეფასების მქონე ექსპერტი. ექსპერტის არჩევის კრიტერიუმს საფუძვლად შეიძლება დაედოს ექსპერტების მიერ გამოთვლილი ემპირიულად აღმოჩენილი შეფასებების გარკვეული კომბინაცია, და ამოცანის ამოხსნის ფაქტიურ მდგომარეობაზე დამოკიდებული შეფასებები. საკლასო დაფის პრინციპი სასარგებლოა კონკურენტი ექსპერტების არაიერარქიული მართვის მომსახურებისთვის. ვთქვათ, ექსპერტები იმყოფებიან საკლასო ოთახში. თუ ნებისმიერ მათგანს სურს თავისი ცოდნა ან დაკვირვებები სხვებს გაუზიაროს, დაფაზე კეთდება შესაბამისი ჩანაწერი, რომელსაც ყველა დაინახავს და გამოიყენებს. ამ შემთხვევაში დაფა წარმოადგენს კონკრეტულ მონაცემთა სტრუქტურას, რომლის წვდომა შეუძლია ნებისმიერ ექსპერტს და შეიძლება გამოყენებული იყოს ნებისმიერ ხედვის სისტემაში. აქ დაფა მოკლევადიანი მეხსიერების (short-term memory) ფუნქციას ასრულებს. იგი შეიცავს ინფორმაციას გამოსახულების ინტერპრეტაციის შესახებ. ხოლო გრძელვადიანი მეხსიერება (long-term memory) კი განიხილება როგორც უფრო ზოგად ინფორმაციის შემცველი ცოდნის ბაზა, რომელიც გამოსადეგია გადასაწყვეტი ამოცანების თითქმის ყველა წარმოდგენისთვის. მაგალითად, აერო-კოსმოსური გამოსახულებების ანალიზის ამოცანაში მთელი ინფორმაცია კონკრეტული გამოსახულების შესახებ ინახება დაფაზე (სეგმენტირებული არეების თვისებები და მათ შორის მიმართებები – კავშირები). დაფაზე არსებული მონაცემთა სტრუქტურა იყენებს არის შესახებ აპრიორულ გლობალურ ცოდნას, როგორცაა პიქსელების ფიზიკური განზომილება, მზის მდებარეობის მიმართულება და ა.

შ. საკლასო დაფის სისტემის უპირველესი მიზანი მდგომარეობს გამოსახულებაზე ინტერესის აღვილების, რაც შეიძლება მაღალი სიზუსტით იდენტიფიცირებაში, რათა მაღალი ალბათობით დადგინდეს ინტერესის არის არსებობა.

ამგვარად, ზემოთქმულის საფუძველზე შეიძლება ითქვას, რომ ნებისმიერ გამოსახულების გაგების სისტემაში უნდა თანაარსებობდეს ცოდნის წარმოდგენის ხერხების მრავალფეროვნება, ობიექტების აღწერის მეთოდები და დამუშავების მართვის სტრატეგიები.

7.4. სცენის მარკირება ჭდეებით

გამოსახულების გაგების ამოცანაში კონტექსტი მნიშვნელოვან როლს თამაშობს. შესაბამისად, დგება საკითხი სეგმენტაციის შემდეგად გამოყოფილი არეების **არსობრივი**, ანუ **სემანტიკური მარკირების** შესახებ. ვთქვათ, რომ გამოსახულების სეგმენტაციის შედეგად მიღებული არეები შეესაბამება ობიექტებს ან მათ ნაწილებს, რომელთა შორის ურთიერთმიმართებები აღწერილია არეების მომიჯნაობის გრაფის საშუალებით. ობიექტის თვისებები აღიწერება უნარული მიმართებებით, ხოლო ობიექტებს შორის ურთიერთმიმართებები ბინარული (ან n - არული) მიმართებებით. ასეთი გრაფის და მისი შესაბამისი სეგმენტირებული გამოსახულების მაგალითი მოცემულია 7.4 სურათზე, სადაც ა) წარმოდგენს გამოსახულებას სეგმენტაციის შედეგად გამოყოფილი და 1, 2, 3, 4, 5 ჭდეებით (რიცხვებით) მარკირებული არეებით, ხოლო ბ) კი შესაბამის არეების მომიჯნაობის გრაფს (§4.5., I ნაწილი). 0 ჭდით მარკირებულია გამოსახულებ-



სურ. 7.4

ის გარეთ არსებული პიქსელები. ეს ჭდე მიუთითებს იმ არეგებზე, რომლებიც მომიჯნაობის გრაფში გამოსახულების საზღვრებს ეხება. გამოსახულების ანალიზის შემდეგ სცენის მარკირების პროცესში გამოსახულების თითოეულ ობიექტს ენიჭება შესაბამისი არსობრივი ჭდე. ასეთი გზით მიღებული გამოსახულების ინტერპრეტაცია უნდა შეესაბამებოდეს სცენის შესახებ არსებულ ცოდნას. ობიექტის მარკირება თანხვედრაში უნდა იყოს სცენის შინაარსთან, და იმ შემთხვევაში, თუ ინტერპრეტაციის რაოდენობა ერთზე მეტია, მაშინ უპირატესობა უნდა მიენიჭოს ყველაზე მეტად ალბათურს. თანხვედრაში ყოფნა ნიშნავს, რომ არასწორ კონფიგურაციაში გამოსახულების არცერთი ორი ობიექტი არ გამოჩნდება, მაგალითად, ობიექტი, რომელიც მარკირებულია როგორც *სახლი* და მოთავსებულია იმ ობიექტის შუაში, რომელიც მარკირებულია როგორც *ტბა*, სცენების უმეტესობაში განიხილება როგორც არათანხვედრაში მყოფი. ამის საპირისპიროდ, ობიექტი *ტბის* შუაში, მარკირებული როგორც *სახლი* გარშემორტყმული ობიექტით, მარკირებული როგორც *გაზონი*, შეიძლება ჩაითვალოს სრულიად მისაღებად.

სცენის შესახებ არსებული ცოდნის საფუძველზე გამოსახულებაზე ობიექტების და არეების სწორი მარკირების მისაღწევად განიხილება ორი მიდგომა:

- **დისკრეტული მარკირება** მარკირების საბოლოო ეტაპზე უშვებს თითოეული ობიექტისთვის მხოლოდ ერთი ჭდის მიკუთვნების საშუალებას. აქ ძალისხმევა მიმართულია შეთანხმებული მარკირების მიღწევაში მთელ გამოსახულებაზე.
- **ალბათური მარკირება** უშვებს ობიექტებისთვის მრავალჯერადი ჭდის თანაარსებობის შესაძლებლობას. ჭდეები ალბათურად შეწონილია; თითოეულ ობიექტს ენიჭება ნდობის ჭდე.

ამ მიდგომებს შორის განსხვავება ინტერპრეტაციის მდგრადობაში (რობასტულობაში) მდგომარეობს. დისკრეტული მარკირება ყოველთვის: ან დაადგენს შეთანხმებულ მარკირებას, ან აღმოაჩენს შეთანხმებული მარკირების მინიჭების შეუძლებლობას. ალბათური მარკირება კი ყოველთვის ინტერპრეტაციის შედეგთან ერთად იძლევა ინტერპრეტაციის ნდობის ზომასაც.

იმ შემთხვევაში, თუ გამოსახულებაზე პირდაპირი ურთიერთქმედებები ყველა ობიექტს შორის განიხილება, მაშინ მარკირების ამოცანის გადაწყვეტა გამოთვლების დიდ ფასს მოითხოვს და შესაბამისი მიდგომები ემყარება ე. წ. **შეზღუდვების გაგრძელების** მექანიზმის გამოყენებას. ამ ტერმინის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ ლოკალური შეზღუდვების შედეგად მიიღება ლოკალური შეთანხმებულობები (ლოკალური ოპტიმუმები), ხოლო იტერაციული პროცესის გამოყენების შედეგად ლოკალურ შეთანხმებულობებს მიყვარათ გლობალური შეთანხმე-

ბულობებისკენ (გლობალური ოპტიმუმებისკენ) მთელ გამოსახულებაზე.

სცენის დისკრეტული მარკირების ამოცანის გადასაჭრელად სხვადასხვა მეთოდები გამოიყენება, მათ შორისაა დისკრეტული რელაქსაცია, ალბათური რელაქსაცია, ძიება ინტერპრეტაციის ხეების გამოყენებით, და ა. შ. განვიხილოთ დისკრეტული რელაქსაციის მეთოდი.

7.4.1. დისკრეტული რელაქსაცია

დისკრეტული მარკირების ერთ-ერთ ხერხს წარმოადგენს **დისკრეტული რელაქსაცია**. განვიხილოთ 7.5, ა სურათზე მოცემული სცენა, რომელიც შედგება 6 ობიექტისგან (ფონის ჩათვლით). ვთქვათ, ისინი მარკირებულია შემდეგი ჭდეებით:

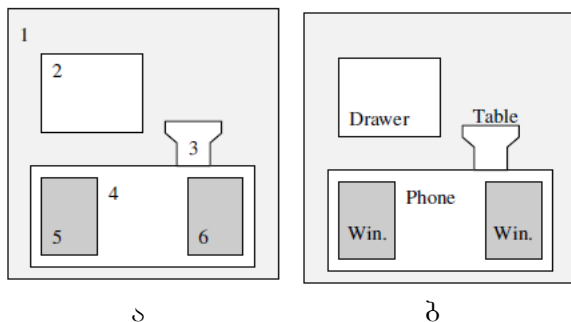
- *ფონი* (B–Background);
- *ფანჯარა* (W–Window);
- *მაგიდა* (T–Table);
- *მაგიდის უჯრა* (D–Drawer);
- *ტელეფონი* (P–Phone);

დავუშვათ, რომ ობიექტის ინტერპრეტაციების უნარული თვისებებია:

- *ფანჯარა მართკუთხაა*;
- *მაგიდა მართკუთხაა*;
- *მაგიდის უჯრა მართკუთხაა*.

ხოლო ბინარული შეზღუდვებია:

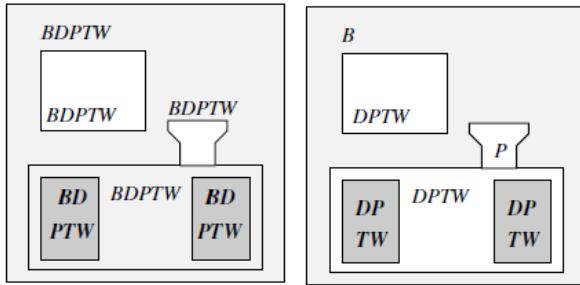
- ფანჯარა მაგიდის ზემოთ მდებარეობს;
- ტელეფონი მაგიდის ზემოთაა;
- მაგიდის უჯრა მაგიდის შიგნითაა;
- ფონი გამოსახულების საზღვრის მომიჯნავედაა.



სურ. 7.5

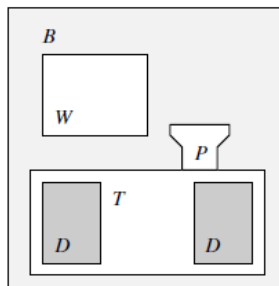
მოცემული შეზღუდვებით 7.5,ბ სურათზე წარმოდგენილი მარკირება შეუთანხმებელია. დისკრეტული რელაქსაციის დროს თითოეულ ობიექტს ენიჭება ყველა არსებული ჭდე და ამასთან ერთად იშლება ყველა ის ჭდე, რომელიც შეიძლება ობიექტს არ მიენიჭოს შეზღუდვების დარღვევის გარეშე. რელაქსაციის პროცესის ნაბიჯების მიმდევრობა წარმოდგენილია 7.6,ა სურათზე. როგორც ვხედავთ, დასაწყისში თითოეულ ობიექტს ენიჭება ყველა ჭდე, რის შემდეგაც ხდება მათი ტესტირება შეთანხმებულობაზე. ასეთი ტესტირების შედეგად ჭდე B უნდა წაიშალოს, როგორც 2, 3, 4, 5 და 6 ობიექტებთან შეუთანხმებელი. ასევე, იმის გამო, რომ ობიექტი 3 არ არის მართკუთხა, შესაბამისად ის არღვევს იმ უნარულ მიმართებას, რომელსაც ადგილი უნდა ჰქონდეს T, W, D ჭდეებისთვის, და ა. შ. (სურ.

7.6,ბ). ჭდეების ტესტირების შედეგად მიღებული საბოლოო შეთანხმებული მარკირება წარმოდგენილია 7.6,გ სურათზე.



ა

ბ



გ

სურ. 7.6

წარმოდგენილ მაგალითში შეზღუდვების გავრცელების მექანიზმის გამოყენების არსი შემდეგში მდგომარეობს. დაშორებულ ობიექტებს შორის მიმართებებმა შეიძლება გავლენა იქონიოს ჭდეების მინიჭებაზე სცენის ერთმანეთისგან დაშორებულ ადგილებში რამდენიმე ნაბიჯის შემდეგ, რაც სცენის ინტერპრეტაციის გლობალური შეთანხმებული მარკირების მიღწევის შესაძლებლობას იძლევა, მიუხედავად იმისა, რომ ჭდეების წაშლის ყველა ოპერაცია ლოკალურად მიმდინარეობს.

7.4.2. ძიება ინტერპრეტაციის ხეობით

დისკრეტული მარკირების კიდევ ერთ ხერხს წარმოადგენს ინტერპრეტაციის ხეობით ძიების კლასიკური მეთოდები. ამ მიდგომის თანახმად ინტერპრეტაციის ხეს იმდენი დონე აქვს, რამდენი ობიექტიცაა სცენაზე. ხის კვანძებს ენიჭებათ ყველა შესაძლო ჭდე და საბოლოო შეთანხმებული მარკირებისთვის გამოიყენება უკუთვალთვალზე დამყარებული სიღრმისეული ძებნა. პროცესი იწყება პირველი ობიექტის შესაბამისი კვანძისთვის (ხის ფესვისთვის) ჭდის მინიჭებით. ამის შემდეგ პროცესი გრძელდება შეთანხმებული ჭდის მინიჭებით მეორე ობიექტის კვანძისთვის, მესამე ობიექტის კვანძისთვის, და ა. შ. იმ შემთხვევაში, თუ კვანძისთვის შეთანხმებული ჭდის მინიჭება შეუძლებელია, მაშინ უკუთვალთვალის მექანიზმი ცვლის უფრო მაღალ დონეზე (ზემოთ) მყოფი უახლოესი კვანძის ჭდეს. ჭდეების ცვლილება ხორციელდება გეგმაზომიერად.

VIII თავი. ვირტუალური რეალობის სისტემები

8.1. ვირტუალური რეალობის არსი

დღეს ადამიანის მოღვაწეობის ბევრი სფეროში ფართოდ ხდება რეალური პროცესების სიმულაციის გამოიყენება ანუ არსებული რეალობის გარკვეული ილუზორული (ვირტუალური) სამყაროს სახით წარმოდგენა. ასეთი გარემოს თავისებურება იმაში მდგომარეობს, რომ ის უქმნის ადამიანს როგორც ამ გარემოში ყოფნის, ისე მასში არსებულ სხვადასხვა ობიექტთან ურთიერთმოქმედების შესაძლებლობის ილუზიას. მაგალითად, მედიცინაში, ქირურგს ვირტუალური რეალობის ტექნოლოგიის გამოყენებით შეუძლია ოპერაცია ჯერ ჩაატაროს რეალურ მონაცემებზე დაყრდნობით აგებულ თავის ტვინის 3D გამოსახულებაზე (მოდელზე), და შემდეგ პაციენტზე. ასევე მფრინავები, მანამ, სანამ რეალურ ფრენებს დაიწყებენ, ჯერ ფრენას სწავლობენ სპეციალური სიმულატორების საშუალებით, და ა. შ. ამასთან, პრაქტიკამ აჩვენა, რომ ასეთ გარემოში ყოფნის განცდა უფრო მეტად დამოკიდებულია იმაზე, თუ რამდენად რეალისტურადაა მოდელირებული ადამიანის ამ გარემოსთან ურთიერთქმედება.

ვირტუალური რეალობის სისტემები შედარებით ახალ მიმართულებას წარმოადგენს. მის შექმნას სტიმული მისცა ისეთი გამოყენებითი მიმართულებების განვითარებამ, როგორიცაა საავიაციო სიმულატორების, დისტანციურად მართული მოწყობილობებისა და კომპიუტერული თამაშების შემუშავებამ. იმის გამო, რომ ამ მიმართულებაში ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ეტაპს წარმოადგენს კომპიუტერული გამოსახულების ფორმირების

პროცესი, მას კომპიუტერული გრაფიკის ნაწილად მიიჩნევენ. კომპიუტერულ ხედვაში კი ის განიხილება შემდეგი მიზეზების გამო:

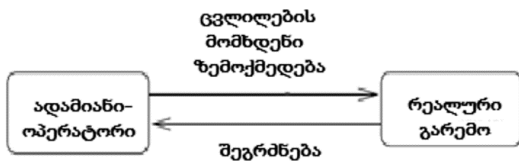
- ამ სისტემებში ხშირად საჭიროა რეალური გამოსახულებების და მათი დამუშავების მეთოდების გამოყენება;
- ადამიანი-მომხმარებლის ვირტუალურ გარემოში ჩასაფლობად საჭიროა ხარისხიანი სტერეოსკოპული გამოსახულებების გენერირება;
- მოდელების და რეალური სამყაროს 3D წერტილების შეთანადებისთვის გამოიყენება ისეთივე მათემატიკური მოდელები, რაც კომპიუტერულ ხედვაში;
- ადამიანის ან რეალური ობიექტების მდებარეობის განსაზღვრისთვის გამოიყენება კომპიუტერული ხედვის მეთოდები.

ვირტუალური რეალობის სისტემის (ვირტუალური გარემოს) მთავარი მახასიათებლებია:

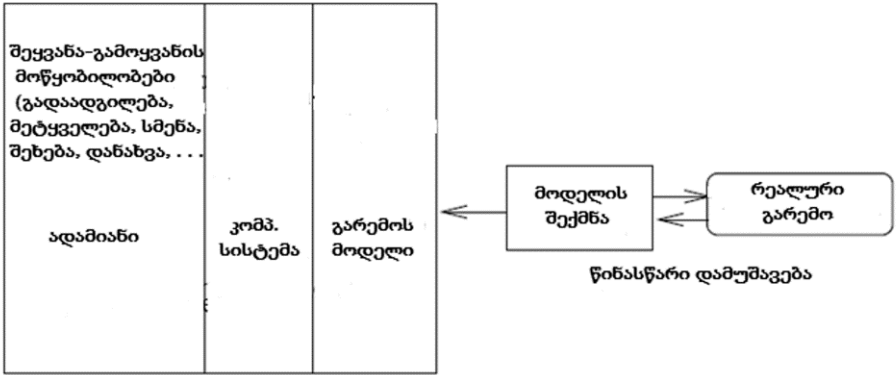
- ადამიანი-მომხმარებელი ოპერირებს რეალობის მოდელთან და ახდენს იმ ოპერაციების იმიტაციას, რომლებიც რეალურ ობიექტებთანაა შესაძლებელი;
- გამოიყენება მაღალი გარჩევისუნარიანობისა და სიჩქარის მქონე ინფორმაციის ასახვის მეთოდები, რათა მომხმარებელი ისე ჩაეფლოს მონაცემებში და ამოცანებში, რომ რეალური სამყაროს აღქმის მსგავსი შეგრძნებები გაუჩნდეს;
- მომხმარებელს უნდა შეეძლოს ურთიერთქმედება მოდელურ გარემოსთან და მასზე ზემოქმედება რეალურ დროში;

- 3D ვიზუალური უკუკავშირის არსებობას გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს. ვირტუალური რეალობის სიტემაში მომხმარებელს შეუძლია ცვალოს დაკვირვების წერტილი ან დაკვირვების მოხერხებულობისთვის მოაბრუნოს ან გადააადგილოს ობიექტები. გარდა ვიზუალურისა, ასევე უნდა იყოს ტაქტილური (რითაც ტვინი გრძნობს ვიბრაციას, წნევას, შეხებას, ტექსტურას და ა. შ.), მოძრაობის, ძალის ან სმენითი უკუკავშირები, მაგალითად, იმისთვის, რომ მომხმარებელმა შეიგრძნოს ობიექტთან შეხება, გაიგონოს ობიექტების შეჯახება და ა. შ.

ვირტუალური რეალობის რეალიზაციისთვის ყველაზე დარიბი აპარატურული კონფიგურაცია შეიცავს კომპიუტერს, მონიტორს, თაგვს ან ჯოისტიკს. ამ უკანასკნელების საშუალებით ხდება ადამიანი-მომხმარებლის მოქმედებების, როგორცაა მაგალითად, მისი გადატანითი მოძრაობა, მობრუნება, ობიექტთან შეხება ან მისი გადაადგილება, და ა. შ. შესახებ შეტყობინებების კომპიუტერზე გადაცემა. ხოლო უფრო ფართო კონფიგურაცია შეიცავს ვირტუალურ სათვალეებს, სტერეოსკოპული დისპლეებითა და ტელეფონებით აღჭურვილ ვირტუალურ ჩაუხუტებს, 3D მონაცემების შეყვანის მოწყობილობებს, ტაქტილური უკუკავშირისთვის საჭირო ციფრულ ხელთათმანებს, და ა. შ. 8.1,ა,ბ სურათზე შესაბამისად წარმოდგენილია ადამიანი-ოპერატორის რეალურ გარემოში და ვირტუალურ გარემოში მოქმედების სცენარები.



ა



ბ
სურ. 8.1

ვირტუალურ რეალობაში ჩაფლულობის ხარისხი განისაზღვრება გამოყენებული აპარატურული საშუალებებისა და პროგრამული უზრუნველყოფის შესაძლებლობებით. რაც შეეხება ვირტუალური გარემოს რეალიზაციას, ის თავისი არსით რთულ ამოცანას არ წარმოადგენს. მომხმარებლის მიერ თავისი, ჯოისტიკის ან სხვა პერიფერიული მოწყობილობით გაცემული ბრძანებების საშუალებით 3D ვირტუალურ სივრცეში მისი გადაადგილებისას, უბრალოდ ხდება სცენაზე დაკვირვების წერტილის კოორდინატებისა და შესაბამისად სცენის განსახილველი პროექციის ცვლილება, ხოლო ობიექტის გადაადგილებისას იცვლება მისი კოორდინატები.

ვირტუალური სცენის შესაქმნელად გამოიყენება ობიექტორიენტირებული მიდგომა. სცენა შედგება ობიექტებისგან, რომლებიც შეიძლება იყოს მარტივი ან რთული – ცალკეული ელემენტარული ობიექტებისგან შედგენილი. ამასთან, თითოეული მათგანი თავის მხრივ ხასიათდება გარკვეული თვისებების და ხდომილებების კრებულით, რომლებზეც მას რეაქცია აქვს.

ასეთ თვისებებს მიეკუთვნება მაგალითად, სივრცეში ობიექტის მდებარეობის კოორდინატები, ზომები, ფერი, მასა, და ა. შ. ხოლო ხდომილებებს, რომლებზეც ობიექტი რეაგირებს, კი, მაგალითად, რაიმე ძალის მოდება ობიექტზე, რომელიც სივრცეში მისი მდებარეობის ცვლილებას იწვევს, ობიექტის დაშლა სხვა ობიექტთან შეჯახების შედეგად, ობიექტის ფერის ცვლილება განათების წყაროს სპექტრის ცვლილების შედეგად, და ა. შ., მაგრამ ამავე დროს, ობიექტი თვითონ შეიძლება იყოს რაიმე ხდომილების წყარო.

იმისთვის, რომ ვირტუალურ სამყაროში დავინახოთ ობიექტები ან გადავაადგილოთ მასში – ვიმოგზაუროთ, საჭიროა დამატებითი ობიექტების გამოყენება, როგორცაა, მაგალითად, განათების წყაროები, დაკვირვების კამერები და ასევე ვირტუალური მოგზაური, რომელიც ვირტუალურ სივრცეში გადაადგილების შესაძლებლობას უზრუნველყოფს.

8.2. ვირტუალური რეალობის გამოყენების სფეროები

ქალაქების დაპროექტება

ვირტუალური რეალობის გამოყენების პირველი მცდელობა ურბანული (ქალაქური) ფორმების ვიზუალიზაციისთვის განხორციელდა ლოს-ანჯელესელი დამპროექტებლების მიერ კალიფორნიის უნივერსიტეტის (UCLA) სპეციალისტების დახმარებით ვირტუალურ გარემოში ჩაფლულობის გზით. მონიტორებისა და სპეციალური ეკრანების გარშემო მოძრაობით მნახველებს შესაძლებლობა ჰქონდათ შეეფასებინათ ქალაქის განვითარების პერსპექტივები ნატურალური ზომის 3D ვირტუალურ გარემოში.

არქიტექტურული ნაგებობების დათვალიერება

მომხმარებელს შეუძლია რომელიმე არქიტექტურული ნაგებობის მოდელის დათვალიერება ვირტუალურ გარემოში სეირნობისას. მაგალითად, რომელიმე ცნობილი შენობის დათვალიერება როგორც გარედან, ისე მისი შიგთავსის, კერძოდ, ოთახების ინტერიერის, ავეჯის, სურათების და სხვა საინტერესო ნივთების. იმ შემთხვევაში, თუ ადამიანს უნდა ახალი სახლის აშენება, მას შეუძლია ცვალოს შენობის როგორც გარეთა არქიტექტურული მოდელი, ასევე შეარჩიოს ოთახების განლაგების, მათი გაწყობის სხვადასხვა ვარიანტები, და ა. შ.

არქეოლოგია

ვირტუალური რომი იყო ერთ-ერთი პირველი პროექტი, რომელიც რენდერინგის შესაძლებლობების გამოყენებით შემუშავებული იქნა კალიფორნიის უნივერსიტეტში (UCLA). ფილმების წარმოებისთვის კინონდუსტრიაში შექმნილი ტექნოლოგიის გამოყენებით შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს მთელი რომის, ანტიკური ქალაქის კომპიუტერული მოდელი რეალურ დროში. რომის ასეთი 3D მოდელი ნაჩვენებია იყო დიდ პანორამულ ეკრანზე. ასევე რომის ვირტუალური პროექტის ნახვა შეიძლება „გუგლ დედამიწის“ (Google Earth) საშუალებით. ვირტუალური რომის პროექტმა ბიძგი მისცა სხვა ისტორიული ქალაქების ვირტუალური მოდელების, როგორცაა იერუსალიმი და პომპეი, შექმნას.

მედიცინა

მედიცინის განვითარებაში მნიშვნელოვანი როლი ითამაშა ვიზუალიზაციის ტექნოლოგიის გამოყენებამ, რასაც საფუძველი ჯერ კიდევ ადრეულ საუკუნეებში ჩაეყარა, როდესაც დაიწყო ადამიანის ანატომიის, ქსოვილების აგებულების, სხვადასხვა

ორგანოების, ჩონჩხის შესწავლა და მათი ვიზუალიზაცია – ილუსტრირება. ვიზუალიზაციის საშუალებების და გამოთვლების განვითარებამ ამ პროცესს კიდევ უფრო მეტად გაუხსნა გზა. დღეს უკვე შესაძლებელია ადამიანის მაგნიტურ-რეზონანსული გამოსახულების (MRI) მონაცემების გარდაქმნა პაციენტის ვირტუალურ მოდელში, რამაც დაავადებათა დიაგნოსტიკის შესაძლებლობები მნიშვნელოვნად გაზარდა. მაღალი დონის 3D გამოსახულებების ფორმირებამ შესაძლებელი გახადა „ვირტუალური ადამიანის“ მოდელის შექმნა, რომელიც მედიკოს-სტუდენტს საშუალებას აძლევს შეისწავლოს ანატომია. ამავე დროს ეს მოდელი ინტერაქტიულია. ქირურგიაში ვირტუალური მოდელების გამოსაყენებლად მთავარ პრობლემას წარმოადგენდა ტექტილური პერიფერიული მოწყობილობების შემუშავება, რაც ქირურგს უკუკავშირის არსებობის საშუალებას მისცემდა დელიკატური ოპერაციების შესრულების დროს. კერძოდ, ამ უკუკავშირის გარეშე ქირურგიული ინსტრუმენტების მიერ ნამდვილ ქსოვილსა და ორგანოზე გაკეთებული ჩაჭრა ვირტუალური სამყაროს მიერ რეალურად არ აღიქმება. ქირურგიის ბევრ სფეროში, როგორცაა მაგალითად, თავის ტვინის სიმსივნის ამოკვეთა, რთული ქირურგიული ოპერაციების ჩატარებისთვის მოხდა რეალური და ვირტუალური სამყაროების შერწყმა. 1980-იან წლებში შეიქმნა რობოტული ქირურგია, ანუ ქირურგის დამხმარე სპეციალური რობოტები. ამ პერიოდში ქირურგი ოპერაციის დროს იყენებდა ოპერაციამდელ გამოსახულებებს. მაგრამ 1990-იანებში მოხდა მაგნიტურ-რეზონანსულ გამოსახულებებთან თავსებადი რობოტების შემუშავება, რამაც საშუალება მისცა ქირურგს ოპერაციის დროს გამოიყენებინა გამოსახულებები, რომლებიც ავადმყოფის მდგომარეობას ასახავდნენ ოპერაციის მიმდინარეობის პროცესში. მართალია, დღეს რობოტული ქირურგია ძვირი ჯდება, მაგრამ ხელოვნური ინტელექტის,

მომხმარებლის ინტერფეისისა და კინესტეტიკური უკუკავშირის (ხელის მტკენიდან კანისა და ნეიროკუნთოვანი სენსორების მიერ გადაცემული შეგრძნებები, რის მეშვეობითაც ადამიანს შეუძლია დაახლოებით შეაფასოს საგნის წონა, ზომა, სხეულის მიმართ მდებარეობა, და ა. შ.) განვითარებით ნეიროქირურგები კიდევ უფრო მეტ მაღალი დონის დამხმარე რობოტებს მიიღებენ.

კომპიუტერული თამაშები

ვირტუალური რეალობის სისტემებმა საზოგადოებაზე ყველაზე დიდი გავლენა თამაშებისა და გამოთვლების შერწყმის შედეგად მოახდინა. ჯერ კიდევ კომპიუტერების განვითარების ადრეულ ეტაპზე 1962 წელს მასაჩუსეტის ტექნოლოგიურ ინსტიტუტში **სტივ რასელის** მიერ შექმნილმა პირველმა კოსმოსური ომის თამაშმა მომხმარებელს საშუალება მისცა ემართა ხომალდი ისეთ სამყაროში, სადაც მოწინააღმდეგის განადგურების სტრატეგიის შექმნა გრავიტაციული ძალების დახმარებით ხდებოდა. მოგვიანებით ეს თამაში მსოფლიოში გავრცელდა როგორც **არკადული კომპიუტერული თამაშები** (arcade games – კომპიუტერული თამაშები, რომლის სცენარი მოთამაშიდან მოითხოვს აქტიურ მოქმედებებს, რათა მის მიერ მართულმა პერსონაჟმა მრავალი დონე გაიაროს), რომელშიც თამაშებიდან ერთ-ერთ პირველში გამოყენებული იყო **ვექტორული გრაფიკა**. კომპიუტერული გრაფიკისა და კომპიუტერების გამოთვლითი სიმძლავრეების ზრდამ თამაშების კიდევ უფრო დიდი განვითარება გამოიწვია. დღეს არსებულ თამაშებს უკვე შეუძლია ცხოვრების ყველა ასპექტის, რეალურის თუ წარმოსახვითის იმიტირება. მაგალითად, მანქანის ტარების, ფრენისა და სხვადასხვა სიმულატორი, სამხედრო თამაში, და ა. შ.

სამხედრო საქმე

ფრენის სიმულატორების შექმნამ ბიძგი მისცა სატანკო სიმულატორების შემუშავებას. რეალური ტანკის მოდელის შიგნით მსხდომ ტანკისტს და მსროლელს საშუალება აქვთ მოახდინოს ტანკის მანევრირება და განახორციელოს სროლები. ამასთან, იმის გამო, რომ ტანკის კონსტრუქციიდან გამომდინარე ტანკისტს შეზღუდული ხედვის ველი აქვს, მისი იმიტაცია არ საჭიროებს მაღალი გარჩევისუნარიანობის გრაფიკულ მონიტორებს. სიმულატორების გამოყენების როლი კიდევ უფრო მნიშვნელოვნად გაიზარდა მას შემდეგ, რაც მათ ქსელში გაერთიანებას მოჰყვა. ამან სამხედრო მეთაურებს შესაძლებლობა მისცა ჩაეტარებინად არა მარტო ცალკეული სამხედრო სახეობების ქვედანაყოფების სწავლებები, არამედ სხვადასხვა სახეობის ერთობლივი სამხედრო სწავლება ერთი ცენტრალური მეთაურობის ხელმძღვანელობის მართვით.

8.3. ვირტუალური რეალობის პერიფერიული მოწყობილობები

ვირტუალური რეალობის ჩაფხუტი (Head mounted displays) წარმოადგენს მოწყობილობას, რომლის დანიშნულებაცაა ასახოს მომხმარებლის ვირტუალური გარემოცვა. ის შედგება:

- ორი, მარცხენა და მარჯვენა თვალისთვის დამზადებული თხევადკრისტალური მონიტორისაგან, რომელიც უზრუნველყოფს სტერეოგამოსახულებების მიღებას;
- ვირტუალური ორიენტაციის სისტემის – თრეკინგისაგან, რომელიც თვალყურს ადევნებს და კომპიუტერს გადასცემს მომხმარებლის თავის მდებარეობის წრფივ და კუთხურ კოორდინატებს;

- **სტერეოტელეფონებისაგან.**

თრეკინგის სისტემები (tracking systems—თვალთვალის სისტემები) საჭიროა ვირტუალური რეალობის სისტემის მიერ მომხმარებლის თვალისთვის სწორი გამოსახულების ფორმირებისთვის, გამომდინარე მისი თავის მდებარეობიდან. ასეთი სისტემები ვირტუალურ გრაფიკულ სცენასთან ინტერაქტული ურთიერთქმედების შესაძლებლობას იძლევა. ისინი საჭიროებისამებრ იყენებენ სხვადასხვა ტიპის გადამწოდს, მაგალითად, გიროსკოპულს, ლაზერულს, ოპტიკურს, და ა. შ.

ჯოისტიკი და ავტომობილის საჭე

კომპიუტერულ თამაშებში, სიმულატორებში მანიპულატორებად იყენებენ ჯოისტიკს და საჭეს. მათი საშუალებით სწავლობენ მანქანის მართვას. უფრო განვითარებულ მოდელებში კი გამოიყენება უკუკავშირის (force feedback) მქონე სიმულატორები, რაც ავტომობილის იმიტაციის საშუალებას იძლევა. ამის გამო, ასეთ სიმულატორებში ავტომობილის მდებარეობის სწრაფი ცვლილებაა შესაძლებელი. მსგავსი პერიფერიული მოწყობილობები გამოიყენება კომპიუტერულ თამაშებში თვითმფრინავებისა და შვეულმფრენების მართვის იმიტაციისთვის.

ვირტუალური რეალობის ხელთათმანები (vr gloves)

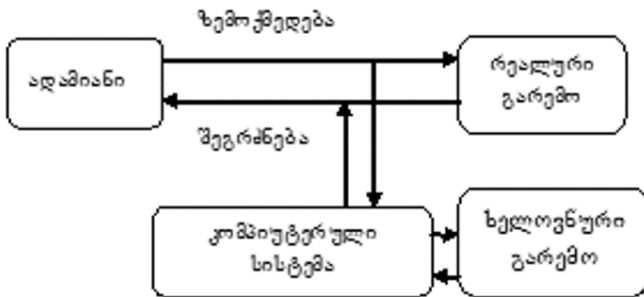
ასეთი ხელთათმანი მომხმარებელს საშუალებას აძლევს ხელის შეხებით მოსინჯოს ობიექტი ვირტუალურ გარემოში. მაგალითისთვის განვიხილოთ ერთ-ერთი ასეთი სათამაშო ხელთათმანი – Essential Reality P5 Glove. მას აქვს შემდეგი მახასიათებლები: USB ინტერფეისი, კვების წყაროსთან შეერთებულია USB კაბელით, 6 თავისუფლების ხარისხი, 5 დამოუკიდებელი გადამწოდი (თითო თითოეული თითისთვის), კოორდინატების

განსაზღვრის ცდომილება – 6,4 მმ, მობრუნების კუთხის განსაზღვრის ცდომილება – 4⁰. ხელთათმანის კორპუსი დამზადებულია პლასტიკატისაგან, რომელსაც აქვს 5 რეზინის თითი ზოლების სახით. თითოეული ზოლი პლასტიკისაგან დამზადებული რგოლებით დამაგრებულია თითზე. ზოლი წარმოადგენს ღუნვის გადამწოდს, რომელიც კომპიუტერს გადასცემს ინფორმაციას შესაბამისი თითის მდებარეობის შესახებ. აღნიშნული ხელთათმანის კორპუსზე დამაგრებულია 8 ინფრაწითელი შუქდიოდი, რომლებიც სიგნალს გადასცემენ საბაზო სადგურზე არსებულ მიმღებს. საბაზო სადგურზე მოთავსებულია ხელთათმანის კონტროლერი, ინფრაწითელი მიმღები და სივრცეში ხელთათმანის ელემენტების მდებარეობის გამომთვლელი პროცესორი. ასევე სადგურზე არის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური გადაადგილების მაკონტროლებელი 2-2 შუქდიოდი.

8.4. გაფართოებული (შერეული) რეალობის სისტემები

თუ რეალური გარემოს გამოსახულებას შევავსებთ ხელოვნური ობიექტებით, რომლებთანაც მომხმარებელს ინტერაქტიულად შეუძლია ურთიერთქმედება, მივიღებთ **გაფართოებულ (შერეულ) რეალობას (augmented reality, AR)**. ისევე როგორც ვირტუალურ რეალობაში, აქაც საჭიროა ხილული სცენის მიმართ დამკვირვებელის მდებარეობის ცოდნა. გაფართოებული რეალობის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ მისი საშუალებით პროგრამულად შეიძლება ერთმანეთს შევუთავსოთ კომპიუტერის მიერ შექმნილი ვირტუალური სამყარო და ჩვენს ირგვლივ არსებული რეალური ობიექტები. ფაქტობრივად ეს ნიშნავს რეალური სამყაროს გაფართოებას ვირტუალური სამყაროს გამოყენებით. გაფართოებულ რეალობაში გადამწყვეტია, რომ ეს შეთავსება

ზუსტი იყოს. 8.2 სურათზე წარმოდგენილია ადამიანი-ოპერატორის მოქმედება გაფართოებული რეალობის გარემოში. გაფართოებული რეალობა უკვე საკმაო ხანია გამოიყენება მედიცინაში, სამხედრო საქმეში, რეკლამების ინდუსტრიაში, თამაშებში, და ა. შ.



სურ. 8.2

ამგვარად, გაფართოებული რეალობა წარმოადგენს სისტემას, რომელიც:

- ერთმანეთს უთავსებს ვირტუალურსა და რეალურს;
- მოქმედებს რეალურ დროში;
- უზრუნველყოფს ობიექტების 3D წარმოდგენას.

გაფართოებული რეალობის სისტემის შემუშავება მოითხოვს შემდეგი კომპონენტებისა და შესაძლებლობების არსებობას:

- რეალური სცენების ვირტუალურით გაფართოებისათვის ობიექტების 3D მოდელებს;

- კალიბრაციის საფუძველზე შესაბამისობის დადგენა მომხმარებლის რეალურ სივრცესა და 3D მოდელების მონაცემებს შორის;
- მომხმარებლის თვალთვალი რეალურ სივრცეში მისი დაკვირვების წერტილის მდებარეობის განსაზღვრისათვის;
- რეალური გამოსახულებებისა და მოდელების საფუძველზე გენერირებული კომპიუტერული გრაფიკის რეალურ დროში შეთავსების ვიზუალიზაცია;
- გაფართოებული სისტემის ეფექტურობისთვის თავის მოძრაობაზე გამოძახილის მცირე დრო და გამოსახულებების და კომპიუტერული გრაფიკის შეთავსების სიზუსტე.

გაფართოებული რეალობის სისტემების გამოყენების მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ ქირურგიული ოპერაცია. ქირურგი, რომელიც ოპერაციას ატარებს რეალურ ავადმყოფზე, მასთან ერთად ხედავს მასზე დადებულ კომპიუტერული ტომოგრაფიის სურათს, რომელზეც ასევე აღნიშნულია ქირურგიული ჩაჭრის დაგეგმილი მიმართულება.

8.5. დისტანციური მართვა

ვირტუალური რეალობის სისტემებზე მნიშვნელოვანი გავლენა მოახდინა დისტანციურმა მართვამ ანუ ტელემაართვამ (teleoperation). კერძოდ, დისტანციური მართვის სისტემებიდან აღებული იქნა ის გადამწოდები, რომლებიც აღიქვამენ გარემოს აქტიურ ზემოქმედებას. ასეთი გადამწოდები საჭიროა ვირტუალურ გარემოში ადამიანის გარემოსთან ურთიერთქმედებისთვის. ტელემაართვის საშუალებით ადამიან-ოპერატორს შეუძლია ოპერაციები განახორციელოს მისგან დაშორებულ გარემოში. განვიხილოთ

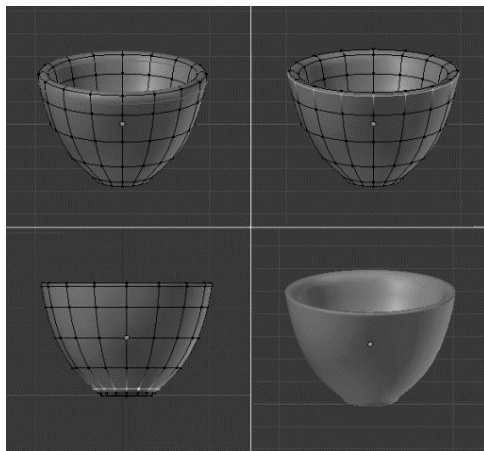
დისტანციური მართვის გამოყენებით რობოტოტექნიკური სისტემის მართვის მაგალითები:

- დედამიწაზე მყოფი ოპერატორი კომპიუტერის საშუალებით ვასცემს მარსზე რობოტის მართვის ბრძანებებს, რომელთა საშუალებით რობოტი უნდა გადაადგილდეს მარსის ზედაპირზე გარკვეული მანძილით და აიღოს ნიადაგის ნიმუში. ოპერატორთან უკუკავშირი ხორციელდება რობოტიდან დაშორებით მყოფ დასაჯდომ მოდულზე მოთავსებული კამერების საშუალებით;
- ოპერაციის დისტანციურად ჩატარებისთვის ქირურგი აკეთებს ჭრილობაზე ნაკერის დადების იმიტაციას, რისთვისაც იყენებს ბურთის მსგავს ხელოვნურ ობიექტს. გადამწოდების საშუალებით ხდება ქირურგის მოძრაობების პარამეტრების ჩაწერა, რომლებიც გადაეცემა დაშორებით მყოფ რობოტს, რომელიც უკვე ნამდვილ პაციენტს ადებს ჭრილობაზე ნაკერს. რეალობაში განხორციელებული ასეთი მიდგომა შესაძლებლობას მისცემს ქირურგს ოპერაციები განახორციელოს გეოგრაფიულად ძნელად მისაღწეა ადგილებში.

8.6. მარტივი 3D მოდელებიდან 2D გამოსახულებების ფორმირება

ვირტუალური (ხელოვნური) სცენების ფორმირება მოითხოვს გარკვეულ ინსტრუმენტებს 3D ობიექტების მოდელების აგებისთვის და მათგან 2D გამოსახულებების ფორმირებას. ამასთან, გამოყენებული ობიექტების მოდელები შეიძლება წარმოდგენილი იყოს როგორც რთული პოლიგონალური ბადის სახით, ხო-

ლო უფრო მარტივი – კარკასული მოდელებით, რომელთა აგება შესაძლებელია ავტომატიზებული პროექტირების სისტემის (CAD – computer-aided design), მაგალითად, AutoCAD-ის საშუალებით, ან რეალურ მონაცემებზე (რომლებიც მიღებულია მანძილსაზომებიდან, სტერეოხედვის სისტემებიდან) დაყრდნობით. მიღებული ობიექტების ფორმები შეიძლება იყოს პოლიგონალური, ბიკუბიკური, კონსტრუქციული მყარი გეომეტრიის (გამოიყენება მყარი სხეულების მოდელირებისთვის), სივრცის დანაწევრების (ოქტანტების ხის) სახით წარმოდგენილი. ობიექტის 3D მოდელის აგების შემდეგ საჭიროა გამოსახულებების ფორმირება, რომლებიც დაკვირვების ნებისმიერ წერტილს და სხვადასხვა განათებას შეესაბამება. 8.3 სურათზე წარმოდგენილია დაკვირვების სხვადასხვა წერტილის შესაბამისი ქოთნის კარკასული 3D მოდელები და მათგან რენდერინგის შედეგად მიღებული გამოსახულება.



სურ. 8.3

განსაზღვრება 8.1. *ობიექტების 3D მოდელების შესაბამისი 2D გამოსახულებების ფორმირების პროცესს რენდერინგი (rendering) ეწოდება.*

კომპიუტერულ პროგრამას კი, რომლითაც რენდერინგი ხორციელდება რენდერი (render) ეწოდება. რენდერინგის პროცესი ორ ეტაპს მოიცავს:

- დაკვირვების არჩეული წერტილიდან მოდელის ხილული ზედაპირების განსაზღვრა;
- ფორმირებადი გამოსახულების პიქსელებში მნიშვნელობების გამოთვლა.

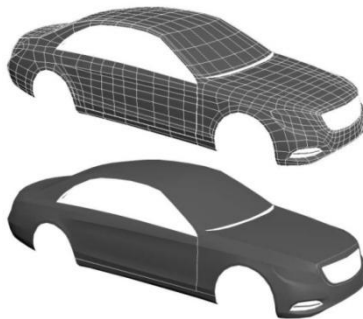
იქიდან გამომდინარე, თუ რამდენად არის შესაძლებელი რენდერინგისთვის პარალელური გამოთვლების შესრულება, არსებობს 2 სახის რენდერინგი:

- მრავალნაკადიანი რენდერინგი – გამოთვლები მიმდინარეობს პარალელურად რამდენიმე ნაკადათ, პროცესორის რამდენიმე ბირთვში;
- ერთნაკადიანი რენდერინგი – გამოთვლები მიმდინარეობს სინქრონულად ერთ ნაკადად.

რენდერინგის პროცესის მიმდინარეობისას დამუშავების პირველი ნაბიჯი კონცეპტუალურად (არსობრივად) იწყება დაკვირვების წერტილიდან გამომავალი და ობიექტისკენ სასურველი მიმართულებით მიმართული სხივების აგებით. ობიექტის ზედაპირისა და სხივის გადაკვეთის პირველი წერტილი იქნება ზედაპირის ის წერტილი, რომელიც ამ სხივის გასწვრივ ჩანს.

ამ მიდგომას **სხივის თვალთვალი (მიდევნება)** ან **ტრასირება (ray tracing)** ეწოდება. ამ მეთოდით ხდება ობიექტების ხილული ზედაპირების განსაზღვრა. რენდერინგის ამ ნაბიჯის სწრაფი რეალიზაციისთვის კომპიუტერებში არსებობს აპარატურული საშუალება, რომელსაც **z-ბუფერს** უწოდებენ.

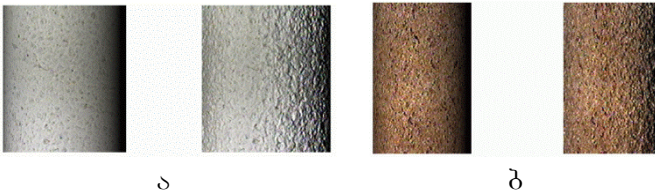
დამუშავების მეორე ნაბიჯი შეიძლება იყოს მარტივი ან რთული. მარტივ შემთხვევაში იგულისხმება, რომ ობიექტი შედგებილია განსაზღვრულ ფერში და დამზადებულია არეკვლის ცნობილი თვისებების მქონე მასალისაგან. სცენაზე სინათლე წერტილოვანი წყაროდან ვრცელდება განსაზღვრული მიმართულებით. ასევე, განათებულია ობიექტის გარემომცველი გარემოც. ობიექტის ზედაპირის პატარა არის შესაბამის პიქსელში სინათლის ფერის გამოთვლისთვის კი იყენებენ სხვადასხვა მათემატიკურ მოდელს. ხოლო რენდერინგის შედეგად რეალისტურთან უფრო ახლოს მყოფი გამოსახულებების მისაღებად საჭიროა დამატებითი ფაქტორების, როგორცაა განათების რამდენიმე წყაროს არსებობა, ზედაპირული განათების წყაროები (წერტილოვანი წყარო, რომელიც ყველა მიმართულებით ანათებს), ჩრდილები, და ა. შ. გამოყენება. 8.4 სურათზე მოცემულია კარკასული სახით წარმოდგენილი ავტომანქანის მოდელის მარტივი რენდერინგის მაგალითი.

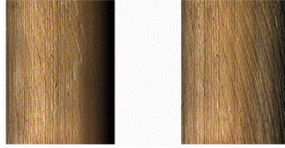


სურ. 8.4
300

8.7. რეალური და ხელოვნური გამოსახულებების შერწყმა

რენდერინგის გამოყენებით 3D მოდელების გამოსახულებების მიღებისას ამოცანას წარმოადგენს ის, რომ ეს უკანასკნელები რაც შეიძლება რეალისტურად და არა ხელოვნურად გამოიყურებოდეს. ამისთვის საჭიროა, რომ ობიექტების მოდელები გეომეტრიულად უფრო დეტალურად იყოს წარმოდგენილი. ეს კი თავის მხრივ მოითხოვს გამოთვლების დიდ ფასს. მაგრამ აღმოჩნდა, რომ რენდერინგის სინქარის გასაზრდელად და უფრო რეალისტური გამოსახულების მისაღებად არსებობს სხვა გზაც. კერძოდ, ობიექტების დეტალური მოდელების ნაცვლად შეიძლება გამოყენებული იყოს რთული ტექსტურების არსებული გამოსახულებები. ზედაპირის რენდერინგის პროცესში მისი ერთ ფერში შედგების ნაცვლად პიქსელების ფერები შეიძლება აღებული იყოს ტექსტურის გამოსახულებიდან. ასეთი მიდგომა ცნობილია როგორც **ტექსტურული ასახვის მეთოდი** (texture mapping). ამ მიდგომის გამოყენებისას ობიექტის გლუვ ზედაპირზე ხდება რაიმე ტექსტურის დადება, რის შედეგადაც ფორმირდება მოცემული ზედაპირის ტექსტურირებული გამოსახულება. 8.5 სურათზე წარმოდგენილია გლუვ ზედაპირზე სხვადასხვა ტექსტურული გამოსახულებების ნიმუშების: ა) თაბაშირის, ბ) ბეტონის და გ) ხის დადების შედეგად მიღებული გამოსახულებები.





ბ
სურ. 8.5

მეორე მიდგომა, რომელიც რენდერინგის შედეგად მიღებული ხელოვნური გამოსახულების რეალისტურად წარმოდგენისთვის გამოიყენება, არის **გამოსახულებაზე დამყარებული რენდერინგის (image-based rendering) მეთოდი**. ამ მიდგომის მიზანია რენდერინგის შედეგად მიღებული ობიექტის ახალი ხელოვნური გამოსახულება რაც შეიძლება უფრო ახლოს იყოს რეალისტურ გამოსახულებასთან და ამასთან, ეს პროცესი იყოს სწრაფი. აღნიშნული მეთოდის მიხედვით, ხელოვნური გამოსახულების მისაღებად გამოიყენება დაკვირვების სხვადასხვა წერტილიდან გადაღებული რეალური ობიექტის დიდი რაოდენობის გამოსახულებების კრებული და არ არის აუცილებელი ობიექტის გეომეტრიული მოდელის ცოდნა. ობიექტის ახალი გამოსახულების მიღება ასევე შეიძლება დაკვირვების ახლომდებარე წერტილებიდან მიღებულ გამოსახულებებს შორის ინტერპოლაციის მეთოდის გამოყენებით. გამოსახულებაზე დამყარებული რენდერინგის კიდევ ერთი მიდგომის გამოყენების მაგალითი, დამყარებული სცენის ორი რეალური ეტალონური (საწყისი) გამოსახულების წერტილებს შორის შესაბამისობის დადგენაზე მოცემულია 8.6, ა სურათზე, ხოლო დანარჩენები კი ერთმანეთთან ახლომდებარე დაკვირვების სხვადასხვა წერტილის შესაბამისი სცენის გამოსახულებების სინთეზირების შედეგადაა მიღებული (სურ. 8.6, ბ).



ა



ბ

სურ. 8.6

ლიტერატურა

1. Amit Y. 2D Object Detection and Recognition: Models, Algorithms, and Networks. The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 325 p., 2002.
2. Ballard D. H., Brown Ch. M., Computer Vision, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 538 p., 1982.
3. Cyganek B., Siebert J. Paul. An introduction to 3D computer vision techniques and algorithms. John Wiley and Sons, Ltd., Publication, 502 p., 2009.
4. Davies E. Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Fourth Edition, Elsevier Inc., 912 p., 2012.
5. Enqvist O. Correspondence Problems in Geometric Vision. Lund University Press, 108p., 2009.
6. Forsyth D., Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. Second Edition. Pearson Education, Inc., 793 p., 2012.
7. Goshtasby A. Ardeshir. 2-D and 3-D image registration for medical, remote sensing, and industrial applications. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 280 p., 2005.
8. Handbook of 3D Machine Vision Optical Metrology and Imaging. Edited by Song Zhang, Taylor & Francis Group, LLC, 403 p., 2013.
9. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Second Edition, Cambridge University Press, 673 p., 2003.
10. Jain R., Kasturi R., Schunck B. Machine Vision. McGraw-Hill, Inc., 549 p., 1995.
11. Medical Image Processing: Techniques and Applications. Geoff Dougherty, Editor. Springer, 397 p., 2011.

12. McInerney T., Terzopoulos D. Deformable Models in Medical Image Analysis: A Survey. *Medical Image Analysis*, 1(2), p. 91-108, 1996.
13. Prince S. *Computer Vision: Models, Learning and Inference*. Cambridge University Press, 667 p., 2012.
14. Trucco E., Verri A. *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Prentice Hall, Inc. New Jersey, 343 p., 1998.
15. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Fourth Edition, Cengage learning, 930 p., 2016.
16. Szeliski R. *Computer Vision. Algorithms and Applications*. Springer-Verlag London Limited, 833 p., 2011.
17. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. *Цифровая обработка изображений в информационных системах. Учебное пособие*. Изд-во НГТУ, Новосибирск, 168 с., 2000.
18. Дуда Р., Харт П., *Распознавание образов и анализ сцен*, М., Мир, 511 с., 1976.
19. Красильников Н. Н. *Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учеб. пособие*. - СПб., БХВ-Петербург, 608 с., 2011.
20. Марр Д., *Зрение*. М., Радио и связь, 400 с., 1987.
21. Павлидис Т., *Алгоритмы машинной графики и обработки изображений*, М., Радио и связь, 394 с., 1986.
22. Постнов К.В. *Компьютерная графика*. – М., 247 с., 2009.
23. Прэтт У.К., *Цифровая обработка изображений*, -М., Мир, т.1, 2, 790 с., 1982.
24. Хорн Б.К.Л., *Зрение роботов*, -М., Мир, 488 с., 1989.
25. Шапиро Л., Стокман Дж., *Компьютерное зрение*, Москва, изд-во БИНОМ, 752 с., 2006.
26. Яне Б. *Цифровая обработка изображений*, ТЕХНОСФЕРА, М., 581 с., 2007.

სარჩევი

I თავი. მონაცემთა შეთავსება 2D სივრცეში	3
1.1. შესავალი	3
1.2. გეომეტრიული გარდაქმნების არსი 2D სივრცეში	4
1.3. წერტილის წარმოდგენა 2D სივრცეში	8
1.4. ძირითადი აფინური გარდაქმნები სიბრტყეზე	10
1.5. მობრუნების, მასშტაბირებისა და გადატანის აფინური გარდაქმნების ერთობლივი გამოყენება	20
1.5.1. აფინური გარდაქმნის მაგალითები	24
1.6. აფინური გარდაქმნის ზოგადი სახე	32
1.7. აფინურ გარდაქმნაზე დამყარებული 2D ობიექტების ამოცნობის მეთოდები	35
1.8. 2D ობიექტების ამოცნობა რელაციური მოდელების გამოყენებით	50
II თავი. 3D სცენების აღქმა 2D გამოსახულებებზე დაყრდნობით	57
2.1. შესავალი	57
2.2. შინაგანი გამოსახულებები	59
2.3. ბრტყელწახნაგიანი ობიექტების კონტურული გამოსახულებების მარკირება	63
2.4. 2D გამოსახულებებზე ასახული 3D სცენის ნიშან-თვისებები	66
2.5. ობიექტების სივრცითი მახასიათებელი თვისებების აღქმის ხერხები	73
2.5.1. ობიექტების ფორმის განსაზღვრა ერთ ნიშან-თვისებაზე დაყრდნობით	75

III თავი. 3D გამოსახულებების აღქმა	89
3.1. 3D სცენის 2D გამოსახულებების ფორმირების მათემატიკური მოდელები	89
3.1.1. გამოსახულების ფორმირების პროექციული სისტემის მოდელი	91
3.1.2. გამოსახულების ფორმირების სტერეოსკოპული სისტემის მოდელი	97
3.1.3. სიღრმის განსაზღვრის სტერეოსკოპული სისტემის მოდელი	99
3.1.4. სტერეოგამოსახულებები	105
3.1.5. შესაბამისობის დადგენა სტერეოგამოსახულებებს შორის	106
3.2. მანიპულატორები და სიღრმის გამოსახულებები	114
3.3. გამოსახულებების მოცულობითი ფორმირების პრინციპები	116

IV თავი. ობიექტების მდებარეობის (პოზის) განსაზღვრა 3D სივრცეში **118**

4.1. წერტილის 3D კოორდინატების გამოთვლა ზოგადი სახის სტერეოსკოპულ სისტემაში	118
4.2. აფინური გარდაქმნები 3D სივრცეში	120
4.3. ობიექტების შეთანასწორება აფინური გარდაქმნების გამოყენებით	129
4.4. კამერის მათემატიკური მოდელი	131
4.5. პერსპექტიული პროექციის მატრიცა	133
4.6. მართკუთხა და სუსტი პერსპექტიული პროექციები	139
4.7. წერტილის კოორდინატების გამოთვლა რამდენიმე კამერის შემთხვევაში	142
4.8. კამერის კალიბრაცია 3D სივრცის აღქმისას	145

4.8.1.	კალიბრაციის პარამეტრების გამოთვლა	149
4.9.	3D სივრცეში დაკვირვებული ობიექტის მდებარეობის განსაზღვრის მარტივი მეთოდი	153
4.10.	კამერის მახასიათებელი პარამეტრების ტიპები	157
4.11.	3D ობიექტების რეკონსტრუქცია	160
4.11.1.	სივრცითი ამოკვეთის ალგორითმი	167
4.12.	ობიექტის ფორმის გამოთვლა განათებულობის მიხედვით	171
4.12.1.	სტერეოფოტომეტრული მეთოდი	173

V თავი. 3D ობიექტების წარმოდგენის მოდელები

		174
5.1.	შესავალი	174
5.2.	გეომეტრიული მოდელები	176
5.2.1.	3D ბადის ტიპის მოდელები	177
5.2.2.	„ზედაპირი – წიბო – წვერო“ ტიპის მოდელები	179
5.2.3.	განზოგადებულ ცილინდრზე დამყარებული მოდელები	182
5.2.4.	ოქტანტების ხეებზე დამყარებული მოდელები	187
5.2.5.	სუპერკვადრებზე დამყარებული მოდელები	192
5.3.	ხილვადობის კლასებზე დამყარებული მოდელები	195
5.4.	ობიექტების ფიზიკაზე დამყარებული და დეფორმირებადი მოდელები	198
5.4.1.	აქტიური კონტურის მოდელები	200
5.4.1.1.	აქტიური კონტურის მოდელის გამოყენება სამედიცინო გამოსახულებების ანალიზის ამოცანებში	208

**VI თავი. 3D სცენის გამოსახულებებზე
ობიექტების ამოცნობა მათი მოდელების
საფუძველზე** 214

- 6.1. ობიექტების ამოცნობის ზოგადი სტრუქტურა 214
- 6.2. 3D ობიექტების ამოცნობა უცნობი დაკვირვების
წერტილის შემთხვევაში 218
- 6.3. 3D ობიექტების ამოცნობის მეთოდების შერჩევის
კრიტერიუმები 221
- 6.4. ამოცნობა გეომეტრიული მოდელების სივრცითი
შეთანასწორების გამოყენებით 225
- 6.5. ამოცნობა საწყისი მონაცემებისა და რელაციური
მოდელების შედარებით 236
- 6.6. ამოცნობა ფუნქციურ მოდელებზე დაყრდნობით 249
- 6.7. ამოცნობა გარეგნულ სახეზე (გარეგნობაზე)
დაყრდნობით 257

VII თავი. სცენის აღწერის მეთოდები 260

- 7.1. სცენათა ანალიზის მიზანი 260
- 7.2. ცოდნის გამოყენების არსი კომპიუტერულ ხედვაში 263
- 7.3. გამოსახულების გაგების მართვის სტრატეგიები 266
 - 7.3.1. პარალელური და მიმდევრობითი დამუშავების
პროცედურების მართვა 267
 - 7.3.2. იერარქიული მართვა 268
 - 7.3.3. კომბინირებული მართვა 273
 - 7.3.4. არაიერარქიული მართვა 275
- 7.4. სცენის მარკირება ჭდეებით 277
 - 7.4.1. დისკრეტული რელაქსაცია 280
 - 7.4.2. ძიება ინტერპრეტაციის ხეებით 283

VIII თავი. ვირტუალური რეალობის სისტემები	284
8.1. ვირტუალური რეალობის არსი	284
8.2. ვირტუალური რეალობის გამოყენების სფეროები	288
8.3. ვირტუალური რეალობის პერიფერიული მოწყობილობები	292
8.4. გაფართოებული (შერეული) რეალობის სისტემები	294
8.5. დისტანციური მართვა	296
8.6. მარტივი 3D მოდელებიდან 2D გამოსახულებების ფორმირება	297
8.7. რეალური და ხელოვნური გამოსახულებების შერწყმა	301
ლიტერატურა	304

