

# სამგანზომილებიანი ობიექტების რეკონსტრუქცია ავტომატური სისტემების გამოყენებით

ივანე მაკასარაშვილი, დოქტორანტი.  
მიხეილ დარჯანია, დოქტორანტი

რეზიუმე

\* \* \* \* \*

სამგანზომილებიანი ობიექტების სკანირებისას ხშირია შემთხვევა როცა მონაცემები არასრულია და საჭიროებს შევსებას. ამ საკითხებზე მუშაობს ბევრი მეცნიერი, მათ მიერ დამუშავებულია სხვადასხვა ალგორითმები, მაგალითად, ნახვრეტების შევსების ალგორითმი, რომელიც მრავალ პრიმიტიულ ფიგურის შევსებას ეფუძნება. რეკონსტრუქციის პრიმიტიულ ფიგურებზე დაფუძნებული ალგორითმი, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია პრიმიტიული ფიგურისთვის ზღვრული წერტილები გამოყოფა. საწყისი საზღვარი წერტილების მეზობლობების ანალიზის შედეგად გამოიყოფა; ფიგურები (სიბრტყეები, ცილინდრები, სფეროები, კონუსები) წერტილების სიმრავლეში RANSAC (Random sample consensus -შემთხვევითი შერჩევის კონსენსუსი) მეთოდით არის აღმოჩენილი.

წარმოდგენილ სტატიაში განხილულია სამგანზომილებიანი ობიექტების სკანირებისას არასრული მონაცემების შევსების ალგორითმი. ასევე, შემოსაზღვრული ზედაპირის რეკონსტრუქციის ალგორითმი, რომელიც ერგებაპრიმიტიული ფიგურების აღმოჩენილ სიმრავლეს.

## Summary

During the tridimensional scan of the object, often it happens that information is not full and needs to be elaborated. A lot of scientists work on this problem; different algorithms had been developed by them. For example the algorithm of filling the spaces, which depends on filling numerous primitive figures. Another algorithm, which depends on reconstruction of primitive figures, gives us an opportunity to distinguish the limit points. Primary limit points are picked out depending to the analysis of their neighboring positions; Figures (Planes, cylinders, spheres, cones) are discovered by method called RANSAC (Random sample consensus) in multiplicity of points.

In represented article is discussed the algorithm of elaborating dumps after scanning of tridimensional objects. Also, the algorithms of reconstruction of bounded plane, which is suitable to multiplicity of discovered primitive figures.

სამგანზომილებიანი ობიექტების სკანირებისას ხშირია შემთხვევა როცა მონაცემები არასრულია და საჭიროებს შევსებას. მეცნიერი შცნაბელი [1] აღწერს ნახვრეტების შევსების ალგორითმს, რომელიც მრავალ პრიმიტიულ ფიგურას ეფუძნება. პრიმიტიული ფიგურები (სიბრტყეები, ცილინდრები, სფეროები, კონუსები) წერტილების სიმრავლეში RANSAC (Random sample consensus -შემთხვევითი შერჩევის კონსენსუსი) მეთოდით არის აღმოჩენილი [2]. ჩვენი მიზანია შემოსაზღვრული ზედაპირის რეკონსტრუქცია, რომელიც ერგება პრიმიტიული ფიგურების აღმოჩენილ სიმრავლეს. ზედაპირის დადგენა ხდება ვოლუმეტრული, გრაფიკული კვთებისა და ღირებულების ფუნქციის მინიმიზაციის მეშვეობით. აღნიშნულ ფუნქციას მინიმუმამდე დაყავს ზედაპირის ფართობი და გამოყოფს არეალებს, რომლებიც არ ემთხვევა პრიმიტიულ ფიგურებს. ამგვარი ოპტიმიზაციის მეშვეობით წერტილების სიმრავლის ნახვრეტები მიმდებარე პრიმიტიული ფიგურების განვრცობის შედეგად იცვება.

რეკონსტრუქციის პრიმიტიულ ფიგურებზე დაფუძნებული ალგორითმის საშუალებით შესაძლებელია თითოეული აღმოჩენილი პრიმიტიული ფიგურისთვის ზღვრული წერტილები გამოყოფა. საწყისი საზღვარი წერტილების მეზობლობების ანალიზის შედეგად გამოიყოფა; აქ საუბარია პრიმიტიული ფიგურისთვის მიკუთვნებულ წერტილებზე. ამის შემდეგ ხდება ზღვრული წერტილების ოპტიმიზაცია, რათა ისინი მიუახლოვდნენ შესაბამის ფიგურას და სხვა ახლომდებარე ფიგურებს. ამგვარი ოპტიმიზაცია გვაძლევს მიმდებარე ფიგურების კვთების მახლობლად განლაგებულ საზღვრებს. თუ სხვა ფიგურა ახლოს არ მდებარეობს, მიიღება თანაბარი საზღვრები.

პრიმიტიულ ფიგურებთან დაკავშირებული კიდევ ერთი მეთოდი [3] ზედაპირების რეკონსტრუქციის მიზნით ადგილობრივი, თანაბარი რეგიონების ორგანიზებას ახდენს შეკავშირების გრაფიკზე. რეგიონების ინიციალიზაცია წერტილების სიმრავლებიდან ნიშნების აღების მეშვეობით ხდება, ხოლო მათი კავშირები დაფუძნებულია სივრცით მანძილებზე. რეგიონი წარმოდგენილია საბაზისო ფუნქციების მეშვეობით და შემდეგ ნაწილებად იყოფა, რისთვისაც ხდება პრიმიტიული ფიგურების გამოვლენა, როდესაც ხმაურის ადგილობრივი დონე მაღალია. მიმდებარე პრიმიტიული ფიგურები ერთმანეთს უკავშირდება, ვინაიდან მათ სავარაუდოდ ყოფს ტეხილი. რეგიონების ზედაპირების ოპტიმიზა-

ცია ღირებულების შემდეგი ფუნქციების მეშვეობით ხდება: მანძილი რეკონსტრუირებულ ზედაპირსა და წერტილების სიმრავლეს შორის; პატარა რეგიონების სიმრუდეები ზედმეტი მორგების თავიდან აცილების მიზნით; მიმდებარე რეგიონების უთანაბრობები.

წერტილების სიმრავლეების რეკონსტრუირების მიზნით იყენებენ პრიმიტიულ ფიგურებს, როგორიც არის სიბრტყეები, ცილინდრები, კონუსები და სფეროები. ამ ფიგურების აღმოჩენა მოდიფიცირებული RANSAC პროცედურის მეშვეობით ხდება. ვინაიდან აღმოჩენის რეჟიმი იერარქიულია, ფიგურები განლაგდება ორობითი სივრცითი დანაწევრების (BSP) ხეზე. BSP ხე სამგანზომილებიან სივრცეს უჯრედებად ყოფს, ხოლო უჯრედები თავის მხრივ შიდა და გარე ნაირსახეობებად იყოფა. (BSP) უჯრედები ქსელის გრაფიკზე ერთმანეთს უკავშირდება, ხოლო კიდეები პრიმიტიული ფიგურების ტრიანგულაციების მეშვეობით მიიღება. ზედაპირები, რომელთა აპროქსიმაცია პრიმიტიული ფიგურების მეშვეობით შეუძლებელია, ქსელის გრაფიკზე წერტილების დელონის ტრიანგულაციის გზით ხდება. გრაფიკის კვანძები გრაფიკული კვთების მეშვეობით შიდა და გარე ნაირსახეობებად იყოფა. თითოეული შემავალი წერტილის ხილვადობის შეზღუდვებზე დაყრდნობით გამოითვლება ენერგიის ფუნქცია. ინფორმაცია ხილვადობის შესახებ აუცილებელია თან ახლდეს წერტილების სიმრავლეს, ვინაიდან თითოეული წერტილი ერთ ან რამდენიმე ხედს მიეკუთვნება.

მეცნიერი შოვე და სხვები [4] წერტილების ხმაურიანი სიმრავლეებიდან პოლიგონალურ წარმოდგენებს ქმნიან, რისთვისაც არქიტექტურული სცენებიდან აღებული წინასწარ ინფორმაციას იყენებენ, როგორიც არის ვერტიკალური სტრუქტურები და ორთოგონალური კვეთები. წერტილების სიმრავლეებში ვლინდება პლანარული სეგმენტები და ისინი სამგანზომილებიანი სივრცის ადაპტაციური დეკომპოზიციის მიზნით გამოიყენება. მიმდებარე სიბრტყეები იკვეთება და სამგანზომილებიანი სივრცე უჯრედების კომპლექსად იყოფა. არქიტექტურული სცენების რეკონსტრუქცია სიბრტყეების სიმრავლისთვის განმეორებადი პრიმიტივების დამატებით უმჯობესდება. განმეორებადი პრიმიტივები ჰორიზონტალური ან ვერტიკალური მიმართულებისა და გამოვლენილი სიბრტყეების ზღვრულ წრფეებთან იქმნება.

ზოგიერთ შემთხვევაში [5] ურბანული სტრუქტურების რეკონსტრუქციას მანჰეტენის უნივერსალური დაშვების მეშვეობით ახდენენ. შემავალი წერტილები კლასიფიცირდება ზედაპირის სამიდან ერთ-ერთი დომინანტური მიმართულების და ადგილობრივი ფიგურის ოთხიდან ერთ-ერთი ნაირსახეობის მიხედვით, კერძოდ ეს არის კედელი, კიდე, კუთხე და კუთხის კიდე. ფიგურის ნაირსახეობა და მისი მიმართულება თითოეული წერტილის ადგილობრივი სამეზობლოს გაანალიზების მეშვეობით განისაზღვრება. „განმტკიცების“ ეტაპზე კლასიფიკაცია უმჯობესდება, მაგალითად, მოწმდება, ერტყმის თუ

არა გარს კიდეს შესაბამისი კედლები. წერტილების კლასიფიკაცია ერთმანეთთან დაკავშირებული კოპლანარული კლასტერების ამოსარჩევად გამოიყენება, ხოლო ვოლუმეტრული მეთოდით მიიღება შემოსაზღვრული მოდელები.

არის შემთხვევები როცა LiDAR შემავალ მონაცემებს და სცენის ფოტოსურათებს აერთიანებენ. ისინი ეყრდნობიან იმ ფაქტს, რომ გამოსახულებებს მაღალი რეზოლუცია აქვს და როგორც წესი, შენობის ფასადების უფრო დიდ არეალს ფარავს, ვიდრე ლაზერული გამოსახულებები. ამის შემდეგ ხდება ფოტოსურათების გასწორება და წერტილების სიმრავლესთან რეგისტრაცია. მართკუთხა პლანარული რეგიონები სამგანზომილებიანი წერტილების კლასტერიზაციის მეშვეობით სეგმენტებად იყოფა და გასწორებულ გამოსახულებაში წრფეების გამოვლენა ხდება. ყველა რეგიონს ენიჭება სიღრმის მნიშვნელობა.

ვუ და სხვები [6] აღწერენ გენერალიზებული ცილინდრების ზედაპირული რეკონსტრუქციის სქემას. ცილინდრები იქმნება ვერტიკალური პროფილური მრუდების გადატარებით ჰორიზონტალური სატრანსპორტო მრუდების გასწვრივ (იხ. სურ. 1). სატრანსპორტო მრუდები დაახლოებით ემთხვევა სცენის იატაკის გეგმებს, ვინაიდან ისინი პარალელურად გასდევს მიწის სიბრტყეს. ამ სიბრტყის ნორმალური და სატრანსპორტო ნორმალები (თითოეული წერტილისთვის) შემავალი წერტილების ძირითადი მიმართულების საფუძველზე აირჩევა. ჰორიზონტალური სატრანსპორტო მრუდები იმ სიბრტყეებთან იქმნება, სადაც შემავალ წერტილებს მინიმალური სიმრუდე აქვს. თითოეული სატრანსპორტო მრუდისთვის წერტილების სიმრავლიდან აირჩევა მრავალი პროფილური კვეთი და ვილები პროფილურ მრუდს კანონიკურ პოზიციაზე. მრუდების შემდგომი ოპტიმიზაცია გვაძლევს თანაბარ ზედაპირებს, ხოლო გადაადგილების რუკა გამოითვლება ნაკლებად მასშტაბური გეომეტრიული დეტალების გათვალისწინების მიზნით.

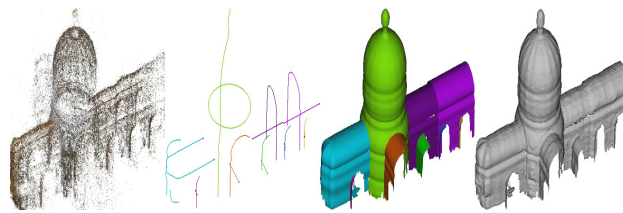
საჰაერო LiDAR მონაცემების საფუძველზე ქალაქის მოდელების რეკონსტრუქციის პრობლემის დაძლევის მრავალი ალგორითმი ემსახურება. მათი უმრავლესობა შენობების ანაბეჭდს იღებს და ორნახევარგანზომილებიან მოდელებს ქმნის. გარდა ამისა, არსებობს ჰიბრიდული მეთოდები, როდესაც სახმელეთო მონაცემების საფუძველზე ფასადების დეტალური რეკონსტრუქციები იქმნება. მკვლევარები ლეფარჟი და მალე [7] საჰაერო LiDAR მონაცემების საფუძველზე ახდენენ ქალაქის მოდელების რეკონსტრუქციას. ისინი სახურავების სტანდარტულ მონაკვეთებს სიბრტყეებით, ცილინდრებით, სფეროებით, კონუსებით და სხვა გეომეტრიული პრიმიტივებით აგებენ, ხოლო სახურავების შედარებით უსწორმასწორო კომპონენტებს წარმოადგენენ სამკუთხა ბადეების მეშვეობით. წერტილების სიმრავლე თავდაპირველად სემანტიკურად შინაარსიან რეგიონებად იყოფა, რათა შენობები მიმდებარე არეალისგან გაიმიჯნოს. მოგვიანებით შენობები გეომე-

ტრიულ პრიმიტივებად იყოფა და რეგიონების მზარდი მეთოდის მეშვეობით. ბოლოს შენობებისა და სხვა ურბანული კომპონენტების ფიგურების პრიმიტივები მჭიდრო, ორგანოზომილებიან ბადეში ექცევა, რისთვისაც ლეიბლები ბადეში მოქცეულ ცარიელ უჯრედებზე ვრცელდება.

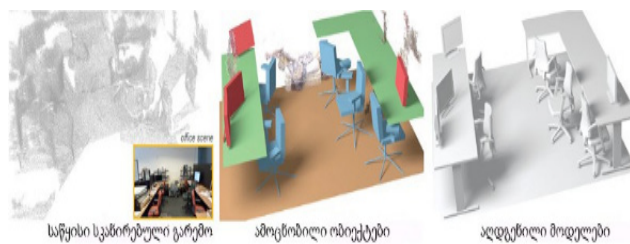
რობოტეხნიკის დარგში მნიშვნელოვანია რეკონსტრუირებული სამგანზომილებიანი ობიექტების ფუნქციონალური რუკის შექმნა, ვინაიდან სხვანაირად რობოტული ამოცანები ვერ შესრულდება. რუსუ და სხვები [8] წარმოადგენენ სამზარეულოების რეკონსტრუირების სისტემას, სადაც სახელურებისა და კნოპების იდენტიფიცირებას რობოტები ახდენენ. წერტილების სიმრავლეები თავდაპირველად პლანარულ რეგიონებად იყოფა, რისთვისაც ნორმალურსა და სიმრუდეებზე დაფუძნებული, რეგიონების ზრდის ალგორითმი გამოიყენება. ღერძებისადმი გასწორებული ორგანოზომილებიანი ოთხკუთხედები და კუბოიდები პლანარულ რეგიონებს ერგება და მაგიდება, კარადებად ან უჯრებად კლასიფიცირდება. სახელურები და კნოპები წერტილების სიმრავლეებიდან იკვეთება, რომლებიც არ თავსდება პლანარულ რეგიონში, მაგრამ მისი მომიჯნავეა. ინტერიერის ბევრი სცენა მაგიდება, სკამებს და სხვა მსგავს ობიექტებს მოიცავს. თანამედროვე მეთოდებით შესაძლებელია მოდელების მონაცემთა ბაზებიდან სამგანზომილებიანი ობიექტების ამორჩევა და განთავსება წერტილების სიმრავლეებთან მიახლოების მიზნით (იხ. სურ. 2). შედეგად მიღებულ მოდელებს ორიგინალური სცენის ზუსტი გეომეტრია არ გააჩნია, თუმცა ისინი შეიცავენ სცენის რედაქტირებისა და სხვა მაღალი დონის დამუშავებისთვის აუცილებელ სემანტიკურ ინფორმაციას.

თავდაპირველად ინტერიერის სეგმენტირების ავტომატურ ალგორითმს იყენებენ მრავალი RGBD გამოსახულებისთვის. ამ გამოსახულებების რედაქტირება შესაძლებელია სამომხმარებლო ინტერფეისის მეშვეობით. სეგმენტირების შედეგად თითოეულ რეგიონს ენიჭება 10-დან ერთ-ერთი სემანტიკური იარლიყი, მაგალითად, სავარძელი ან მაგიდა. თითოეული სეგმენტირებული რეგიონისთვის სამგანზომილებიანი მოდელების მონაცემთა ბაზიდან აირჩევა მსგავსი სამგანზომილებიანი მოდელი შესაბამისი სიღრმისეული ინფორმაციის საფუძველზე. შემთხვევითი რეგრესიის ტყე გამოიყენება მოდელის ობიექტის ამოცნობის პრობლემის დაძლევის მიზნით, რა დროსაც გამოიყენება 496-განზომილებიანი ვექტორები (გეომეტრიული იმპულსების, მბრუნავი

გამოსახულებების და სხვა გეომეტრიული მახასიათებლების ჩათვლით). თითოეული სამგანზომილებიანი მოდელისთვის მრავალი გამოსახულების რენდერინგის შედეგად მიიღება საცდელი მონაცემები.



სურ. 1. ზედაპირის სქემატური რეკონსტრუქცია (მარცხნიდან მარჯვნივ): შემავალი წერტილების სიმრავლე, სატრანსპორტო და პროფილური მრუდები, ნაშლილი ზედაპირები და ზედაპირები გადაადგილების რუკებით [9]



სურ. 2. გამოსახულებაში იძებნება სამგანზომილებიანი მოდელები და ისინი რეკონსტრუქციის მიზნით გამოიყენება.

თითოეულ მოდელს ფიგურების პრიმიტივების იერარქიული, გრაფიკული სტრუქტურის სახით წარმოადგენენ, რაც საშუალებას გვაძლევს გამოვიყენოთ სხვადასხვა კონფიგურაციები, როგორც არის ღია და დახურული უჯრები. სწავლის ეტაპზე ინდივიდუალური ობიექტების გამოსახულება სხვადასხვა ხედით და სხვადასხვა კონფიგურაციით მიიღება, ხოლო შემდეგ ხდება ფიგურების პრიმიტივების ავტომატური აღმოჩენა. ამოცნობის ეტაპზე ერთი გამოსახულებიდან მიიღება დომინანტური სიბრტყეები და ხდება მათი კლასიფიცირება იატაკად, კედლებად ან მაგიდებად. დარჩენილი წერტილები ერთმანეთთან შეკავშირებულ კომპონენტებად იყოფა და სამგანზომილებიანი მოდელებს მიესადაგება. მისადაგების პროცესი მოდელების სხვადასხვა ფრაგმენტებისთვის ტარდება და ეფუძნება კონტურების განაწილებას, ძირითად კომპონენტებსა და ობიექტების ზომებს.

ძიებისა და კლასიფიცირების მეთოდების გამოყენებისას ამოცნობისა და შაბლონის დეფორმაციის ეტაპები გაერთიანებულია. ისინი ეყრდნობიან იმ დაკვირვებას, რომ ადამიანის მიერ შექმნილ ფიგურებს ხშირად ახასიათებთ ბუნებრივი სეგმენტაცია აღმავალი მიმართულებით, მაგალითად, მაგიდა შეიძლება დაიყოს ფეხებად და სადგამად. ობიექტები სამჰორიზონტალურ ფრაგმენტად იყოფა წერტილების განაწილების ანალიზის მეშვეობით. ჰორიზონტალური ფრაგმენტების ზომების თანაფარდობა და აბსოლუტური ზომა კონტურების ვექტორს გვაძლევს. „ტყის“ შემთხვევითი კლასიფიკატორი მიიღება მომხმარებლის მიერ დასათაურებული გამოსახულებების საფუძველზე. ამოცნობის ეტაპზე გამოსახულება კვლავ სეგმენტირდება და შაბლონების გამოვლენის მიზნით გამოიყენება რეგიონის ზრდის ალგორითმი.

1. Ruwen Schnabel, Patrick Degener, and Reinhard Klein. Completion and Reconstruction with Primitive Shapes. *Computer Graphics Forum*, 28(2):503–512, April 2009.
2. Ruwen Schnabel, Roland Wahl, and Reinhard Klein. Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. *Computer Graphics Forum*, 26(2):214–226, June 2007.
3. Philipp Jenke, Michael Wand, and Wolfgang Straßer. Patch-Graph Reconstruction for Piecewise Smooth Surfaces. In *Vision, Modeling, and Visualization (VMV)*, pages 3–12, 2008.
4. Anne-Laure Chauve, Patrick Labatut, and Jean-Philippe Pons. Robust piecewise-planar 3D reconstruction and completion from large-scale unstructured point data. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 1261–1268, 2010.
5. Carlos A Vanegas, Daniel G Aliaga, and Bedrich Benes. Automatic Extraction of Manhattan-World Building Masses from 3D Laser Range Scans. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(10):1627–1637, 2012.
6. Changchang Wu, Sameer Agarwal, Brian Curless, and Steven M Seitz. Schematic surface reconstruction. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 1498–1505, 2012.
7. Florent Lafarge and Clement Mallet. Creating Large-Scale City Models from 3D-Point Clouds: A Robust Approach with Hybrid Representation. *International Journal of Computer Vision*, 99(1):69–85, 2012.
8. Radu Bogdan Rusu, Zoltan Csaba Marton, Nico Blodow, Mihai Dolha, and Michael Beetz. Towards 3D Point cloud based object maps for household environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 56(11):927–941, November 2008.
9. Changchang Wu, Sameer Agarwal, Brian Curless, and Steven M Seitz. Schematic surface reconstruction. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 1498–1505, 2012.