

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ინდირა ნატრიაშვილი

მობილური რობოტების ორიენტაციისა და მართვის მეთოდების
ალგორითმების დამუშავება და შესწავლა

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარმოდგენილი
დისერტაციის

ავტორ ე ფ ე რ ა ტ ი

სადოქტორო პროგრამა: მართვის სისტემები, ავტომატიზაცია,
ტესტ-ინჟინერინგი

შიფრი 0403

თბილისი,

2019

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის „მართვის ავტომატიზებული სისტემების“ დეპარტამენტში.

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: კეკელიძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2019 წლის ..

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი პროფ. თინათინ კაიშაური

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თანამედროვე მობილური რობოტები წარმოადგენენ რთულ პროგრამულ-ტექნიკურ კომპლექსებს, რომელთა დანიშნულება არის სხვადასხვა სირთულის ამოცანების გადაწყვეტა. ასეთი რობოტების უახლოეს მოდიფიკაციებს გააჩნიათ განვითარებული კონსტრუქციები სავალი ნაწილების, გამოთვლითი ტექნიკის ბორბლური (გვერდითი) მოწყობილობა, მარშუტის მიმყოლი-ნავიგაციური სისტემა და აგრეთვე შეგრძნების საშუალებების საშუალებები. თანამედროვე რობოტები ხასიათდებიან გარე ობიექტებთან კარგი ურთიერთქმედებით, ისინი ხასიათდებიან რთულ მოძრავ გარე სამყაროსთან შეგუების კარგი შესაძლებლობით, მაღალი ფუნქციონალური მოქნილობით და მანევრირებით. ასეთი თვისებები აუცილებელია არატრივიალური სატრანსპორტო ამოცანების შესრულებისათვის, როგორც არის წინაღობისათვის შემოვლა, ძნელად მისაწვდომ სამუშაო ადგილებში შეღწევა, რთული მრუდწირული კონტურის გასწვრივ მოძრაობა და სხვა.¹ ავტონომიური თვლიანი რობოტის მოძრაობის მართვის სისტემის აგებისას გათვალისწინებული უნდა იყოს გარემოს მოდელირების ალგორითმების დამუშავება, მარშუტის დაგეგმვა, სტატიკური და მოძრავი წინაღობების აღმოჩენა და მათი გვერდის ავლა და სხვა.

თვლიანი რობოტები მიეკუთვნება არაგოლონომიური სისტემების კლასს. ასეთ სისტემებში გეომეტრიულის გარდა არსებობს კინემატიკური კავშირები, ე.ი. კავშირები რომლებიც ითვალისწინებენ შეზღუდვებს სისტემის წერტილებისა და ტანის სიჩქარის მნიშვნელობებზე. თვლიანი რობოტების აღწერისას გამოიყენება ცვლადები, რომელთაგან ყველა არ არის დამოუკიდებელი. ეს კი იწვევს ძირითად სიმძნელებს რობოტის ტექნიკური სისტემების ანალიზსა და სინთეზში.

¹ Мирошник И.В., Никифоров В.В., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими объемами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.

მართვის თეორიის თვალსაზრისით არაგოლონომიური კავშირების არსებობა ხელს უშლის გამოყენებული იქნას დაგეგმვისა და მართვის სტანდარტული ალგორითმები. რომლებიც დამუშავებულია მანიპულაციური რობოტებისათვის . ასეთი სისტემებისთვის სტაბილიზაციის ამოცანა არის არატრივიალური. არაგოლონომიური სისტემები არ შეიძლება იყოს სტაბილიზირებული სტაციონალური უკუ კავშირით. თვლიანი რობოტების სტაბილიზაციის ამოცანის გადაწყვეტა მოითხოვს სხვა სახის უკუ კავშირის გამოყენებას.² ³არასტაციონალურის, უბან-უბან უწყვეტის და ა. შ. თუმცა ამის მიუხედავად, შესაძლებელია სტაციონალური უკუ კავშირის გამოყენება მოძრაობის ამოცანების გადაწყვეტისას.

ერთ-ერთი ყველაზე ცნობილი შეცდომა რობოტების მართვის ამოცანების გადაწყვეტისა ეფუძნება მიმყოლი სისტემების აგების კლასიფიკაციას.⁴ მოცემული მეთოდი ითვალისწინებს მართვის სისტემაში სპეციალური დამკავებელი მოწყობილობის ჩართვას, რომელიც ახდენს სასურველი ტრაექტორიის გენერირებას პარამეტრულ ფორმაში.

მიზანი: სადისერტაციო ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს მობილური რობოტების მართვისა და ორიენტაციის მეთოდებისა და ალგორითმების დამუშავება. დასმული მიზნის მისაღწევად გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. მობილური თვლიანი რობოტების მათემატიკური მოდელების აგება და ანალიზი.
2. მობილური რობოტის ტექნიკური მხედველობის სისტემის ოპტიკური სქემების ანალიზი.

²Bloch A.M., McClamroch N.H., Reyhanoglu M. Controllability and stabilizability properties of nonholonomic control system // Proc. 29th Conf. on Decision and Control. Honolulu, Hawaii, 1990. -P. 13 12-13 1

³ Brockett R.W. Asymptotic stability and feedback stabilization II Differential Geometric Control Theory. Birkhauser: Boston, 1983. P.181191.

⁴ Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. _М.: Мир, 1989

3. მობილური რობოტის ორიენტაციისა და მართვის სისტემის სტრუქტურის აგება.

4. მობილური რობოტის მოძრაობის მართვის ალგორითმების სინთეზი და კვლევა.

5. რობოტის ორიენტაციის ალგორითმების სინთეზი და კვლევა სამუშაო სივრცეში.

6. რობოტის მოძრაობის ტრაექტორიის კორექტირების ალგორითმების სინთეზი და კვლევა.

კვლევის მეთოდები: თეორიული შედეგების მიღებისთვის გამოყენებული იქნა არაწრფივი სისტემების დიფერენციალური გეომეტრიის თეორიის მეთოდები, ნეიროქსელური ტექნოლოგიები, გრაფების თეორია და სასრული ავტომატები. ნეირონული ქსელების სწავლებისთვის და მიღებული შედეგების ტესტირებისთვის დამუშავებული იქნა პროგრამული პაკეტი.

მიღებული შედეგების სამეცნიერო სიახლეა:

1. დამუშავებული იქნა მობილური რობოტის მოძრაობის მართვის სისტემის იერარქიული სტრუქტურა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს გადავწყვიტოთ მართვის არატრივიალური ამოცანები.

2. დამუშავებული იქნა მობილური რობოტის ორიენტაციის ალგორითმები სასრული ავტომატების გამოყენებით.

3. შემოთავაზებულია ნეირონული ალგორითმის სინთეზის მეთოდი რობოტის მოძრაობის ტრაექტორიის კორექტირებისთვის იმ მიზნით, რომ არ მოხდეს შუქურასთან შეჯახება.

4. შემოთავაზებულია ორ ამძრავიანი მობილური რობოტის მოძრაობის მართვის ალგორითმი როდესაც არ გვაქვს მოძრაობის ტრაექტორია ცხადად მოცემული.

პრაქტიკული ღირებულება: სადისერტაციო ნაშრომის შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნას ავტონომიური მობილური რობოტების

მართვის სისტემის აგებისთვის, რომლებიც ფუნქციონირებენ იმ პირობებში რომელშიც წინასწარ არ არის ცნობილი მოძრაობის ტრაექტორია.

ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი დებულებები და შედეგები მისი დამუშავების სხვადასხვა ეტაპებზე მოხსენებულ და განხილულ იქნა სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციებზე და სემინარებზე.

მათ შორის:

- საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე (თბილისი, 28-29 სექტემბერი 2018 წ.);

პუბლიკაციები. სადისერტაციო კვლევის ძირითად შედეგებზე გამოქვეყნებულია 3 ბეჭდვითი ნაშრომი.

1. ორამძრავიანი თვლიანი რობოტის კინემატიკური მოდელი - ვ.კეკენაძე, ი. ნატრიაშვილი// THE TWO-DIMENSIONAL ROBOT KINETIC MODEL. Kekenadze Vladimer, Natriashvili Indira

2. თვლიანი რობოტების კინემატიკური სქემების დამუშავება- ვ.კეკენაძე, ი.ნატრიაშვილი, მ.კაკოჩაშვილი//DEVELOPING THE CINEMATIC SCHEMES OF THE ROBOT. Kekenadze vladimer, Natriashvili Indira, Kakofashvili Mikheil// РАЗРАБОТКА КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ РОБОТА. Кекенадзе владимир, Натриашвили Индира, Какофашвили Михаил

3. მართვის ალგორითმების დამუშავება ბორბლური რობოტებისთვის. ვლადიმერ კეკენაძე, ინდირა ნატრიაშვილი, მიხეილ კაკოჩაშვილი// DEVELOPMENT OF CONTROL ALGORITHMS FOR WHEELED ROBOTS. Kekenadze Vladimer, Natriashvili Indira, Kakochashvili Mikheil// РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОЛЕСНЫХ РОБОТОВ. Кекенадзе Владимир, Натриашвили Индира, Какочашвили Михаил

პირადი წვლილი. სადისერტაციო თემის მიხედვით გამოქვეყნებულია თანაავტორობით რამდენიმე სტატია. ყველა შედეგი, რომელიც წარმოადგენს ამ ნაშრომის ძირითად შინაარსს, მიღებულია ავტორის მიერ დამოუკიდებლად.

სადისერტაციო ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლისაგან, ხუთი თავის, დასკვნის, ლიტერატურის სიისგან 95 დასახელებით. სამუშაოს ძირითადი მასალა გადმოცემულია ბეჭდვითი ტექსტის 162 გვერდზე, ილუსტრირდება 6 ცხრილით და 38 ნახაზით.

სადისერტაციო ნაშრომის შინაარსი

შესავალში წარმოდგენილია სადისერტაციო თემის აქტუალობა, ის ძირითადი ამოცანები და პრობლემები, რომლებიც წარმოიშობა კვლევის პროცესში. ჩამოყალიბებულია ნაშრომის მიზანი, კვლევის მეთოდები, მეცნიერული სიახლე და პრაქტიკული ღირებულება. მოცემულია ნაშრომის შინაარსის მოკლე ანოტაცია. დისერტაციის პირველი თავი დასათაურებულია როგორც თვლიანი რობოტების მათემატიკური მოდელები, რომელიც თავის მხრივ ქვეთავებისგან შედგება. განვიხილოთ თითოეული ქვეთავის მიზანი. დისერტაციის პირველ თავში, თანამედროვე მართვის სისტემების დაპროექტების ამოცანის გადაწყვეტისას ვგულისხმობთ რომ არსებობს ადეკვატური მათემატიკური მოდელები, რომლებიც ერთი მხრივ, საკმაოდ სრულად აღწერენ რობოტის ქცევას სამუშაო სივრცეში მისი გადაადგილების პროცესში, მეორე მხრივ გამოსადეგია მართვის ალგორითმების სინთეზის პროცედურების განხორციელებისათვის. ასეთ დროს ერთნაირად მიუღებელია როგორც არითმეტიკული მოდელები, ასევე ძალზედ რთულები რომლის გამოყენება სისტემის სინთეზისათვის დაკავშირებულია გადაულახავ ანალიზურ სირთულეებთან.

როგორც მართვის ობიექტი თვლიანი რობოტები წარმოადგენს მრავალარხიან არსებითი არა წრფივი სისტემა. მისი მათემატიკური აღწერა (მათემატიკური მოდელი) შეიძლება მივიღოთ ლაგრანჟის ან ნიუტონ-ეილერის განტოლებების გამოყენებით. რომლიც F , M ძალა მომენტური ზემოქმედება წარმოებს თვლიან სისტემაზე, ეს უკანასკნელი განსაზღვრავს

მოდელების ძირითად თვისებებს. განსახილველი კლასის რობოტების და მათ განსხვავებას მყარი სხეულების მოძრაობის კუთხე და ვექტორი და მათი წრფივი სიჩქარე არის ურთიერთდაკავშირებული, ე.ი. ემორჩილება ნეგოლონომიურ შეზღუდვას, რაც იწვევს ძირითად სირთულეს თვლიანი რობოტო ტექნიკური სისტემის ანალიზის და სინთეზის განხორციელებისას.

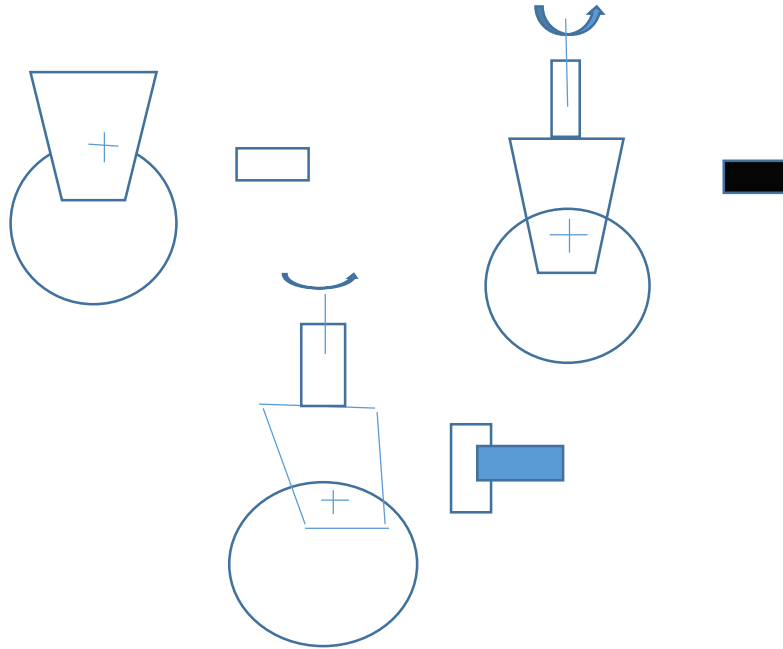
მოცემული განყოფილების ამოცანას წარმოადგენს იმ საკითხების სისტემური განხილვა რომელიც დაკავშირებულია თვლიანი რობოტების მათემატიკური მოდელების აგებასთან, კლასიფიკაციასთან და ანალიზთან.

პირველი თავი შედგება ქვეთავებისგან:

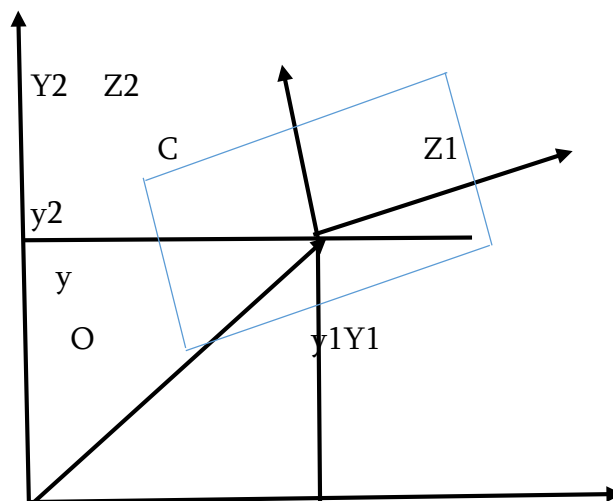
თვლიან რობოტების კინემატიკური სქემები- სადაც საუბარია რობოტების კონსტრუქციაზე, მის შემადგენელ ნაწილებზე. კინემატიკურ სქემებზე, თვლიანი არის თვითმავალი თვლიანი მანქანა ავტომატური მართვით. რობოტის კონსტრუქციის ძირითად ელემენტს წარმოადგენს სავალი მოწყობილობები, საინფორმაციო სისტემა და მართვის სისტემა. რობოტი სავალი ნაწილი შედება სავალი თვლისა(კორპუსი, პლატფორმა) და თვლიანი მოდელებისაგან, რომლებიც უზრუნველყოფენ მოთხოვნილ მიმართულებასა და სიჩქარეს რობოტის სიბრტყესთან გადაადგილებისას, თვლიანი რობოტი თავის მხრივ შედგება თვლებისაგან, საკიდისაგან და აღმძრავი მექანიზმისაგან , რომელიც ჩვეულებრივ შედგება მუდმივი დენის ძრავისაგან , ჩაყენებული რედუქტორისაგან, მუხრუჭისაგან და ა.შ. პრაქტიკაში გამოყენებული თვლიანი მოდელების კონსტრუქციები, გამოყენებული საკიდის ტიპზე დამოკიდებულებით შეიძლება დაყოფილი იქნან უძრავად (ფიქსირებული), სიმეტრიულად მობრუნების(საჭინი)და ასიმეტრიულად მობრუნებით.

რობოტის კოორდინატთა სისტემის და გეომეტრიის ფორმირება - პლატფორმა (ფუძე) მოძრავი რობოტის განიხილება როგორც მყარი სხეული დეკარტის კოორდინატთა სისტემაში $y = R^2$ [30]. მისი მდებარეობა სიბრტყეზე (ნახ.4) ცალსახად განისაზღვრება $y = \text{col}(y_1, y_2)$ ვექტორით C (მასის ცენტრი ან პლატფორმის პოლუსი) წერტილის კოორდინატებით

OY_1Y_2 კოორდინატა სისტემაში და α კუთხით CZ_1 ღერძის ორიენტაციის რობოტის CZ_1Z_2 კოორდინატა სისტემის დაკავშირებული პლატფორმასთან.



ნახ.1 თვლიანი მოდელების კონსტრუქციები



ნახ.2 მოძრავი რობოტი აბსოლუტურ კოორდინატა სისტემაში

თვლის კინემატიკური მახასიათებლები- თვლიანი მოდელების საშუალებით ხორციელდება ურთიერთკავშირი რობოტისა საყრდენ ზედაპირთან. მათი საშუალებით ხდება ძალების გადაცემა, რომელიც იჭერს რობოტს ტრასაზე, საშუალებას აძლევს მას განახორციელოს სასურველი მანევრირება საჭირო მიმართულებით და დავალებული სიჩქარით გადაადგილდეს შესაბამისი მიმართულებით. თვლიანი რობოტის სტრუქტურული თვისებები მთლიანად არის დამოკიდებული თვლიანი მოდულების ნაკრებზე რომელიც შედის რობოტის კონსტრუქციის შემადგენლობაში. განვიხილოთ კინემატიკური მახასიათებლები თვლიანი მოდულების ძირითადი ტიპები. არამობრუნებადი (დაფიქსირებული) მოდელი. ასეთი კონსტრუქციის მოდელის დანიშნულებაა გრძივი მოძრაობის შექმნა მას შეუძლია ბრუნვა თავისი ჰორიზონტალური ღერძის გარშემო, თუმცა მისი ორიენტაცია პლატფორმასთან შეფარდებით არის ფიქსირებული. მობრუნებადი სიმეტრიული მოდელი. ფიქსირებული მოდულისაგან განსხვავებით მობრუნებადი სიმეტრიულმა მოდულმა შეიძლება შეიცვალოს თავისი ორიენტაცია მოძრაობის პლატფორმის მიმართ.

მექანიკური სისტემები კინემატიკური შეზღუდვებით.
არაგოლონომიური სისტემების კლასიფიკაცია- განვიხილოთ მექანიკურ სისტემათა კლასი კინემატიკური შეზღუდვებით, წრფივი სიჩქარით

$$\langle \sigma_j(q), \dot{q} \rangle = 0, \quad j = 1, \dots, n - m,$$

სადაც $Q = \text{col}(q_1, \dots, q_n)$ ლოკალური კოორდინატია გლუვი n - განზომილებიანი M მრავალსახეობის, რომელიც ასრულებს კონფიგურაციული სივრცის როლს, და

$$\sigma_j(q) = \sum_{i=1}^n \sigma_j^i(q) dq_i, \quad j = 1, \dots, n - m$$

არის გლუვი ლოკალური დამოუკიდებელი კოვექტორული ველი (დიფერენციალური პირველი ფორმა), მოცემული M კონფიგურაციული მრავალსახეობის V ქვესიმრავლეზე. თუ ტოლობის მარცხენა მხარე არ არის სრული წარმოებულ დროის მიხედვით რაიმე კოორდინატთა

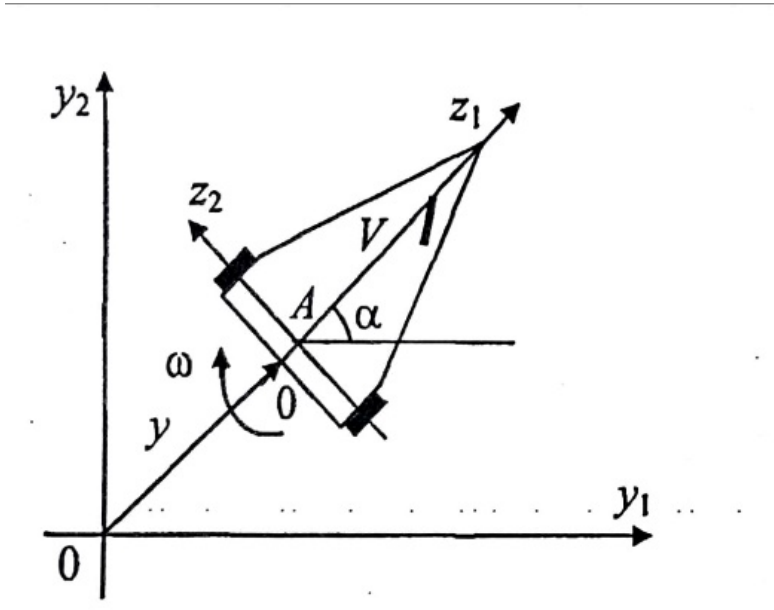
თვლიანი რობოტის პლატფორმის მოძრაობის კინემატიკური მოდელი- მოცემული განყოფილების მიზანს წარმოადგენს პლატფორმის მოძრაობის კინემატიკური მოდელის მიღება, რომელიც გარკვეულ როლს თამაშობს თვლიანი რობოტის მართვის ამოცანაში და მისი მოძრაობის სასურველი ტრაექტორიის დაგეგმვაში. თუ ვივარაუდებთ, რომ არ ხდება თვლის მოცურება, თვლიანი რობოტის კინემატიკური მოდელი განისაზღვრება $j_q(q)\dot{q} = 0$ (19) განტოლებიდან გამომდინარეობს, რომ $j_q(q)$ მატრიცის წრფივად დამოკიდებული სტრიქონი განსაზღვრავს, ბაზის კოგანაწილებისა n_q - განზომილების კონფიგურაცია M_q მრავალსახეობაზე იმ პირობით, რომ

$$\epsilon V_q = \{q: \text{rank} T(\beta_c) = 3 - k_n\}$$

ბორბლური მუშაობის დინამიკური მოდელი-მოცემული განყოფილებების მიზანია თვლიანი რობოტის დინამიკური მოდელი აღწერს კავშირებს ლოკალურ კოორდინატებს $q = \text{col}(y, \alpha, \theta, \beta_\alpha, \beta_c)$ კონფიგურაციულ n_q - განზომილების M_q მრავალსახეობის და $\mu = \text{col}(\mu_\theta, \mu_\alpha, \mu_c)$ მომენტებს შორის, სადაც μ_θ - არის მომენტების N ვექტორი, მოდებული თვლის ჰორიზონტალურ ღერძებზე; μ_α არის მომენტების N_α ვექტორი, მოდებული ასიმეტრიული თვლიანი მოდელის ვერტიკალურ ღერძებზე; μ_c მომენტების N_c ვექტორი, მოდებული მბრუნავი სიმეტრიული თვლიანი მოდელის ვერტიკალურ ღერძებზე.

ორამბავიანი თვლიანი რობოტის კინემატიკური მოდელი- მაგალითის სახით განვიხილოთ მობილური რობოტის დინამიკური მოდელის აგება, რომელიც შედგება ხისტი (მაგარი) პლატფორმისაგან, რომელიც აღჭურვილია ორი წამყვანი თვლიანი მოდელებისაგან და დამატებით ავლუგერული მოდელისაგან რომელიც ანიჭებს კონსტრუქციას მდგრადობას მადჯის განტოლება არაგოლონომიურ კავშირებიან ელექტრომექანიკური სისტემებისთვის- სტაციონალური რეჟიმების მდგრადობის რიგ ამოცანებში და თვლიანი რობოტების და მობილური მანიპულატორების მოძრაობის (გადაადგილებს) მართვა მოითხოვს მათემატიკური მოდელების აგებას რობოტის ელექტროამძრავი დინამიკის გათვალისწინებით. ასეთი აგება

ხელსაყრელია ჩავატაროთ ლაგრანჟი-მაქსველის ფორმულების დახმარებით ელექტრომექანიკური სისტემებისათვის შესაბამისი არაგოლონომიური კავშირებით.⁵ ელექტრომექანიკური სისტემის ქვეშ იგულისხმება სისტემა, რომელშიც წარმოებს მექანიკური ენერჯის გარდაქმნა ელექტრომაგნიტურ ენერჯიად და პირიქით.



ნახ.6 მობილური რობოტის კოორდინატთა სისტემა

ორამძრავიანი თვლიანი რობოტის ელექტრომექანიკური მოდელი- ვთქვათ რობოტს, რომელიც განხილული იყო წინა ქვეთავში დაყენებული აქვს ორი ელექტრო ძრავა მუდმივი დენის, რომლებიც უზრუნველყოფენ პლატფორმის წამყვანი თვლების მუშაობას. ელექტრული ქვესისტემა შეიცავს (შედგება) დენის ორი კონტურს, გამომდინარე აქედან, ელექტრომექანიკური ქვესისტემის განზოგადებული კოორდინატების ვექტორი $z = \text{col}(y, \alpha, \theta, e)$ შეიცავს e_1, e_2 მუხტებს, ამასთან $e_j = i_j$ წარმოადგენენ დენებს რომლებიც გადიან შესაბამისი ძრავების კვების გარე წრედებში.

მეორე თავი ეთმობა თვლიანი რობოტების მათემატიკური მოდელების ანალიზს მოცემული თავის ამოცანას წარმოადგენს თვლიანი რობოტების

⁵ Мартыненко Ю.Г. Применение теории неголономных . электромеханических систем к задачам динамики мобильных колёсных роботов // Сб. науч. статей, посв. 125-летию кафедры теоретической механики. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. С. 33-47.

მათემატიკური მოდელების თვისებების კვლევა, რომლებიც უკავშირდებიან მათში მართვის ალგორითმების რეალიზაციას. ამ თვისებებს მიეკუთვნებიან: მიღწევადობა, მართვადობა და სტაბილიზაციის შესაძლებლობა. ამოცანის გადაწყვეტაში განსაკუთრებულ როლს თამაშობს დადგენილი აქტი ე.წ დიფერენციალური ბრტყელი გამომთვლელის არსებობა, ეს ნიშნავს გამოსასვლელებს, რომელთა მიმართაც სისტემას არ აქვს ნულოვანი დინამიკა. ⁶ასეთი ტიპის სისტემის მაგალითად გამოდგება ბრუნოვსკის კანონიკური ფორმა.

მოცემული თავი თავის მხრივ მოიცავს შემდეგ ქვეთავებს, ესენია: **მართვადობა, კანონიკური ფორმები და დიფერენციალური ბრტყელი სისტემები** - ხშირ შემთხვევებში მართვის ალგორითმის სინთეზი შეიძლება იქნას გამარტივებული, კოორდინატთა სისტემის წინასწარი შეცვლის ხარჯზე, რომლის შედეგად რობოტის მოდელების განტოლებები იღებენ უფრო მარტივ კანონიკურ ფორმას $\dot{x}=f(x)+\sum_1^n g_1(x)v_1, \quad v = col(v_1, \dots, v_2) \in U \subset R^m$ (102) სახის არა წრფივი სისტემის გარდაქმნის პრობლემა მდგომარეობს იმაში, რომ მოძებნილი იქნას ისეთი არა წრფივი შეცვლა კოორდინატების და უკუ კავშირის რომ ახალ კოორდინატებში ტრანსფორმირებული სისტემა იღებს წრფივი მართვადი სისტემის სახეს.⁷ **თვლიანი რობოტების მოდელების სტატისტიკური და დინამიკური გაწრფივება** (102) სახის სისტემის გაწრფივების ყველა მეთოდის საერთო ხაზს წარმოადგენს ის ფაქტი, რომ სისტემის შესასვლელების ვექტორული ველი $g_i, i = 1, \dots, m$ მთლიანი ოჯახიდან გამოიყოფა ..ოჯახი, რომლის არსებობას განსაზღვრავს არაინვოლუტური განაწილება D^8 , ე.ი ამ გამოყოფის შემდეგ დარჩენილი შესასვლელობის სისტემის ვექტორული ველი წარმოადგენს

⁶ Tilbury D., Sondalen J., Bushnell L., Sasz 8. A multi-steering trailer system: Conversion into chained form using dynamic feedback II IEEE Trans. on Robotics and Automation. 1995. V.1 1, N26. P.807-818

⁷ Мартыненко Ю. Г . Айалитическая динамика Аэлэктромеханических систем. М.: Изд-во МЭИ, 1985

⁸ Мартыненко Ю.Г. Управление дВИЖеЕиём мобильных колёсных роботов // Фундаментальная и прикладная математика. М.: Центр новых информационных технологий МГУ, Издательский дом «Опфьпые системы», 2005. Том 11, № 8. с. 29 80

ინვოლუტური განაწილების ბაზისს. განაწილებისას, რომელიც იყენებს დინამიკურ უკუ კავშირს მმართველი ზემოქმედებისათვის, მოცემული ქვეოჯახის შესაბამისობაში აიგება დინამიკური კომპენსატორი. სტატიკური გაწრფივება. ვთქვათ $m_1(x) = \text{rank} D_i(x), x \in V$ $F_1 = \{x \in V: m_j = \sup \text{rank} D_j(x), j = 0, \dots, i\}$ შევნიშნოთ, რომ $m = m_0 \leq m_1 \leq \dots \leq m_\infty \leq n = \dim R^n$ და $V = F_0 \supset F_1 \supset \dots \supset F_\infty \cdot B$

არაგოლონომიური სისტემის სტაბილიზაცია წონასწორობის მდგრადობის თანაფარდობით. (102) სისტემის სტაბილიზაციის ამოცანა ფორმირდება შემდეგნაირად: საჭიროა მოიძებნოს უკუ კავშირის კანონი $v = k(x)$, სადაც $k(x)$, არის გლუვი ფუნქცია ისეთი, რომ ჩაკეტილი სისტემა

$$\dot{x} = f(x) + G(x)K(x)$$

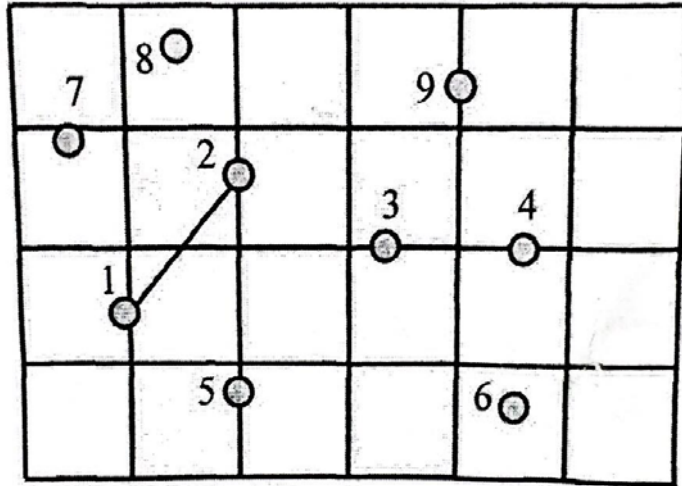
სადაც $G(x) = [g_1(x), \dots, g_m(x)]$, წარმოადგენს ასიმეტრიულად მდგრადს, ე.ი. არაწრფივი სისტემების თეორიიდან, გლუვი მასტაბილებელი უკუ კავშირის არსებობისათვის $x(t) = x(t, t_0, x_0)$ სისტემის ყველა ამონახსნი ასიმეტრიულად მიისწრაფვის ნულისაკენ ნებისმიერი საწყისი მდგომარეობიდან

$$x(t_0) = x_0,$$

არაწრფივი სისტემის თეორიიდან, გლუვი მასტაბილებელი უკუკავშირის არსებობისათვის მდგომარეობის მიხედვით საკმარისია, რომ წრფივი სისტემა იყოს მართვადი. არაწრფივი სისტემაც შეიძლება იყოს მართვადი, თუმცა აქედან არ გამომდინარეობს გლუვი მასტაბილებელი უკუ კავშირის არსებობა. ქვემოთ მოყვანილი თეორემა განსაზღვრავს აუცილებელ პირობას. ამ ამოცანის გადაწყვეტის $(0, D)$ სახის სისტემის მიმართ.

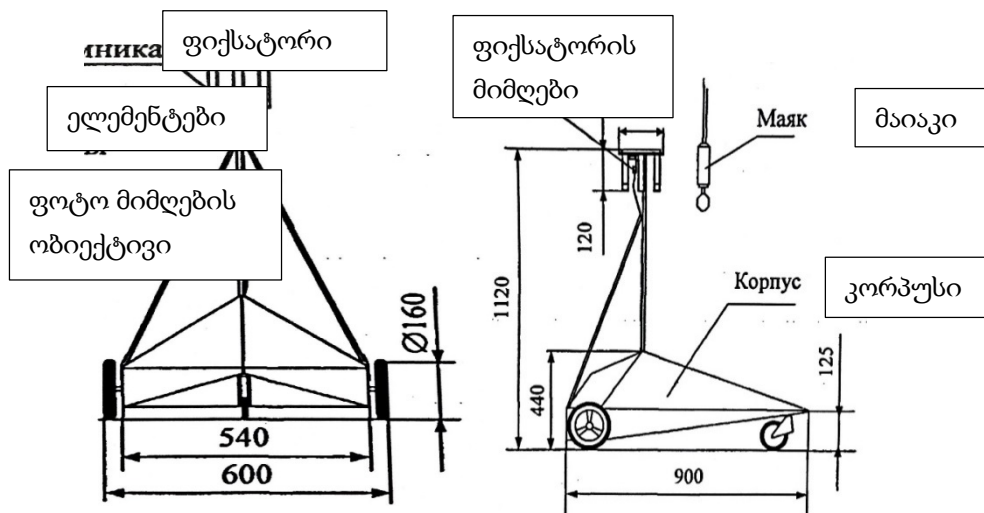
მესამე თავში გადმოცემულია **ამოცანის დასმა და მართვის სისტემის სტრუქტურა**, განხილულია ქვეთავები **ამოცანის აღწერა**, სადაც ნაშრომის პრაქტიკული რეალიზაციისათვის განიხილება ორამძრავიანი მობილური რობოტის მოძრაობის მართვის სისტემის სინთეზის ამოცანა. რობოტის ფუნქციონირება ხდება დინამიკურ გარემოში, რომელიც აღჭურვილია ინფრაწითელი (მაიაკებით) შუქურებით. კონკრეტული მაგალითად სატრანსპორტო ამოცანის შეგვიძლია განვიხილოთ რობოტის მიერ

დავალებული მარშუტის გავლა აქტიური შუქურების დახმარებით⁹ შუქურების განლაგება და მათი ჩართვის თანმიმდევრობა წინასწარ არ არის ცნობილი, ამიტომ ანალიზურად არა გვაქვს რობოტის მოძრაობის ტრაექტორიის აღწერა.

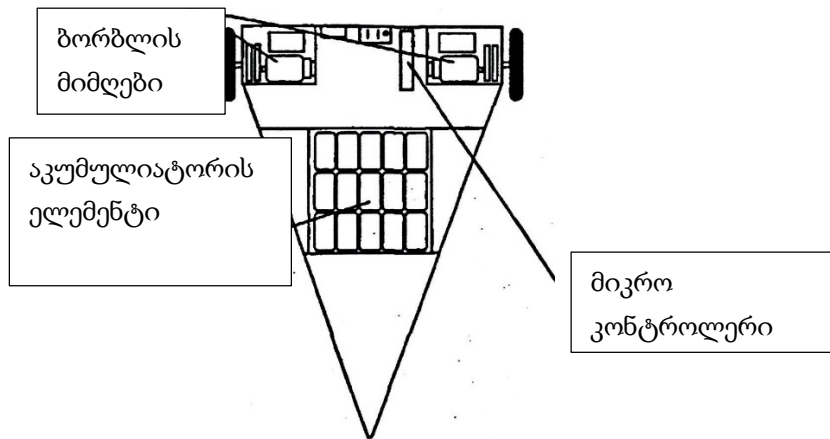


ნახ.10 პოლიგონის სქემა

მობილური რობოტის „წვეის ისარი“ აღწერა



⁹ 0 соревнованиях мобильных роботов в рамках Фестиваля // Материалы науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», 5 6 декабря 2000 г. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. С. 274 278.



სენსორული სისტემა-მობილური რობოტის სენსორული სისტემა შედგება გადაადგილებისას გადამწოდებისაგან და ტექნიკური მხედველობის სისტემისგან. გადაადგილების გადამწოდები გამოიყენებიან თვლის მობრუნების კუთხის გამოთვლისა და ლილვის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირებისთვის. რობოტის მოძრაობის მიმართულება და კოორდინატი აგრეთვე გარემოს ობიექტების აღმოჩენა და აღწერა წარმოებს ტექნიკური მხედველობის სისტემის დახმარებით.

მართვის სისტემის სტრუქტურულ სქემას-თვლიანი რობოტის მართვის სისტემის შექმნის ამოცანა მდგომარეობს მმართველი ზემოქმედების გამომუშავებაში, რომელიც უზრუნველყოფს მასის ცენტრის ან პლატფორმის მიზნობრივი წერტილის გადაადგილებას სამუშაო სივრცეში მიუხედავად იმისა თუ სად იმყოფება რობოტი მოძრაობის დასაწყისში გათვალისწინებული უნდა იყოს მთელი რიგი შეზღუდვის პირობები, რომლებიც წარმოდგენილია სისტემის სხვადასხვა ცვლილების ფუნქციონალური თანაფარდობებით. მაგალითად, ტრაექტორულ ამოცანებში უფრო მნიშვნელოვან დამოკიდებულებებს წარმოადგენენ მოძრაობის ტრაექტორიების ანალიზური აღწერა. ასეთ ამოცანებში მართვის სისტემა დაიყვანება მართვის ობიექტის სტაბილიზაციამდე დავალებული ტრაექტორიის მიმართ და გრძივი გადაადგილების სასურველი რეჟიმის უზრუნველყოფა სხვა სახის შეზღუდვა შეიძლება ეხებოდეს რობოტის სასურველ ორიენტაციას და მოითხოვებოდეს მმართველი ზემოქმედების განაწილება ცალკეულ ამძრავებში საკმარისი რაოდენობა ასეთი

შეზღუდვების საშუალებას იძლევა ავტომატური მართვის კორექტული ამოცანის ჩამოყალიბების და შემდეგ დავაპროექტოთ შესაბამისი მრავალარხიანი რეგულატორი.¹⁰

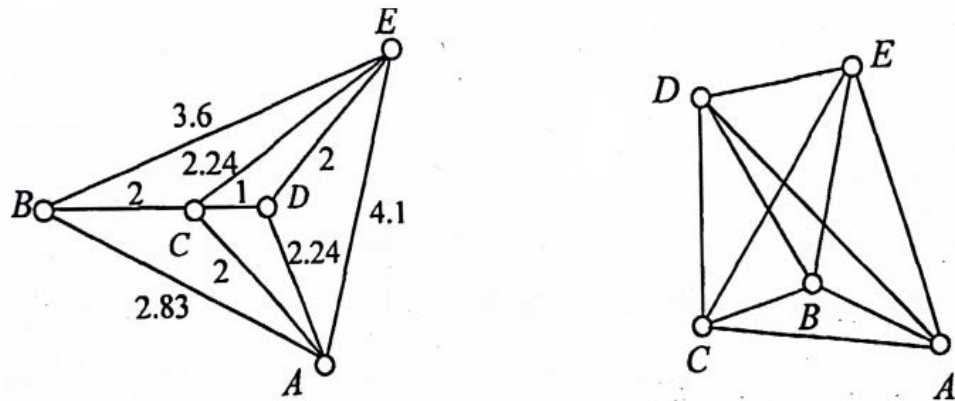
მეოთხე თავი ეხება **სასრულ ავტომატებს**- მოცემული ტექნოლოგიის ძირითად ცნებას წარმოადგენს „მდგომარეობის“ ცნება. მდგომარეობა განიხილება, როგორც ზოგიერთი აბსტრაქცია, რომელიც შემოგვყავს ალგორითმიზაციის პროცესის დასაწყისში. მაგალითად, ცალსახა შეპირისპირება თითოეულის სამართავი ობიექტის ფიზიკურ მდგომარეობასთან. როგორც წესი საწარმოო სისტემის ფუნქციონირება ვლინდება მისი მდგომარეობის ცვლილებაში, ამიტომ ალგორითმში ყოველი მდგომარეობა ხელს უწყობს ობიექტის შესაბამის მდგომარეობაში ყოფნას. ალგორითმში ახალ მდგომარეობაში გადასვლა იწვევს ობიექტის შესაბამის ახალ მდგომარეობაში გადაყვანას, რაც უზრუნველყოფს ობიექტის მართვის პროცესს. მოცემულ თავში გამოყოფილია შემდეგი ქვეთავები: **„გროვის“ ამოცანის გადაწყვეტა** - ამოცანის აღწერა: სტარტის მომენტში ჩართულია რამდენიმე შუქურა, მათი განლაგება წინასწარ არ არის ცნობილი. რობოტის ამოცანას წარმოადგენს შევიდეს კონტაქტში რომელიმე ჩართულ შუქურასთან, რის შემდეგაც ხდება მისი გამორთვა. მოითხოვება რომ ჩააქროს ყველა შუქურა. ჩაქრობის თანამიმდევრობას არ აქვს მნიშვნელობა.

თანმიმდევრობის შედგენის კრიტერიუმს წარმოადგენს დროის მინიმიზაცია, რომელიც სჭირდება რობოტს შუქურების „გროვის“ გავლისათვის შესაბამისი მარშრუტით, რადგანაც რობოტი მოძრაობს მუდმივი სიჩქარით, ამოცანის შესრულებისათვის უმოკლეს დროში აუცილებელია ისეთი მარშრუტის მოძებნა, რომ მოხდეს ყველა აქტიური შუქურის გავლა და ამასთანავე მარშრუტს უნდა ჰქონდეს მინიმალური სიგრძე.

¹⁰ Miroshnik1.V., Nikiforov V.O., Lyamin A.V. Trajectory control of mobile manipulators interacting with complex environment // 2nd ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems. Austria, 1996. P.222-227.

ერთ-ერთი შესაძლებელი მეთოდი ამოცანის გადაწყვეტის არის „უახლოესი მეზობლის“ ალგორითმის გამოყენება.¹¹ მოცემული ალგორითმის თანახმად რობოტი ირჩევს მასთან უახლოეს შუქურას, რის შემდეგაც ის იქნება ჩამქრალი, რის შემდეგ ამ ადგილიდან აირჩევა უახლოესი შუქურა.

ავაგოთ ამოცანის გრაფები G , რომელშიც ყოველ შუქურას შესაბამისი წვერო, აგრეთვე ერთი წვერო შეესაბამება რობოტის საწყის მდგომარეობას, წიბოები აერთებენ შუქურებს ერთმანეთს შორის.

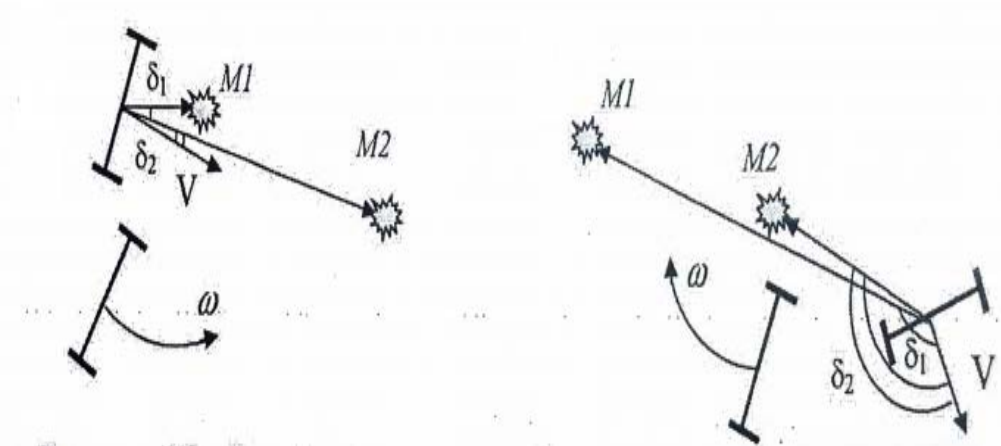


ნახ. 4 შუქურებთან გავლის გრაფის ნიმუში

მოძრაობის ტრაექტორიის კორექტირების ალგორითმი- ალგორითმი განკუთვნილია რობოტის მოძრაობის კორექტირებისათვის კარებში გავლისას, რათა თავიდან იქნეს აცილებული შუქურასთან შეჯახება. ორი აქტიური შუქურის მიერ შექმნილი კარების გავლისას რობოტი მოძრაობს შუქურებს შორის შექმნილი კუთხის ბისექტრისაზე. თუმცა შესაძლებელია კარების მიმართ რობოტის საწყისი მდებარეობა, რომ მოცემული ალგორითმით მოძრაობის ტრაექტორია ისეთი იყოს, რომ რობოტმა ძალიან

¹¹ Canudas de Wit C., Sordalen OJ. Example of piecewise smooth stabilization of drifless systems with less inputs them states // Nonlinear Control System Design Symposium. Bordeaux, France, IFAC, 1992. P.57-61.

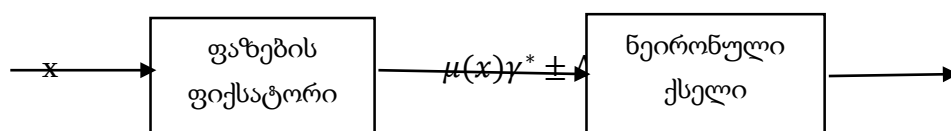
ახლოს გაიაროს ერთ-ერთ შუქურასთან ასეთ დროს არსებობს რისკი, რომ რობოტი გაედო შუქურას და მოახდინოს მისი ჩაქრობა რაც დაუშვებელია.



ნახ. 5 რობოტის მოძრაობის ვარიანტები კარებში გავლის პროცესში, მისი საწყის მდგომარეობაზე დამოკიდებულებით.

ალგორითმის ჩართვა ხდება სასრული ავტომატის გადასვლისას შუქურებს შორის გავლის მდგომარეობის აუცილებლობის შემთხვევაში ალგორითმი ახდენს კარებში გავლის კუთხის კორექტირებას მასში რომ $\pm \Delta$ ცვლილების შეტანით, რათა რობოტი გამოვიდეს შუქურასთან დაჯახების ზონიდან. ცვლილებების სიდიდის განსაზღვრა ხდება რობოტის ტექნიკური მხედველობის სისტემის საშუალებით.¹²

კორექტირების ალგორითმი სრულდება არამკაფიო ლოგიკის ალგორითმებით და ნეიროქსელური ტექნოლოგიით¹³, ალგორითმის პირობითი სტრუქტურა მოყვანილია ნახ 6



¹² Waxman A.M., LeMoigne 1.1. Scinvasan F .B. A visual navigation system for autonomous land vehicles // [BE 1. Robotics and Automation. 1987. 3(2).-P. 124-141

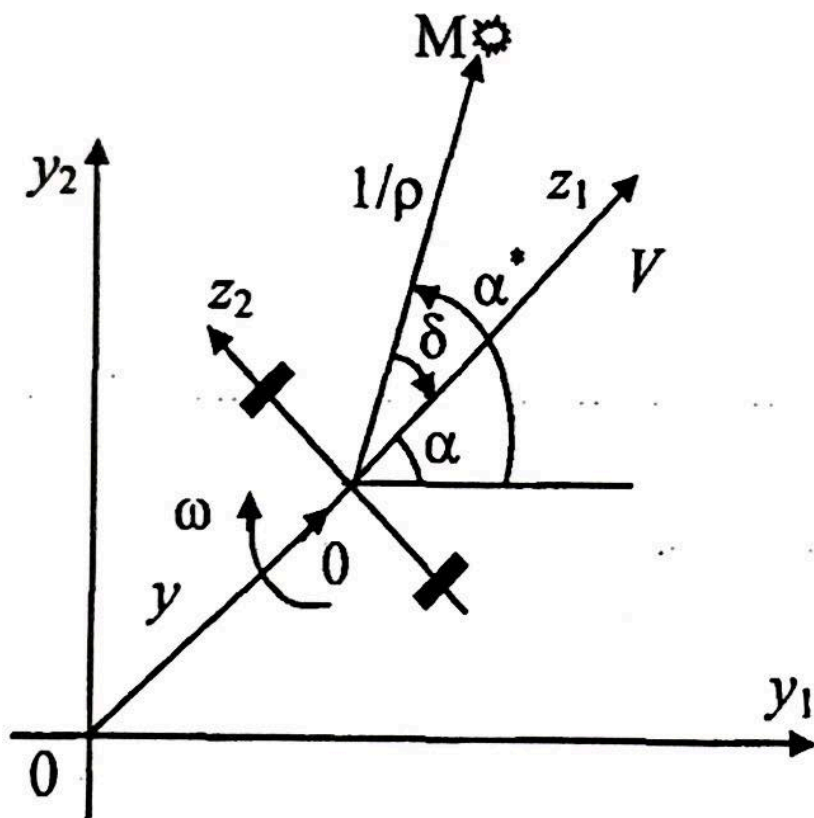
¹³ Campton G., Bastin G., D'Andera-Novel B. Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots // IEEE Trans. on Robotics and Automation. 1996 . v.12, M1. P.47-61.

ნახ. 6 ტრაექტორიის კორექტირების ალგორითმის სტრუქტურა.

მეხუთე თავი დათმობილია მართვის ალგორითმების დამუშავებაზე - ამ თავში მოყვანილია ლოკალური რეგულატორების სინთეზის პროცედურა რომლებიც უზრუნველყოფენ რობოტის დამიზნებას შუქურაზე და შუქურის გარშემო ბრუნვაზე მოძრაობის დავალებული მიმართულებით. მართვის ალგორითმების სინთეზის პროცედურაში შედის:

- დასკვნები პლატფორმის მოძრაობის პრობლემურ-ორიენტირებულ მოდელების;
- ფარდობითი და გრძივი მოძრაობების არხების დეკომპოზიცია;
- ლოკალური რეგულატორების აგება, რომლებიც უზრუნველყოფენ გადახრების სტაბილიზაციას.

მეხუთე თავში განხილული ქვეთავებია: რობოტის ორიენტაციის მართვა- მართვის ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ მოიძებნოს U_1, U_2 ძაბვები რომლებიც მოახდენდნენ კუთხურ ორიენტაციის $\delta = \alpha - \alpha^*$ კომპენსაციას (ნახ.7)



ნახ.7 რობოტის კუთხური კოორდინატები

რობოტის გრძივი გადაადგილების მართვა- მართვის ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ ვიპოვოთ ისეთი U_1, U_2 ძაბვები რომლებიც ახდენენ სიჩქარის მიხედვით გადახრის კომპენსირებას $\sigma = V(t) - V^*(t)$ მცირე გადახრებისას $\sigma \approx 0, \dot{\sigma} \approx 0$ დინამიკის განტოლება მიიღებს სახეს

$$-\ddot{\sigma} + [a_{V\omega}\rho^*V^* + a_{RIL}]\dot{\sigma} + [a_{V\sigma}a_{\sigma V} + a_{RIL}a_{V\omega}\rho^*V^*]\sigma = -a_{V\omega}\delta\dot{V}^* - [a_{V\delta}a_{\delta\omega} + a_{RIL}a_{V\omega}V^*]\delta - a_{V\sigma}a_{\sigma V}V^* - a_{V\delta}a_{\delta\omega}\rho^*V^* - a_{RIL}a_{V\omega}\rho^*(V^*)^2 + \bar{U}_\delta$$

დასკვნა

დისერტაციაში ჩატარებულია კვლევები, რომელიც უკავშირდება თვლიანი რობოტების მათემატიკურ მოდელებს აგებულია თვლიანი რობოტების მოძრაობის მართვის კანონებს იმ შემთხვევებში როდესაც მოძრაობის სასურველი ტრაექტორია ცხადად არ არის მოცემული.

დისერტაციის ძირითადი შედეგებია:

1. წარმოდგენილია თვლიანი რობოტების მათემატიკური მოდელების აგებისა და კლასიფიკაციის პროცედურები და წარმოდგენილია მათი ანალიზი. ილუსტრაციისთვის მოყვანილია კონკრეტული მაგალითები თვლიანი მობილური რობოტების კინემატიკური და დინამიკური მოდელების აგების.

2. მოყვანილია შედარებითი ანალიზი მობილური რობოტის ტექნიკური მხედველობის სხვადასხვა ოპტიკური სქემების ობიექტების კოორდინატების განსაზღვრის სიზუსტის თვალსაზრისით.

3. დამუშავებულია მობილური რობოტის მართვის სისტემის სტრუქტურა, მაღალი დონის რეგულატორი რომელსაც აქვს ორი ბლოკი: ანალიზატორი და მოძრაობის კორექციის ბლოკი

4. დამუშავებულია მართვის ლოკალური ალგორითმები, რომელიც საშუალებას იძლევა გადაწყვეტილი იქნას რობოტის მართვის ამოცანა იმ პირობებში როდესაც არ არის გარკვეული მოძრაობის ტრაექტორია.

გამოყენებულ ნაშრომთა სია

1. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими объектами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
2. Bloch A.M., McClamroch N.H., Reyhanoglu M. Controllability and stabilizability properties of nonholonomic control system // Proc. 29th Conf. on Decision and Control. Honolulu, Hawaii, 1990. -P. 13 12-13 1
3. Brockett R.W. Asymptotic stability and feedback stabilization // Differential Geometric Control Theory. Birkhauser: Boston, 1983. P.181-191.
4. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. _М.: Мир, 1989
5. Мартыненко Ю.Г. Применение теории неголономных . электромеханических систем к задачам динамики мобильных колёсных роботов // Сб. науч. статей, посв. 125-летию кафедры теоретической механики. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. С. 33 47.
6. Tilbury D., Sondalen J., Bushnell L., Sasz 8. A multi-steering trailer system: Conversion into chained form using dynamic feedback // IEEE Trans. on Robotics and Automation. 1995. V.1 1, N26. P.807-818
7. Мартыненко Ю. Г. Аналитическая динамика Аэлектромеханических систем. М.: Изд-во МЭИ, 1985
8. Мартыненко Ю.Г. Управление движением мобильных колёсных роботов // Фундаментальная и прикладная математика. М.: Центр новых информационных технологий МГУ, Издательский дом «Опфельные системы», 2005. Том 11, № 8. с. 29 80
9. О соревнованиях мобильных роботов в рамках Фестиваля // Материалы науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», 5 6 декабря 2000 г. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. С. 274 278.
10. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Lyamin A.V. Trajectory control of mobile manipulators interacting with complex environment // 2nd ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems. Austria, 1996. P.222-227.
11. Canudas de Wit C., Sordalen OJ. Example of piecewise smooth stabilization of driftless systems with less inputs than states // Nonlinear Control System Design Symposium. Bordeaux, France, IFAC, 1992. P.57-61.
12. Waxman A.M., LeMoigne I.1. Scivanan F .B. A visual navigation system for autonomous land vehicles // [BE 1. Robotics and Automation. 1987. 3(2).-P. 124-141
13. Campion G., Bastin G., D'Andera-Novel B. Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots // IEEE Trans. on Robotics and Automation. 1996 . v.12, M1. P.47-61.
14. ორამძრავიანი თვლიანი რობოტის კინემატიკური მოდელი - ვ.კეკენაძე, ი. ნატრიაშვილი// THE TWO-DIMENSIONAL ROBOT KINETIC MODEL. Kekenadze Vladimer, Natriashvili Indira
15. თვლიანი რობოტების კინემატიკური სქემების დამუშავება-ვ.კეკენაძე, ი.ნატრიაშვილი, მ.კაკოფაშვილი//DEVELOPING THE CINEMATIC SCHEMES OF THE ROBOT. Kekenadze vladimer, Natriashvili Indira, Kakofashvili Mikheil// РАЗРАБОТКА КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ РОБОТА. Кекенадзе владимир, Натриашвили Индира, Какофашвили Михаил

16. მართვის ალგორითმების დამუშავება ბორბლური რობოტებისთვის. ვლადიმერ კეკენაძე, ინდირა ნატრიაშვილი, მიხეილ კაკოჩაშვილი// DEVELOPMENT OF CONTROL ALGORITHMS FOR WHEELED ROBOTS. Kekenadze Vladimer, Natriashvili Indira, Kakochashvili Mikheil// РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОЛЕСНЫХ РОБОТОВ. Кекенадзе Владимир, Натриашвили Индира, Какочашвили Михаил

Abstract

Develop and study algorithms of mobile robots orientation and management methods

Modern mobile robots are complex software and hardware systems whose goal is to solve problems of varying complexity. The closest modifications of such robots have developed designs of wheeled parts, computing equipment, parallel navigation equipment and sensation equipment. Modern robots are characterized by good interaction with external objects, they are characterized by good flexibility to adapt to the complex movements of the external world with high functionality, flexibility and maneuverability. Such functions are necessary for non-travel transportation tasks, such as crossing a barrier, accessing hard-working jobs, driving around the contour with the toughest contour, and more. When creating an autonomous robot motion control system, one should take into account the algorithms for modeling the environment, route planning, detection of static and moving resistance, and other obstacles.

Mental robots belong to the class of non-algorithmic systems. In such systems, there are also kinematic relations, in addition to geometry. Connections that provide limitations on system points and body velocity values. The description of robots robots uses variables that are not independent. This leads to great difficulties in the analysis and synthesis of technical systems of robots.

The existence of non-analogous connections from the point of view of control theory hinders the planning and control of standard algorithms. Which are processed for manipulating robots. The task of stabilizing such systems is impartial. Non-column systems cannot be stabilized by a fixed line. Solving the problem of stabilizing a robot-robot requires the use of a different type of highway. Non-national, polling station and so on. Schilling Despite this, however, you can use a stationary highway when solving transport problems.

One of the most well-known mistakes in solving problems of robot control is based on the classification of building systems. This method involves the use of a special control device in the control system, which generates the desired trajectory in the form of a parameter.

Purpose: The purpose of the thesis is to develop methods and algorithms for controlling and targeting mobile robots. To achieve the goal, the following tasks were defined:

1. Build and analyze mathematical models of mobile robots.
2. Analysis of the optical schemes of the vision system of a mobile robot.
Building a mobile orientation and control system for the robot.
4. Synthesis and study of motion control algorithms for mobile robots.
5. Synthesis and study of robot orientation algorithms in the workspace.
6. Synthesis and study of algorithms for setting the trajectory of the robot.

Research methods. For theoretical results, the methods of differential geometry, the theory of nonlinear systems, neurotoxic technologies, graph theory and more accurate machines were used. Were developed software packages for training neural networks and the results obtained.

Scientific results:

1. The hierarchical structure of the mobile robot motion control system has been developed, which allows solving non-violent control tasks.
2. Developed algorithms for the orientation of the mobile robot using more accurate machines.
3. A method for the synthesis of a neural algorithm is proposed to correct the trajectory of the robot in order to avoid a collision with a beacon.
4. The algorithm for driving a mobile robot for two players is proposed when the trajectory of movement is not clear.

Practical value. The results of the thesis can be used to build an autonomous control system for a mobile robot that operates in conditions where the trajectory of motion is unknown.

Structure and scope of work: the thesis consists of 135 pages of introduction, five chapters, references, list of references and applications.

The attractiveness of the work. The main provisions and results of the thesis were reviewed and discussed at different stages of its development at scientific and technical conferences and seminars.

Among them:

- International Scientific Conference (Tbilisi, 28-29 September 2018);

Publications. The main results of the dissertation research

Published 4 print jobs.

Personal contribution. On the topic of the thesis published several co-authors. All results, which are the main content of this work, are accepted by the author independently.

The structure and scope of the thesis. The thesis work consists of introduction, five chapters, conclusion, 95 list of references. The main material of the work is presented on the 167th page of the printed text, illustrated with 6 tables and 38 figures.