

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

მიხეილ კაკოჩაშვილი

სფერული ფორმის რობოტების გადაადგილების მართვის
სისტემების დამუშავება და შესწავლა

სადოქტორო პროგრამა: მართვის სისტემები, ავტომატიზაცია,

ტესტ-ინჟინერინგი

შიფრი 0403

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი, D-8671, საქართველო

„-----“, 2019 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი
მართვის სისტემების დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: სტუ-ს ასოცირებული პროფესორი ვლადიმერ
კეკელიძე

რეცენზენტები: -----

დაცვა შედგება ----- წლის „-----“ -----, ----- საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის -----
----- საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს
სხომაზე, კორპუსი -----, აუდიტორია -----
მისამართი: 0174, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

თემის აქტუალურობა

სხვადასხვა ტიპის მობილურ რობოტებს შორის, სფერული რობოტების გამოყენების სფერო ბოლო წლებში საკმაოდ გაფართოვდა. ითვლება, რომ მათ ბევრი სარგებელი აქვთ. პირველ რიგში, მათ გააჩნიათ მიწასთან კონტაქტის მხოლოდ ერთი წერტილი, რომელიც გადაადგილებისას მინიმალურ ხახუნს იწვევს. ამიტომ, გადაადგილებისას ბევრი ენერგია ინახება. მეორეც, სფერული სტრუქტურა გვამძლევს საშუალებას რობოტი ადვილად ვამოდრაოთ მჭიდროდ კონსტრუირებულ სივრცეშიც. მესამეც, სფერული ეგზოსკელეტონი იცავს შიდა სტრუქტურას გარე შეტევებისა და მტერისაგან. იგი ასევე შესაძლებელია დავამზადოთ სითხე და გაზ გამძლევ კი. საბოლოოდ, სფეროს გადმოყირავების და მობილობის დაკარგვის არანაირი შანსი არ არსებობს. ეს ძალიან მნიშვნელოვანია სხვა ტიპის რობოტებისთვის, როგორცაა ჰუმანოიდი და მოხეტიალე რობოტები.

დღემდე, საკმაო რაოდენობის კვლევა არის ჩატარებული სფერული რობოტების რეალიზებისთვის. ჯონსმა შექმნა ქარზე ორიენტირებული სფერული ფორმის რობოტი მარსის პლანეტარული გამოკვლევებისათვის. ეს არის დიდი გასაბერი ბურთი დიამეტრით 6 მეტრი და სხეულის შიგნით მოთავსებულია სამეცნიერო ინსტრუმენტები. ბურთი კონტორილირებადია მარტივი სტრატეგიით, იგი ჩერდება ნაწილობრივი ჩაჩუტვით და მოძრაობას აგრძელებს სრული გაბერვით.

აღსანიშნავია ქარის საშუალებით მოძრავი სფერული რობოტები, რომლებიც ასრულებენ მცირე რაოდენობის ბრუნვას, რათა ამოძრაონ საკუთარი კონსტრუქცია. ეს ართულებს სხვადასხვა წინააღმდეგობების გადალახვას და მთაზე ასვლას. ამიტომ, მოცემული კვლევის მთავარი მიზანი არის გვლუვ, ბრტყელ ზედაპირზე მოძრავი სფერული ფორმის რობოტების კვლევა.

კომიამამ გაანალიზა სფერული ფორმის რობოტების დინამიკა და განავითარა რობოტის პროტოტიპი. პირველ რიგში, მან განაცალკევა ბრუნვის და წინსვლის მოძრაობები მეტი სიმარტივისთვის. შემდეგ

გამოიყენა ლანგრანჟის განტოლებები როტაციის განტოლებების მისაღებად. მან ასევე ჩაატარა ექსპერიმენტი მოძრაობაზე პროტოტიპი რობოტის გამოყენებით. ლაპლანტმა წარმოადგინა მათემატიკური ფონი და სიმულაციის შედეგები, რომლებიც დაადგენდა დამოკიდებულებას ბრუნვის კუთხესა და სფერული ფორმის რობოტის შიდა მასის გადანაცვლების რაოდენობას შორის. მოსალოდნელი იყო, რომ ნაკლები სიჩქარე და მოტორილების დიდი კუთხე იწვევს რობოტის მკვეთრ მოძრაობას. სპიცმიულერმა განავითარა პროტოტიპი და გამოიგონა მარტივი ღია-მარყუჟიანი რეგულაციის მეთოდი.

ადრინდელმა კვლევებმა ვერ შეძლეს მართვის ისეთი მეთოდების განვითარება, რომლებიც ხელს უწყობენ მანუალურ კონტროლს. ჯერჯერობთ, მანუალური კონტროლი ძალიან მოუქნელია წინა კვლევებში, მაშინაც კი, როდესაც უკუკავშირს იძლევა ადამიანი ოპერატორი. უკუკავშირი ამ შემთხვევაში ნიშნავს რობოტის მდგომარეობის შეგრძნებას ადამიანის თვალით და სათანადოდ მის მართვას.

უკანასკნელ ხანებში გამოჩნდნენ მნიშვნელოვნად განსხვავებული რობოტები, რომლებიც განსხვავდებიან როგორც კონსტრუქციით ასევე დანიშნულებების მიხედვით. კერძოდ მობილური რობოტების ცალკეული კლასების ფორმირება, რომელთა მოძრაობა ეფუძნება გორების პრინციპს. მათ შორის ინტერეს წარმოადგენს სფერული ფორმის რობოტების განხილვა, რომელთაც გააჩნიათ ისეთი უპირატესობები რეალიზაციისას როგორც არის რობოტის გერმეტულობა, შეუღლებისა და შესახსრების არ არსებობა, რომლებიც არიან უხერხული სხვადასხვა მოქმედებების მიმართ. აპარატის ასეთი ფორმა მოსახერხებელია გამოყენებული იქნას კვლევის და დაზვერვის მიზნებისათვის. მაგალითად ისეთ ზონებში სამუშაოდ როგორც არის აგრესიული გარემო. ასეთი აპარატების მოძრაობაში მომყვანი შიდა მექანიზმების რეალიზაციის სპექტრი ასევე ძალზედ ფართოა. რობოტების უმრავლესობა იყენებს სისტემის მასის ცენტრის წანაცვლების პრინციპს. ინტერესს იწვევენ ასევე ის აპარატები, რომლებიც მოძრაობენ კორპუსის

დეფორმაციის პრინციპით. მოცემული სამუშაო ეძღვნება სხვა პრინციპს გიროსტატის პრინციპს, რომელიც გულისხმობს სფეროს შიგნით ამძრავების სისტემის არსებობას, რომლებიც უზრუნველყოფენ შიდა კინეტიკური მომენტის შექმნას. კერძოდ განხილულია რობოტის მაგალითი, რომლის შიგნით სამ ურთიერთმართობული ღერძებზე განლაგებულია სამი მქნევარა, რომლებიც ქმნიან მართვად მომენტს.

ამასთან ერთად, ბოლო ხანებში გამოჩნდნენ რიგი ნაშრომები, რომლებიც გვთავაზობენ ხახუნის მოდელების არსებით ცვლილებებს, რომლებიც ავსებენ და განაზოგადებენ კულონის მშრალი ხახუნის მოდელებს. განზოგადება ხდება იმის ხარჯზე, რომ კულონური წერტილოვანი ურთიერთქმედება მგორავი. სხეულის სიბრტყესთან იცვლება ურთიერთქმედებით რაიმე გარემოს გასწვრივ . ამ მიდგომის მაგალითს წარმოადგენს შეხების ლაქა წრის სახით , ასეთი მოდელი პირველად წარმოდგენილი იყო კონტენსუს მიერ, ხოლო შემდეგ განავითარა ვ.ფ. ჟურავლიოვამ. ასეთი მიდგომებისას შეიძლება ვილაპარაკოთ სფეროს სფერული გარსის ბრტყელ დეფორმაციაზე, კონტაქტის სიახლოეს აბსოლიტურად მყარ სიბრტყესთან. თუმცა არსებობს სხვა მიდგომაც, რომლის დროს კონტაქტის ლაქა წარმოადგენს არა ბრტყელ გარემოს არამედ სფერულ სეგმენტს , რაც შეესაბამება როგორც სფეროს დეფორმაციას ასევე სიბრტყის დეფორმაციას კონტაქტის სიახლოეს. ასეთი მოდელი ჩამოყალიბებული და შემდგომ განვითარებული იქნა ა.ვ.კარაპეტიანის მიერ შრომებში. საინტერესოა, რომ ეს მოდელი დამოკიდებულია ორ პარამეტრზე და მათი მნიშვნელობების განსაზღვრის შემდეგ გადადის კულონისა და კონტენს-ჟურავლიოვამ მოდელებში. მოცემულ ნაშრომში გამოიყენება ხახუნის ორპარამეტრიანი მოდელი.

სადისერტაციო ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს სფერული ფორმის რობოტების მართვისა და მოძრაობების მეთოდებისა და ალგორითმების დამუშავება.

ნაშრომში გაანალიზებულია სფერული ტიპის რობოტები და ნაჩვენებია რომ სხვადასხვა ტიპის მობილურ რობოტებს შორის, სფერული რობოტების მოწონებამ მოიმატა ბოლო ხანებში. ითვლება, რომ მათ ბევრი სარგებელი აქვთ. პირველ რიგში, მათ გააჩნიათ მიწასთან კონტაქტის მხოლოდ ერთი წერტილი, რომელიც გადაადგილებისას მინიმალურ ხახუნს იწვევს. ამიტომ, გადაადგილებისას ბევრი ენერგია ინახება. მეორეც, სფერული სტრუქტურა გვადლევს საშიალებას რობოტი ადვილად ვამოდრაოთ ვიწრო ადგილებში. მესამე, სფერული გარსი იცავს შიდა სტრუქტურას გარე შეტევებისა და მტვრისაგან. იგი ასევე შესაძლებელია გახდეს სითხე და გაზგაუმტარი. ასევე სფეროს გადაყირავების და მობილობის დაკარგვის არანაირი შანსი არ არსებობს. ეს ძალიან მნიშვნელოვანია სხვა ტიპის რობოტებისთვის, როგორცაა ჰუმანოიდი და მოხეტიალე რობოტები.

არსებობს რამდენიმე პრობლემა სხვა კვლევებში. პირველ რიგში, დინამიკის ანალიზმა უგუვებელყო მოტორიალე სფერული სხეულის შესაძლებელი ჰიროსკოპის ეფექტი. ეს ეფექტი წარმოიქმნება სფერული სხეულის როტაციისაგან სფერული რობოტის მოძრაობის დროს. მიუხედავად იმისა, რომ ეს ეფექტი შეიძლება არ იყოს გათვალისწინებული დაბალი სიჩქარისას, მისი უგულველყოფა არ შეიძლება მაღალი სიჩქარისას. სხვა კვლევებმა ასევე ვერ შეძლეს მართვის ისეთი მეთოდების განვითარება, რომლებიც ხელს უწყობენ მანუალურ კონტროლს.

მამასადამე, ამ კვლევის მიზანია განავითაროს დინამიკური მოდელი და ასევე სათანადო მართვის მეთოდები, რომლებიც ხელს შეუწყობენ ბრტყელ ზედაპირზე მანუალურ კონტროლს. ეს კვლევა კონცენტრირებულია დინამიკის მოდელის განვითარებაზე, განსაკუთრებით ტრიალის, რომელიც ითვალისწინებს ჰიროსკოპის ეფექტს, რობოტის პროტოტიპის შექმნაზე და კონტროლის ისეთი მეთოდები შექმნაზე, რომლებიც გაითვალისწინებენ მანუალურ მართვას. რობოტი-სფეროს მოყვანილი კონსტრუქციებისათვის გადაწყვეტილია დინამიკის უკუ ამოცანა

წარმოდგენილ ხახუნის ორპარამეტრიან მოდელში. მაგალითის სახით განხილული იყო ე.წ. ბაზური ალფავიტური მოძრაობა, ამასთან ერთად შედეგები შეიძლება გავრცელდეს ნებისმიერ მრუდწირულ ტრაექტორიაზე. ნაჩვენები იყო, რომ მოძრაობა არ არის ყოველთვის შესაძლებელი, რადგანაც არსებობს უძრაობის ხახუნის მომენტი, რომელიც აუცილებლად უნდა იყოს დაძლეული მოძრაობის დაწყებისათვის. რეალური ელექტროძრავებისათვის, რომლებსაც მოძრაობაში მოჰყავთ მქნევარები, მოყვანილია პარამეტრების არე სადაც შესაძლებელია მოძრაობა.

ამასთან ერთად რეალური ექსპერიმენტები აჩვენებენ, რომ რეალური პარამეტრისათვის მოძრაობის მაღალი სიზუსტით აღწერისათვის საჭიროა განხილული იყოს არაბალანსირებადი სფეროს მოდელი ე.ი. უარი უნდა ვთქვათ სისტემის მასის ცენტრის დამთხვევისა სფეროს გეომეტრიულ ცენტრთან.

დასმული მიზნის მისაღწევად გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. სფერული ფორმის რობოტების მათემატიკური მოდელების აგება და ანალიზი.
2. სფერული ფორმის რობოტების ორიენტაციისა და მართვის სისტემების სტრუქტურის აგება.
3. სფერული რობოტების სხვადასხვა ტრაექტორიით მოძრაობის ალგორითმების სინთეზი და კვლევა.

თეორიული შედეგების მიღებისათვის გამოყენებული იქნა არაწრფივი სისტემების თეორიული მეთოდები. დინამიკის ანალიზისათვის გამოყენებული იქნა ლანგრანჟის განტოლებები.

მიღებული შედეგების სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

1. დამუშავებული იქნა სფერული ფორმის რობოტების მართვის იერარქიული სისტემა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს გადავწყვიტოთ მართვის არასტანდარტული ამოცანები.

2. დამუშავებული იქნა სფერული ფორმის რობოტების მოძრაობის ალგორითმები.

3. შემოთავაზებულია ორ ამპრავიანი სფერული რობოტის მოძრაობის კონტროლისა და მართვის ალგორითმები.

ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა: სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს 105 გვერდს. იგი შედგება შესავლის, ხუთი თავის და დასკვნითი ნაწილისაგან. ნაშრომს თან ერთვის 48 ნახაზი. გამოყენებული ლიტერატურის სია წარმოდგენილია 24 დასახელებით.

ნაშრომის მოკლე დახასიათება

შესავალში გადმოცემულია დისერტაციის თემის აქტუალობა, მიზანი და გადასაწყვეტი ამოცანები. აგრეთვე ნაშრომის მოკლე შინაარსი.

პირველი თავი მოიცავს ლიტერატურის მიმოხილვას. მასში აღწერილია სფერული ფორმის რობოტების ისტორია, შექმნილი და გამოყენებული რობოტები, მათი ნაკლოვანებები და უპირატესობები.

მეორე თავში განხილულია სფერული ფორმის რობოტების დინამიკა და მართვა. განვიხილეთ ჰორიზონტალური მოძრაობა, ენერგიები (პოტენციური, კინეტიკური, როტაციული) სფეროსათვის და პენდულუმისთვის, შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგი ფორმულებით

$$U_1 = 0, U_2 = -M_2 g e \cos(\theta_1 + \theta_2), K_1 = \frac{1}{2} M_1 (r w_1)^2 \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} M_2 \{ (r w_1 - e \cos(\theta_1 + \theta_2) (w_1 + w_2))^2 + (e \sin(\theta_1 + \theta_2) (w_1 + w_2))^2 \} \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{1}{2} J_1 w_1^2, T_2 = \frac{1}{2} J_2 (w_1 + w_2)^2 \quad (3)$$

ლანგრანჟის ფუნქცია შეიძლება გამოვთვალოთ შემდეგი ფორმულით

$$L = K_1 + K_2 + T_1 + T_2 - U_1 - U_2 \quad (4)$$

ლანგრანჟის მოძრაობის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial w_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -T + T_f \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial w_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = T \quad (6)$$

სადაც t - არის დრო, T - არის სფეროსა და პენდულუმს შორის განხორციელებული ბრუნვა.

T_f ბრუნვა წარმოქმნილი სფეროსა და ზედაპირს შორის არსებული წინაღობით. ამის გათვალისწინებით ჩვენ ვიღებთ

$$\begin{aligned} -T + T_f = & a_1(J_1 + J_2 + M_1r^2 + M_2r^2 + M_2e^2 - 2M_2re \cos(\theta_1 + \theta_2)) + \\ & a_2(J_2 - M_2re \cos(\theta_1 + \theta_2) + M_2e^2) + M_2re \sin(\theta_1 + \theta_2) + \\ & + (\omega_1 + \omega_2)^2 + M_2re \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} T = & a_1(J_2 - M_2re \cos(\theta_1 + \theta_2) + M_2e^2) + a_2(J_2 + M_2e^2) + \\ & M_2ge \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (8)$$

განხილული გვაქვს აღმავალი და დაღმავალი მოძრაობები. როდესაც ჰორიზონტალური მოძრაობის განტოლება ცნობილია, მაშინ ადვილად მივიღებთ აღმავალი და დაღმავალი მოძრაობის განტოლებას. მიღებულია, რომ ერთადერთი განსხვავება ჰორიზონტალურ მოძრაობას და აღმავალ და დაღმავალ მოძრაობას შორის არის გრავიტაციის მიმართულება, მაშინ საჭიროა როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ მცირე ცვლილება U_1 და U_2 მნიშვნელობებში

$$U_1 = -M_1gr\theta_1 \sin \alpha \quad (9)$$

$$U_2 = -M_2gr\theta_1 \sin \alpha - M_2ge \cos(\theta_1 + \theta_2 + \alpha) \quad (10)$$

სადაც α არის გადახრის მიმართულება

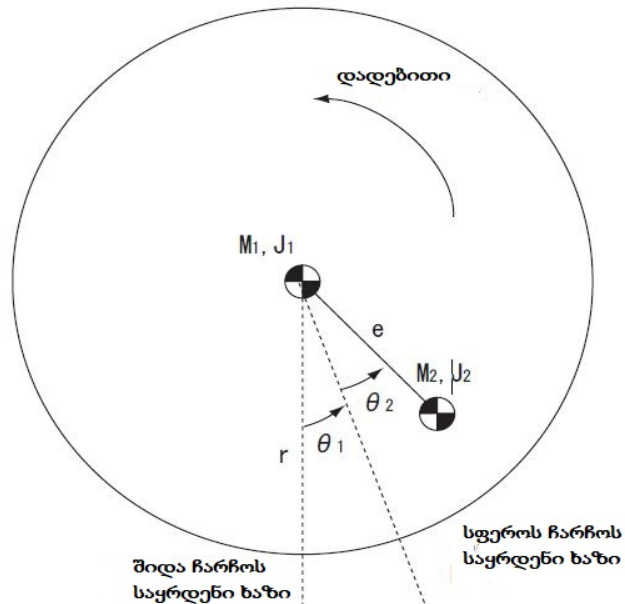
$$\begin{aligned} -T + T_f = & a_1(J_1 + J_2 + M_1r^2 + M_2r^2 + M_2e^2 - 2M_2re \cos(\theta_1 + \theta_2)) + \\ & a_2(J_2 - M_2re \cos(\theta_1 + \theta_2) + M_2e^2) + M_2re \sin(\theta_1 + \theta_2)(w_1 + w_2)^2 + M_2ge \sin(\theta_1 + \\ & \theta_2) - (M_1 + M_2)gr \sin \alpha \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T = & a_1(J_2 - M_2re \cos(\theta_1 + \theta_2) + M_2e^2) + a_2(J_2 + M_2e^2) + \\ & M_2ge \sin(\theta_1 + \theta_2 + \alpha) \end{aligned} \quad (12)$$

განხილული გვაქვს დაბრკოლების გადალახვა. ნახაზი გვიჩვენებს სფერული ფორმის რობოტის წინააღმდეგობის აღმოჩენის სტატიკურ კონფიგურაციას. აქ გათვალისწინებული არ არის მოცურება და მოძრაობა. იმისათვის რომ გადალახოს დაბრკოლება მამოძრავებელი ბრუნვა უნდა

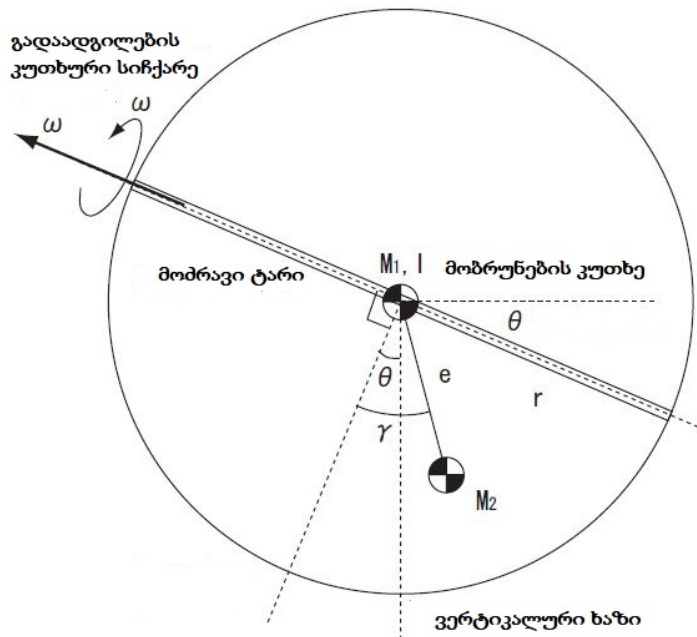
იყოს იმაზე დიდი ვიდრე გრავიტაციის მიერ გათვლილი ბრუნვაა, როგორც ნაჩვენებია შემდეგ განტოლებებში.

$$\begin{aligned}
 M_2 g e \sin \theta &> (M_1 + M_2) \sqrt{r^2 - (r-h)^2} \\
 M_2^2 e^2 \sin^2 \theta &> (M_1 + M_2)^2 \{r^2 - (r-h)^2\} \\
 (r-h)^2 &> r^2 - \frac{e^2 \sin^2 \theta M_2^2}{(M_1 + M_2)^2} \\
 h &< r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{e \sin \theta M_2}{M_1 + M_2}\right)^2} \\
 h_{max} &= r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{e M_2}{M_1 + M_2}\right)^2} \quad (13)
 \end{aligned}$$



ნახ.1: სფეროს მოდელირება

მოძრაობის გრეხვის ძალა მეტია წინააღმდეგობის ძალაზე. განხილულია მართვადი მოძრაობის მოდელირების საკითხი.



ნახ.2: მართვის მოდელირება

θ : სფეროს ბრუნვადი კუთხე

γ : ქანქარის სფეროსთან დაკავშირებული დახრის კუთხე

w : მართვადი სფეროს კუთხოვანი ნიშნული

Ω : მართვის კუთხოვანი ნიშნული

r : სფეროს რადიუსი

e : მანძილი სფეროს ცენტრიდან ქანქარებს შორის

I : სფეროს ინერციის მომენტი ბრუნვადი ღერძის გარშემო

M_1 : სფეროს მასა

M_2 : ქანქარის მასა

g : გრავიტაციის აჩქარება

სიმარტივისათვის, ქანქარის დახრილი კუთხეების გვერდები სფეროსთან მიმართებაში სახელდება როგორც γ ამ ფურცელზე ეწოდება „მართვადი“ კუთხე. ნიშანდობლივია, რომ მთავარი ღერძის მიდრეკილებას ანუ θ -ს ეწოდება ბრუნვადი კუთხე.

განხილული გვაქვს წრფეზე მოძრაობა. ვგულისხმობთ, რომ სფეროს ცენტრის ტრაექტორია ემთხვევა Sx ღერძის ნაწილს. ამ შემთხვევაში $v_0 = v_{0x}a$ არსებობიდან გამომდინარე და $v_0 = [w; e_z]$ დამოკიდებულებიდან

ვლებულობთ $w = w(t)e_y$. ζ ვექტორის განსაზღვრების თანახმად და პუასონის ფორმულიდან მივიღებთ, რომ $\zeta=0$. თუ ეს ასე არ არის, მაშინ საჭიროა სფერო მოვაბრუნოთ ადგილზე მოცემული პირობის მიღწევამდე. აღსანიშნავია, რომ წონასწორობის მდგომარეობიდან მოძრაობის დაწყებისას პირობა $\zeta_y = 0$ სრულდება რაც ნიშნავს რომ ასეთი მოძრაობა როგორც ალფავიტური გამართლებულია. წინა პუნქტების ანალოგურად შეიძლება მივიღოთ, რომ:

$$\zeta_x = A \sin \theta, \quad \zeta_z = A \cos \theta, \quad \frac{d}{dt} \theta = w(t), \quad A = \|\zeta\|, \quad (14)$$

სადაც Θ არის კუთხე ζ ვექტორსა და ვერტიკალს შორის. კინეტიკური მომენტის განტოლება კოორდინატთა აბსოლიტურ სისტემაში შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$\frac{d}{dt} [k + ((A^2 + 1)w + 2w\zeta_z)e_y] = -b \left(w^2 + \frac{g}{R} \right) \zeta_x e_y \quad (15)$$

ცხადია აზრი აქვს განვიხილოთ განტოლება პროექციის Sx ღერძზე, თუ განვიხილავთ მოძრაობას წონასწორობის მდგომარეობიდან, მაშინ განტოლება შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგ სახეში:

$$\frac{dk_y}{dt} = -b \left[(A^2 + 1) \frac{dw}{dt} + 2 \frac{dw}{dt} \zeta_z - \zeta_x \left(w^2 + \frac{g}{R} \right) \right] \quad (16)$$

აღსანიშნავია, რომ გამოსახულების მარჯვენა ნაწილში არის ცნობილი დროის ფუნქცია $\mu(t)$ მოცემული $w(t)$ და $\theta(t)$ ფუნქციების პირობებში. ამიტომ შეგვიძლია განვსაზღვროთ ფუნქცია: $\varphi(t) = \int_0^t \mu(\tau) d\tau$

ეს ფუნქცია ცხადი სახით იქნება:

$$\varphi \left(\theta, \frac{d\theta}{dt}, \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) = \varphi_0 - b \frac{d\theta}{dt} (A^2 + 1) + A \frac{d\theta}{dt} \cos \theta + A \int_0^t \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \cos \theta - \frac{g}{R} \sin \theta \right) d\tau \quad (17)$$

შემოვიტანოთ e ვექტორი ესაა e_y ვექტორი მოძრავ კოორდინატთა სისტემაში შეგვიძლია დავწეროთ ვექტორული განტოლება α მოძებნისათვის მოძრავ ბაზისში: $Ca = (\varphi E - wI)e$

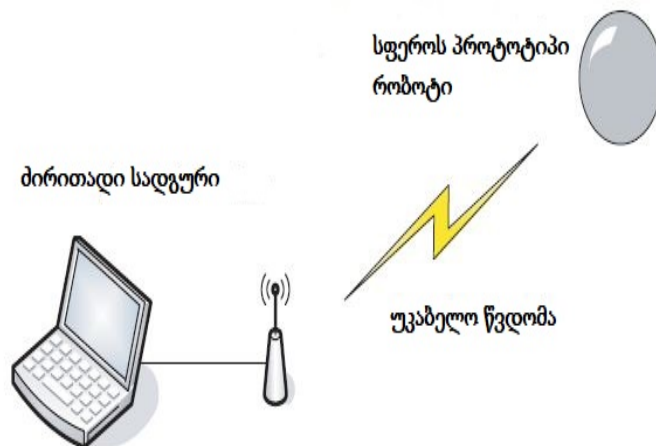
შეგვიძლია გავაკეთოთ ერთი მნიშვნელოვანი რემარკი: $(\zeta; e_y) = 0$ პირობიდან და D ოპერატორის ორთოგონალობიდან გამომდინარეობს, რომ $(e; \zeta) = 0$.

განვიხილოთ კუთხური სიჩქარის სამკუთხა პროფილი (ე.ი. პირობა $w(t) = E(T - |t - T|)$) კუთხური აჩქარებით, რომელიც ტოლია E მოდელის. მოძრაობის დრო არის $2T$ ტოლი. მოძრაობის პირველი ნაწილი არის გაქანება, ხოლო მეორე დამუხრუჭება. დამატებით შეგვიძლია ვიგულისხმოდ, რომ $\theta(0) = -\pi/2$, რაც შეესაბამება რობოტის მასის ცენტრის წონასწორობის ქვედა მდებარეობას დროის საწყის მომენტში. ცხადია, რომ დიდ მონაკვეთზე მოძრაობისას ხდება რამდენიმე ასეთი მოძრაობა Θ კუთხისათვის $w(t)$ ასეთი არჩევისას სამართლიანია გამოსახულება

$$\theta(t) = \begin{cases} \frac{Et^2}{2} - \frac{\pi}{2}, \\ -\frac{\pi}{2} - Et^2 + 2ETt - \frac{Et^2}{2}, \text{ როცა } t \in [T, 2T] \end{cases} \quad (18)$$

განხილულია რობოტის დაბალი, საშუალო და მაღალი სიჩქარეებით მოძრაობის შემთხვევები.

მესავე თავი ეძღვნება პროტოტიპი რობოტის აღწერას და ტექნიკურ მახასიათებლებს. პროტოტიპი რობოტის შესწავლის მთავარი მიზანია რობოტის მართვაში გამოყენებული კონტროლის მეთოდების შესწავლა და ანალიზი. სისტემა შედგება ორი მთავარი კომპონენტისგან: პროტოტიპი რობოტი და ძირითადი სადგური. იგი აღჭურვილია საბორტე კომპიუტერით, დენის წყაროთი, კომუნიკაციის სისტემით და რამდენიმე სენსორით, რომლის მონაცემებიც საჭიროა უკუკავშირის კონტროლისთვის.



ნახ.3: სისტემის მიმოხილვა

სფერული რობოტის შიგნით შეგვიძლია მოვათავსოთ: უკაბელო სისტემა (ბლუთუზ ადაპტერები), მაგნიტური კომპასი, სამღერძიანი ამჩქარებელი (აქსელომეტრი), ჰიროსკოპი (გამოიყენება სფეროს ბრუნვის კუთხის სიჩქარის გამოსავლენად), სერვო ძრავა (სფერული რობოტის შიგნით მყოფი ქანქარის გადასახრელად ორი ავტომატური ძრავა გამოიყენება. ძრავები ქანქარაზეა დამონტაჟებული), DC ძრავი (DC ძრავი უწყვეტად ამოძრავებს ქანქარას, იმისათვის რომ რობოტმა მოახერხოს გადაადგილება), ბატარეა, ძრავის კონტროლერი (გამოიყენება სიჩქარის და ბრუნვის გასაკონტროლებლად, რომელიც დაკავშირებულია მთავარ კომპიუტერსა და DC ძრავს შორის) და ასევე სხვა ხელსაწყოები საჭიროებისამებრ.

მეოთხე თავი ეძღვნება კონტროლის მეთოდებს და მართვას. სფეროს ფორმის რობოტის ხელით მართვა საკმაოდ რთულია სფერული რობოტის მოყვანილობის გამო. რობოტი აჩვენებს მოუხერხებელ მოძრაობას როდესაც არ ხორციელდება დამხმარე მართვის დამხმარე მეთოდები, მაშასადამე საჭიროა კონტროლის გარკვეული დამხმარე სისტემა. ამის მისაღწევად ორი სირთულე უნდა მივიღოთ მხედველობაში. პირველი მართვის რელიეფის პირობები ზოგჯერ არ არის წინასწარ განსაზღვრული. მაგალითად რელიეფი შეიძლება იყოს აღმართი, დაღმართი, ქვიანი ან სწორი. ეს ნიშნავს, რომ დინამიური მოდელი ხშირად არ არის საკმარისი რობოტის სამართავად. განსაკუთრებით ხახუნი T_f ვერ განისაზღვრება თუ რელიეფის პირობები არ არის განსაზღვრული. მაშასადამე, კონტროლის დამხმარე მეთოდები სხვადასხვა ტიპის ზედაპირზეც ეფექტური უნდა იყოს.

კიდევ ერთი დაბრკოლება გახლავთ ის, რომ სენსორები ვერ დამონტაჟდება სფეროს ზედაპირზე რომ განვსაზღვროთ სამოძრაო ზედაპირი. ყველა ელექტრული მოწყობილება და სენსორები უნდა დამონტაჟდეს რობოტის ქანქარაზე მავთულებით, ეს შეუძლებელს ხდის სფერული ფორმის რობოტის ზედაპირზე სენსორების დამონტაჟებას. მაშასადამე ქანქარის სტატუსი სფეროსთან მიმართებაში და გარე

სამყაროსთან შეიძლება იყოს გაზომვადი, მაგრამ არა სფეროსთან მიმართებაში რომელიც მოძრაობს ზედაპირზე.

აქედან გამომდინარე არ არის შესაძლებელი სფეროს კონტროლის მართვის გამოყენება მიწასთან მიმართებაში. მაგალითად შეუძლებელია გავზომოთ პარამეტრი θ_1 -ით, რომელიც არის სფეროს მობრუნების კუთხე ზედაპირთან მიმართებაში. მიუხედავად ამისა მხოლოდ θ_2 შეიძლება იყოს გაზომვადი, რომელიც არის ქანქარის მობრუნების კუთხე სფეროსთან მიმართებაში. მაშასადამე, საჭიროა ზოგიერთი კონტროლის მეთოდები, რომლებიც იყენებენ მხოლოდ სფეროს შიდა მდგომარეობას, ზუსტად კი ქანქარის ბრუნვის კუთხეს სფეროს მიმართ.

ნაშრომში მოყვანილია კონტროლის სამი მეთოდი:

- კონტროლი ძრავის ძაბვის დახმარებით
- კონტროლი ძრავის ბრუნვის სიჩქარით
- კონტროლი ძრავის მხოლოდ ბრუნვით

კონტროლის პირველ ტიპს არ სჭირდება დამხმარე სისტემების კონტროლი. DC ძრავის ძაბვა არის ყველაზე დაბალი დონე რობოტისა ყოველგვარი პროცესის გარეშე. დანარჩენი ორი კონტროლის მეთოდს გარკვეულწილად ჭირდება დამხმარე მეთოდები. ეს სისტემა ანალიზებს მიზანმიმართული ბრუნვის სიჩქარეს ან ბრუნვას, ბრუნვის ძალას DC ძრავზე გამოყენებული ძაბვის რეგულირებით.

იმისათვის, რომ გავაანალიზოთ მიწოდების ძაბვა და სფეროს ბრუნვა, ძრავა უნდა იყოს მოდელირებული. DC ძრავის მოდელირება შეიძლება განვსაზღვროთ ორი მთავარი განტოლებით. პირველი ეს არის ძაბვის განტოლება, მეორე ბრუნვისა და დენის ნაკადის.

$$V = IR + K_e w \quad (19)$$

$$T = K_t I \quad (20)$$

სადაც:

I : დენის ნაკადი ალმატურაში

R : ძრავის წინააღმდეგობის ძალა

V : მიწოდებული ძაბვა

K : მუდმივი სიჩქარე

T : წარმოქმნილი მგრები ძალა

W : ბრუნვის სიჩქარე

K_t : მუდმივი ბრუნვა

I-ის ამოღებით განტოლებიდან, შესაძლებელია მივიღოთ შემდეგი განტოლება

$$V = \frac{T}{K_t}R + K_e w_2 \quad (21)$$

$$T = \frac{K_t}{R}(V - K_e w_2) \quad (22)$$

განხილული გვაქვს კონტროლის მეთოდი. კვლევებმა გვიჩვენეს, რომ სფეროს მოძრაობა შეიძლება იყოს მუდმივი, იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც ბრუნვის პარამეტრები არ არის მუდმივი. მაშასადამე საკმარისია კონცეტირება მოვახდინოთ ქანქარის კონტროლზე ან ძრავაზე სფეროსთან მიმართებაში. ეს თავი აღწერს ძრავის სიჩქარისა და ბრუნვის კონტროლს.

ბრუნვის სიჩქარის კონტროლის მისაღწევად, მიწოდებული ძაბვის კონტროლის გამოყენებით. PID გამოიყენება ოპტიკური გაზომვის კოდირებით. თავდაპირველად გადაცემათა ფუნქცია V გარდაიქმნება θ_2 -ში:

$$\frac{\theta_2}{V} = \frac{K_t(-sT_v + 2egM_2 + s^2(J_1 + 2J_2 + r^2M_1 + (2e^2 - 3er + r^2)M_2))}{s(A + Bs + Cs^2 + Ds^3)} \quad (23)$$

პროტოტიპისთვის, გარდაქმნის ფუნქცია არის:

$$\frac{\theta_2}{V} = \frac{14.35 + 0.8786s + 1.721s^2}{38.34s + 88.31s^1 + 0.5161s^2 + s^3} \quad (24)$$

მაშასადამე, გარდაქმნის ფუნქცია V -დან ძრავის ბრუნვის სიჩქარემდე, w_2 არის:

$$\frac{\Omega_2}{V} = \frac{14.35 + 0.8786s + 1.721s^2}{38.34s + 88.31s^1 + 0.5161s^2 + s^3} \quad (25)$$

სადაც $\Omega_2 = s\theta_2$, w_2 ლაპლანის გარდაქმნა.

განხილულია სფეროს ხახუნი ზედაპირთან. ხახუნი იგულისხმება, როგორც ხახუნი რობოტსა და იმ ზედაპირს შორის, რომელზეც მოძრაობს რობოტი. სფეროს ბრუნვის ხახუნის ძალა T_f შედგება ორი ძირითადი

მართვადი ტიპისგან. პირველი კულონის ხახუნის ძალა, რომელიც თითქმის ყოველთვის მუდმივია ბრუნვის სიჩქარის ცვლილების მიუხედავად. მეორე არის ბლანტი ხახუნი ძალა, რომელიც არის სფეროს სიჩქარის პროპორციული. T_f გამოისახება შემდეგი ფორმულით

$$T_f = T_c + T_v w_1 \quad (26)$$

სადაც T_c არის კულონის ხახუნი, რომელიც შეიძლება იყოს როგორც დადებითი ასევე უარყოფითი, რაც დამოკიდებულია ბრუნვის მიმართულებაზე, ხოლო T_v არის ბლანტი ხახუნის კოეფიციენტი, რომელიც არის უარყოფითი ნიშნით.

გარდა ზემოთ ჩამოთვლილისა განხილულია სხვა დამხმარე კონტროლის საშუალებები. როგორცაა მართვის კუთხის შეზღუდვა და ძრავის ლიმიტის განსაზღვრა.

მეხუთე თავი ეძღვნება სფერული ფორმის რობოტის გადახრის კონტროლის მეთოდებს. სფერული ფორმის რობოტის გადახრის კონტროლი უკავშირდება ორ საკითხს. პირველი როგორ მოხდეს რობოტის გადახრა და მეორე როგორ მოხდეს რობოტის გადატრიალების კუთხის სტაბილიზაცია. დაბალი სიჩქარე და ქანქარის დიდი გადახრის კუთხეების შედეგია გადახრის უფრო დიდი ნორმა, სახელდობრ კი უფრო მცირე ბრუნვის რადიუსი და პირიქით, მაღალი სიჩქარე და მცირე გადახრის კუთხეების შედეგია გადახრის მცირე ნორმა, სახელდობრ უფრო დიდი ბრუნვის რადიუსი.

გადახრაში არის ერთი სირთულე. მობრუნების (მოძრაობის) რადიუსი ასევე დამოკიდებულია გარსის ტრიალის კუთხეზე. მიუხედავად იმისა, რომ ქანქარის გადახრის კუთხე არის დარეგულირებელი, სფეროს სფერული ფორმა მის რხევას იწვევს, რაც მუდმივად ცვლის მოძრაობის რადიუსს გადახრისას.

ეს სიტუაცია არ არის კარგი გადახრის კონტროლისათვის და ყველანაირი რხევა როგორმე თავიდან უნდა იქნას აცილებული სტაბილური გადახრის მისაღწევად.

მიუხედავად ამისა, როდესაც მოძრაობის სიჩქარე მაღალია, ჰიროსკოპის სტაბილიზაციის ეფექტის დამსახურებით, სტაბილურია გადატრიალების კუთხე. მაშასადამე ეს ქვეთავი წარმოგვიდგენს დაბალი სიჩქარით მოძრაობაზე დაფუძნებულ სტაბილიზაციის მეთოდს. დაბალ სიჩქარიან ოპერაციისას სტაბილური გადახრის მისაღწევად, გადახრის კუთხე უნდა იყოს სტაბილიზირებული. მაგრამ, ეს სტაბილიზაციის კონტროლი შეიძლება გამოირთოს როდესაც სფერო მიაღწევს მოძრაობის გარკვეულ სიჩქარეს.

$$T_f - T_s = a_{1s}(J_{1s} + J_{2s} + M_1 r^2 + M_2 r^2 + M_2 e^2 - 2M_2 r e \cos(\theta_{1s} + \theta_{2s})) + a_{2s}(J_{2s} - M_2 r e \cos(\theta_{1s} + \theta_{2s}) + M_2 e^2) + M_2 r e \sin(\theta_{1s} + \theta_{2s}) + (\omega_{1s} + \omega_{2s})^2 + M_2 r e \sin(\theta_{1s} + \theta_{2s}) \quad (27)$$

$$T_s = a_{1s}(J_{2s} - M_2 r e \cos(\theta_{1s} + \theta_{2s}) + M_2 e^2) + a_{2s}(J_{2s} + M_2 e^2) + M_2 g e \sin(\theta_{1s} + \theta_{2s}) \quad (28)$$

r : სფეროს რადიუსი

e : სფეროსა და ქანქარის ცენტრებს შორის დაშორება

θ_{1s} : გადახრის კუთხე

θ_{2s} : ქანქარის გადახრის კუთხე

ω_{1s} : სფეროს გარსის კუთხური სიჩქარის გადახრის შესტიკულაციისას

ω_{2s} : ქანქარის კუთხური სიჩქარის სფეროს გადახრის შესტიკულაციის გათვალისწინებით

a_{1s} : სფეროს გარსის გადახრის აჩქარება

a_{2s} : ქანქარის გადახრის აჩქარება სფეროს მიმართ

J_{1s} : ცენტრის გარშემო სფეროს ინერციის მომენტი, სფეროს გარსის ჰორიზონტალური ხაზის მიმართ

J_{2s} : ცენტრის გარშემო ქანქარის ინერციის მომენტი, სფეროს გარსის ჰორიზონტალური ხაზის მიმართ

M_1 : სფეროს მასა

M_2 : ქანქარის მასა

g : გრავიტაციის აჩქარება

T_s : სერვო ძრავების მუშაობის ძალვა

T_f : ხახუნის ძალა სფეროსა და ზედაპირს შორის

რობოტის სტაბილიზაციისათვის გამოიყენება მოდიფიცირებული კონტროლის მეთოდი. „მოდიფიცირებული“ ნიშნავს, რომ დიფერენცია არ გამოიყენება უკუკავშირის შესატანიდან გამოკლების შემდეგ, არამედ უკუკავშირის ერთეულს ერთვება გამოკლების წინ.

Abstract

The movement control system processing and studying of spherical robot

Last time spherical robots have become increasingly attractive. They have a lot key locomotion. As they would be able to save energy for locomotion. Second the spherical structure makes it possible to move even in tightly constrained spaces. The spherical shell protects the inner structure against external shocks or dust, from water and from other nature phenomenon. And of course, it is no chance for a ball to tip over, turn over and then lose mobility. The spherical robots can be used in the zones such as aggressive conditions, crash places, for planet surface monitoring and studying. It can be also used for many task performance for purpose.

There are many kinds of spherical robots which applies system mass replacing principles. Also exists devices which moves corps deputation principle. The above mention thesis is about gyrostat principle- the spherical inner system which provides and creates an internal kinetic moments. Namely I have discussed about the spherical robots which internal axis has engines and the voltage control creates a mere momentum. Model has it's important peculiarities: the spherical mass center and geometrical center don't coincides each other.

The thesis purpose is the processing spherical robots managing and moving methods and algorithms.

The following tasks were solved for reaching the goal:

1. Mathematic model erecting and analyze for sphere robots.
2. Orientation and Managing system structural building.
3. Synthesis and flow of algorithms with different trajectory of spherical shaped robots.

Therefore, the purpose of this research is developing dynamic model and managing models, which promotes manual control on horizontal surface. This thesis is concentrated on dynamic model development.

The objective of the development of a prototype robot is to investigate the applied control method. The system consists of the following two main components, the prototype robot and the ground station. It is equipped with an on board computer, wireless link, magnetic compass, servo engine, a power source, engine controller.

We need control helper system for sphere robot ruling. Algorithms with different trajectory of spherical shaped robots is shown in work: horizontal moving, uphill and downhill motion, obstacle crossings, low, intermediate and high speed traveling, upright and alphabet moving, such as- turning at place and moving on the same place with the beforehand referred trajectory.

The control methods processed in this thesis: sphere robot control and steering. The robot displays clumsy motion when no control supporting methods are implemented. Therefore some kind of control supporting system is necessary. Suggested control methods are: control by supply voltage to the motor, control by motor rotation speed, control by torque of the motor, engine speed across the sphere ball, rotation speed control. These methods analyze rotation speed or torque by adjusting to applied voltage to the motor. Above discussed control methods showed us that moving may be permanent even when the rotation parameters aren't stable. So it is sufficient to concentrate on pendulum control or motor towards the sphere.

Theoretical methods of nonlinear systems were used for theoretical results. For dynamic analyze was used Langrazhe equations, The strength of the Coulomb friction which is almost stable in spite of changing speed rotation.

The scientific innovation results of the thesis are the following:

1. The hierarchy system of spherical robot management was worked out, which gives us opportunity to decide nonstandard task of management.
2. They worked out motion algorithm of spherical robot.
3. They proposed algorithms of motion control and management of two motor- spherical robot.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული პუბლიკაციები:

1. მიხეილ კაკოჩაშვილი, გოჩა დალაქიშვილი - სფერული ფორმის არაბალანსირებული რობოტის მართვა ზოგიერთ ტრანექტორიაზე, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, გვ. 65, შრომები N2(26), თბილისი 2018წ.
2. მიხეილ კაკოჩაშვილი, ინდირა ნატრიაშვილი, ვლადიმერ კეკენაძე - ორთვლიანი რობოტების კინემატიკური სქემების დამუშავება, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, შრომები N2(24), გვ.89, თბილისი 2017წ.
3. ვლადიმერ კეკენაძე, ინდირა ნატრიაშვილი, მიხეილ კაკოჩაშვილი - მართვის ალგორითმების დამუშავება ბორბლური რობოტებისთვის, გვ.251, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, შრომები N1(28), თბილისი 2019.
4. მიხეილ კაკოჩაშვილი, ინდირა ნატრიაშვილი, ვლადიმერ კეკენაძე - სფერული ფორმის რობოტების დინამიკა და მართვის ზოგიერთი საკითხი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „ციფრული ტექნოლოგიები: დღევანდელი და გამოწვევები“, გვ.316, თბილისი 2018.

5. საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია - საინფორმაციო საზოგადოება და განათლების ინტენსიფიკაციის ტექნოლოგიები (ISITE '18), სფერული ფორმის არაბალანსირებული რობოტის მართვა ზოგიერთ ტრაექტორიაზე, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, შრომები N2(26), გვ. 65, თბილისი 2018წ.