

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

მიხეილ კაკოჩაშვილი

სფერული ფორმის რობოტების გადაადგილების მართვის
სისტემების დამუშავება და შესწავლა

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: მართვის სისტემები, ავტომატიზაცია,

ტესტ-ინჟინერინგი

შიფრი 0403

თბილისი 0175, საქართველო

„-----“, 2019 წელი

საავტორო უფლება © 2019-- წელი

მიხეილ კაკოჩაშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით მიხეილ კაკოჩაშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: **სფერული ფორმის რობოტების გადაადგილების მართვის სისტემების დამუშავება და შესწავლა** და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ----- საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

„-----“, „-----“ 2019 წელი

ხელმძღვანელი: სტუ-ს ასოცირებული პროფესორი, ვლადიმერ კეკენაძე

რეცენზენტი: -----

რეცენზენტი: -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2019 წ

ავტორი: მიხეილ კაკოჩაშვილი

დასახელება: სფერული ფორმის რობოტების გადაადგილების მართვის სისტემების დამუშავება და შესწავლა.

სადოქტორო პროგრამა: მართვის სისტემები, ავტომატიზაცია, ტესტ-ინჟინერინგი.

ხარისხი: -----

სხდომა ჩატარდა: -----

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

სფერული ფორმის რობოტების ინტერესმა მოიმატა ბოლო პერიოდში. მათ ბევრი სარგებელი გააჩნია. პირველ რიგში მათ გააჩნიათ მიწასთან მხოლოდ ერთი შეხების წერტილი, რომელიც გადაადგილებისას მინიმალურ ხახუნს იწვევს, ამიტომ გადაადგილებისას ბევრი ენერჯია ინახება. მეორე სფერული სტრუქტურა რობოტს აძლევს საშუალებას ადვილად იმოძრაოს მჭიდროდ კონსტრუირებულ ზედაპირზე კი. სფეროს გარსი იცავს გარე შეტევებისაგან, მტვრისაგან, წყლისაგან და სხვა სტიქიური მოვლენებისაგან. ასევე შეუძლებელია, რომ სფერო ამოტრიალდეს დაკარგოს წონასწორობა და ვეღარ შეძლოს მოძრაობის გაგრძელება. სფერული ფორმის რობოტების აქტუალურობა, იმაში მდგომარეობს რომ იგი გამოიყენება ისეთ ზონებში სამუშაოდ, როგორც არის აგრესიული გარემო, ავარიის ადგილები, პლანეტების ზედაპირების დაკვირვების და შესწავლისათვის, ასევე გამოიყენება სხვა მრავალი დავალების შესასრულებლად დანიშნულების მიხედვით.

არსებობენ მრავალი სახის, ფორმის რობოტები რომელთა უმრავლესობა იყენებს სისტემის მასის ცენტრის წანაცვლების პრინციპს, ასევე არსებობენ აპარატები, რომლებიც მოძრაობენ კორპუსის (გარსის) დეფორმაციის პრინციპით. მოცემული დისერტაცია ეძღვნება სხვა პრინციპს გიროსტატის პრინციპს, რომელიც გულისხმობს სფეროს შიგნით ამძრავი სისტემის არსებობას, რომლებიც უზრუნველყოფენ შიდა კინეტიკური მომენტის შექმნას. კერძოდ განხილულია სფერული რობოტის მაგალითი, რომლის შიგნით ღერძე განლაგებულია ძრავები და მათზე ძაბვების კონტროლი ქმნიას მართვად მომენტს. მოდელის მნიშვნელოვანი თავისებურება არის ის, რომ სფეროს მასის ცენტრი და გეომეტრიული ცენტრი ერთმანეთს არ ემთხვევიან.

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

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 ფორმის რობოტების სხვადასხვა ტრაექტორიით მოძრაობის ალგორითმების სინთეზი და კვლევა.

მაშასადამე, ამ კვლევის მიზანია განავითაროს დინამიკური მოდელი და ასევე სათანადო მართვის მეთოდები, რომლებიც ხელს შეუწყობენ ჰორიზონტალურ ზედაპირზე მანუალურ კონტროლს. ეს კვლევა კონცენტრირებულია დინამიკის მოდელის განვითარებაზე.

შესწავლილი იქნა პროტოტიპი რობოტი, რომლის მთავარი მიზანია სფერული რობოტის მართვაში გამოყენებული მეთოდების შესწავლა და

ანალიზი. სისტემა შედგება ორი მთავარი კომპონენტისგან: პროტოტიპი რობოტი და ძირითადი სადგური. იგი აღჭურვილია საბორტე კომპიუტერით, უკაბელო სისტემით, მაგნიტური კომპასით, სერვო ძრავით (გამოიყენება სფეროს შიგნით მყოფი ქანქარის გადასახრელად), დენის წყაროთი, ძრავის კონტროლერით.

სფერული ფორმის რობოტის კონტროლისათვის საჭიროა კონტროლის გარკვეული დამხმარე სისტემები. ნაშრომში მოყვანილია სფერული რობოტის მოძრაობის ტრაექტორიების ალგორითმები: ჰორიზონტალური მოძრაობა, აღმავალი და დაღმავალი მოძრაობა, დაბრკოლების გადალახვა, დაბალი სიჩქარით მოძრაობა, საშუალო სიჩქარით მოძრაობა, მაღალი სიჩქარით მოძრაობა, მრუდწირული მოძრაობა და ასევე ალფავიტური მოძრაობები რომლებიცაა: მობრუნება ადგილზე და მოძრაობა მონაკვეთზე წინასწარ მითითებული ტრაექტორიით.

დისერტაციში ჩემ მიერ დამუშავებულია კონტროლის მეთოდები: სფერული რობოტის მართვა და გადახრა. სფერული ფორმის რობოტი აჩვენებს მოუხერხებელ მოძრაობებს, როდესაც არ ხორციელდება დამხმარე მართვის დამხმარე მეთოდები, მაშასადამე საჭიროა კონტროლის გარკვეული დამხმარე მეთოდები. შემოთავაზებული მართვის მეთოდებია: კონტროლი ძრავის ძაბვის დახმარებით, კონტორილი ძრავის ბრუნვის სიჩქარით, კონტროლი ძრავის მხოლოდ ბრუნვით, ძრავის სიჩქარე სფეროს ბრუნვის მიმართულებით, ბრუნვის სიჩქარის კონტროლი. ეს მეთოდები აანალიზებს მიზანმიმართულ ბრუნვის სიჩქარეს ან ბრუნვას, სფეროს მობრუნება და გადაადგილება ხორციელდება ქანქარის ძრავებზე გამოყენებული ძაბვის რეგულირებით. განხილულმა კონტორილის მეთოდებმა გვაჩვენა, რომ მოძრაობა შეიძლება იყოს მუდმივი, იმ შემთვევაშიც კი, როდესაც ბრუნვის პარამეტრები არ არის მუდმივი, ამიტომ საკმარისია კონცეტირება მოვახდინოთ ქანქარის კონტროლზე ან ძრავაზე სფეროსთან მიმართებაში.

თეორიული შედეგების მიღებისათვის გამოყენებული იქნა არაწრფივი სისტემების თეორიული მეთოდები. დინამიკის ანალიზისათვის გამოყენებული იქნა ლანგრანჟის განტოლებები, კულონის ხახუნის ძალა, რომელიც თითქმის ყოველთვის მუდმივია ბრუნვის სიჩქარის ცვლილების მიუხედავად.

სადისერტაციო ნაშრომში 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 ამძრავიანისფერული რობოტის მოძრაობის კონტროლისა და მართვის ალგორითმები.

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.

სარჩევი

ნახაზების ნუსხა.....	11
შესავალი	12
თავი 1	16
სფერული რობოტების განვითარების ისტორია.....	16
1.1 გადაადგილების პრინციპები.....	18
1.2 IDU-ს გამოყენება	18
1.3 ქანქარის გამოყენება	20
1.4 მარყუჟიანი სფერო	20
1.5 მარსის სფერო	21
1.6 IWBS რობოტი	22
1.7 დეფორმირებადი სხეული, ქარკვეთა სფერო	24
1.8 კოჰარო რობოტი	25
1.9 ჰიროვერი	26
1.10 დინამიკის ანალიზი, IDU რობოტის ანალიზი	28
1.11 ლაგრანჟის განტოლებით	30
1.12 გამოყენების გზები, სათამაშო	32
1.13 მეთვალყურეობა	33
1.14 დაზვერვა	34
1.15 კოსმოსური კვლევა	36
1.16 გასართობი რობოტი	37
თავი 2	39
სფერული ფორმის რობოტის დინამიკა და მართვა.....	39
2.1 მოძრაობის დინამიკა	39
2.2 ჰორიზონტალური მოძრაობა	39
2.3 აღმავალი და დაღმავალი მოძრაობა	40
2.4 დაბრკოლების გადალახვა	41
2.5 მოდელირება	43
2.6 დაბალი სიჩქარით მოძრავი სფერო	44
2.7 საშუალო სიჩქარით მოძრავი სფერო	45
2.8 მაღალი სიჩქარით მოძრავი სფერო	47
2.9 რიცხვითი გაანგარიშება	49
2.10 მოდელის აღწერა. მოძრაობის განტოლება	50
2.11 მრუდწირული მოძრაობა	52
2.12 რობოტი აბსოლიტურ ხორკლიან ზედაპირზე	55
2.13 ხახუნის ძალისა და მომენტის ანალიზი	55
2.14 მოძრაობა წრფეზე	62
2.15 ვერტიკალური ღერძის გარშემო ბრუნვა	64
2.16 უძრავი მასის ცენტრის შემთხვევა	65
2.17 თავისუფალი დინამიკის ზოგიერთი ასპექტები	66
თავი 3	70
პროტიტიპი რობოტი	70

3.1 სისტემის განხილვა	71
3.2 ელექტრონული არქიტექტურა	72
3.3 სტრუქტურული დიაგრამის აღწერა	72
3.4 უკაბელო სისტემა	73
3.5 მაგნიტური კომპასი	74
3.6 სამლერძიანი აქსელომეტრი	75
3.7 ჰიროსკოპი	76
3.8 სერვო ძრავა	77
3.9 DC ძრავი	78
3.10 ბატარეა	78
3.11 ძრავის კონტროლერი	79
3.12 ოპტიკური მაკოდირებელი	79
3.13 მთავარი დაფა	80
3.14 დამონტაჟება	81
3.15 სპეციფიკაციები	82
თავი 4	86
4.1 კონტროლის მეთოდები: მართვა	86
4.2 რობოტის ბრუნვის სტაბილურობა	87
4.3 ძაბვა სფეროს მობრუნებისათვის.....	87
4.4 ხახუნის მოდელირება	88
4.5 დინამიკის განტოლების გაწვდობა	89
4.6 ძრავის სიჩქარე სფეროს ბრუნვის მიმართულებით	90
4.7 ძრავის ძალა სფეროს ბრუნვისათვის	91
4.8 კონტროლის მეთოდი	91
4.9 ბრუნვის სიჩქარის კონტროლი	92
4.10 ბრუნვის კონტროლი	93
4.11 სხვა დამხმარე კონტროლერები	94
თავი 5	95
კონტროლის მეთოდი, გადახრა	95
5.1 შესავალი	95
5.2 გადახრის კუთხის სტაბილიზაცია	96
5.3 მოდელირება	96
5.4 გადახრის კუთხის დაზუსტება	98
5.5 სტაბილიზაციის მეთოდი	100
დასკვნა	101
გამოყენებული ლიტერატურა	103

ნახაზების ნუსხა

ნახ.1: ე.ე სესილის მექანიკური სათამაშო.....	17
ნახ.2: ა.დ მაკვაულის ზაზუნის სფეროს დიზაინი.....	17
ნახ.3: TKK-ში განვითარებული მეორე თაობის როლო რობოტის IDU.....	19
ნახ.4: TKK-ში განვითარებული მესამე თაობის „როლო“ რობოტის IDU.....	20
ნახ.5: მარყუჟიანი სფერო.....	21
ნახ.6: მარსის სფერო.....	22
ნახ.7: IWBS რობოტი.....	24
ნახ.8: ქარკვეთა სფერო.....	25
ნახ.9: სფერული კოჰარო რობოტის რბილი სხეული.....	26
ნახ.10: ჰიროვერი.....	27
ნახ.11: ბრუნვის ძირითადი პრონციპები.....	28
ნახ.12: მოდელირება	29
ნახ.13: მობრუნების მოდელირება	30
ნახ.14: რობოტი, ბავშვი ეთამაშება რობოტს	33
ნახ.15: მეთვალყურე რობოტი	34
ნახ.16: ციკლოპი.....	35
ნახ.17: მარსზე გაგზავნილი სფერული მიკრო რობოტები	37
ნახ.18: გასართობი რობოტი ქიუ-ტარო	37
ნახ.19: სფეროს მოდელირება	42
ნახ.20: მართვის მოდელირება	43
ნახ.21: დაბალ სიჩქარეზე ბრუნვის მოდელირება	44
ნახ.22: თითოეულ ელემენტზე მოქმედი ძალები	45
ნახ.23: ქანქარის ბრუნვის კუთხის საწინააღმდეგო მობრუნების კუთხე	49
ნახ.24: სფეროს ფორმის რობოტის მოდელი	51
ნახ.25: ძალის გრაფიკი	57
ნახ.26: მომენტების გრაფიკი	59
ნახ.27: θ_1, θ_2 ცვლადები	60
ნახ.28: φ ცვლადი	61
ნახ.29: ω_x, ω_y ცვლადები.....	61
ნახ.30: ეილერის კუთხეების ევოლუცია და მართველი ძალა.....	62
ნახ.31: უძრაობის ხახუნის მომენტი მოძრაობის დაწყებისას.....	67
ნახ.32: მოძრაობის შესაძლებლობის გარემო.....	68
ნახ.33: პროტოტიპი რობოტი.....	71
ნახ.34: სისტემის მიმოხილვა.....	72
ნახ.35: ძირითადი სადგურის ელექტრონული სტრუქტურა.....	73
ნახ.36: CRUMB128-CAN მოდული (მარცხნივ) და IOGEAR პირველი კლასის ბლუთუზის სერიული ადამტერი(მარჯვნივ).....	74
ნახ.37: ჰიტაჩი GM55B კომპასის მოდული	75
ნახ.38: კომპასის მდებარეობა	76
ნახ.39: KIONIX სამღერძიანი აქსელერატორი KXM52-1050(მარცხნივ), Kondo KRG-3 ჰიროსკოპი(მარცხნივ)	77

ნახ.40: BlueBird BMS660MG-HS სერვო ძრავა(მარცხნივ), Mabuchi RS540SH DC ძრავა(მარჯვნივ)	78
ნახ.41: Sanyo-ს დაბალი გამოყოფის NiMH ბატარეა, Eneloop (marcxniv), პროტოტიპისთვის გამოყენებული 6-AA ბატარეების შეკვრა (მარჯვნივ)	79
ნახ.42: TKK-ში გამოყენებული სტანდარტული ძრავური კონტროლერი(მარცხენა) ხელნაკეთი ოპტიკური მაკოდირებელი ფოტო-შემაერთებლით	80
ნახ.43: მთავარი გადამრთველი	81
ნახ.44: მთავარი გადამრთველი (მარცხნივ), ელექტრონიკის კონტეინერი(მარჯვნივ)	82
ნახ.45: მთლიანი ელექტრონული სისტემა (მარცხნივ-ხედი წინიდან,მარჯვნივ-ხედი უკნიდან)	82
ნახ.46: მოძრაობის მართვის სტაბილიზაციის სტრუქტურული სქემა	93
ნახ.47: აქსელერომეტრის მდებარეობა	98
ნახ.48: გვერდითი მოძრაობის სტაბილიზაციის სტრუქტურული სქემა	100

შესავალი

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 გვამღევეს საშუალებას რობოტი ადვილად ვამოდრაოთ მჭიდროდ კონსტუირებულ სივრცეშიც. მესამეც, სფერული ეგზოსკელეტონი იცავს შიდა სტრუქტურას გარე შეტევებისა და მტერისაგან. იგი ასევე შესაძლებელია დავამზადოთ სითხე და გაზ გამძლევი 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 (2001) წარმოადგინა 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. ქარზე ორიენტირებული იდია ასევე გადაეცა სხვა სფერულ რობოტს სახელად „მარსის ბურთი“. (ილიკორპი, 2005) მას შიგნით გააჩნია თავისუფლების ორხარისხიანი ქანქარა აქტიური გადაადგილებისთვის და ასევე ფარფლები მარსის ქარის საშუალებით პასიური გადაადგილებისთვის.

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

კოშიამამ (1996) გაანალიზა სფერული ფორმის რობოტების დინამიკა და განავითარა რობოტის პროტოტიპი. პირველ რიგში, მან განაცალკევა ბრუნვის და წინსვლის მოძრაობები მეტი სიმარტივისთვის. შემდეგ გამოიყენა ლაგრანჟის განტოლებები როტაციის განტოლებების მისაღებად. მან ასევე ჩაატარა ექსპერიმენტი მოძრაობაზე პროტოტიპი რობოტის გამოყენებით. ლაპლანტმა (2005) 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 მოტორიალების დიდი კუთხე იწვევს რობოტის მკვეთრ მოძრაობას. სპიცმიულერმა (1998) განავითარა პროტოტიპი და გამოიგონა მარტივი ღია-მარყუჟიანი რეგულაციის მეთოდი.

არსებობდა რამოდენიმე პრობლემა წინა კვლევებში. პირველ რიგში, დინამიკის ანალიზმა უგულებელჰყო მოტორიალე სფერული სხეულის შესაძლებელი ჰიროსკოპის ეფექტი. ეს ეფექტი წარმოიქმნა სფერული სხეულის როტაციისაგან სფერული ფორმის რობოტის მოძრაობის დროს. მიუხედავად იმისა, რომ ეს ეფექტი შეიძლება არ იყოს გათვალისწინებული დაბალი სიჩქარისას, მისი უგულისყურობა არ შეიძლება მაღალი სიჩქარისას.

ადრინდელმა კვლევებმა ასევე 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 (ავარიების ადგილი, სხვა პლანეტების ზედაპირები და ა.შ.). 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.

ასეთი აპარატის მოძრაობისა და დაგეგმვის ტრაექტორიის გამოკვლევა აბსოლიტურ ხორკლიან ზედაპირზე განხილული იქნა [2]- ში. შემდგომ [3] დამტკიცებული იქნა სისტემის მართვადობა არაგოლონომიური შემთხვევებისათვის და ცხადად იქნა ნაჩვენები რობოტის მართვის ალგორითმები. [4] -ში შედეგები იქნა გავრცობილი სიბრტყეებზე რომლებსაც გააჩნია ხახუნი კერძოდ განხილული იყო კულონის მშრალი ხახუნის მოდელები. მიღებულ მოდელებში მნიშვნელოვანი თავისებურება იყო კონტაქტის წერტილებში კინეტიკური მომენტების ორი ინტერვალის არსებობა.

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 [9], ხოლო შემდეგ განავითარა ვ.ფ. ჟურავლევი [8]. 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 [5] , [6] შრომებში. საინტერესოა, რომ ეს მოდელი დამოკიდებულია ორ პარამეტრზე და მათი მნიშვნელობების განსაზღვრის შემდეგ გადადის კულონისა და კონტენს-ჟურავლენის მოდელებში. მოცემულ ნაშრომში გამოიყენება ხახუნის ორპარამეტრიანი მოდელი.

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

დასმული მიზნის მისაღწევად გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

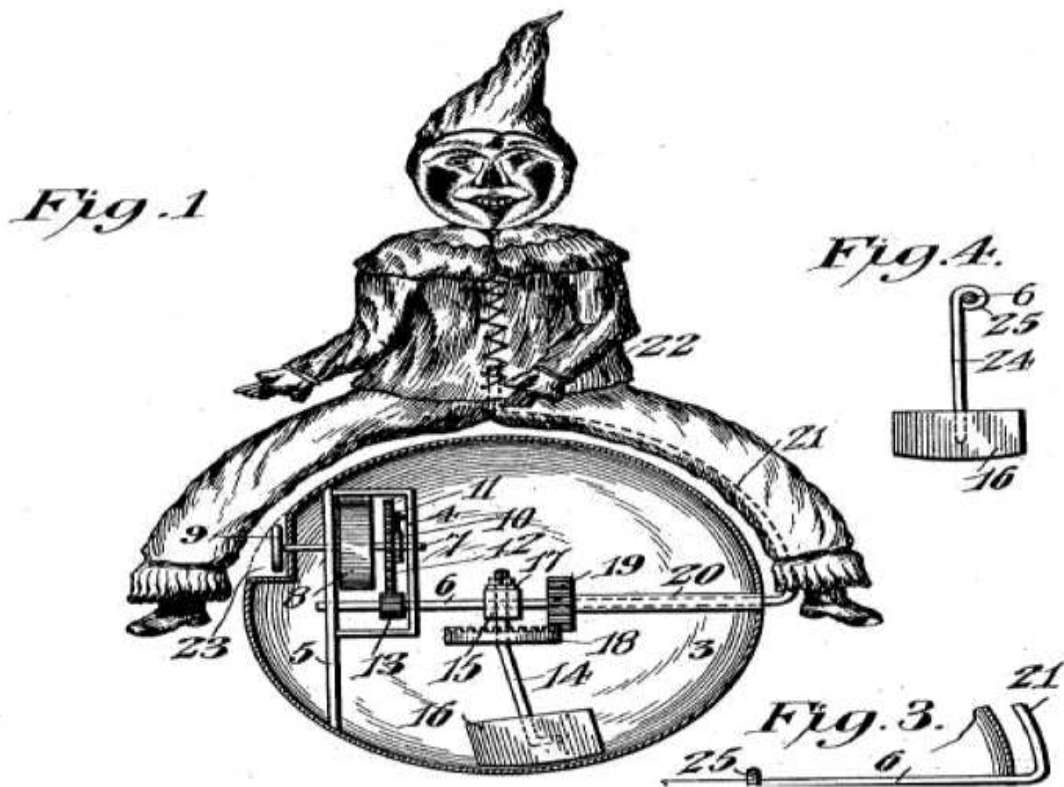
1. სფერული ფორმის რობოტების მათემატიკური მოდელების აგება და ანალიზი.
2. სფერული ფორმის რობოტების ორიენტაციისა და მართვის სისტემების სტრუქტურის აგება.
3. სფერული რობოტების სხვადასხვა ტრაექტორიით მოძრაობის ალგორითმების სინთეზი და კვლევა.

თავი 1

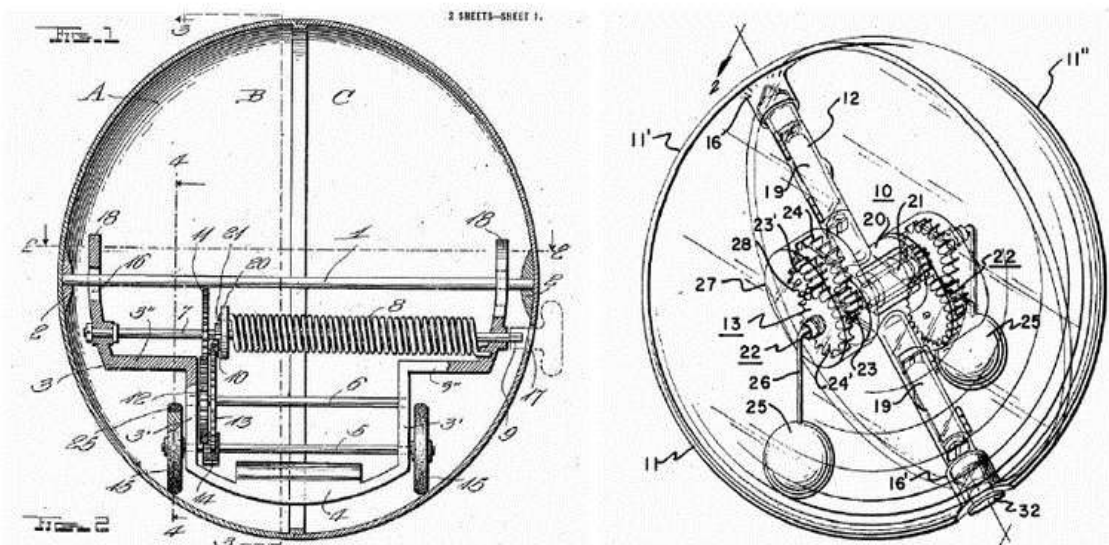
სფერული რობოტების განვითარების ისტორია

პირველად თვითმავალი მოძრავი სფეროების მოკლე ისტორია ილიკორპის (2005) მიერ იქნა განხილული მის ნაშრომში სახელად „ბიოლოგიურად შთაგონებული მოძრავი რობოტი პლანეტარული ზედაპირის კვლევისათვის“. პირველი მოძრავი სფერო იყო 1893 წელს (აშშ პატენტი 508,558) დაპატენტებული ზამბარით მავალი სათამაშო, რომელიც გორავს სწორ გზაზე. დიზაინი გაუმჯობესებული იქნა ბ.შორთჰაუსის მიერ 1906 წელს, რომ ბურთს ჰქონოდა შესაძლებლობა ემოძრავა წინასწარ დადგენილ მრუდ ტრაექტორიაზე. მას შემდეგ, სხვადასხვა მექანიზმები წარუდგენიათ და დაუპატენტებიათ, რამაც შესაძლებელი გახადა თვითმავალი მოძრავი სფეროების უსწორმასწორო გადაადგილება. ნახ.1 გვიჩვენებს ერთ-ერთ დიზაინს, რომელიც შეიქმნა 1909 წელს სათამაშოსთვის. მას შიგნით მოთავსებულია ქანქარა, რომელიც ქმნის ახორციელებს სფეროს მოძრაობას. მასის ცენტრის გადაადგილების დახმარებით მოძრაობის გამოგონება, რომელიც ახლაც გამოიყენება სფერული რობოტების უმეტესობაში, ერთი საუკუნის წინ მოხდა.

გადაადგილების კიდევ ერთი პოპულარული სისტემა 1918 წელს დააპატენტა ა.დ. მაკფაულმა. იგი ცნობილია როგორც „ზაზუნის სფეროს“ დიზაინი. დიზაინი იყენებს ბორბლებიან საპირწონეს ბურთში. დღეს, იგი ცნობილია როგორც IDU (Inside Driving Unit- შიდა მოძრაობის ერთეული) და გამოიყენება ზოგიერთი სფერული რობოტის დიზაინში. ამ დიზაინის მთავარი მახასიათებელი არის ის, რომ გორვის ჟესტი მოდის შიდა ზედაპირის, სფერული სხეულისა და IDU ბორბლების ხახუნისგან. იგი მოითხოვს მცირე ძალვას მართვის სისტემისთვის, ზემოთ აღნიშნული ქანქარით გადაადგილების სისტემისაგან განსხვავებით, რომელიც ბევრად უფრო მეტ ძალვას ითხოვს.



ნახ.1: ე.ე სესილის მექანიკური სათამაშო.



ნახ.2: ა.დ მაკვაულის ზაზუნის სფეროს დიზაინი.

შედეგად ზამბარის, როგორც ძალის წყაროს გამოყენება ჩაანაცვლა ბატარეებმა და ელექტრო-მოდურებმა, რომლებიც დააპატენტა ჯ.მ ისტერლინგმა 1957 წელს. სფერული ფორმის რობოტებისთვის

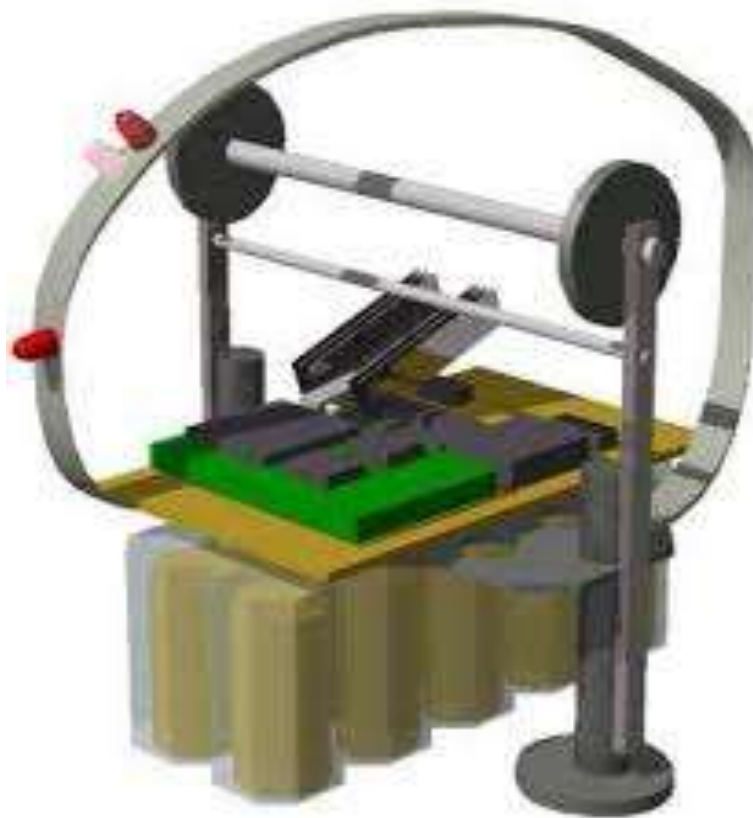
ელექტროსისტემის დამატებამ მათ ბევრი ახალი ფუნქცია შემატა, როგორც მგრძობელობა და გადართვა.

1.1 გადაადგილების პრინციპები

მიუხედავად იმისა, რომ სფერული რობოტების უმრავლესობა იყენებს მასის ცენტრის გადანაცვლებას როგორც მატარებელ ძალას, არსებობს განსხვავება მასის გადანაცვლების სტრატეგიებს შორის. განვიხილავთ გადაადგილების სამ პრინციპს.

1.2 IDU-ს გამოყენება

გადაადგილების ერთ-ერთი მეთოდი არის IDU-ს გამოყენება ან ბორბლებიანი ყუთი, რომელიც მოძრაობს სფერული სხეულის შიდა ზედაპირზე. IDU-ს დახმარებით მოძრავი სფერული ფორმის რობოტის ერთ-ერთი მაგალითი არის „როლო“ რობოტი, მეორე თაობა, რომელიც შეიქმნა TKK-ში 1998 წელს (სპიცმიულერი 1998). IDU-ს გვერდით გააჩნია ორი სამართავი ბორბალი და ორი უმართავი ბორბალი ზედაპირზე, რომ სფეროში ყველაფერი მჭიდროდ იყოს დალაგებული. ამ რობოტში გამოყენებულია ელექტრონიკა, როგორცაა სენსორები, ძრავები, ტრანსივერი და კომპიუტერი. ეს კომპონენტები საჭიროა რობოტის შეუფერხებლად მოძრაობისთვის. ჩატარებულ იქნა დინამიკური მოდელირება და უხეში დია-მაყუჟიანი კონტროლი აღმოჩნდა, რომ მართვა საკმარისად ზუსტი იყო. მას აქვს მაკოდირებელი, ჰიროსკოპი, ინკლინომეტრი. რადგან გადაადგილების სისტემა იყენებს IDU-ს, ორივე ბორბლის მაკოდირებელი აღჭურვილია. მონაცემები გამოყენებული იქნა რობოტის უხეში დინამიკის შესტიკულაციის აღსარიცხად, როგორცაა ვიზრაცია. სენსორის მონაცემები არც კი გამოიყენება კონტროლისათვის.



ნახ.3: TTK-ში განვითარებული მეორე თაობის როლო რობოტის IDU

მესამე თაობის „როლოს“, რომელიც მოჰყვამეორე თაობას, IDU-სგან განსხვავებული დიზაინი აქვს. მის IDU-ს შეუძლია საკუთარი თავის შემოტრიალება სფეროს შიდა ზედაპირზე მყოფი მრგვალი ხელსაწყო გასწვრივ, ასე იგი ირჩევს სფეროს ორიენტაციას. მოძრაობები წარმოიქმნება IDU-ს მთავარი მასის ზემოთ აქნევით. მოძრაობის ეს სტრატეგია იგივეა რაც ქანქარიანი სფერული ფორმის რობოტისა, რომელსაც განვიხილავთ შემდეგ. მაგრამ ამ კვლევაში „როლო“ კლასიფიცირებულია როგორც IDU-ს მართული რობოტი.

IDU რობოტების ერთ-ერთი შეზღუდვა არის ზომა. ასეთი, ტიპის რობოტი მოითხოვს გლუვ და მყარ სფერულ სხეულს იმისათვის, რომ IDU-ს მიეცეს შიდა ზედაპირზე მოძრაობის საშუალება. მყარი სფერული სხეულები ადვილად ათვისებადია პატარა რობოტებისთვის, როგორც ზემოთ აღნიშნული რობოტებია. გარდა ამისა, დიდი პლასტმასის სხეულები მოითხოვენ სქელ გარეკანს სტრუქტურული სიძლიერისთვის, რაც იწვევს წონის საკმაო მატებას. ეს შეიძლება გახდეს კრიტიკული კოსმოსურ

მისიებზე, სადაც გასროლის უკიდურესად მაღალი ფასი დამოკიდებულია ტვირთის წონაზე. ეს დიდ პარადოქს ქმნის, რადგან რაც უფრო დიდია სფერული ფორმის რობოტი, მით უფრო მარტივია მისთვის მარსისა და მთვარის უხეში და კლდოვანი რელიეფის გადალახვა.



ნახ.4: TKK-ში განვითარებული მესამე თაობის „როლო“ რობოტის IDU

1.3 ქანქარის გამოყენება

მასის ცენტრის გადანაცვლების კიდევ ერთი გზა არის ქანქარის გამოყენება. ქანქარები უმეტესად დაკავშირებულნი არიან სფეროს გეომეტრიულ ცენტრთან, ეგზოსკელეტონთან შეხების გარეშე. ამიტომ, ყველანაირი სფერული სხეულის გამოყენება არის შესაძლებელი, როგორცაა გაბერვადი, გასაშლელი ან მავთულიანი სხეულები.

1.4 მარყუჟიანი სფერო

ერთ-ერთი ასეთი რობოტის მაგალითია სათამაშო „მარყუჟიანი სფერო“, რომელსაც დისტრიბუციას უწევს კორპორაცია „Hart Toys“. მას აქვს

მატარებელი მასა სახელად ბალასტი ან ქანქარა სხეულის შიგნით. მიუხედავად იმისა, რომ ამ ბურთს არ გააჩნია საკონტროლო სისტემა ან რადიო ხაზები მთავარ სადგურთან, მას შეუძლია ჟესტიკულაციის ცვლა წინააღმდეგობასთან შეხვედრისას. მაშინაც კი, როდესაც იგი წინააღმდეგობას ხვდება, შიდა ბალასტი მაინც ზემოთ იძვრება, რაც ბურთის გარეთ დამაგრებული რეზინის თოკის დამსახურებაა, რომელიც თავიდან იცილებს ბურთსა და წინააღმდეგობას შორის სრიალს. როდესაც ბალასტი ყველაზე მაღალ წერტილს აღწევს, ბურთი უკან გორდება და იცვლის მოძრაობის ტრაექტორიას რადგან რეზინა ოდნავ იჭიმება სხეულისგან საპირისპირო მხარეს. ასე ეს ბურთი ავტომატურად იცვლის მიმართულებას და მას ლაბირინთიდან გამომდომაც კი შეუძლია.



ნახ.5: მარყუვიანი სფერო

1.5 მარსის სფერო

კიდევ ერთი მაგალითი არის ილიკორპის (2005) მიერ ჰელსინკის ტექნოლოგიურ უნივერსიტეტში წარმოდგენილი „მარსის სფერო“. მას გააჩნია „თავისუფლების ორ ხარისხიანი“ ქანქარა, რომელიც დამაგრებულია მთავარი ტარის შუაგულთან, რომელიც ასევე მოქმედებს ბრუნვის ღერძზე. ამ რობოტის მთავარი მახასიათებელი ის არის, რომ იგი იყენებს მარსის ქარს

როგორც ბიძგის მეორად წყაროს. ამისათვის, სფერულ სხეულზე მიმაგრებულია ფარფლები, რომლებიც გაკეთებულია რამდენიმე თაღური მავთულისაგან. ფარფლები აგროვებენ ხელმისაწვდომი ქარის ძალას. თაღოვანი მავთულები იძლევიან მსუბუქი სხეულისა და პოტენციურად გასაშლელი სტრუქტურის შექმნის საშუალებას. „მარსის სფეროს“ აქვს დიდი ზომები (6 მეტრის დიამეტრი საფრენი მოდელისთვის და 1.3 მეტრი პროტოტიპის მოდელისთვის) მარსის უბეში რელიეფის გადასალახად.



ნახ.6: მარსის სფერო

1.6 IWBS რობოტი

კოშიამამაც (1992) განავითარა ქანქარიანი ტიპის სფერული ფორმის რობოტი. მხოლოდ შიდა სენსორებიანი, როგორცაა ინერციული და მაგნიტური სენსორები, სხვა რობოტებისგან განსხვავებით მისი მგორავი რობოტი სახელად IWBS, ანუ შიდა ბორბლით ბალანსირებადი სისტემის რობოტი, შეიცავს გარე სენსორებს მდგომარეობის ზუსტი გაზომვისთვის.

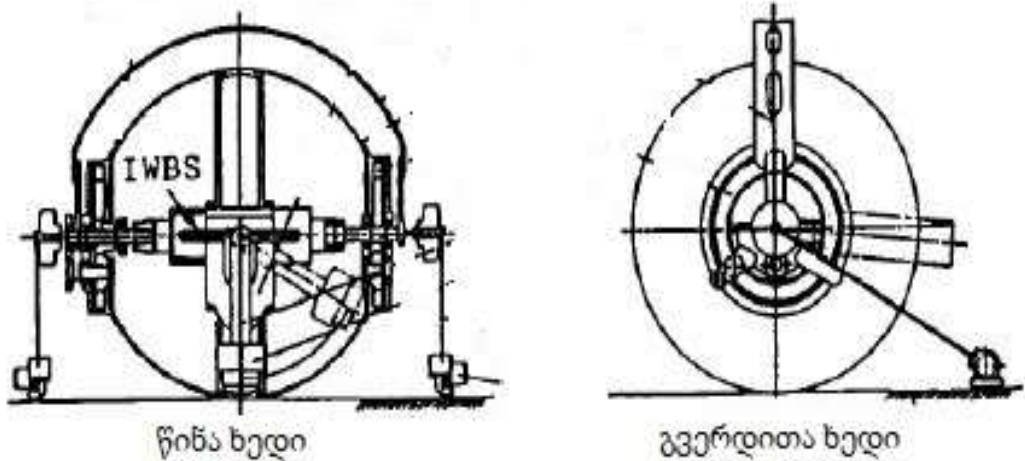
გარე სენსორების დამაგრებამ შეიძლება დააზიანოს სფერული ფორმის რობოტის მთავარი სარგებელი, როგორცაა ელექტრონიკის სრული ჩაკეცვა გარემოსგან და სფერული ფორმისგან გამოწვეული ძალა. კომიამას რობოტი მაინც შეიძლება გამოყენებული იყოს ინტერიერისთვის.

ეს რობოტი ჰგავს თავს, რომელზეც დიდი ყურსასმენებია დამაგრებული. ყურსასმენების ნაწილი არის თაღი, რომელიც გამოიყენება რობოტის საკონტროლო ჟესტუკულაციისათვის. ამაზე დამატებით, თაღოვანი ნაწილი შეიძლება სტაბილიზირებულ იქნას და ასევე იყოს გამოყენებული ადამიანების ან სხვადასხვა ნივთების სატარებლად, რაც სხვა რობოტების შემთხვევაში ფაქტობრივად შეუძლებელია, რადგან მათ არ გააჩნიათ გარედან ისეთი ნაწილი, რომელიც არ ტრიალებს.

ორი ძელს, რომელიც რობოტის „ყურებიდან“ გამოიყოფა, ემახიან „საკონტაქტო ძელებს“. ძელების ბოლოები ყოველთვის ეხებიან ზედაპირს. ასე შესაძლებელია ზედაპირის მიმართებაში სხვადასხვა გამოთვლების ჩატარება. თითო ძელს ორი სენსორი აქვს. ერთი არის როტაციის მაკოდირებელი, რომელიც ზომავს რობოტის გადაადგილების მანძილს. მეორე არის კუთხური სენსორი, რომელიც ზომავს ძელის გადახრის კუთხეს.

ეს პარამეტრები გამოიყენება რობოტის დახურულ-მაყუჩიანი კონტროლისთვის. კომიამას ნაშრომი გვიჩვენებს, რომ სტაბილიზაცია და გლუვი მოძრაობის კონტროლი წარმატებული იყო ამ პარამეტრების გამოყენებისას.

მიუხედავად იმისა, რომ ქანქარიანი რობოტების კონცეფცია და დიზაინი შესაფერისია პლანეტარული კვლევებისთვის, წინა კვლევებს აკლიათ მათემატიკური დინამიკის მოდელირება და მისი შეფასება

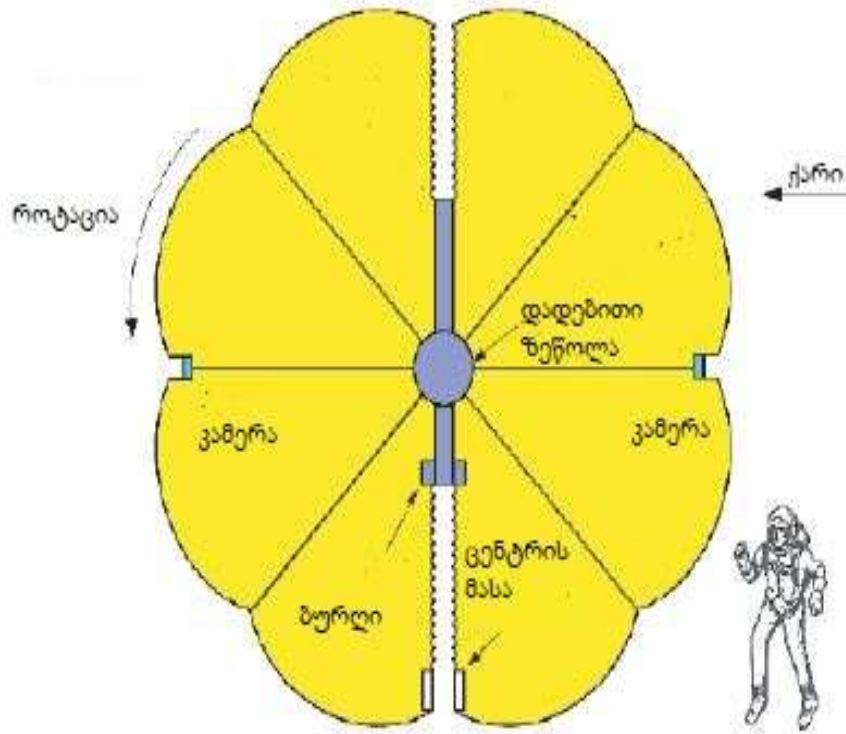


ნახ.7: IWBS რობოტი

მოწყობილობის გამოყენებით. ამ კვლევად დეტალები მოგვიანებით განიხილება.

1.7 დეფორმირებადი სხეული, ქარკვეთა სფერო

ერთ-ერთი მაგალითი არის რეაქტიული ძრავის ლაბორატორიის მიერ განვითარებული „ქარკვეთა ბურთი“. (ჯონსი 2001) ეს არის დიდი გასაბერი ბურთი, რომელიც უზარმაზარ სანაპიროს ბურთს წააგავს, რომელიც 6 მ. დიამეტრიან სხეულში მოთავსებულია სამეცნიერო ინსტრუმენტები. შიგნით მოძრავი მასის გამოყენების მაგივრად, მას უბრალოდ ამოძრავებენ მარსის ქარები. ძალიან მარტივი მოძრაობის მართვის მიღება შეიძლება უბრალოდ გასაბერი სხეულის მორგებით: მისი გაჩერება შეიძლება ნაწილობრივი გამოტუმბვით და ისევ ამოძრავება სრული გაბერვით.

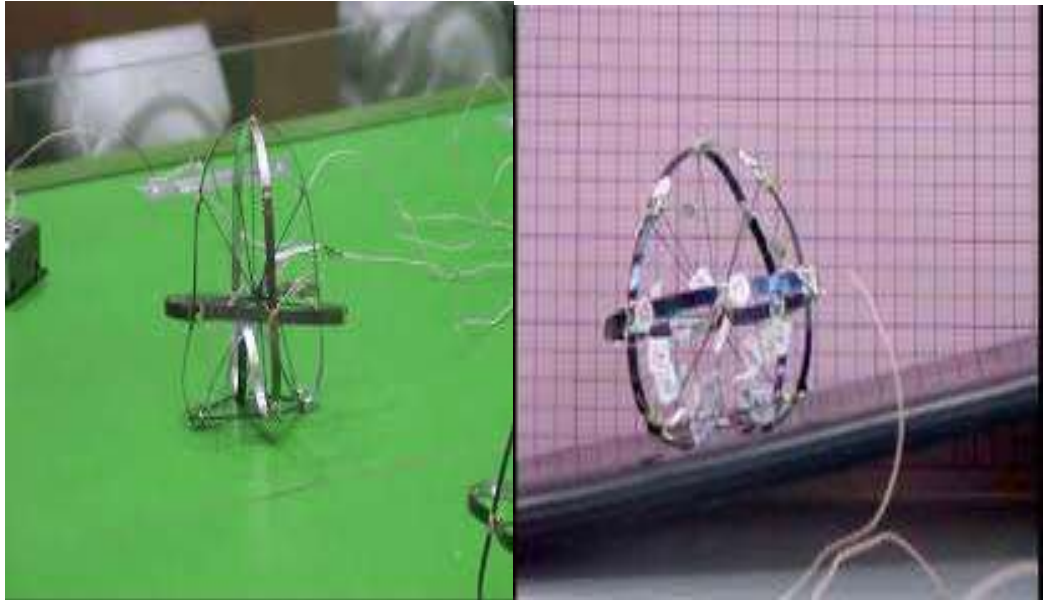


ნახ.8: ქარკვეთა სფერო

1.8 კოჰარო რობოტი

კიდევ ერთი საინტერესო დეფორმირებადი რობოტი არის კოჰარო, რომელიც განავითარეს რიცუმეიკის უნივერსიტეტში იაპონიაში (სუგიამა, 2005). კოჰაროს შეუძლია გადაადგილება უხეშ რელიეფზე გორაობისა და ხტუნვის საშუალებით. მას აქვს დეფორმირებადი რბილი სხეული და დრეკადი აქტუაროტი, რომელიც არის გაკეთებული ფორმის მახსოვრობის ეფექტით და მას შეუძლია მიწაზე ხტუნვა და გორება უბრალოდ რბილი სხეულის ფორმის შეცვლით. გარდა ამისა, კოჰაროს რობოტები ამაყად წარადგინეს 2005 წლის აიჩის მსოფლიო ექსპოზიციაზე იაპონიაში. ექსპოზიციაზე ასევე წარმოდგენილ იქნა ბევრი სხვადასხვა პროგრესული

ტექნოლოგია, როგორცაა რობოტოტექნიკა, ავტომობილები და ეკოლოგიური ინჟინერია.



ნახ.9: სფერული კოჰარო რობოტის რბილი სხეული

1.9 ჰიროვერი

ჰიროვერი არის დისკის ფორმის ბრუნვადი რობოტი, რომელიც განავითარეს კარნეჟი მელონის უნივერსიტეტში და იგი იყენებს ბრუნვადი მასის ეფექტს სტაბილურობისთვის (ცაი, 1999). მიუხედავად იმისა, რომ ჰიროვერი არ ითვლება მკაცრად სფერული ფორმის რობოტად, მისი შესწავლა სასარგებლოა სფერული ფორმის რობოტების მოძრაობაზე ცოდნის გასაღმავებლად.

ჰიროვერის მთავარი მახასიათებელი არის მისი მბრუნავი მასა შიდა სხეულში, ანუ ჰიროსკოპი. წინ და უკან მოძრაობის მთავარი სისტემა ჰგავს ქანქარიანი რობოტის ლოკომოციის სისტემას. მაგრამ ტრიალის სისტემა განსხვავდება ქანქარიანი და IDU-იანი სფერული ფორმის რობოტების სისტემისაგან.

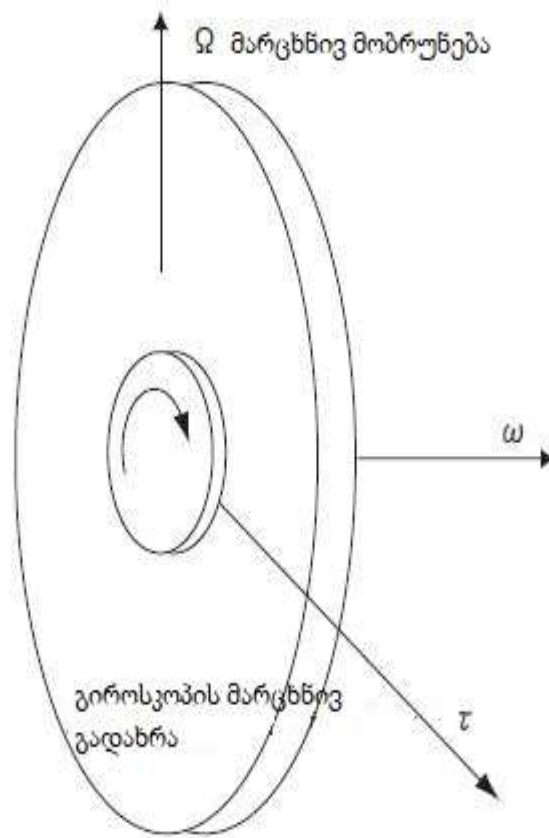


ნახ.10: ჰიროვერი

ჰიროვერი იყენებს სერვო ძრავს, რომელიც მომაგრებულია მბრუნავ ჰიროსკოპზე, რომელიც ხრის ჰიროსკოპის როტაციის ღერძს, რის შედეგადაც ვიღებთ სხეულის ბრუნვას. ამ დინამიკის ფუნდამენტური განტოლება არის ჰიროსკოპული პრეცესიის განტოლება:

$$\tau = J\omega X \Omega \quad (1)$$

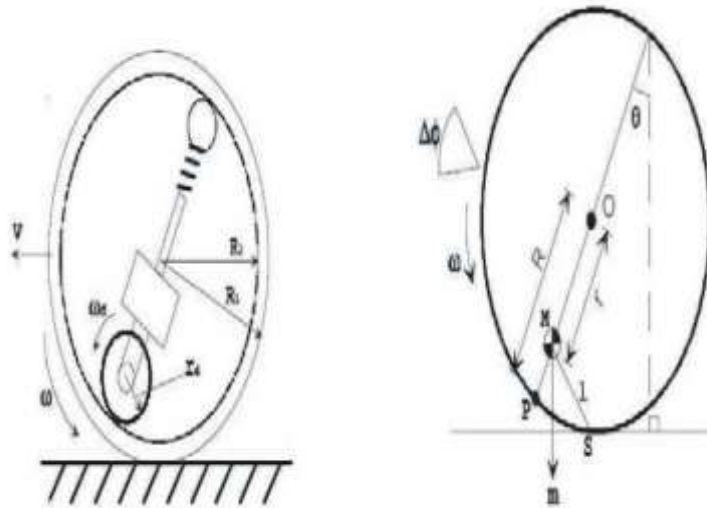
სადაც τ არის ჰიროსკოპის ძალვა, J არის ჰიროსკოპის ინერციის მომენტი, ω არის ჰიროსკოპის კუთხური ნორმა, Ω არის პრეცესიის ნორმა. ამ პრეცესიის განტოლებზე დაფუძნებით, რობოტის ბრუნვის მოძრაობა შეიძლება წარმოიქმნას ჰიროსკოპზე მომენტის გამოყენებით, როგორცაა ნაჩვენები ნახ.11-ზე.



ნახ.11: ბრუნვის ძირითადი პრონციპები

1.10 დინამიკის ანალიზი, IDU რობოტის ანალიზი

ჰალმა (1996) ჩაატარა IDU სფერული ფორმის რობოტების მოძრაობის საბაზისო ანალიზი. (ჰალმი და ვანგი, 1996) პირველ რიგში, რობოტის სტრუქტურა გამარტივებულია როგორც ნაჩვენებია სურათზე ნახ.12-ის მარცხენა მხარეს. აქ, თითო ნაწილი წარმოდგენილია წერტილოვანი მასა და ინერციის მომენტი გრავიტაციის ცენტრის გარშემო (ნახ.12 მარჯვენა მხარეს).



ნახ.12: მოდელირება

ამ მოდელზე დაფუძნებით, მოძრაობის ანალიზი ჩატარებულ იქნა შემდეგი როტაციის განტოლების გამოყენებით:

$$T = J \frac{d^2 \phi}{dt^2} \quad (2)$$

სადაც T არის ძალა, J არის ინერციის მომენტი ფა ϕ არის როტაციის კუთხე. განტოლება შეიძლება შემდეგნაირად იქნას გამოხატული:

$$rmg \sin \theta = I_{ball} \alpha \quad (3)$$

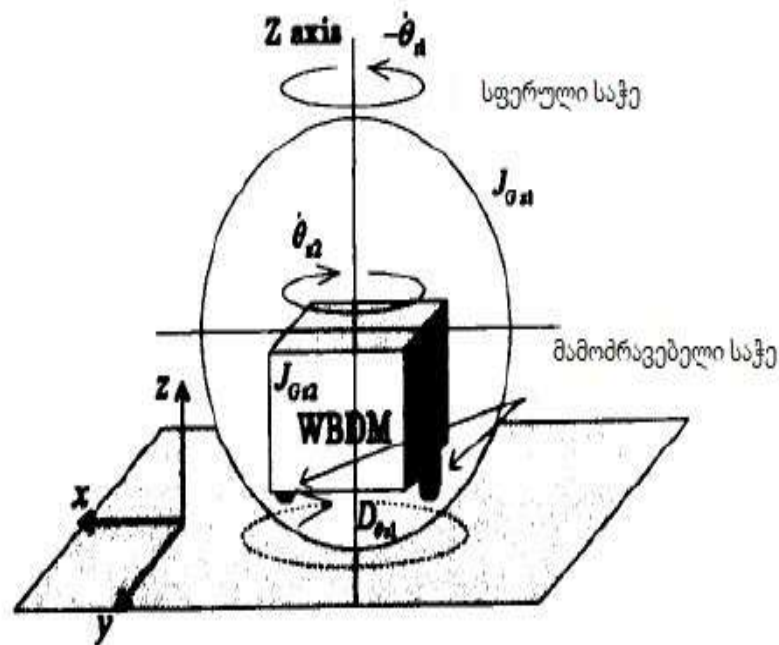
სადაც r არის დაშორება ბურთის გრავიტაციის ცენტრსა და IDU-ს გრავიტაციის ცენტრს შორის. M არის IDU-ს მასა, θ არის გადახრის კუთხე. I_{ball} არის ბურთის ინერციის მომენტი კონტაქტის წერტილის გარშემო მყოფი IDU-ს გამოკლებით (არა ინერციის მომენტი ბურთის გრავიტაციის ცენტრის გარშემო), g არის გრავიტაციის აჩქარება, α არის როტაციული აჩქარება. ეს ანალიზი ჩატარებულ იქნა შემდეგი შემთხვევებისათვის:

- თანაბარ ზედაპირზე გადაადგილებისას
- ზემოთ ასვლისას
- დაბრკოლების გადალახვისას
- მობრუნებისას გამოწვეული ხახუნის გათვალისწინებით მოძრაობისას

1.11 ლაგრანჟის განტოლებით

კოშიამამაც (1996) ჩაატარა საბაზისო მოძრაობის ანალიზი IDU რობოტისთვის. მან განაცალკავა წინ სვლის და მობრუნების მოძრაობები სიმარტივისთვის. ლაგრანჟის განტოლება გამოიყენა, რომ მოეპოვებინა მოძრაობის განტოლება მობრუნების და წინ სვლის ქეისებისთვის (კოშიამა და ფუჯი, 1996).

მობრუნების მოძრაობის განტოლების მიღება შემდეგნაირად შეიძლება:



ნახ.13: მობრუნების მოდელირება

ენერგიები (პოტენციური, კინეტიკური, როტაციული) როგორც სფეროსთვის, ასევე IDU-სთვის, შემდეგნაირია:

$$U_1 = U_2 = K_1 = K_2 = 0 \quad (4)$$

$$T_1 = \frac{1}{2}J_{z1}w_{z1}^2, T_2 = \frac{1}{2}J_{z2}(w_{z1} + w_{z2})^2 \quad (5)$$

U_1 : სფეროს პოტენციური ენერგია ცენტრთან მიმართებაში.

U_2 : ქანქარის პოტენციური ენერგია სფეროს ცენტროიდის სიმაღლესთან მიმართებაში.

K_1 : სფეროს კინეტიკური ენერგია

K_2 : ქანქარის კინეტიკური ენერგია

T_1 : სფეროს მობრუნების ენერგია

T_2 : ქანქარის მობრუნების ენერგია

J_{z1} : სფეროს ინერციის მომენტი მისი ვერტიკალური ღერძის გარშემო

J_{z2} : IDU-ს ინერციის მომენტი მისი ვერტიკალური ღერძის გარშემო

θ_{z1} : სფეროს მობრუნების კუთხე მისი ვერტიკალური ღერძის გარშემო

θ_{z2} : IDU-ს მობრუნების კუთხე მისი ვერტიკალური ღერძის გარშემო

სფეროსთან მიმართებაში

w_{z1} : სფეროს კუთხური ნორმა მისი ვერტიკალური ღერძის გარშემო

w_{z2} : IDU-ს კუთხური ნორმა მისი ვერტიკალური ღერძის გარშემო

სფეროსთან მიმართებაში.

ლანგრანჟის განტოლება:

$$L = K_1 + K_2 + T_1 + T_2 - U_1 - U_2 = \frac{1}{2} J_{z1} w_{z1}^2 + \frac{1}{2} J_{z2} (w_{z1} + w_{z2})^2 \quad (6)$$

აქ, ლანგრანჟის მოძრაობის განტოლება შეიძლება გამოვითვლილ იქნას როგორც:

$$T_z - T_{zf} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta w_{z1}} \right) - \frac{\delta L}{\delta \theta_{z1}} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta w_{z1}} \right) = a_{z2} J_{z2} + a_{z1} (J_{z1} + J_{z2}) \quad (7)$$

$$-T_z = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta w_{z2}} \right) - \frac{\delta L}{\delta \theta_{z2}} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta w_{z2}} \right) = a_{z2} J_{z2} + a_{z1} J_{z2} \quad (8)$$

სადაც T_z არის სფეროსა და IDU-ს შორის მოხმარებული ენერგია, T_{zf} არის სფეროსა და ზედაპირთან ხახუნისაგან წარმოქმნილი ენერგია, a_{z1}

რობოტის კუთხური აჩქარება მისი ვერტიკალური ღერძის გარშემო, a_{z2} არის IDU-ს კუთხური აჩქარებია მისი ვერტიკალური ღერძის გარშემო.

კოშიამამ ასევე ჩაატარა მობრუნების ექსპერიმენტი, რომელმაც გამოავლინა დამოკიდებულება მობრუნების კუთხესა და სფერული ფორმის რობოტის შიდა მასის გადანაცვლებებს შორის. ეს სრულიად ექსპერიმენტულია, ყველანაირი თეორიული დიმანიკის გამოძიების გარეშე. ექსპერიმენტი ძალიან მნიშვნელოვანია, რადგან IDU რობოტისგან განსხვავებით, ქანქარიანი რობოტის მოძრაობის დაყოფა არ შეიძლება წინ სვლისა და მობრუნების კატეგორიებად. როდესაც იგი ბრუნდება, გადაადგილება და მობრუნება ერთად ხდება, როგორც ჩვეულებრივი ავტომობილის შემთხვევაში.

1.12 გამოყენების გზები, სათამაშო

მიჩიუდმა (2000) განავითარა სათამაშო სფერული ფორმის რობოტი, რომელიც სავსებით მომხიბვლელია ბავშვებისათვის, რომლებიც მიჩვეულნი არიან ბურთის ტიპის სათამაშოებით გართობას, როგორცაა რეზინის, პლასტმასის ან გასაბერი ბურთები. დამატებით მრგვალი ფორმიდან არაფერი არ არის გამოწეული, რამაც შეიძლება ბავშვი დააზიანოს ან გატყდეს. ამ რობოტის სახელია „რობოლი“ და იყენებს ქანქარით სისტემას (მიჩიუდი და კარონი, 2000).

რობოლის მოძრაობა დაფუძნებულია ქცევაზე და გვთავაზობს მოძრაობის ოთხ ტიპს: „საგანგებო“, „ბზრიალი“, „სწორი“ და „კრუიზი“, რომლის გააქტიურება და გაჩერება შეიძლება მოვლენის მიხედვით. ეს გამარტივებული ცნებები საკმარისი იქნება ბავშვებისთვის.

ბავშვებთანაც ჩატარდა ექსპერიმენტი, ტესტებმა აჩვენა, რომ ბავშვები დაინტერესდნენ რობოლით და დაიწყეს თამაში. ბავშვების თამაშმა ასევე გვიჩვენა რომ ბურთის გონიერება ძალიან მნიშვნელოვანია, რადგან ბავშვები ხშირად ისვრიან სათამაშოებს ძირს.



ნახ.14: რობოტი, ბავშვი ეთამაშება რობოტს

1.13 მეთვალყურეობა

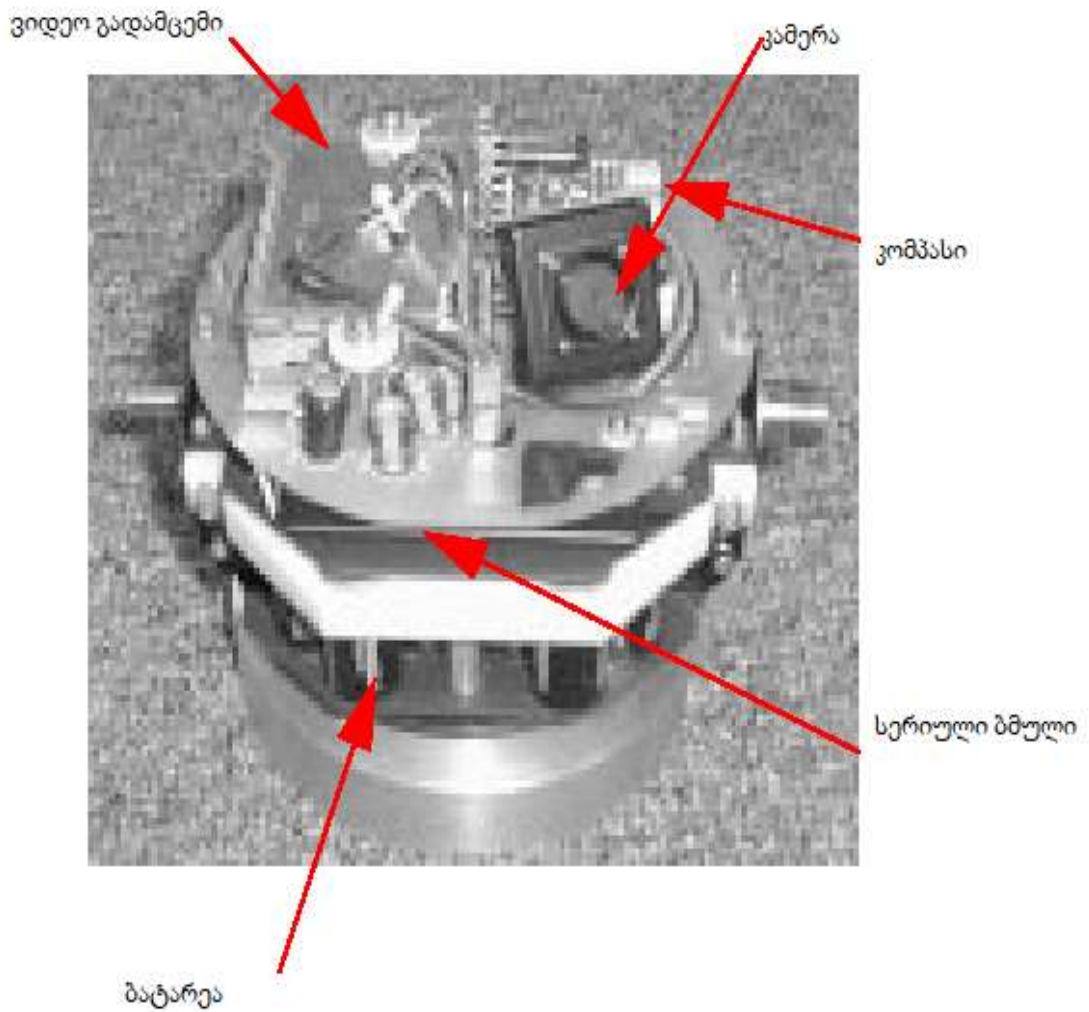
კიდევ ერთი რობოტის გამოყენების გზა არის მეთვალყურეობა. როტუნდუსმა 2004 წელს დაარსა შვედური კომპანია, განავითარა ქანქარიანი სფერული ფორმის რობოტი. (ნაითი 2005) მეთვალყურე რობოტებს უნდა ჰქონდეს ყველანაირ რელიეფზე გადაადგილების საშუალება, როგორცაა ტალახი და თოვლი. სფერული ფორმის რობოტები გვთავაზობენ ბევრ უპირატესობებს ასეთი ტიპის ზედაპირზე გადასადგილებლად. რობოტებს აქვს რადარი და ასევე ბევრი სხვა სენსორი გარე პირების აღმოჩენისათვის და განგაშის ხმა შეტყობინებისათვის.



ნახ.15: მეთვალყურე რობოტი

1.14 დაზვერვა

„ციკლოპი“ არის მინიატურული სფერული რობოტი, რომელიც შექმნილია შორეული მეთვალყურეობისა და დაზვერვისთვის ქალაქის პირობებში. (ქემელი, 1999) მინიატურული სფერული დიზაინის მოტივაცია წარმოიშვა პოლიციისა და სამხედროს მხრიდან ურბანულ ადგილებში მისიების ჩატარების მოთხოვნიდან. პატარა ზომა იძლევა მალული მეთვალყურეობის საშუალებას ჩაკეტილ სივრცეში. ამაზე დამატებით, შორეული მეთვალყურეობა გვამლევს საშუალებას თვალი ვადევნოთ სახიფათო ვითარებას შორიდან. მას ასევე საკმარისად მცირე პარამეტრები და წონა გააჩნია რაც ადვილს ხდის მისი ხელით გადაადგილებას. ციკლოპის ლოკომოციისა და კონტროლის სისტემა დაფუძნებულია ქვემოთ აღნიშნულ საბორტო სენსორულ სისტემაზე:



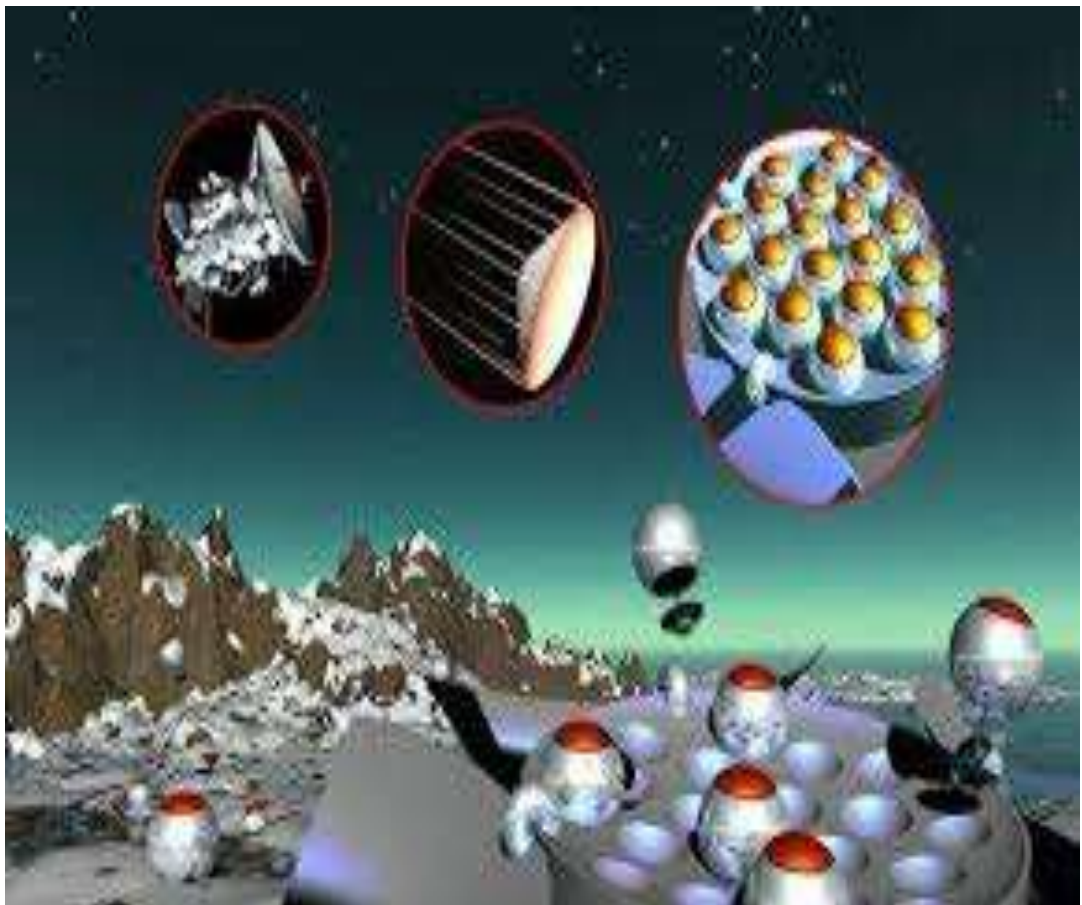
ნახ.16: ციკლოპი

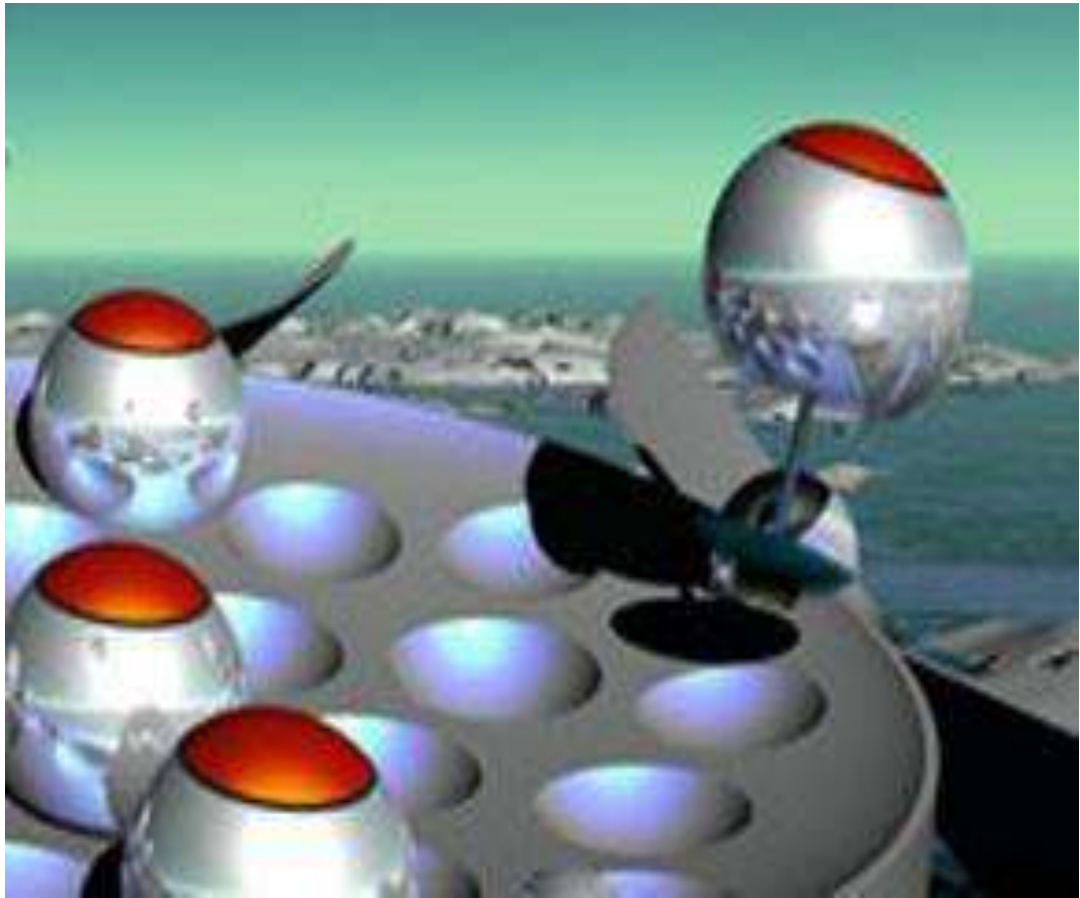
გადაადგილების სისტემა აქვს „თავისუფლების ორი ხარისხი“ ორი ძრავა როგორც ვერტიკალური ასევე ჰორიზონტალური ღერძის გაყოლებზე. ვერტიკალურ ღერძზე მოთავსებული ძრავა საჭიროა რობოტის თავის მოსაბრუნებლად, როდესაც ძრავა აბრუნებს რობოტში ჩადგმულ მასას, თვითონ სფერული სხეული საპირისპირო მხარეს ბრუნდება სარეაქციო ძალის გამო. ჰორიზონტალურ ღერძზე მყოფი ძრავა წინ და უკან სვლისთვისაა საჭირო. იგივე მასის მოტრიალებით რობოტს შეუძლია იტრიალოს წინ ან უკან გრავიტაციის მიერ წარმოშობილი ძალვის დამსახურებით.

1.15 კოსმოსური კვლევა

მასაჩუსეტსის ტექნოლოგიის უნივერსიტეტი აშშ-ში ავითარებს სფერულ რობოტებს, რომლებიც გადაადგილდებიან გორაკობისა და ხტუნვის საშუალებით. (იანგი, 2006) ამ რობოტების სხვა პლანეტაზე გაგზავნა შეიძლება მათი კვერცხის კარდონისებრი ყუთში ჩალაგებით.

რამდენიმე მინიატურული რობოტის ერთად გამოყენების უპირატესობა არის ის, რომ მათ შეუძლიათ კოოპერაცია და კოლექტიური მიზნის მიღწევა. მაგალითად სწორი პოზიციისას, მათ შეუძლიათ შეტყობინების გადაცემა ცენტრალური განყოფილებისთვის ღრმა გამოქვაბულებიდანაც კი.





ნახ.17: მარსზე გაგზავნილი სფერული მიკრო რობოტები

1.16 გასართობი რობოტი

2002 წელს „სონიმ“ განავითარა სფერული რობოტი გასართობად სახელად „კიუ-ტარო“ (Q.taro)



ნახ.18: გასართობი რობოტი კიუ-ტარო

მას აქვს გასაოცარი 36 სენსორი. ასევე შეუძლია საკუთარი თავი ჩართოს ან გამორთოს ადამიანის ხელების შეგრძნების მიხედვით. ასევე ავტომატურად თავს არიდებს ფიზიკურ დაზარალებებს . ამ ყველაფერზე დამატებით, როდესაც ბევრი ასეთი რობოტი ხვდება ერთად, ისინი იწყებენ ურთიერთობას და ერთმანეთთან კოოპერაციას. ისინი ასევე აღიქვამენ ხმებს და მაურს.

თავი 2

სფერული ფორმის რობოტის დინამიკა და მართვა

2.1 მოძრაობის დინამიკა

პირველ რიგში საჭიროა განვიხილოთ მოძრაობის დინამიურობის მოდელირებისა და დინამიკის ანალიზის საკითხები. ლანგრანჟის განტოლების გამოყენებით, ხდება მოძრაობის განტოლებები. 1996 წლის კოშიამას ანალიზი მოდიფიცირდა და მოერგო პენდულუმის მოძრავ სფერულ რობოტებს.

2.2 ჰორიზონტალური მოძრაობა

ენერგიები (პოტენციური, კინეტიკური, როტაციული) სფეროსათვის და პენდულუმისთვის, შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგი ფორმულებით

$$\begin{aligned} U_1 &= 0, \quad U_2 = -M_2 g e \cos(\theta_1 + \theta_2), \quad K_1 = \frac{1}{2} M_1 (r w_1)^2 \\ K_2 &= \frac{1}{2} M_2 \{ (r w_1 - e \cos(\theta_1 + \theta_2) (w_1 + w_2))^2 + (e \sin(\theta_1 + \theta_2) (w_1 + w_2))^2 \} \\ T_1 &= \frac{1}{2} J_1 w_1^2, \quad T_2 = \frac{1}{2} J_2 (w_1 + w_2)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

U_1 : სფეროს პოტენციური ენერგია დაკავშირებული მის ცენტრის სიმაღლესთან

U_2 : პენდულუმის პოტენციური ენერგია დაკავშირებული სფეროს ცენტრის სიმაღლესთან

K_1 : სფეროს კინეტიკური ენერგია

K_2 : პენდულუმის კინეტიკური ენერგია

T_1 : სფეროს როტაციული ენერგია

T_2 : პენდულუმის როტაციული ენერგია

r : სფეროს რადიუსი

e : მანძილი სფეროს ცენტრსა და პენდულუმს შორის

θ_1 : სფეროს როტაციული კუთხე

θ_2 : პენდულუმის მოძრაობის კუთხე დაკავშირებული სფეროსთან

W_1 : სფეროს კუთხის ცვლილების დროის ხანგრძლივობა

W_2 : პენდულუმის კუთხის ცვლილების დროის ხანგრძლივობა სფეროს ცენტრთან მიმართებით

J_1 : სფეროს ინერციის მომენტი ცენტრის მიმართ

J_2 : პენდულუმის ინერციის მომენტი ცენტრის გარშემო

M_1 : სფეროს მასა

M_2 : პენდულუმის მასა

g : გრავიტაციის აჩქარება

ლანგრანჟის ფუნქცია შეიძლება გამოვთვალოთ შემდეგი ფორმულით

$$L = K_1 + K_2 + T_1 + T_2 - U_1 - U_2 \quad (10)$$

ლანგრანჟის მოძრაობის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{w}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -T + T_f \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{w}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = T \quad (12)$$

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

$$\begin{aligned} -T + T_f = & a_1(J_1 + J_2 + M_1 r^2 + M_2 r^2 + M_2 e^2 - 2M_2 r e \cos(\theta_1 + \theta_2)) + \\ & a_2(J_2 - M_2 r e \cos(\theta_1 + \theta_2) + M_2 e^2) + M_2 r e \sin(\theta_1 + \theta_2) + \\ & + (\omega_1 + \omega_2)^2 + M_2 r e \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$T = a_1(J_2 - M_2 r e \cos(\theta_1 + \theta_2) + M_2 e^2) + a_2(J_2 + M_2 e^2) + M_2 g e \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (14)$$

პენდულუმის დახრის კუთხე ვერტიკალურ ღერძის მიმართ, კონკრეტულად $\theta_1 - \theta_2$ ეწოდება მოძრავი კუთხე.

2.3 აღმავალი და დაღმავალი მოძრაობა

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 ავლნიშნეთ მცირე ცვლილება U_1 და U_2 მნიშვნელობებში.

$$U_1 = -M_1 g r \theta_1 \sin \alpha \quad (15)$$

$$U_2 = -M_2 g r \theta_1 \sin \alpha - M_2 g e \cos(\theta_1 + \theta_2 + \alpha) \quad (16)$$

სადაც α არის გადახრის მიმართულება

$$-T + T_f = a_1(J_1 + J_2 + M_1 r^2 + M_2 r^2 + M_2 e^2 - 2M_2 r e \cos(\theta_1 + \theta_2)) + a_2(J_2 - M_2 r e \cos(\theta_1 + \theta_2) + M_2 e^2) + M_2 r e \sin(\theta_1 + \theta_2)(w_1 + w_2)^2 + M_2 g e \sin(\theta_1 + \theta_2) - (M_1 + M_2) g r \sin \alpha \quad (17)$$

$$T = a_1(J_2 - M_2 r e \cos(\theta_1 + \theta_2) + M_2 e^2) + a_2(J_2 + M_2 e^2) + M_2 g e \sin(\theta_1 + \theta_2 + \alpha) \quad (18)$$

2.4 დაბრკოლების გადალახვა

ამ ნაწილში განხილულია რობოტის მოძრაობის დაბრკოლების გადალახვა. ნახ.19 გვიჩვენებს სფერული 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.

მოძრაობის გრეხვის ძალა მეტია წინააღმდეგობის ძალაზე.

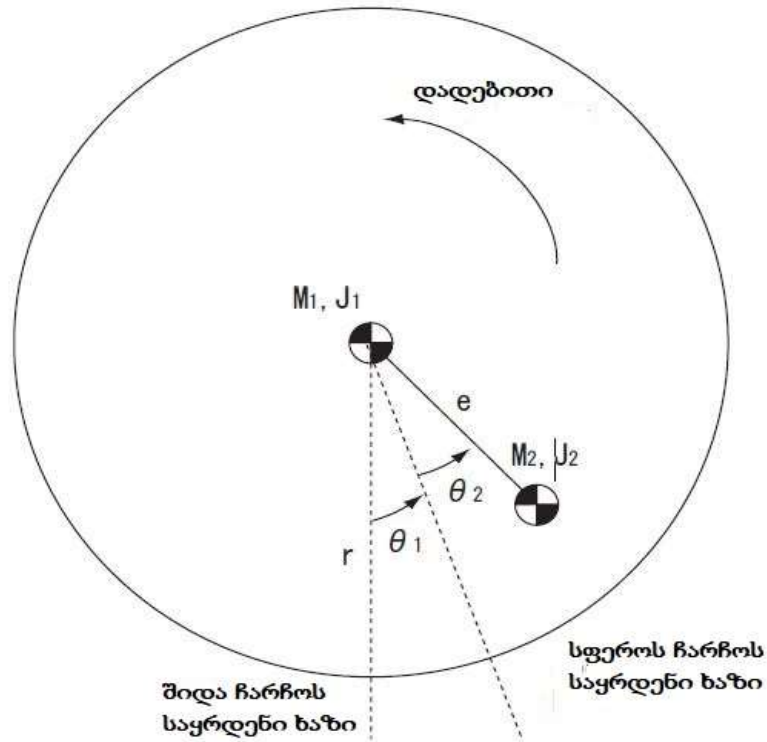
$$M_2 g e \sin \theta > (M_1 + M_2) \sqrt{r^2 - (r-h)^2}$$

$$M_2^2 e^2 \sin^2 \theta > (M_1 + M_2)^2 \{r^2 - (r-h)^2\}$$

$$(r-h)^2 > r^2 - \frac{e^2 \sin^2 \theta M_2^2}{(M_1 + M_2)^2}$$

$$h < r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{e \sin \theta M_2}{M_1 + M_2}\right)^2}$$

$$h_{max} = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{e M_2}{M_1 + M_2}\right)^2} \quad (19)$$



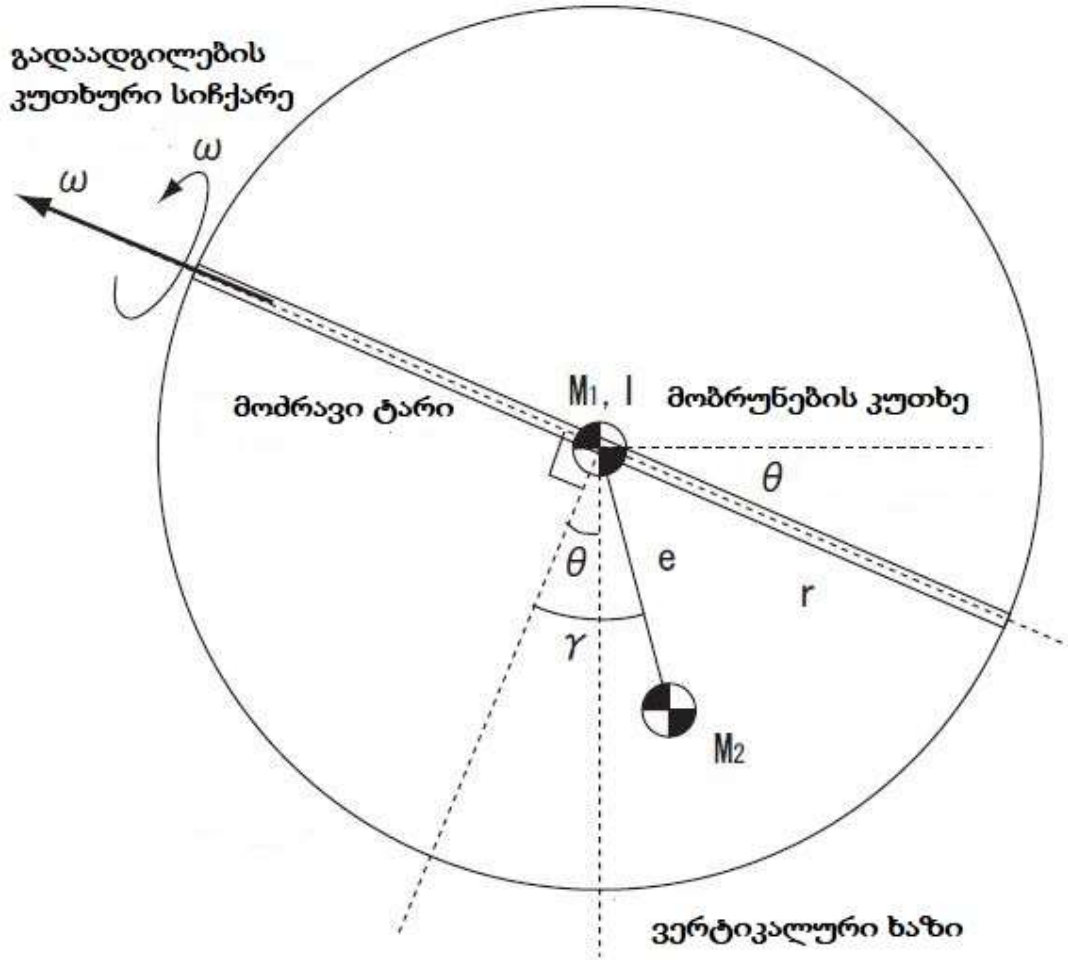
ნახ.19: სფეროს მოდელირება

სადაც h არის დაბრკოლების სიმაღლე, θ არის პენდულუმის მამოძრავებელი კუთხე. ამ კვლევაში შექმნილი რობოტის პარამეტრების შეცვლით, დაბრკოლების მაქსიმალური სიმაღლე, რომელიც შეიძლება გადალახული იქნას რობოტის მიერ ტოლია $0.0012 \text{ მ} = 1.2 \text{ მმ}$

რობოტის 22 სმ-იან რადიუსთან შედარებით 1.2 მმ არის მნიშვნელოვნად მცირე, რაც ნიშნავს რომ დაბრკოლების გადალახვა არის კრიტიკული სისუსტე სფერული რობოტის მოძრაობაში. შესაბამისად, საჭიროა დაბრკოლების გადალახვის რამდენიმე გამოსავალის მოძებნა. ეს მოიცავს რობოტის იმპულსის უპირატესობის გამოყენებას, პენდულუმის სწრაფი გადაადგილების საშვლებით, ასევე სადენიანი ნაწილის გამოყენებით, რომლის „ნახტომი“ ფუნქცია საშუალებას აძლევს დაბრკოლება გადალახოს მასთან შეხების გარეშეც კი.

2.5 მოდელირება

ნახაზზე ნაჩვენებია მართვადი მოძრაობის მოდელირება



ნახ.20: მართვის მოდელირება

θ : სფეროს ბრუნვადი კუთხე

γ : პანდულუმის სფეროსთან დაკავშირებული დახრის კუთხე

ω : მართვადი სფეროს კუთხოვანი ნიშნული

Ω : მართვის კუთხოვანი ნიშნული

r : სფეროს რადიუსი

e : მანძილი სფეროს ცენტრიდან პანდულუმს შორის

I : სფეროს ინერციის მომენტი ბრუნავი ღერძის გარშემო

M_1 : სფეროს მასა

M_2 : პენდულუმის მასა

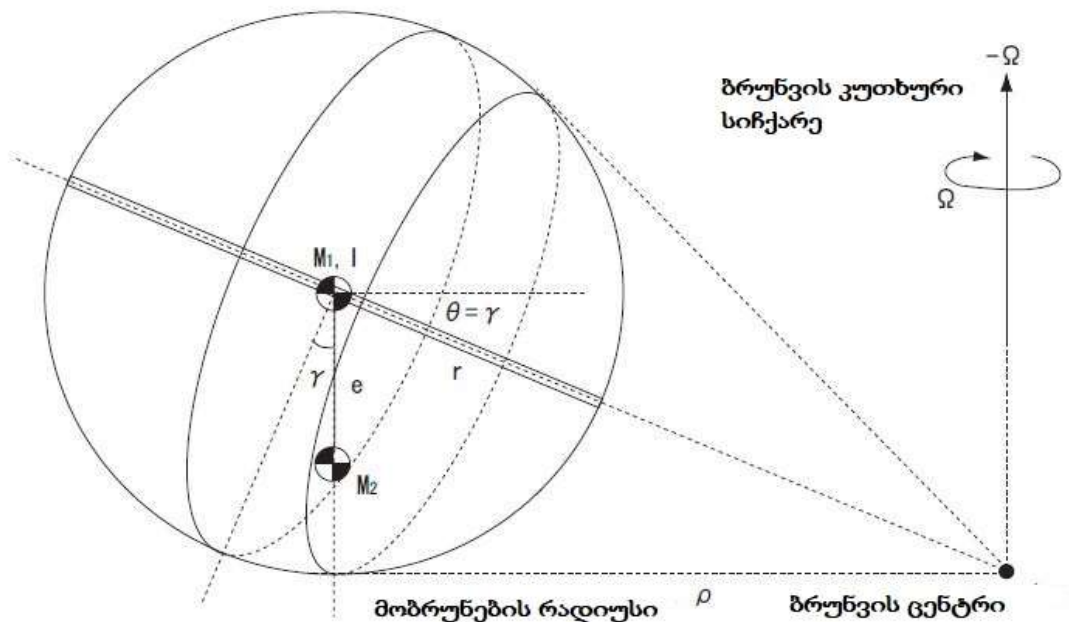
g : გრავიტაციის აჩქარება

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

2.6 დაბალი სიჩქარით მოძრავი სფერო

მოცემული შემთხვევის ანალიზისასთვის, ისევე როგორც საშუალო სიჩქარით მოძრავი სფეროს შემთხვევაში მთავარი პრინციპებია

- ძალთა თანასწორობა და ბრუნვა რომელიც შეიცავს ცენტრიდანულ ძალას
- რობოტი მისდევს წრფეს, სადაც ცენტრალური ადგილი არის ნიადაგის კვეთა და რობოტის მოძრავი ძალის ხაზი.



ნახ.21: დაბალ სიჩქარეზე ბრუნვის მოდელირება

გამოთვლების პროცესში ცენტრიდანული ძალა შეიძლება იყოს უგულველყოფილი როცა რობოტი მოძრაობს დაბალი სიჩქარით. ასეთ შემთხვევაში მოზრუნების კუთხე θ იგივეა რაც პენდულუმის მოძრავი კუთხე γ მოძრავი რადიუსი შეიძლება გამოვითვალოთ შემდეგნაირად:

$$p = \frac{r}{\tan \gamma} \quad (20)$$

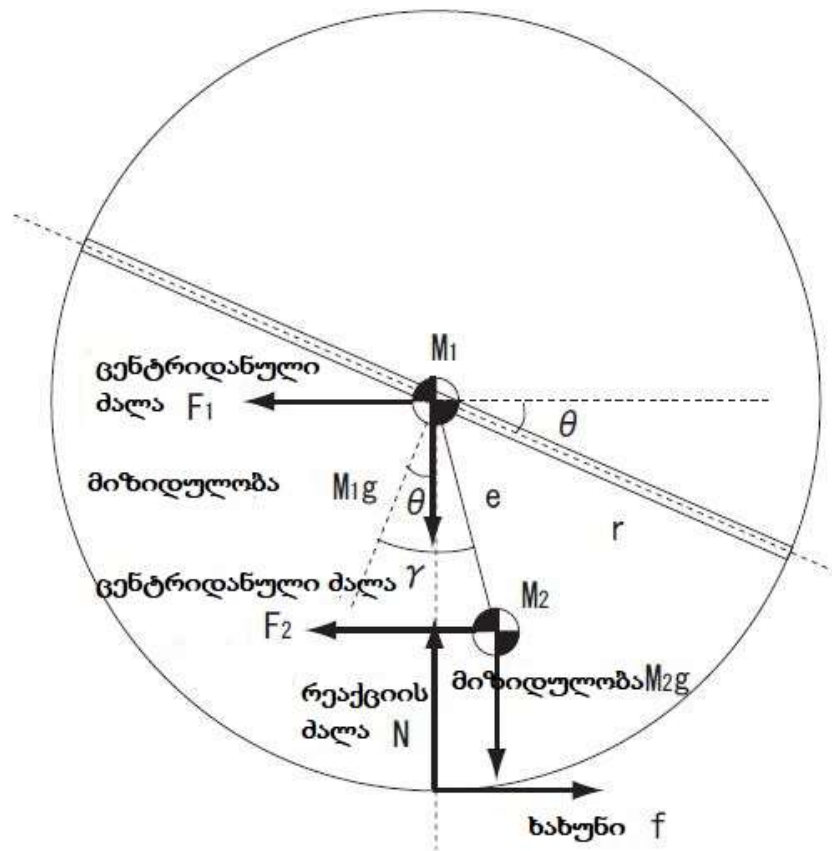
კუთხის ცვლილების სიჩქარე Ω გამოითვლება ფორმულით

$$(\text{მოძრაობის მანძილი}) = wr \cos \gamma = p\Omega \quad (21)$$

$$\Omega = \frac{wr \cos \gamma}{p} = \frac{wr \cos \gamma \tan \gamma}{r} = w \sin \gamma \quad (22)$$

2.7 საშუალო სიჩქარით მოძრავი სფერო

როდესაც რობოტი საშუალო სიჩქარით მოძრაობს, გირო ეფექტი შეიძლება იყოს უგულველყოფილი, მაგრამ ცენტრიდანული ძალა უნდა მივიგოთ მხედველობაში.



ნახ.22: თითოეულ ელემენტზე მოქმედი ძალები

F_1 : ცენტრიდანული ძალა არის სფეროს ცენტრში

F_2 : ცენტრიდანული ძალა არის პენდულუმის ცენტრში

N : ვერტიკალური რეაქციის ძალა, რომელიც მომდინარეობს კონტაქტის წერტილიდან.

f : არის კონტაქტის დროს მიმდებელი ხახუნი

$$F_1 = M_1 p \Omega^2 \quad (23)$$

$$F_2 = M_2 (p - \sin(\gamma - \theta) e) \Omega^2 \quad (24)$$

$$\Omega = \frac{v}{p} \quad (25)$$

ბრუნვისა და ძალის თანაფარდობა

$$F_1 + F_2 = f \quad (26)$$

$$N = (M_1 + M_2) g \quad (27)$$

$$r f = e \sin(\gamma - \theta) M_2 g + e \cos(\gamma - \theta) F_2 \quad (28)$$

სფეროს მრგვალი ფორმიდან გამომდინარე

$$\tan \theta = \frac{r}{p} \quad (29)$$

სიმარტივისათვის შეიძლება ვივარაუდოთ რომ θ და $\gamma - \theta$ არიან საკმარისად მცირე:

$$\sin(\gamma - \theta) \approx (\gamma - \theta) \quad (30)$$

$$\cos(\gamma - \theta) \approx 1 \quad (31)$$

$$\tan \theta \approx \theta \quad (32)$$

გარდა ამისა, რომ გამოვრიცხოთ მცირე მნიშვნელობების გამრავლება შემდეგი განტოლება მაინც მიიღება:

$$p = \frac{(M_1 + M_2) r v^2 + e M_2 (g r - v^2)}{e g M_2 \gamma} \quad (33)$$

როგორც შევამჩნიეთ (14) და (15) განტოლებებში მცირე შეცდომა დაფიქსირდა (16) ყოველთვის არ არის მცირე. მაგ: როგორც ტესტის შედეგები გვიჩვენებს 7,5. $\tan \theta$ შეიძლება იყოს იმდენივე როგორც 0,3 რომელსაც მივყავართ 3% შეცდომა (32) 10% ცდომილების დაფიქსირება

დამოკიდებულია შემობრუნებაზე. (33) განტოლება რაღაც კონტექსტში არასანდოდ მივიჩნიოთ. ამ სწავლების კონტროლის მეთოდები არ არის დაფუძნებული (33) განტოლებაზე. სფერული რობოტის მთავარი დამახასიათებელი ნიშნები, რაც უფრო მეტია ბრუნვის კუთხე და ნაკლებია სიჩქარე მით უფრო ზუსტი ხდება ბრუნვა. ამ მახასიათებლების გამოყენებისას რობოტს შეუძლია უკუკავშირით აკონტროლოს. მამასადამე მცირედი პროცენტული ცდომილება ნამდვილად არ შეუშლის ხელს მთავარი მიზნის მიღწევას და საკონტროლო მეთოდების შესწავლას.

2.8 მაღალი სიჩქარით მოძრავი სფერო

სფეროს მაღალი სიჩქარით მოძრაობისას არ უნდა ვუგუვებელყოთ არც გირო ეფექტი არც ცენტრიდანული ძალა. აქ $p \gg r > e$ მიახლოებითია. შეხების ადგილზე ხახუნის ძალა არის

$$f = F_1 + F_2 = M_1 p \Omega^2 + M_2 (p - \sin(\gamma - \theta) e) \Omega^2 \approx (M_1 + M_2) p \Omega^2 \quad (34)$$

ბრუნვა მიმართული სფეროსკენ არის

$$N = e \sin(\gamma - \theta) M_2 g + e \cos(\gamma - \theta) F_2 - r f \approx M_2 g e \sin(\gamma - \theta) + M_2 p \Omega^2 e \cos(\gamma - \theta) - r (M_1 + M_2) p \Omega^2 \quad (35)$$

$$\omega = \Omega \hat{z} - \theta \hat{l} + \omega \hat{k} = \Omega (\cos \theta \hat{m} - \sin \theta \hat{k}) - \theta \hat{l} + \omega \hat{k} \quad (\hat{z} = \cos \theta \hat{m} - \sin \theta \hat{k}) = \Omega \cos \theta \hat{m} + (\omega - \Omega \sin \theta) \hat{k} \quad (36)$$

$$L = I \Omega \cos \theta \hat{m} + I_3 (\omega - \Omega \sin \theta) \hat{k} \quad (37)$$

$$N = -N \hat{l} = \frac{dL}{dt} = \Omega * L = I \Omega^2 \cos \theta \hat{z} * \hat{m} + I_3 \Omega (\omega - \Omega \sin \theta) \hat{z} * \hat{k} = I \Omega^2 \cos \theta (-\sin \theta) \hat{l} + I_3 \Omega (\omega - \Omega \sin \theta) (-\cos \theta) \hat{l} = -\hat{l} (I \Omega^2 \cos \theta \sin \theta) + I_3 \Omega \cos \theta (\omega - \Omega \sin \theta) \quad (38)$$

$$N = I \Omega^2 \cos \theta \sin \theta + I_3 \Omega \cos \theta (\omega - \Omega \sin \theta) = I_3 \Omega \omega \cos \theta \left(1 + \frac{I - I_3 \Omega}{I_3 \omega} \sin \theta \right) = I_3 \Omega \omega \cos \theta \quad (39)$$

ω : სფეროს კუთხური სიჩქარის ვექტორი

Ω : სფეროს წრიული ბრუნვის კუთხური სიჩქარე

θ : სფეროს მობრუნების კუთხე

L : სფეროს მამოძრავებელი ძალის ვექტორი

I_3 სფეროს ინერცია მისი მოძრავი ღერძის გარშემო

I : სფეროს ინერცია მართობული მოძრავი ღერძის გარშემო

N : სფეროსკენ მიმართული ბრუნვადი ვექტორი

(34) და (39) -ის გამოთვლით ჩვენ ვიღებთ:

$$M_2 g e \sin(\gamma - \theta) + M_2 p \Omega^2 e \cos(\gamma - \theta) - r(M_1 + M_2) p \Omega^2 \approx I_3 \Omega \omega \cos \theta \quad (40)$$

გვაქვს შემდეგი განტოლებები:

$$\Omega = r \omega \cos \theta$$

$$\Omega = \frac{r \omega \cos \theta}{p}$$

$$I_3 \frac{r \omega \cos \theta}{p} \omega \cos \theta \approx$$

$$\approx M_2 g e \sin(\gamma - \theta) + M_2 p \frac{r^2 \omega^2 \cos^2 \theta}{p^2} e \cos(\gamma - \theta)$$

$$- r(M_1 + M_2) p \frac{r^2 \omega^2 \cos^2 \theta}{p^2}$$

$$I_3 \frac{r \omega^2 \cos^2 \theta}{p} \approx M_2 g e \sin(\gamma - \theta) + M_2 \frac{r^2 \omega^2 \cos^2 \theta}{p} e \cos(\gamma - \theta)$$

$$- r(M_1 + M_2) \frac{r^2 \omega^2 \cos^2 \theta}{p}$$

$$p M_2 g e \sin(\gamma - \theta) \approx r \omega^2 \cos^2 \theta (I_3 - M_2 r e \cos(\gamma - \theta) + r^2 (M_1 + M_2))$$

$$p \approx \frac{r \omega^2 \cos^2 \theta (I_3 - M_2 r e \cos(\gamma - \theta) + r^2 (M_1 + M_2))}{M_2 g e \sin(\gamma - \theta)}$$

თუ $\theta = 0$ ის დაბალანსებულია გირო ეფექტით და შემდეგი თანაფარდობა მიიღება

$$p \approx \frac{r \omega^2 (I_3 - M_2 r e \cos \gamma + r^2 (M_1 + M_2))}{M_2 g e \sin \gamma} \quad (41)$$

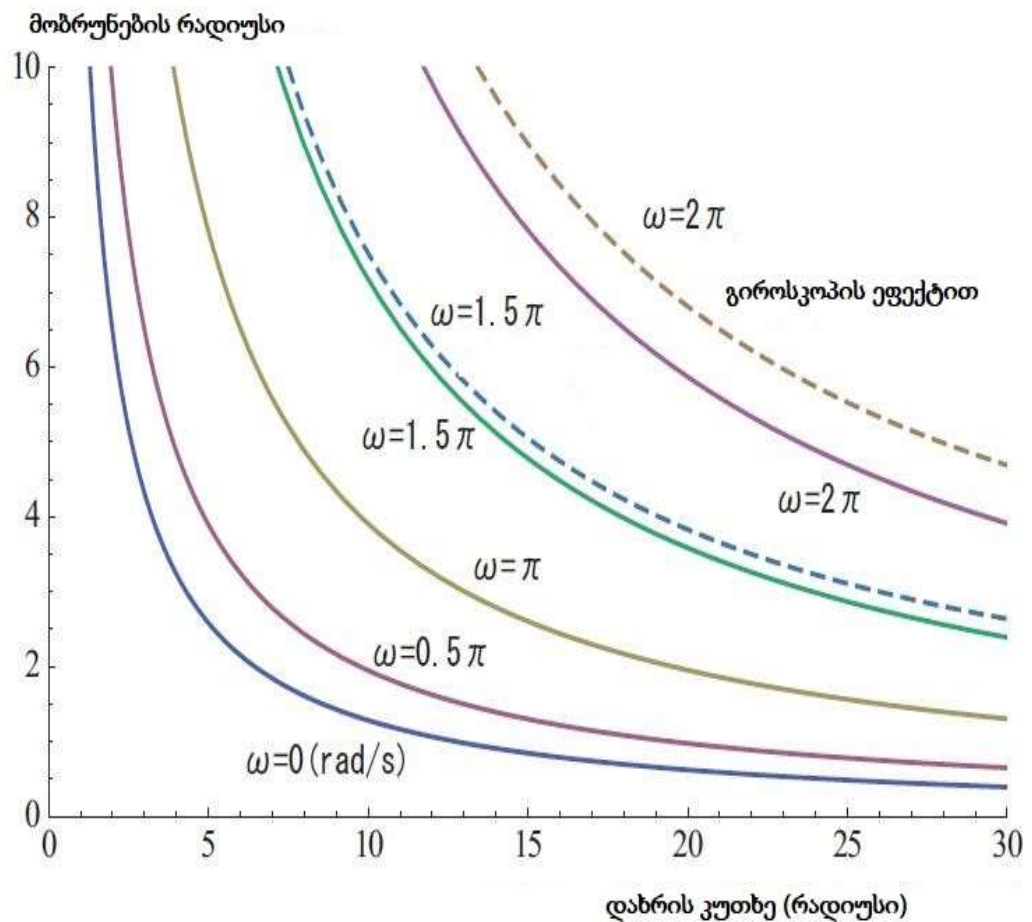
2.9 რიცხვითი გაანგარიშება

შესაძლებელია გამოვითვალოთ რამდენიმე სხვადასხვა პირობებში გამოვიყენოთ რა შემდეგი პარამეტრები პროტოტიპი რობოტისთვის.

ნულოვანი სიჩქარე ნიშნავს უსასრულოდ დაბალ სიჩქარეს . იგი ასევე შეგვიძლია მივიჩნიოთ როგორც მოძრავი ნიშან თვისებები და სრულიად ვუგუველბეყოთ ცენტრიდანული ძალა.

$$e = 0.065m, \quad g = 9.8 m/s^2, \quad M_1 = 3.294kg, \quad M_2 = 1.7995kg$$

$$r = 0.226m, \quad I_3 = J_1 = 6.33 \times 10^{-2} kgm^2, \quad v = rw$$



ნახ.23: ქანქარის ბრუნვის კუთხის საწინააღმდეგო მობრუნების კუთხე

როგორც ჩანს ბრუნვა ნელ-ნელა ხდება ციკაბო კუთხეები ფართოვდება და სიჩქარე ნელდება.

მთავარი ფაქტი რომელის გამოჩნდა არის რომ გირო ეფექტით და მის გარეშე სრულებით არ იცვლება ძირითადი ტენდეცია. რაც უფრო დაბალია სიჩქარე მით უფრო მეტია პენდულუმის მოძრავი კუთხე და მით უფრო

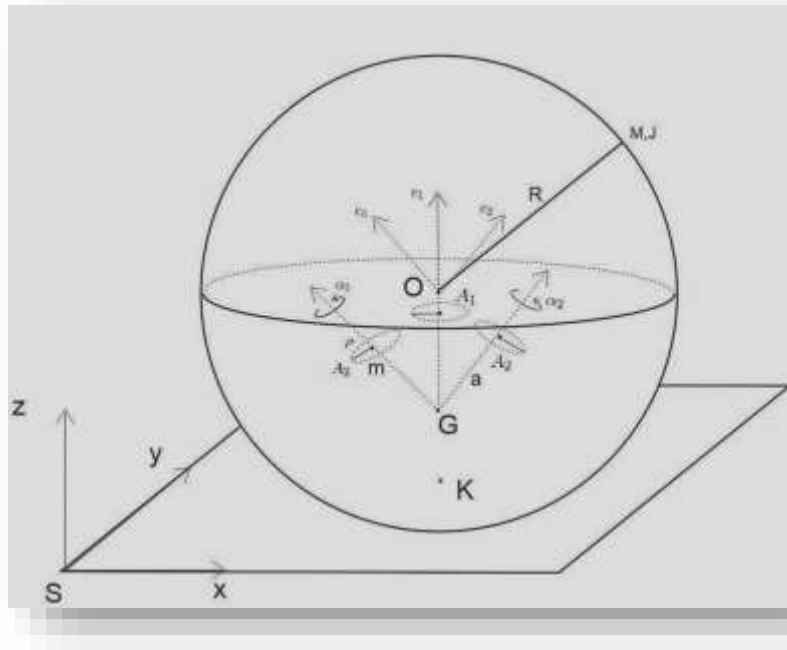
ძნელი ხდება მოძრაობა. ვინაიდან ეს ტენდეცია ნარჩუნდება გირო ეფექტით ან მის გარეშე მოძრაობის მთავარი სტრატეგია ხდება თანმივდევრული.

2.10 რობოტი-სფეროს დინამიკა და მართვა

მოდელის აღწერა. მოძრაობის განტოლება

განვიხილოთ Sxy უძრავ სიბრტყეზე R რადიუსიანი სფერო ცენტრით O წერტილში. სფერული გარსის შიგნით სამ ურთიერთმართობულ ღერძზე მოთავსებულია სამი ერთნაირი დისკი-მქნევარა m მასით და r რადიუსით. დაშორება ორთოგონალური მქნევარების გადაკვეთის G წერტილიდან თითოეული მქნევარის ცენტრამდე (წერტილი A_j) ტოლია. α მქნევარების ცენტრები მდებარეობენ სფეროს ეკვატორულ სიბრტყეზე. სფეროს მასა მქნევარების მასის გაუთვალისწინებლად არის - M . შემდეგ ვგულისხმობთ, რომ რობოტის მასის ცენტრი არის O წერტილში. ე.ი. ემთხვევა სფეროს გომეტრულ ცენტრს. OO'/R^1 ვექტორი ავლნიშნოთ ζ საშუალებით.

შემოვიღოთ მოძრავი $O'e_1e_2e_3$ კოორდინატთა სისტემა ცენტრით O' წერტილში, მისი ბაზისური ვექტორები e_i ითვლება რომ თანამიმართულები არიან მქნევარების ღერძების (GA_i). გადასვლის D მატრიცის საშუალებით, მოცემული $SO(3)$ -ზე. სამი კუთხური სიჩქარე მქნევარების ბრუნვისა თავისი ღერძების გარშემო ავლნიშნოთ α_i . შემდეგ გადავიდეთ უსასრულო კოორდინატებზე $x' = \frac{x}{R}, y' = \frac{y}{R}, z' = \frac{z}{R}$, ხოლო რადიუსის ვექტორი და სიჩქარის ვექტორი ავლნიშნოთ $r' = (x', y', z')^T$ და $v = d/dt(r')$ შემდგომში ფიზიკური მახასიათებლების ქვეშ, როგორც არის ძალა, სიჩქარე და ა.შ. იგულისხმება უსასრულო სიდიდეები, თუ წინასწარ არ გვექნება აღნიშნულის საწინააღმდეგო.



ნახ.24. სფეროს ფორმის რობოტის მოდელი

უნდა ჩავთვალოთ, რომ სფეროს ცენტრის სიჩქარის პროექცია ვერტიკალურ ღერძზე არის ნულის ტოლი, რომელსაც მივყავართ თანაფარდობასთან

$$(v - [w; \zeta]; e_z) = 0 \quad (42)$$

სისტემის კინეტიკური მომენტი წარმოვადგინოთ, მოძრავ კოორდინატთა სისტემაში შემდეგი სახით.

$$k = Iw + C\alpha \quad (43)$$

მოცემულ გამოსახულებაში პირველი შესაკრები წარმოადგენს სისტემის კინეტიკურ მომენტს „როგორც მთელი“, ხოლო მეორე შესაკრები უზრუნველყოფს მქნევარის ბრუნვას თავისი ღერძის მიმართ. C მატრიცა არის დიაგონალური მატრიცა, რომელიც შედგება მქნევარების ინერციის მომენტებისგან მათი ღერძების მიმართ, ხოლო I შეესაბამება სისტემის ინერციის ტენზორს. შევნიშნოთ, რომ ყველა ინერციული მახასიათებლები გაყოფილია რაიმე J ინერციის მომანტზე.

დინამიკის ზოგადი თეორემის გამოყენებით მივიღებთ:

$$\frac{dv}{dt} = f - \frac{g}{R} e_z \quad (44)$$

$$\frac{dk}{dt} = \mu^0 - b[\zeta + e_z; f] \quad (45)$$

f არის კონტაქტური ურთიერთქმედების ძალა, μ^0 არის კონტაქტში წარმოშობილი დამატებითი მომენტი. გარე ძალების სრული ვექტორი მომენტისათვის μ სამართლიანია, რომ $\mu = \mu^0 - b[\zeta + e_z; f]$, სადაც $b = (M + 3m)R/J$

შემდგომ, რიცხვითი გამოთვლებისათვის მიღებულია შემდეგი სიდიდეები: ვექტორი $e_z = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$, I მატრიცი იგულისხმება შემდეგი სახით:

$$I = \begin{pmatrix} v & 1 & 1 \\ 1 & v & 1 \\ 1 & 1 & v \end{pmatrix} \quad (46)$$

აქ $v = 50.6$ დიაგონალური C მატრიცა შედგება ერთნაირი ელემენტებისაგან $c = 0.1$. b -ს მნიშვნელობაა $b = 115$. სხვა მნიშვნელობებია $M = 4$ კგ, $m = 0.61$ კგ, რადიუსი ტოლია $0,2$ მ, $J = 0.002$, ხოლო $\zeta = 2$ მმ.

იმისათვის, რომ სისტემა გახდეს ჩაკეტილი, აუცილებელია კიდევ შემოვიტანოთ ვარაუდი კონტაქტური ურთიერთქმედების ხასიათზე ე.ი. მოცემული იყოს კავშირის განტოლება ან დამოკიდებული ძალისა და მომენტების ვექტორებზე.

2.11 მრუდწირული მოძრაობა

მონაკვეთზე გადაადგილების და ადგილზე მობრუნების გარდა პრაქტიკული თვალსაზრისით სასურველია ბაზისურ მოძრაობებში გვექონდეს მოძრაობა მრუდწირულ ტრაექტორიაზე. ნებისმიერ მრუდზე მოძრაობისათვის განტოლება შეგვიძლია მივიღოთ თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ $x = x(s), y = y(s), s = s(t)$ (s არის ნატურალური პარამეტრი). მაშასადამე იმისათვის, რომ სრულად განვსაზღვროთ მოძრაობის კანონი უნდა გვექონდეს $k(s), s(t)$ და $w(t)$ სადაც $k(s)$ მრუდის სიმრუდეა.

ვთქვათ მოცემული გვაქვს სფეროს ცენტრის მოძრაობის კანონი (ტრაექტორიის ქვეშ ვგულისხმობთ სფეროს ცენტრის მოძრაობის

ტრაექტორიას). ვსარგებლობთ იმით, რომ $v_0 = [w; e_z]$, ადვილად ვიპოვით კუთხური სიჩქარის ვექტორის ჰორიზონტალურ კომპონენტს. სასურველი ტრიალის (ბრუნვის) კანონის $w_z(t)$ -ს მიწოდებით შემავალი პარამეტრის სახით, შეგვიძლია მივიღოთ w ვექტორის სამივე კომპონენტი. შემდეგი ეტაპი არის

$$\frac{d\zeta}{dt} = [w; \zeta] \quad (47)$$

განტოლების ამოხსნა უცნობი ζ ვექტორის მიმართ. კინემატიკური $v = [w; \zeta + e_z]$ თანაფარდობიდან ვპოულობთ $v(t)$ დამოკიდებულებას, რის შემდეგაც მისი ჩასმით კინეტიკურ მომენტის განტოლებაში ვპოულობთ ჭეშმარიტ მართვას.

ასეთ მიდგომას აქვს ერთი არსებითი ნაკლი. დავალებული w შემთხვევაში $\zeta(t)$ დამოკიდებულება შეიძლება ვიპოვოთ, შესაბამისი დიფერენციალური განტოლების ამოხსნით. თუმცა კუთხური სიჩქარის თავისუფალი არჩევისას მოძრაობის ბოლოში შეიძლება არ მოდელს გადასვლა წონასწორობის მდგომარეობაში, ამიტომ განვიხილოთ სხვა მიდგომა.

ელემენტარული ტრაექტორია უწოდოთ სფეროს გეომეტრიული ცენტრის ისეთ ტრაექტორიას, რომელიც მიიღება მასის ცენტრის გადასვლისას ქვედა მდგომარეობიდან უმდაბლესში. შევნიშნოთ, რომ თუ მოძრაობის ბოლოს მასის ცენტრი აღმოჩნდება წონასწორობის ქვედა მდგომარეობაში, ხოლო მისი სიჩქარე იქნება ნულოვანი, მაშინ გეომეტრიული ცენტრის სიჩქარე იქნება ტოლი ნულის.

ვთქვათ, მთელი მოძრაობის დროს $w_z \equiv 0$, მაშინ ζ ვექტორის კომპონენტების განტოლებათა სისტემას ექნება შემდეგი სახე:

$$\frac{d\zeta_x}{dt} = \frac{ds}{dt} \frac{\partial x}{\partial s} \zeta_z \quad (48)$$

$$\frac{d\zeta_y}{dt} = \frac{ds}{dt} \frac{\partial y}{\partial s} \zeta_z \quad (49)$$

$$\frac{d\zeta_z}{dt} = -\frac{ds}{dt} \left(\frac{\partial y}{\partial s} \zeta_y + \frac{\partial x}{\partial s} \zeta_x \right) \quad (50)$$

მივიღოთ ψ კუთხე, ისე რომ დაკმაყოფილდეს ტოლობა $\cos \psi = \frac{\partial x}{\partial s}$,
 $\sin \psi = \frac{\partial y}{\partial s}$, საიდანაც $\|\zeta\| = A$, გადავიდეთ სფერულ კოორდინატებზე:

$$\zeta_x = A \cos \beta \cos \gamma \quad (51)$$

$$\zeta_y = A \cos \beta \sin \gamma \quad (52)$$

$$\zeta_z = A \sin \beta \quad (53)$$

საწყისი სისტემა გადავწეროთ შემდეგ სახეში:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{ds}{dt} \cos(\psi(s) - \gamma) \quad (54)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} \cos \beta = \frac{ds}{dt} \sin \beta \sin(\psi(s) - \gamma) \quad (55)$$

თუ მიღებულ სისტემაში მოვახდენთ შეცვლას $\xi = \psi - \gamma$ მაშინ მივიღებთ შემდეგ სისტემას :

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{ds}{dt} \cos \xi \quad (56)$$

$$\frac{ds}{dt} \left(\frac{\partial \psi}{\partial s} \cos \beta - \sin \xi \sin \beta \right) = 0 \quad (57)$$

აღსანიშნავია რომ $\frac{\partial \psi}{\partial s}$ სხვა არაფერია თუ არა მოცემული მრუდის $k(s)$ სიმრუდე.

როგორც ადრე ავღნიშნეთ $s(t)$ და $k(s)$ დავალეებული ფუნქციები არ გვაძლევენ იმის გარანტიას, რომ ბირთვის მასის ცენტრი მოძრაობის დასასრულს არ მოხვდება წონასწორობის უმდაბლეს მდგომარეობაში. თუ მოცემული გვექნება მრუდი, რომელშიც უნდა მოხდეს მოძრაობა და უნდა მოხდეს $k(s)$ ფუნქციის განსაზღვრა. საბოლოოდ შემდგომი იდეა მდგომარეობს იმაში რომ, უნდა იქნას მოცემული $\xi(t)$ ფუნქცია ან $\beta(t)$ ფუნქცია იმისათვის რომ ტრაექტორია გახდეს ელემენტარული და მხოლოდ ამის შემდეგ უნდა იქნას მოძებნილი $s(t)$ ფუნქცია.

2.12 რობოტი აბსოლიტურ ხორკლიან ზედაპირზე

თავდაპირველად გავჩერდეთ (განვიხილოთ) ასეთ ამოცანებში ყველაზე გავრცელებული ამოცანა ეგრეთწოდებული „არაგოლონომიური მოდელი“, ე.ი. ვიგულისხმობთ, რომ სფერო მოძრაობს აბსოლიტურად ხორკლიან სიბრტყეზე და სიჩქარე K წერტილში (სფეროს სიბრტყესთან შეხების წერტილი) არის ნული. ავლნიშნობთ, რომ ამ პირობიდან გამომდინარეობს რომ ბირთვის მასის ცენტრის სიჩქარის ვერტიკალური კომპონენტი აგრეთვე ნულის ტოლია. სხვა სიტყვებით, მართებულია ტოლობა:

$$v = [w; \zeta + e_z] \quad (58)$$

შენიშვნა.

მოცემული მოდელის ფარგლებში თანაფარდობა გარდაიქმნება შემდეგი სახით:

$$\frac{d}{dt} [k + bw \|\zeta + e_z\|^2 - b(\zeta + e_z)(w; \zeta + e_z)] = -b \left(w(\zeta; [w; e_z]) + \frac{g}{R} [\zeta; e_z] \right) \quad (59)$$

2.13 ხახუნის ძალისა და მომენტის ანალიზი

თავდაპირველად შევჩერდეთ ძალისა და მომენტის როგორც რეჟიმული θ კუთხის ფუნქციის ანალიზზე. ეს აუცილებელია როგორც დინამიკის უკუ ამოცანის გადაწყვეტისათვის, ასევე სისტემის თავისუფალი დინამიკის კვლევისათვის (პირდაპირი ამოცანების გადაწყვეტა). ამასთან ერთად აღსანიშნავია ამ ფუნქციების π - ანტიპერიოდულობა, ამიტომ საკმარისია შემოვისაზღვროთ $\theta \in [0; \pi]$ მონაკვეთით. გარდა ამისა აღნიშვნის ღირსია ის, რომ პრაქტიკაში უფრო რეალიზებადი რობოტის მოძრაობა უნდა შეესაბამებოდეს უპირატესი ქანაობის რეჟიმს (ე.ი. მოცურება იქნება არსებითად მცირე ვიდრე რხევა), რაც იმას ნიშნავს რომ θ იმყოფება საკმაოდ მცირე მონაკვეთში $\pi/2$ წერტილთან.

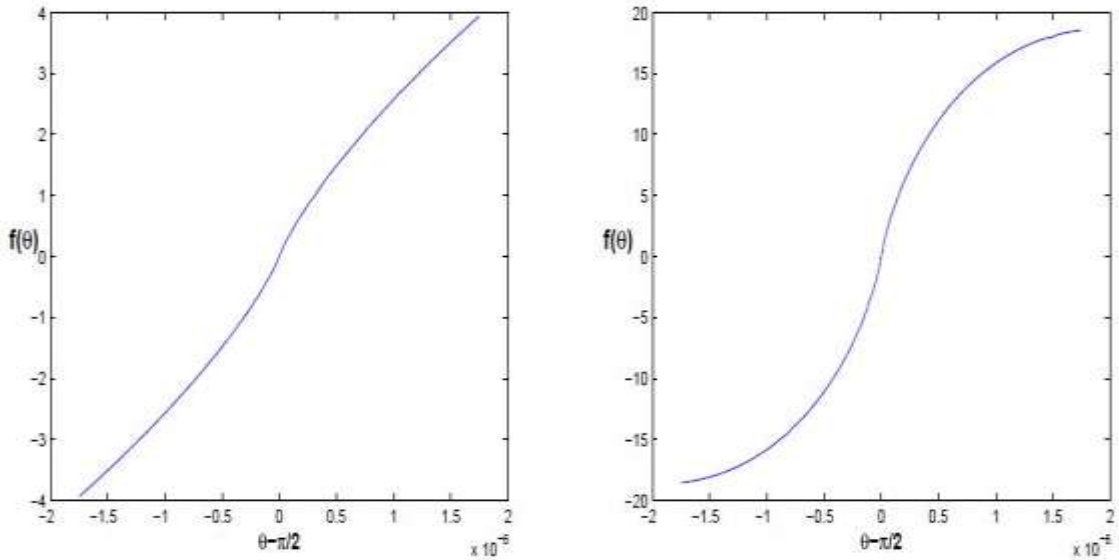
მტკიცება. $f(\theta) \in C(0; \pi)$ უ იზრდება ამ შუალედში. მტკიცების პირველი ნაწილი ცხადია, რადგანაც ინტერვალში ფუნქციაა უწყვეტია (ერთადერთი პოტენციურად განსაკუთრებული წერტილი, რომელიც დაკავშირებულია მნიშვნელის ნულთან ტოლობასთან მოდის ზუსტად $\theta = \pi/2$ მნიშვნელობასთან, თუმცა ამ შემთხვევაში ინტეგრალი არსებობს და სასრულია). აღსანიშნავია, რომ ამ შემთხვევაში

$$f(\pi/2) = -\frac{kg\varepsilon^2\delta^2}{5R(1+\sqrt{1-\varepsilon^2\delta^2})} \quad (60)$$

განსახილველი ფუნქციის წარმოებული ასეთია:

$$\frac{\partial I_{u1}}{\partial \theta} = \int_0^{2\pi} \frac{\sin^4 \beta \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \sin \theta}{(l(\theta))^{3/2}} \quad (61)$$

მაშასადამე ცხადია, რომ როცა $\sin \theta > 0$ $f(\theta)$ ფუნქცია იზრდება. აღნიშვნის ღირსია ის, რომ $\partial f / \partial \theta$ წარმოებულის $\pi/2$ აქვს მეორე რიგის წყვეტა, ეს უკავშირდება იმას, რომ β მიხედვით ინტეგრალი განშლადია ($\beta = 0$ წერტილის სიახლოეს აღიძვრება $1/\beta$ სახის განუზღვრელობა). შემდგომში გამომდინარე იქედან, რომ $f(\pi/2) < 0$ ხოლო $f(\pi) > 0$, არსებობს ისეთი θ f კუთხე რომლისთვისაც $f = 0$. მოვიყვანოთ f ძალის გრაფიკები $\theta = \pi/2$ წერტილის მიდამოში (პირველი გრაფიკი შეესაბამება შემთხვევას, როცა $\delta = 0.13$, $\varepsilon = 0.06$, მეორე კი $\delta = 0.03$, $\varepsilon = 0.06$. ძნელი არ არის შევნიშნოთ რომ $f(\theta)$ ზრდას ადგილი აქვს შემდეგ მტკიცებულებით



ნახ.25. ძალის გრაფიკი

მტკიცება. მოძრაობა უძრავი მდგომარეობიდან შესაძლებელია, თუ $\theta(0+) \in (\theta_f; \theta)$, სადაც $\theta = \pi - \arctg 1/\delta$ განსაზღვრების ძალით

$$v = r \left(\frac{1}{\delta} \cos \theta + \sin \theta \right) \quad (62)$$

იმისათვის, რომ უძრავი მდგომარეობიდან მოძრაობა იყოს შესაძლებელი აუცილებელია, რომ სიჩქარე და აჩქარება რაიმე ნულთან ახლოს მცირე მოდამოში ჰქონდეს ერთნაირი ნიშანი "+". θ_* კუთხეს ვუწოდოთ სრული ბუქსირების კუთხე, ამ შემთხვევაში $v=0$ მმ და სფერო დგას ადგილზე. კუთხური სიჩქარე ტოლია სრიალის სიჩქარის უკუნიშნით. შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ $f(\theta_*) > 0$ სიბრტყის პარამეტრების ნებისმიერი მნიშვნელობისათვის. მაშასადამე რობოტის სტარტი შესაძლებელია მხოლოდ $\theta \in (\theta_f; \theta_*)$ რეჟიმით. გარდა ამისა საჭიროა შევნიშნოთ, რომ სისტემის თანაბარაჩქარებული მოძრაობა ექვივალენტურია $\theta = const$ ე.ი. მუდმივია დამოკიდებულება კუთხური სიჩქარისა და ბირთვის სრიალის სიჩქარის.

მტკიცება. ფუნქცია $\mu^0(\theta) \in C(\pi/2; \pi)$ ზრდადია ამ მონაკვეთებზე. უწყვეტობის ჩვენება ხდება ისევე როგორც f ძალისათვის. I_{w2} წარმოებული ტოლია:

$$\frac{\partial I_{w1}}{\partial \theta} = \int_0^{2\pi} \frac{\sin^4 \beta \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \sin \theta}{(l(\theta))^{3/2}} \quad (63)$$

ცხადია რომ θ როდესაც მდებარეობს ამ მონაკვეთებზე ეს წარმოებული არის უარყოფითი, ხოლო μ^0 ფუნქციის წარმოებულის მნიშვნელობა დადებითია. აგრეთვე აღსანიშნავია, რომ არსებობს წარმოებულის მეორე რიგის წყვეტა $\pi/2$ წერტილში და სრულდება დამოკიდებულება:

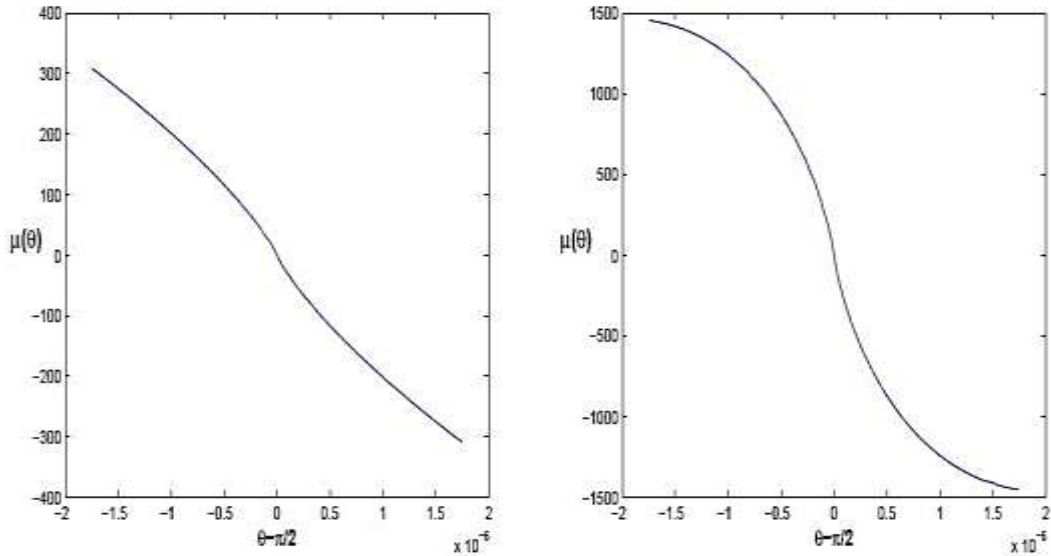
$$\frac{\delta}{b} \frac{\partial \mu^0}{\partial \theta} \sin \theta = - \frac{\partial f}{\partial \theta} \cos \theta \quad (64)$$

მტკიცებულებიდან გამომდინარე, აგრეთვე გამომდინარე წარმოებულის ცხადი სახიდან ვიღებთ მნიშვნელოვან ფაქტს:

მტკიცება. ფუნქცია $\mu(\theta) \in C(0; \pi)$ კლებადია $\theta \in [0; \theta]$ მონაკვეთზე. მართლაც გამოვდივარ რა $\mu = \mu^0 - bf$ არის ცხადი სახის და აქედან გამომდინარეობს ფუნქციის უწყვეტობა. რაც შეეხება წარმოებულს:

$$\frac{\partial \mu}{\partial \theta} = b \frac{\partial (\delta \mu^0 - f)}{\partial \theta} = -b \frac{\partial f}{\partial \theta} \left(\frac{1}{\delta} \cos \theta + \sin \theta \right) \quad (65)$$

მოვიყვანოთ მომენტების გრაფიკი $\theta = \pi/2$ წერტილის მიდამოში (სიბრტყის პარამეტრები ანალოგიურია იმის რაც მოცემული იყო ძალისათვის):



ნახ.26: მომენტების გრაფიკი

აღსანიშნავია, რომ $\mu(\pi) = -\mu(0) < 0$ ე.ი. არსებობს კუთხე $\theta \mu \in (0; \pi/2)$, რომლისათვისაც $\mu = 0$. $\mu(\theta f)$ სიდიდე შეგვიძლია ჩავთვალოთ უძრავობის ხახუნის მომენტად, რომელიც უნდა გადაილახოს რათა მოხდეს მოძრაობის დაწყება. ამ მომენტის სიდიდე დამოკიდებულია კონტაქტის პარამეტრებზე.

მტკიცება : ვთქვათ დროის რაღაც მონაკვეთისათვის მოძრაობის ტრაექტორია არის გლუვი მრუდი, ისეთი რომ $k(s)|=0$ ყოველ წერტილში, ამასთან მოძრაობა იწყება უძრავი მდგომარეობიდან. მაშინ მთელ მოძრაობაზე $f(t) \geq 0$, ამასთან ნულთან ტოლობის მიღწევა შეიძლება მხოლოდ ამ მონაკვეთის ბოლოში.

მართლაც, განსახილველ ტრაექტორიაში s ნიშანი დადებითია და არ იცვლება მთელ მონაკვეთზე. საწყისი პირობების ძალით ადვილი შევნიშნოთ, რომ $\varphi(0)=0$. როდესაც $f(0)>0$, s დადებითობის გამო საწყისი დროის მომენტის რაიმე მიდამოში. თუ რაიმე წერტილში f ხდება ნული, ეს იწვევს იმას რომ ან $k(s)$ ხდება ნულის ტოლი, ან s , რაც ეწინააღმდეგება ზემოთ გაკეთებულ დაშვებას.

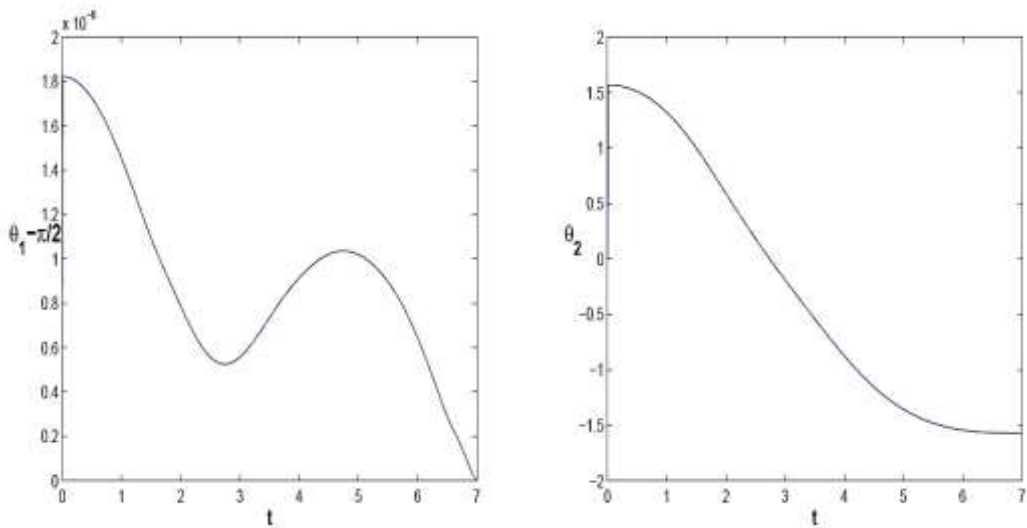
ახლა განვიხილოთ კერძო შემთხვევა, სახელდობრ მოძრაობა წრეწირის რკალზე რადიუსით p . ψ კუთხისათვის რომელიც არის კუთხე მხებ

ვექტორსა და Sx ღერძს შორის სწორია, რომ $\psi = \rho s$ (აქ იგულისხმება, რომ ყველა საწყისი საწყისი პირობა ნულოვანია) მოძრაობის კანონად ვირჩევთ ისეთს, რომელიც უზრუნველყოფს საკმარისად უზრუნველყოს სიგლუვე ისეთი ფუნქციის როგორც (62)-ში, სახელდობრ:

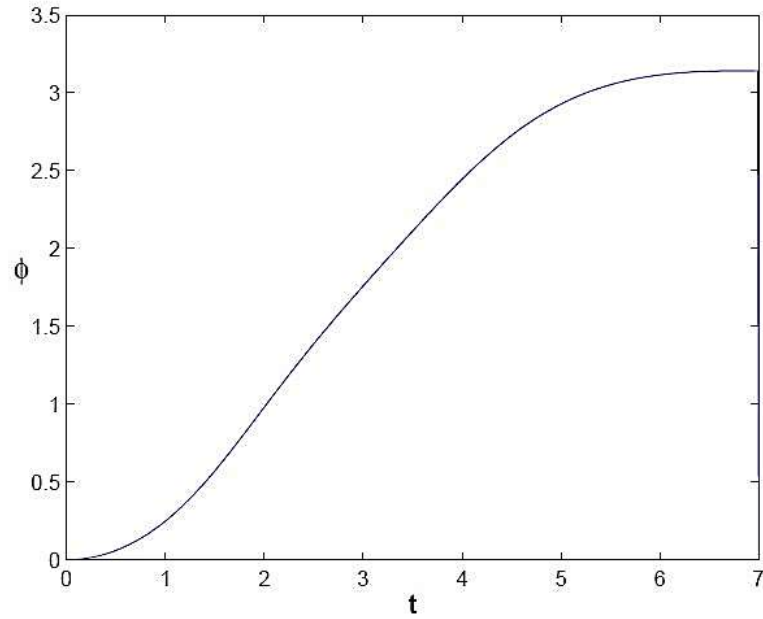
$$\dot{s}(t) = A \cos \frac{\eta t}{2} \sin \eta t \quad t \in [0; \pi/\eta] \quad (66)$$

$k(s)$ სიმრუდისათვის ჩვეულებრივ არჩეულია $k(s) = 1/\rho$ ტოლობა.

მოვიყვანოთ შედეგები განტოლებათა სისტემის რიცხვითი ამოხსნის იმ შემთხვევისათვის, როცა $\Delta\psi = \pi/2$, $\rho = 4$, $\eta = \pi/7$

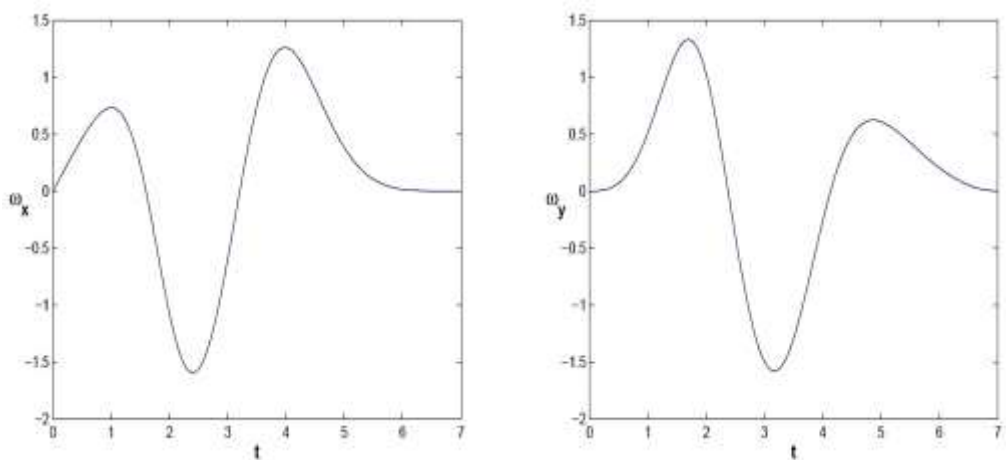


ნახ.27: θ_1, θ_2 ცვლადები



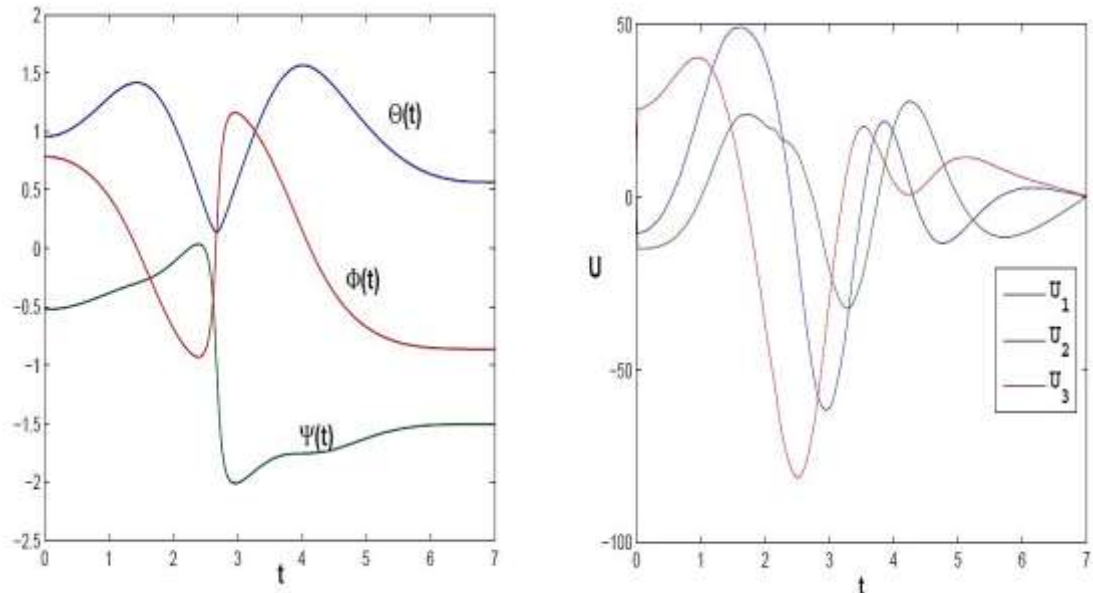
ნახ.28: ϕ ცვლადი

წრფეზე მოძრაობისაგან განსხვავებით, სადაც ყველა სამივე განტოლება კინეტიკური მომენტების დადის ერთზე უძრავ ღერძზე პროექციით, ამ შემთხვევაში მართვის მოძებნისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ $D(t)$ დამოკიდებულება. როგორც ლოკალურ კოორდინატებათ $SO(3)$ მრავალ სახეობაზე უნდა ავიღოთ ეილერის კუთხეები Θ, Ψ, Φ . (დიდი ასოებით ვისარგებლოთ, იმიტომ, რომ არ აგვერის უკვე გამოყენებულ კუთხეებში).



ნახ.29: ω_x, ω_y ცვლადები

აღწერილი მოძრაობის ეილერის კუთხეების ევოლუცია მოვიყვანოთ ქვემოთ მარცხენა გრაფიკზე:



ნახ.30: ეილერის კუთხეების ევოლუცია და მართველი ძალა

მარცხენა გრაფიკზე საწყისი პირობები არის შემდეგი:

$$\theta(0) = \arctg\sqrt{2}, \psi(0) = -\pi/6, \phi(0) = \pi/4. \quad (67)$$

2.14 მოძრაობა წრფეზე

ვგულისხმობთ, რომ სფეროს ცენტრის ტრაექტორია ემთხვევა Sx ღერძის ნაწილს. ამ შემთხვევაში $v_o = v_{ox}a$ არსებობიდან გამომდინარე და $v_o = [w; e_z]$ დამოკიდებულებიდან ვღებულობთ $w = w(t)e_y$. 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

მოდრაობა როგორც ალფავიტური გამართლებულია. წინა პუნქტების ანალოგურად შეიძლება მივიღოთ, რომ:

$$\zeta_x = A \sin \theta, \quad \zeta_z = A \cos \theta, \quad \frac{d}{dt} \theta = w(t), \quad A = \|\zeta\|, \quad (68)$$

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

$$\frac{d}{dt} [k + ((A^2 + 1)w + 2w\zeta_z)e_y] = -b \left(w^2 + \frac{g}{R} \right) \zeta_x e_y \quad (69)$$

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

$$\frac{dk_y}{dt} = -b \left[(A^2 + 1) \frac{dw}{dt} + 2 \frac{dw}{dt} \zeta_z - \zeta_x \left(w^2 + \frac{g}{R} \right) \right] \quad (70)$$

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:

$$\varphi \left(\theta, \frac{d\theta}{dt}, \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) = \varphi_0 - b \frac{d\theta}{dt} (A^2 + 1) + A \frac{d\theta}{dt} \cos \theta + A \int_0^t \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \cos \theta - \frac{g}{R} \sin \theta \right) d\tau \quad (71)$$

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 რამოდენიმე ასეთი მოძრაობა Θ კუთხისათვის $w(t)$ ასეთი არჩევისას სამართლიანია გამოსახულება

$$\theta(t) = \begin{cases} \frac{Et^2}{2} - \frac{\pi}{2}, \\ -\frac{\pi}{2} - Et^2 + 2ETt - \frac{Et^2}{2}, \text{ როცა } t \in [T, 2T] \end{cases} \quad (72)$$

2.15 ვერტიკალური ღერძის გარშემო ბრუნვა

განვიხილოთ არაგოლონომიური ბალანსირებული სფეროს ადგილზე მობრუნების ანალოგი, ბრუნვა ვერტიკალური ღერძის მიმართ. არაბალანსირებული სფეროს შემთხვევაში ვთვლით რომ „სფეროს ტრაექტორია“ ეს არის მისი O ცენტრის კვალი Sxy სიბრტყეზე ან რაც იგივეა ეს არის კონტაქტის k წერტილის კვალი. ვერტიკალური ღერძის გარშემო ბრუნვის შემთხვევაში ზემოთ განსაზღვრული ტრაექტორია გადავარდება წერტილში. მაშასადამე, შესრულებულია პირობა $w = w_z \frac{d}{dt} \zeta = [w; \zeta]$ დამოკიდებულებების ძალით მივიღებთ ζ ვექტორის ევოლუციას:

$$\zeta_x = B \cos \theta, \zeta_y = B \sin \theta, \zeta_z = const, \frac{d}{dt} \theta = w, \quad (73)$$

განტოლება, რომელიც მიღებულია კინეტიკური მომენტის ცვლილების თეორემიდან, მიიღებს სახეს:

$$\frac{d}{dt} \left[k + w \begin{pmatrix} -\zeta_x(1+\zeta_z) \\ -\zeta_y(1+\zeta_z) \\ A^2 - \zeta_z^2 \end{pmatrix} \right] = -\frac{bg}{R} [\zeta; e_z] \quad (74)$$

გამომდინარე აქედან შეგვიძლია ავლნიშნოდ, რომ თუ $\zeta = \pm A$, რაც შეესაბამება მასის ცენტრის მდებარეობას ზემო ან ქვემო წონასწორობის მდებარეობას, მაშინ მიღებული სისტემა სრულად რედუცირებულია ანალოგურ ამოცანის არაბალანსირებული სფეროსათვის.

2.16 უძრავი მასის ცენტრის შემთხვევა

ვიგულისხმობთ, რომ სისტემის მასის ცენტრი უძრავია, ე.ი. z' არის დროის მიხედვით მუდმივი ვექტორი, მაშინ კავშირის განტოლებიდან გვექნება:

$$[w; \zeta + e_z] = 0 \quad (75)$$

იმ შემთხვევაში როდესაც $w = 0$ ვღებულობთ დაწყნარებულ სფეროს წანაცვლებული მასის ცენტრით. იმ შემთხვევაში, როცა $w \uparrow \zeta + e_z$, მაშინ ხდება ბრუნვა KO' ღერძის გასწვრივ. იმ შემთხვევაში როცა $\zeta + e_z = 0$ მაშინ დროის ყოველ მომენტში შეხების წერტილი ემთხვევა სისტემის მასის ცენტრს. ეს უკანასკნელი არარეალიზებადია კონსტრუქციული თვალსაზრისით, ამიტომ ასეთ შემთხვევებს არ განვიხილავთ.

შევჩერდეთ იმ შემთხვევაზე, როცა $w = 0$

$$\frac{d}{dt} k = b \left[\zeta + e_z; \frac{g}{R} e_z \right] = \frac{bg}{R} [\zeta; e_z] \quad (76)$$

ζ ვექტორი განტოლების მარჯვენა ნაწილში აბსოლიტურ კოორდინატთა სისტემაში არის მუდმივი გამომდინარე იქედან, რომ სფერო უძრავია, რაც გულისხმობს მთელი მარჯვენა ნაწილის მუდმივობას. მაშასადამე განტოლება გარდაიქმნება შემდეგ სახეში:

$$c\alpha = \frac{g}{R} btD[\zeta; e_z] + k_0 \quad (77)$$

შევადაროთ დროის შუალედი, რომელშიც სისტემა შეიძლება იყოს უძრავი ნულოვანი საწყისი პირობები შემოვიღოთ $A = \|\zeta\|$ და $y = A^{-1}D[\zeta; e_z]$ ვექტორი. ვთქვათ u_* - არის მაქსიმალური დასაშვები მმართველი ძაბვა. $u_i = u_*$ პირობებიდან გამომდინარე, მივიღებთ:

$$t = \frac{c}{k_2} \left(\frac{Ru_*k_1}{gbAy_*} - 1 \right) \quad (78)$$

ზომადი გამშვები მომენტისათვის $\mu_{max} = Ju_*k_1$ მივიღებთ, რომ ნებისმიერი საწყისი კონფიგურაციისათვის მასის ცენტრის დაკავება შესაძლებელია,

$$\text{თუ } \mu_{max} \geq (M + 3m)gA,$$

ხოლო თუ

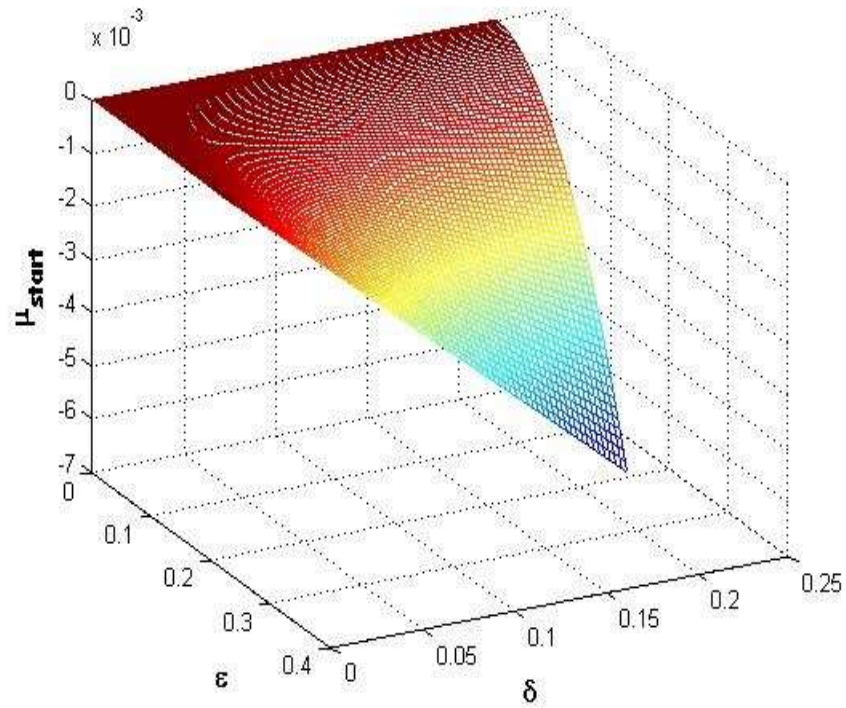
$$\mu_{max} \leq \frac{(M+3m)gA}{\sqrt{3}}, \quad (79)$$

მაშინ ნებისმიერი საწყისი კონფიგურაციისათვის მასის ცენტრის გაჩერება უძრავ მდგომარეობაში შეუძლებელია.

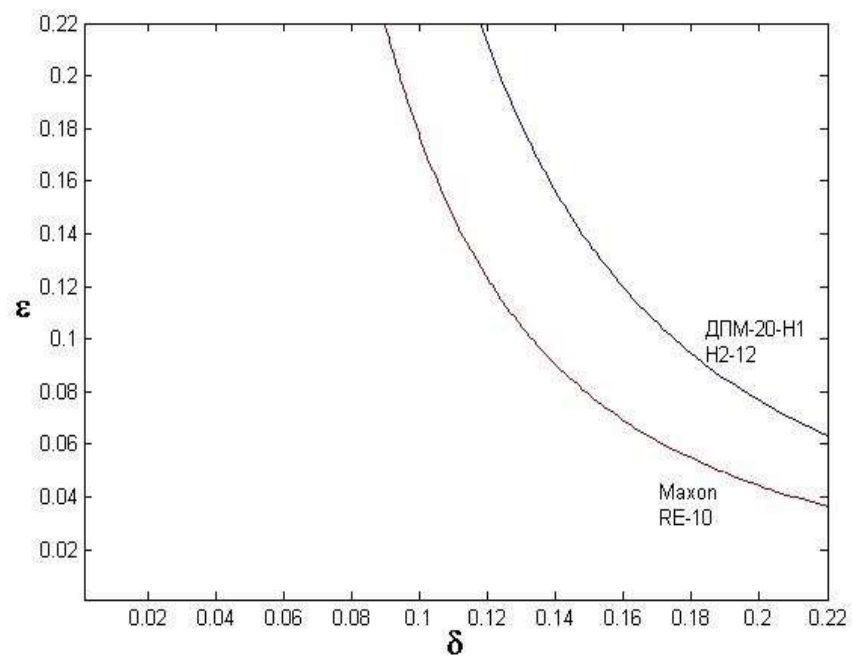
2.17 თავისუფალი დინამიკის ზოგიერთი ასპექტები

დინამიკის უკუ ამოცანების გადაწყვეტა საშუალებას იძლევა წარმოდგენილი აპარატებისათვის მოიძებნოს აუცილებელი მართვები, რომლებისთვისაც მოძრაობები შეიძლება განხორციელდეს დავალებულ მონაკვეთებზე. წარმოდგენილი კონსტრუქციებისათვის მართვა ხორციელდება მქნევარაზე მომენტების შექმნის გზით. ამასთან ერთად, ინტერეს წარმოადგენს ამოცანა ბირთვის მოძრაობა „გამორთული“ ამძრავებით, ე.ი. სისტემის თავისუფალი მოძრაობა. კერძოდ, ასეთი მოძრაობა გვეხმარება გადავწყვიტოთ პრობლემა მომენტის „ჩამოყრისა“ მქნევარაზე, რაც მნიშვნელოვანია პირველ რიგში შედარებით რბილი მოძრაობისათვის (სრული გაჩერების გარეშე მოძრაობის ახალ რეჟიმში გადასვლა), მეორეც რომ შენარჩუნებული იქნას აუცილებელი რესურსული რეჟიმი. მაშასადამე ამოცანა გადადის მეხანიკის კლასიკურ ამოცანაში ჩაპლიგინის სფეროს მოძრაობა ბრტყელ სიბრტყეზე. ასეთი ამოცანას ჩვეულებრივი ბილიარდის სფეროსთვის საკმარისად სრულად იქნა გამოკვლეული. აქ მოვიყვანთ ზოგიერთ ფაქტს, რომელიც ეხება ჩაპლიგინის სფეროს დინამიკას სიბრტყეზე ორპარამეტრიანი ხახუნით სწორხაზობრივი მოძრაობის შემთხვევაში. ყველა ეს თვისებები ასე თუ ისე გამომდინარეობს [19]- დან, თუმცა მოცემული ნაშრომში განხილულია რამდენიმე განსხვავებული მიდგომა, კერძოდ განხილულია ტეილორის გაშლა ε პარამეტრის მიხედვით, აქ ჩვენ შევჩერდებით გამომავალ გამოსახულებაზე

ძალისა და მომენტისათვის. ბოლოს ავღნიშნოთ, რომ ყველა შედეგი მიღებულია როცა $\theta \in [0; \pi]$:



ნახ.31: უძრაობის ხახუნის მომენტი მოძრაობის დაწყებისას



ნახ.32: მოძრაობის შესაძლებლობის გარემო

პირველ რიგში აუცილებელია ავლნიშნოთ, რომ გამორთული მქნევარებიანი ჩაპლინტის სფეროს დინამიკისათვის სამართლიანია შემდეგი მტკიცებები:

მტკიცება. ჩაპლიტინის სფეროს თავისუფალი რხევა წრის გასწვრივ შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ის მოხდება ინერციის I საკუთარი ვექტორი გასწვრივ.

ეს გამომდინარეობს იქიდან, რომ როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები $\mu \equiv \mu_y e_y$, კუთხური სიჩქარის ვექტორი ასევე მიმართულია ამ ღერძის გასწვრივ, ვექტორები $k = I\omega$ და k' თანამიმართულია. $k' + [\omega; k] = \mu = \lambda\omega$ ეს უკანასკნელი აჩვენებს k და ω ვექტორების კომპლანარობას და მათ ვექტორულ ნამრავლს, რაც შესაძლებელია მხოლოდ მაშინ როცა კინეტიკური მომენტი და კუთხური სიჩქარის ვექტორები კოლინიარული არიან, აქედან გამომდინარეობს, რომ კუთხური სიჩქარე მიმართულია ინერციის მთავარი ღერძის გასწვრივ.

როგორც ზემოთ იყო ნათქვამი, როცა θ მუდმივია ძალა და მომენტი არიან დროის მუდმივი ფუნქციები და გამომდინარე აქედან ამ შემთხვევაში ხდება დამუხრუჭების რეჟიმი მუდმივი აჩქარებით. აღსანიშნავია, რომ სფეროს თავისუფალი დინამიკისათვის (გამორთული მქნევარით) ჩაპლიგინის სფერო იქცევა ისეთნაირად როგორც დინამიური იდეალური სფერო, სახელდობრ სწორია შემდეგი მტკიცებულება :

მტკიცება. ჩაპლიგინის სფეროს ქანაობა სრიალის გარეშე შეუძლებელია.

მართლაც, ჩაპლიგინის სფეროს თავისუფალი დინამიკისათვის განტოლებათა სისტემა, იმის გათვალისწინებით რომ $\theta \equiv \pi/2$:

$$\dot{\omega} = f \tag{80}$$

$$\frac{d}{dt} (\omega I e) = \mu_e \tag{81}$$

e არის უძრავი ვექტორი ისეთ, რომ $\omega = \omega e$. როგორც ზემოთ იქნა დამტკიცებული ეს ვექტორი არის კერძო ინერციის I ტენზორისათვის, მაშასადამე მეორე განტოლების მარცხენა ნაწილის დიფერენცირებით მიიღება შემდეგი შედეგი:

$$(\omega \dot{I} - \mu E)e = (fI - \mu E)e = 0 \quad (82)$$

ითვლება, რომ ინერციის ტენზორი I ჩაწერილია მათ ღერძებში, გვექნება მოძრაობის პირობები, შესაბამისი ინერციის k -ური ღერძის გარშემო ბრუნვის:

$$f(\pi/2)ik = \mu(\pi/2) \quad (83)$$

ეს უკანასკნელი შეუძლებელია, რადგანაც განზომილებადი ინერციის მომენტებისთვის ცენტრალური ღერძების მიმართ სამართლიანია, რომ $I_k < M \hat{R}^2$. ასეთი მოძრაობის შენარჩუნებისათვის შიდა მქნევარას დახმარებით, საჭიროა შეიქმნას მართვადი კინეტიკური მომენტი, t დროის პროპორციული, მქნევარას შეზღუდული რესურსის გათვალისწინებით. ასეთი გადაწყვეტა დასაშვებია მხოლოდ გარკვეული დროით.

თავისუფალი დინამიკისათვის მართებულია შემდეგი მტკიცება:

მტკიცება. ბირთვის სრიალი ქანაობის (რხევის) გარეშე შეუძლებელია მართლაც, როცა $\theta \equiv \pi$ გვექნება, რომ $\mu \equiv 0$, რაც შეუძლებელია.

შედეგი: სრიალსა და რხევას ადგილი აქვს ერთდროულად თითქმის ყოველთვის, ამასთან მათ დასრულებას ადგილი აქვს ერთდროულად.

თავი 3 პროტიტიპი რობოტი

3.1 სისტემის განხილვა

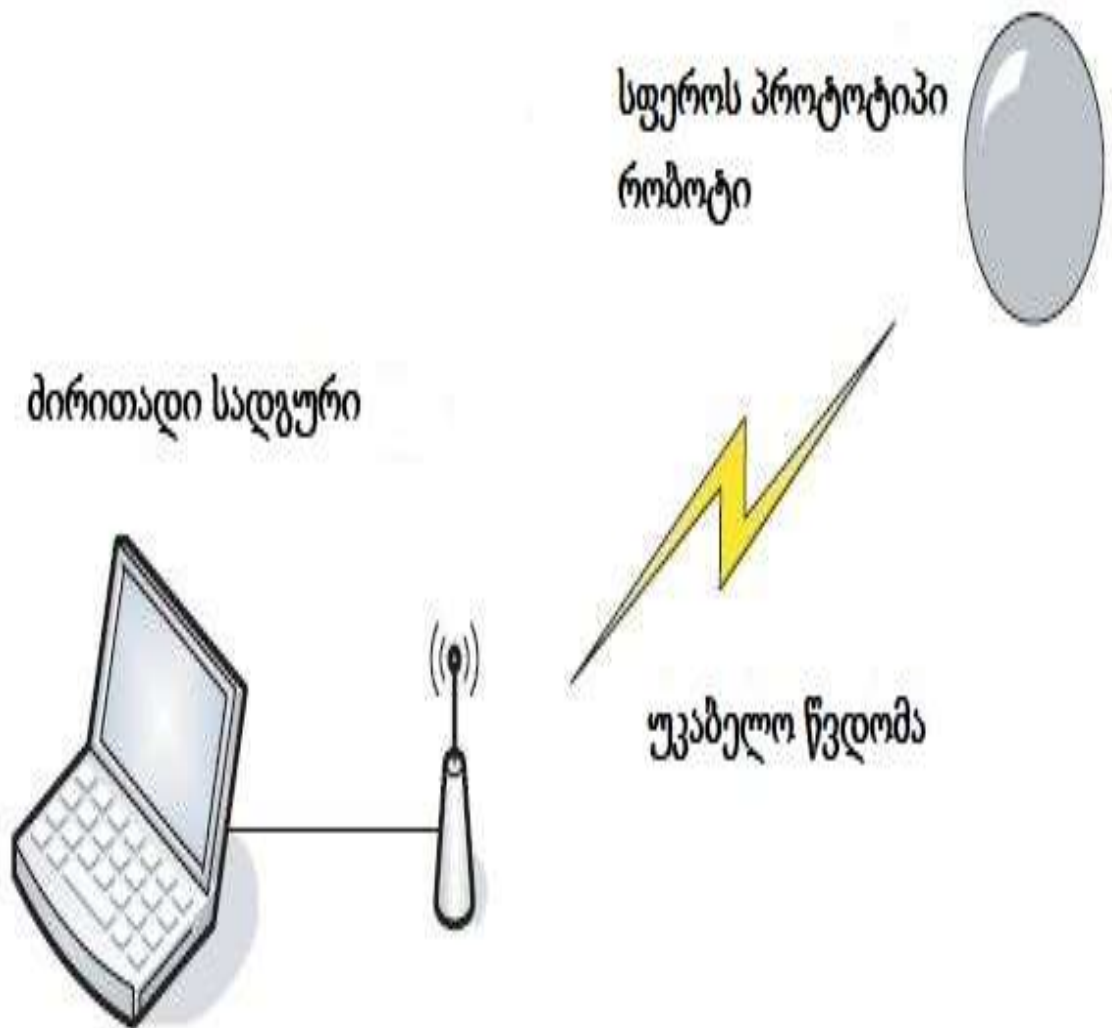
პროტიტიპი რობოტის შესწავლის მთავარი მიზანია რობოტის მართვაში გამოყენებული კონტროლის მეთოდების შესწავლა და ანალიზი. სისტემა შედგება ორი მთავარი კომპონენტისგან: პროტიტიპი რობოტი და ძირითადი სადგური. იგი აღჭურვილია საბორტე კომპიუტერით, დენის წყაროთი, კომუნიკაციის სისტემით და რამდენიმე სენსორით, რომლის მონაცემებიც საჭიროა უკუკავშირის კონტროლისთვის. პროტიტიპ რობოტს ასევე გააჩნია ძრავები გადაადგილებისთვის.



ნახ.33: პროტიტიპი რობოტი

ძირითადი სადგური საჭიროა სენსორული მონაცემების მისაღებად და მონაცემთა გადასამუშავებლად, ასევე მაღალი დონის ფუნქციონირების

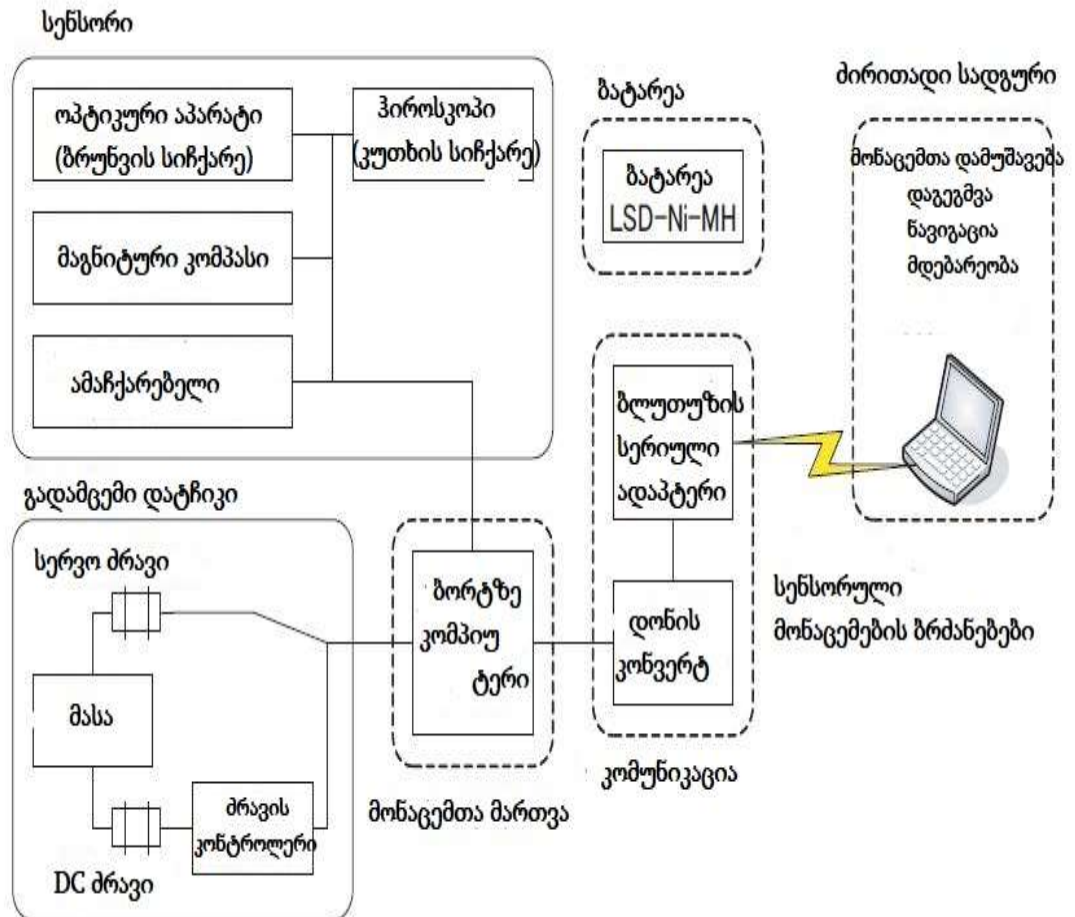
კონტროლისთვის, როგორც არის „სიჩქარის დაყენება“, „მარცხნივ მოხვევა“ და „მარჯვნივ მოხვევა“. უფრო დაბალი დონის ფუნქციონირებისთვის როგორც არის, „აჩქარება მითითებული სიჩქარით“ ან „რობოტის ორიენტაციის შენარჩუნება“, კომპიუტერი იყენებს კვლევაში მითითებულ შემოთავაზებულ მეთოდებს. მოცემული ცხრილი მთლიანი სისტემის სისტემურ გეგმას გვიჩვენებს.



ნახ.34: სისტემის მიმოხილვა

3.2 ელექტრონული არქიტექტურა

ძირითადი სადგურის შემადგენელი ელექტრონული სტრუქტურა შემდეგნაირად შეიძლება იქნას წარმოდგენილი.



ნახ.35: ძირითადი სადგურის ელექტრონული სტრუქტურა

3.3 სტრუქტურული დიაგრამის აღწერა საბორტო კომპიუტერი და დონეების კონვერტორი

საბორტო კომპიუტერი CRUMB128-CAN მოდულს წარმოადგენს. ეს არის მოდული, რომელიც Atmel AT90CAN128 AVT 8-ბიტის მიკროკონტროლერს უერთებს სტანდარტულ სერიულ პორტს, Rs232 ტრანსივერთა და USB2.0 მოწყობილობის ინტერფეისით. ამ პროექტისთვის მნიშვნელოვანი მახასიათებლებს მისაღებად საჭირო კომპონენტებია:

- 8-არხიანი 10-ბიტის ანალოგიდან-ციფრულში გარდამსახი ანალოგის - გამომავალი სენსორიდან მონაცემების მოპოვებისთვის.
- ორმაგად პროგრამირებადი სერიული საყოველთაო სინქრონულ-ასინქრონული მომღებ-გადამცემი (USART) ძირითად სადგურთან უკაბელო სერიული კავშირის სახით კომუნიკაციისთვის.
- 128 კილობაიტი ჩიპი, სტაბილური მეხსიერებით პროგრამის კოდის შესანახად.

3.4 უკაბელო სისტემა

რობოტი აღჭურვილია IOGEAR პირველი კლასის ბლუთუზის სერიული ადაპტერით GBA301-ით, უსადენო კომუნიკაციისთვის ძირითად სადგურთან. ეს საშუალებას აძლევს RS32 სერიულ მოწყობილობას ბლუთუზს უსადენო დაკავშირებას 100 მეტრამდე. შერჩეული გადაცემის ნორმა მაჩვენებელი არის 9600 ბოდი, ყველაზე ნელი, რადგან ეს უზრუნველყოფს საუკეთესო ხარისხს.



ნახ.36: CRUMB128-CAN მოდული (მარცხნივ) და IOGEAR პირველი კლასის
 ბლუთუზის სერიული ადამტერი(მარჯვნივ)

3.5 მაგნიტური კომპასი

მაგნიტური კომპასი გამოიყენება, იმისთვის რომ განსაზღვროს რობოტის გადაადგილების მიმართულება. მისი კომპონენტია Hitachi HM55B კომპასის მოდული მაგნიტური ველის ორმაგ ღერძიანი სენსორით. მისი საშუალებით ასევე ხელმისაწვდომია ძალისა და სიგნალის კავშირები, მაკეტური პლატისთვის გამოსადეგარი, 6-პინიანი, ორმაგი ხაზის შიდა პაკეტის სახით. მნიშვნელოვანი მახასიათებლებია:

- მაგნიტური ველის სიმძლავრის მოკროტესლური ვარიაციებისადმი მგრძნობელობა
- გამარტივებული მიმართულება მაგნიტური ველის გაზომვის მოგვარებიდან ორკომპონენტიან ღერძში.
- 6 ბიტისანი (64 მიმართულება) რეზოლუციის ტევადობა პროგრამული უზრუნველყოფის კალიბრაციის შემდეგ.

- შედარებით მცირე პარამეტრების დრო (30 40 მილიწამი)



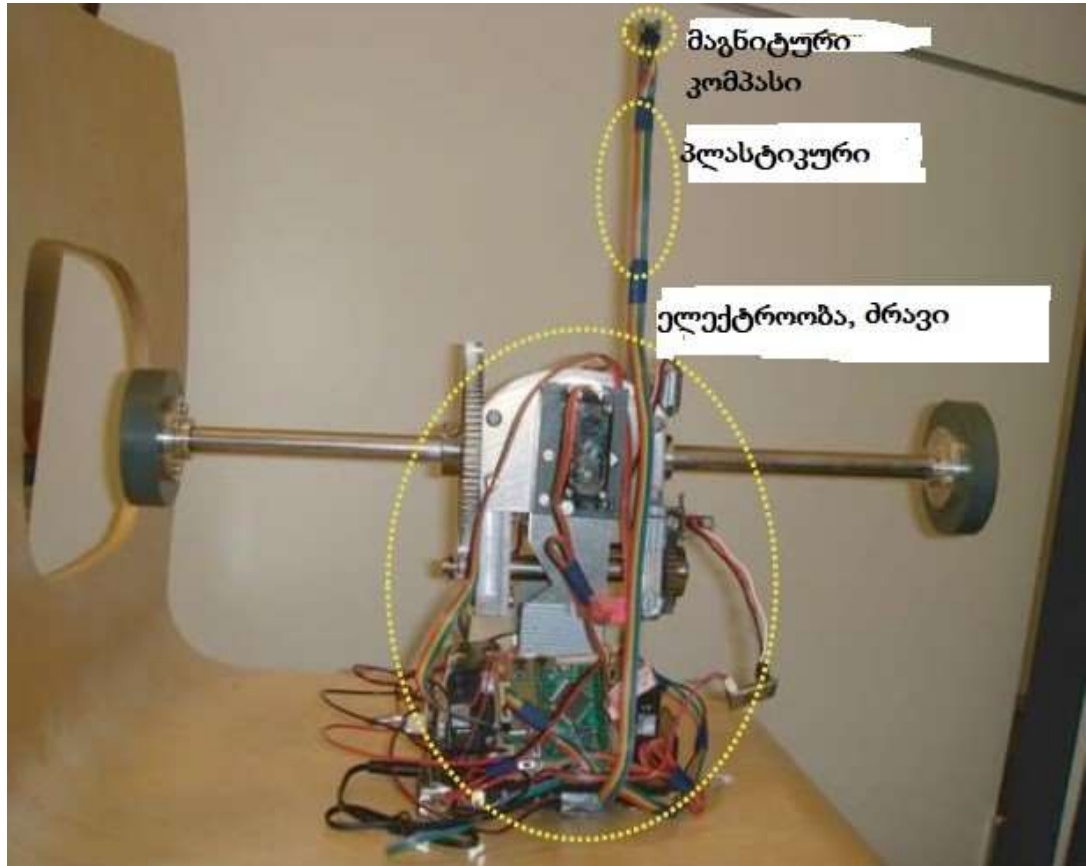
ნახ.37: ჰიტაჩი GM55B კომპასის მოდული

მთავარი ელექტრონული ზედაპირისა და ძრავებისთვის ელექტრომაგნიტური ხმაურის თავიდან ასაცილებლად, კომპასი მათთან მცირე დაშორებით არის დამაგრებული პლასტმასის ძელის კენწეროზე.

3.6 სამღერძიანი აქსელომეტრი

KXM52-1050 სამღერძიანი აქსელომეტრი დამონტაჟებულია, იმისთვის რომ გაზომოს ქანქარის აჩქარება. მოწყობილობის მთავარი მახასიათებლებია:

- პაკეტი: 8 პინიანი აქსელომეტრი
- გამომავალი სიგნალი: ანალოგ 660 მვ/გ.
- გარე ვოლტაჟი: 1.65 ვოლტი
- მომარაგების ვოლტაჟი: 3.3-5 ვოლტი



ნახ.38: კომპასის მდებარეობა

3.7 ჰიროსკოპი

„კონდო“ KRG-3 ჰიროსკოპი გამოყენებულია სფეროს ბრუნვის კუთხის სიჩქარის გამოსავლენად. ეს არის ზომიანი ძალიან პატარა, მსუბუქი და ერთი ღერძით. მთავარი მახასიათებლებია:

- კუთხოვანი მაჩვენებლის დიაპაზონი ± 300 გრ/წმ.
- გამომავალი სიგნალი: Analogue 067მვ/ გრადუსი/წამში.
- გარე ვოლტაჟი: 1.35 ვოლტი
- მომარაგების ძაბვა: 3-5 ვოლტი
- წონა: 1.8 გრამი
- ზომა: 22X12.5X7.80 მმ

3.8 სერვო ძრავა

სფერული რობოტის შიგნით მყოფი ქანქარის გადასახრელად ორი ავტომატური ძრავა გამოიყენება. ძრავები ქანქარაზეა დამონტაჟებული, ხოლო ხელები კი რობოტის მთავარ სხეულთანაა მიმაგრებული. ამგვარად ძრავის ბრუნვითი მოძრაობები გადახრიან რობოტს ქანქარის მიმართულებით.



ნახ.39: KIONIX სამლერძიანი აქსელერატორი KXM52-1050(მარცხნივ), Kondo KRG-3 ჰიროსკოპი(მარცხნივ)

პირველად დამზადდა ტაივანში სახელით BMS660MG-HS, რომელზეც პირველად სათამაშო რალის მანქანებისთვის განავითარეს. ამ მოწყობილობის მთავარი მახასიათებლებია:

- კუთხის სიდიდე ± 300 გრ/წმ
- ბრუნვის ძალა 4.8 V :13 კგ. სმ.
- სფეროსთან ურთიერთქმედება: ორმაგი
- მომარაგების ძაბვა: 4.8 – 6.0 ვოლტი
- წონა: 54გრამი
- ზომა: 40.5 x20.0 x 42.5 მმ

3.9 DC ძრავი

DC ძრავი უწყვეტად ამოძრავებს ქანქარას, იმისათვის რომ რობოტმა მოახერხოს გადაადგილება, ამისათვის გამოიყენება Mabuchi RS540SH DC ძრავა. ამ მოწყობილობის მთავარი მახასიათებლებია:

- ნომინალური ძაბვა: 12ვოლტი
- სიჩქარე (ტვირთის გარეშე) :17500 RPM
- ნაკადი(ტვირთის გარეშე): 0.95 ა
- წონა: 160 გრამი
- ზომა:35.8 x 50 მმ



ნახ.40: BlueBird BMS660MG-HS სერვო ძრავა(მარცხნივ), Mabuchi RS540SH DC ძრავა(მარჯვნივ)

3.10 ბატარეა

NiMH ბატარეები გამოიყენება როგორც დაბალი თვით გამორთვადი ენერჯის წყარო. აღნიშნული ახალი ტექნოლოგია 2005 წელს გააცნეს საზოგადოებას. მან მნიშვნელოვნად შეამცირა თვით-გამოჟონვა, რაც იძლევა საშუალებას მალევე გამოვიყენოთ დამუხტვის შემდეგ. მათ ასევე მცირე მახსოვრობის ეფექტი აქვთ, რის საშუალებითაც მცირე გამოყენების შემდეგ შეიძლება მათი დამუხტვა, რაც ამარტივებს დატენვის პროცესს. ეს მახასიათებლები გამოსადეგარია რობოტების პერიოდული ტესტირებისა და ბატარეების სასურველ დროს დამუხტვისათვის



ნახ.41: Sanyo-ს დაბალი გამოყოფის NiMH ბატარეა, Eneloop (marcxniv), პროტოტიპისთვის გამოყენებული 6-AA ბატარეების შეკვრა (მარჯვნივ)

3.11 ძრავის კონტროლერი

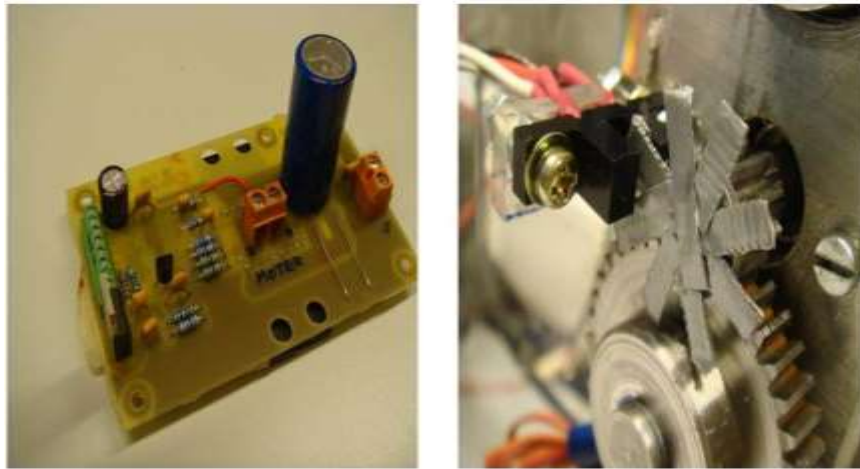
ძრავის კონტროლერი გამოიყენება სიჩქარის და ბრუნვის გასაკონტროლებლად, რომელიც დაკავშირებულია მთავარ კომპიუტერსა და DC ძრავს შორის. მისი დიზაინი შექმნილია და განვითარებულია TKK-ს ავტომატიზაციისა და სისტემური დეპარტამენტის მიერ. მისი მაკონტროლებელი იღებს შემდეგ მონაცემებს:

- ჩართვა: კონტროლის ჩართვა (0 ვ. ან 5 ვ.)
- მიმართულება: ბრუნვის მიმართულების დასაყენებლად (0 ვ. ან 5 ვ.)
- PWM (პულსის სიგნალის მოდულაცია): სიჩქარისა და ბრუნვის საკონტროლებლად დაბვასთან მიმართებაში. მაქსიმალური სიხშირე 30 კილოჰერცი.

3.12 ოპტიკური მაკოდირებელი

მაკოდირებელი, რომელიც დამაგრებულია პროტოტიპზე ხელით არის აწყობილი ფოტო-შემაერთებლის გამოყენებით, რომელსაც ტესტირებისას არ იყენებდნენ ლაბორატორიაში. სამწუხაროდ, უცნობია

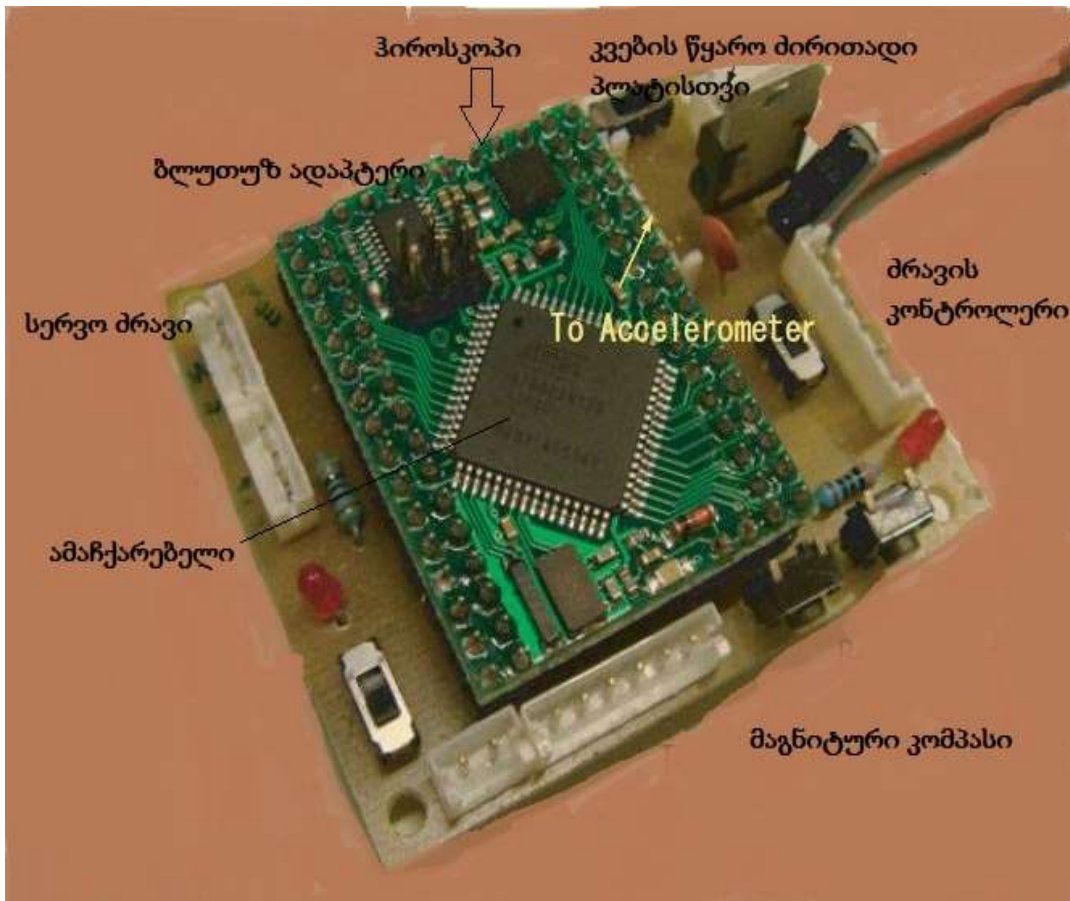
ფოტო-შემაერთებლის მეწარმეც და პროდუქტის სახელიც. ფოტო-შემაერთებელი და მისი პერიფერიული წრებრუნვა 0 ვ.-ს იძლევა, როდესაც დაბლოკილია შემაერთებელი სინათლის ბილიკი, ხოლო დანარჩენ შემთხვევაში ეს მაჩვენებელია 3.4 ვ. მობრუნების დისკს რვა ფრთა აქვს, რომლებიც პერიოდულად ბლოკავენ სინათლის გზას მობრუნებისას, რაც წარმოშობს 8 პულსს ძრავის თითო ბრუნზე. AVR მიკროჩიპი მუდმივად აკვირდება პულსებს და აძლიერებს კონკრეტულ პარამეტრს პულსის თითო დაცემასა და ამაღლებისას.



ნახ.42: TKK-ში გამოყენებული სტანდარტული ძრავური კონტროლერი(მარცხენა) ხელნაკეთი ოპტიკური მაკოდირებელი ფოტო-შემაერთებლით

3.13 მთავარი დაფა

მთავარი ელექტრონული დაფა წარმოადგენს მთავარ ცენტრს, რომელიც აერთებს ყველა სენსორს, ენერჯის წყაროს, საკომუნიკაციო მოწყობილობებს და ძრავებს. მას ასევე გააჩნია რამდენიმე LED ნათურა, რომ მიუხედავად როდის არის იგი ჩართული და გამორთული, სერვო ძრავები და AVR მიკროჩიპი

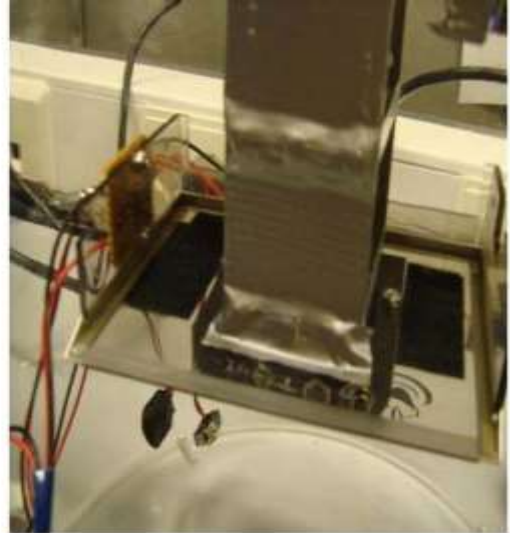
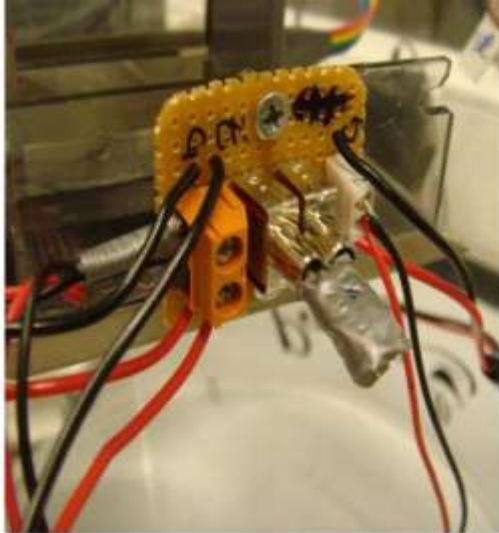


ნახ.43: მთავარი გადამრთველი

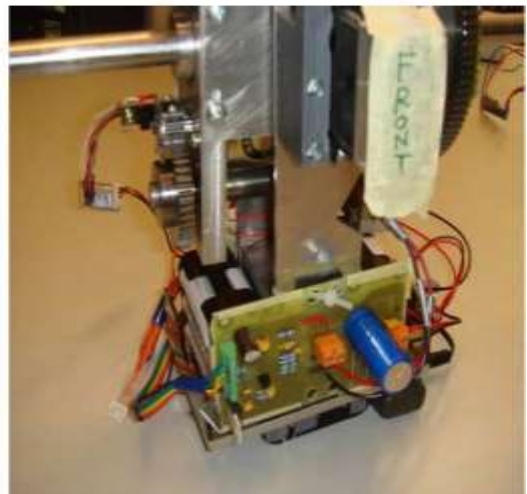
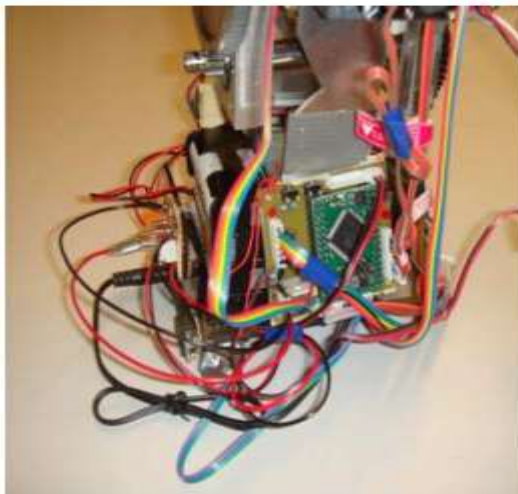
მთავარი ამომრთველი იღებს 7.2 ვოლტს ორი 6-AA- ბატარეიიდან და 4.8 ვ. 4-AA- ბატარეის ყუთიდან, აწვდის 7.2V-ს ძრავის მაკონტროლებელს, 7.2 ვ.-ს მთავარ სადგურს, რომელშიც მარეგულირებელი გარგაქმნის მას 5.0 - მდე. 4.8 V მიემართება სერვო ძრავისკენ ერთი ჩამრთველით.

3.14 დამონტაჟება

პლასმასის პროცესორი მიერთებულია ალუმინის ქანქარის ძირზე, იჭერს ბატარეების ყუთებს მთავარ ზედაპირს ძრავის მაკონტროლებელს და ბლუთუზის მიმღებს



ნახ.44: მთავარი გადამრთველი (მარცხნივ), ელექტრონიკის კონტეინერი(მარჯვნივ)



ნახ.45: მთლიანი ელექტრონული სისტემა (მარცხნივ-ხედი წინიდან, მარჯვნივ-ხედი უკნიდან)

3.15 სპეციფიკაციები

მოცემული ცხრილები აღწერს რობოტის სპეციფიკასა და კომპონენტებს

ქანქარის სპეციფიკაცია

პარამეტრები	ხარისხები	სიმბოლოები
საერთო მასა	1795გ	M_2
ინერციის მომენტი(მოზრუნების ღერძის გარშემო)	0,007428კგ \cdot მ ²	J_2
ინერციის მომენტი(სხეულისთვის ნორმალური ჰორიზონტალური ხაზის გარშემო)	0,007428კგ \cdot მ ²	J_{2s}
სფეროს ცენტრსა და ქანქარა CG-ს შორის დაშორება	0,065მ	s

სფეროს სპეციფიკაციები

პარამეტრები	ხარისხები	სიმბოლოები
მარჯვენა ნახევარსფეროს მასა	985გ	
მარცხენა ნახევარსფეროს მასა	1230გ	
მარცხენა პლასტმასი (სხეულისა და სფეროს დამაკავშირებელი)	96გ	
მარჯვენა პლასტმასი (სხეულისა და სფეროს დამაკავშირებელი)	106გ	
საერთო მასა (ქანქარის გამოკლებით)	3294გ	M_1

ინერციის მომენტი (ბრუნვის ღერძის გარშემო)	0.0633კგძ ²	J_1
ინერციის მომენტი	0.0777კგძ ²	J_{1s}
რადიუსი	0.226მ	r

DC ძრავის სპეციფიკაციები

პარამეტრები	ხარისხები	სიმბოლოები
მასა	158გ	
სიჩქარე ტვირთის გარეშე	17500rpm	
ცდომილების მობრუნების ძალვა	230mNm	
მობრუნების კონსტანტა	0.00852N/mA	K_t
სიჩქარის კონსტანტა	0.00638Vs/rad	K_r
ტერმინალური წინააღმდეგობა	0.324Ω	R

ბატარიის სპეციფიკაცია

პარამეტრები	ხარისხები
ბატარიის ყუთის მასა(6xAA)	168გ

ბატარეის ყუთის მასა(4xAA)	114გ
ტიპიური ტევადობა	2000mAh
მინიმალური ტევადობა	1900mAh
ვოლტაჟი	1.2V

ელექტრონიკები სპეციფიკაციები:

პარამეტრები	ხარისხები
Crumb128AVR-ს მასა	32გ
ძრავის დრაივერის მასა	52გ
RS232 შემაერთებლის მასა	6გ
ბლუთუზის ადაპტერის მასა	22გ
სერვო ძრავის მასა	54გ

თავი 4

4.1 კონტროლის მეთოდი: მართვა

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 ზედაპირზე ეფექტური უნდა იყოს.

კიდევ ერთი დაბრკოლება გახლავთ ის, რომ სენსორები ვერ დამონტაჟდება სფეროს ზედაპირზე რომ განვსაზღვროთ სამოდრაო 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.

4.2 რობოტის ბრუნვის სტაბილურობა

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.

ჩავთვალოთ რომ ძაბვა, სიჩქარე და ბრუნვა სრულიად კონტროლირებადია. განვიხილოთ შეიძლება თუ არა სფეროს კონტროლი იყოს სტაბილური. გადაადგილების ფუნქციები გამომდინარეობს ძაბვის, სიჩქარის და ბრუნვის პარამეტრებიდან სფეროს ბრუნვის მიმართულების, θ_1 . ეს ფუნქციები გვაძლევენ საშუალებას შევაფასოთ სისტემის სტაბილურობის დონე, რადგან სფეროს გარე ზედაპირს არ გააჩნია სენსორები, ღია-მარყუჟიანი გადაადგილების ფუნქციები აქ არის წარმოდგენილი.

4.3 ძაბვა სფეროს მობრუნებისათვის

იმისათვის, რომ გავანალიზოთ მიწოდების ძაბვა და სფეროს ბრუნვა, ძრავა უნდა იყოს მოდელირებული.

DC ძრავის მოდელირება

ძრავის მოდელირება შეიძლება განვსაზღვროთ ორი მთავარი განტოლებით. პირველი ეს არის ძაბვის განტოლება, მეორე ბრუნვისა და დენის ნაკადის.

$$V = IR + K_e w \quad (84)$$

$$T = K_t I \quad (85)$$

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

$$V = \frac{T}{K_t} R + K_e W_2 \quad (86)$$

$$T = \frac{K_t}{R} (V - K_e W_2) \quad (87)$$

4.4 ხახუნის მოდელირება

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

$$T_f = T_c + T_v W_1 \quad (88)$$

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.

4.5 დინამიკის განტოლების გაწვრივება

იმისათვის რომ მივიღოთ, გადაცემის ფუნქცია დინამიკური განტოლებების (12) და (13) გამარტივება უნდა მოხდეს. თავდაპირველად უნდა ვივარაუდოთ, რომ ქანქარის ორიენტაცია ქვემოთ არის მიმართული, მაშასადამე $\theta_1 + \theta_2 \ll 1$, $w_1 + w_2 \ll 1$ და $a_1 + a_2 \ll 1$. აქედან ჩვენ ვიღებთ წრფივ განტოლებას.

$$-T + T_f = a_1(J_1 + J_2 + M_1r^2 + M_2r^2 + M_2e^2 + 2M_2re) + a_2(J_2 - M_2re + M_2e^2) + M_2ge(\theta_1 + \theta_2) \quad (89)$$

$$T = a_1(J_2 - M_2re + M_2e^2) + a_2(J_2 + M_2e^2) + M_2ge(\theta_1 + \theta_2) \quad (90)$$

ლაპლასისმ θ_1 და θ_2 გარდაიქმნება $\theta_1(s)$ და $\theta_2(s)$ შესაბამისად, აქედან w_1 და w_2 გამოდინარეობს $s\theta_1(s)$ და $s\theta_2(s)$, T გახდება $T(s)$, ხოლო $V - V(s)$. (86)-დან ამოვიღოთ T_c , რადგან გადაცემის ფუნქციაზე ვერ ახდენს ზეგავლენას. (87) და (88) შეგვიძლია გარდავექმნათ ლაპლასის გარდაქმნის გამოყენებით.

$$-T = [-sT_v + egM_2 + s^2\{J_1 + J_2 + M_1r^2 + (e - r)^2M_2\}]\theta_1 + [s^2J_2 + e\{g + (e - r)s^2\}M_2]\theta_2 \quad (91)$$

$$T = s^2J_2(\theta_1 + \theta_2) + eM_2[\{g + (e - r)s^2\}\theta_1 + (g + es^2)\theta_2] \quad (92)$$

$$T = \frac{K_t}{R}(V - K_e s\theta_2) \quad (93)$$

ასევე გადაცემათა ფუნქცია შეიძლება მივიღოთ T -სა და θ_2 -ის ამოღებით შემდეგი განტოლებებიდან (89) (90) (91)

$$\frac{\theta_1}{V} = \frac{A + Bs^2}{C + Ds + Es^2 + Fs^3} \quad (94)$$

$$A = -2egK_tM \quad (95)$$

$$B = K_t(-2J_2 + e(-2e + r)M_2) \quad (96)$$

$$C = -egRT_vM_2 + 2egK_tK_eM_2 \quad (97)$$

$$D = -T_vK_eK_t + egRJ_1M_2 + egr^2RM_1M_2 + egr^2RM_2^2 \quad (98)$$

$$E = -RT_vJ_2 + 2J_2K_tK_e - e^2T_vM_2 + K_tK_e(J_1 + r^2M_1 + (2e^2 - 3er + r^2)M_2) \quad (99)$$

$$F = e^2RJ_1M_2 + e^2r^2eM_1M_2 + RJ_2(J_1 + r^2(M_1 + M_2)) \quad (100)$$

დამახასიათებელი განტოლება, რომელიც შეიძლება გამოვიყენებულ იქნას სისტემის პოლუსების გამოსათვლელად, წარმოადგენს გადაცემათა ფუნქციის მნიშვნელობას (92):

$$C + Ds + Es^2 + Fs^3 = 0 \quad (101)$$

პოლუსის ფუნქცია შეიძლება გამოვთვალოთ შემდეგნაირად:

$$s_1 = -0.43 \quad (102)$$

$$s_{23} = -0.041 \pm 9.40i \quad (103)$$

4.6 ძრავის სიჩქარე სფეროს ბრუნვის მიმართულებით

განტოლება (89) და (90)- დან T-ს ამოღებით ვიღებთ შემდეგ გადაცემათა ფუნქციას:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{-2s^2J_2 + e(-2g + (-2e+r)s^2)M_2}{-sT_v + 2egM_2 + s^2(J_1 + 2J_2 + r^2M_1 + (2e^2 - 3er + r^2)M_2)} \quad (104)$$

პროტოტიპი რობოტისთვის ის არის:

$$\frac{-8.33 - 0.014s^2}{8.336 + 0.510s + s^2} \quad (105)$$

დამახასიათებელი ფუნქციაა:

$$-sT_v + 2egM_2 + s^2(J_1 + 2J_2 + r^2M_1 + (2e^2 - 3er + r^2)M_2) = 0 \quad (106)$$

პოლუსი გამოითვლება:

$$s = \frac{T_v \pm \sqrt{T_v^2 - 8egM_2(J_1 + 2J_2 + r^2M_1 + (2e^2 - 3er + r^2)M_2)}}{2(J_1 + 2J_2 + r^2M_1 + (2e^2 - 3er + r^2)M_2)} \quad (107)$$

რადგანაც $T_v < 0$, სისტემა იქნება მუდმივი. პროტოტიპი რობოტისთვის, პოლუსების მნიშვნელობაა:

$$s_{12} = -0.26 \pm 2.88i \quad (108)$$

რაც ნიშნავს, რომ მთელი სისტემა არის მუდმივი, თუ ძრავის სიჩქარე კონტროლირებადია.

4.7 ძრავის ძალა სფეროს ბრუნვისათვის

θ_2 -ის ამოღებით განტოლებიდან (97) და (98) მივიღებთ შემდეგ გადაცემათა ფუნქციას:

$$\frac{\theta_1}{T} = \frac{-2s^2J_2 + e(-2g + (-2e + r)s^2)M_2}{esM_2((g + es^2)(-T_v + sJ_1 + r^2sM_1) + gr^2sM_2) + s^3J_2(-T_v + sJ_1 + r^2s(M_1 + M_2))} \quad (109)$$

დამახასიათებელი ფუნქციაა:

$$esM_2((g + es^2)(-T_v + sJ_1 + r^2sM_1) + gr^2sM_2) + s^3J_2(-T_v + sJ_1 + r^2s(M_1 + M_2)) = 0 \quad (110)$$

სისტემის პოლუსებია:

$$s_1 = -0.43 \quad (111)$$

$$s_{23} = -0.036 \pm 9.40i \quad (112)$$

$$s_4 = 0 \quad (113)$$

რაც ნიშნავს, რომ მთელი სისტემა არის მუდმივი თუ ძრავის მობრუნების ძალა არის კონტროლირებადი.

4.8 კონტროლის მეთოდი

განხილულმა მაგალითებმა გვაჩვენეს, რომ სფეროს მოძრაობა შეიძლება იყოს მუდმივი, იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც ბრუნვის პარამეტრები არ არის მუდმივი. მაშასადამე საკმარისია კონცეპტირება

მოვახდინოთ ქანქარის კონტროლზე ან ძრავაზე სფეროსთან მიმართებაში. ეს თავი აღწერს ძრავის სიჩქარისა და ბრუნვის კონტროლს.

4.9 ბრუნვის სიჩქარის კონტროლი

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

$$\frac{\theta_2}{V} = \frac{K_t(-sT_v + 2egM_2 + s^2(J_1 + 2J_2 + r^2M_1 + (2e^2 - 3er + r^2)M_2))}{s(A + Bs + Cs^2 + Ds^3)} \quad (114)$$

$$A = -egRT_vM_2 + 2egK_eK_tM_2 \quad (115)$$

$$B = -T_vK_eK_t + egRJ_1M_2 + egr^2RM_1M_2 + egr^2RM_2^2 \quad (116)$$

$$C = -RvisJ_2 - e^2T_vM_2 + K_eK_t(J_1 + 2J_2 + r^2M_1 + (2e^2 - 3er + r^2)M_2) \quad (117)$$

$$D = RJ_1J_2 + e^2RJ_1M_2 + e^2r^2RM_1M_2 + r^2RJ_2(M_1 + M_2) \quad (118)$$

პროტოტიპისთვის, გარდაქმნის ფუნქცია არის:

$$\frac{\theta_2}{V} = \frac{14.35 + 0.8786s + 1.721s^2}{38.34s + 88.31s^1 + 0.5161s^2 + s^3} \quad (119)$$

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

$$\frac{\Omega_2}{V} = \frac{14.35 + 0.8786s + 1.721s^2}{38.34s + 88.31s^1 + 0.5161s^2 + s^3} \quad (120)$$

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

გამომდინა ზიეგლერ-ნიკოლასის მეთოდისა PID კონტროლერი შეიძლება გამოვთვალოთ ესე (კანო, 2005):

$$K_p = 3.66 \quad (121)$$

$$K_i = 0.2 \quad (122)$$

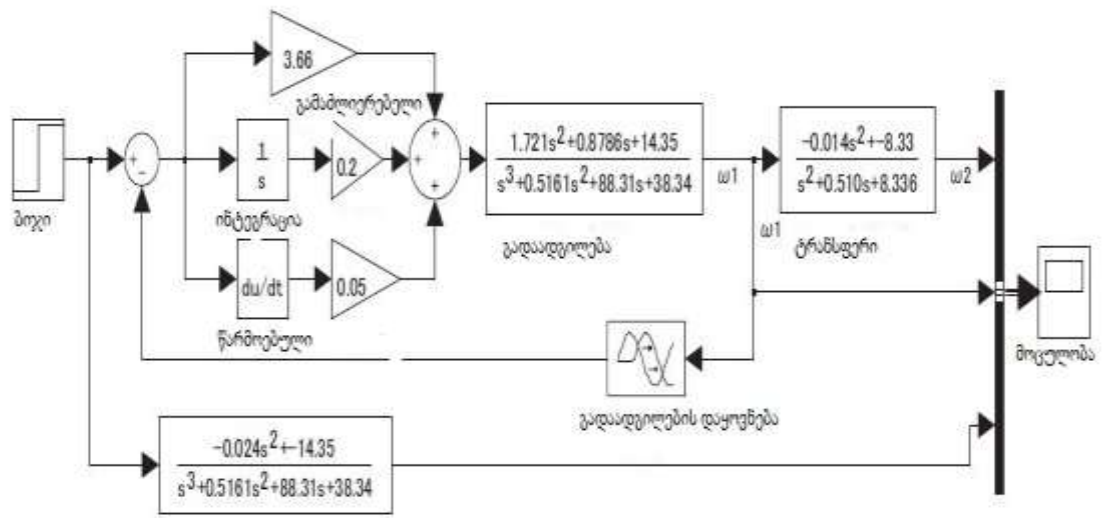
$$K_D = 0.05 \quad (123)$$

PI კონტროლის მნიშვნელობები:

$$K_p = 2.74 \quad (124)$$

$$K_1 = 0.33 \quad (125)$$

აქ, PID კონტროლი ისე გამოიყენება როგორც ნახ.37-ში.



ნახ.46: მოძრაობის მართვის სტაბილიზაციის სტრუქტურული სქემა.

4.10 ბრუნვის კონტროლი

ბრუნვის კონტროლის ერთ-ერთი სირთულე ის გახლავთ, რომ სასურველი ბრუნვის ძალის მიღწევა არ არის შესაძლებელი. ბრუნვა შეიძლება შეჩერებული იყოს გარე ხახუნით, მაგრამ გლუვ ზედაპირზე მოძრაობა ითხოვს მობრუნების ძალას, რომ შეინარჩუნოს სიჩქარე. იწვევს რა მუდმივ აჩქარებას რობოტი მარტივად აღწევს მაქსიმალურ სიჩქარეს. რაც იწვევს მოძრავი ძრავის ვიბრაციას, რის შედეგადაც ხმაური წარმოიქმნება.

მამასადამე, ბრუნვის კონტროლი არ არის შესაფერისი მხარდამჭერი მექანიკური კონტროლისთვის. ამ მიზეზით, პროტოტიპში არ დაგეგმარებულა და არც დანერგილა ბრუნვის კონტროლი.

4.11 სხვა დამხმარე კონტროლერები

მთავარი დამხმარე მეთოდის სხვა დამხმარე კონტროლის მეთოდები ასევე იქნა დანერგილი პროტოტიპში. მათ შორისაა: ძაბვის გამოჟონვის ლიმიტი, მართვის კუთხის შეზღუდვა და ძაბვის ლიმიტი.

ძაბვის გამოჟონვის ლიმიტი

თავი რომ ავარიდოთ რობოტის მკვეთრ აჩქარებას, ინერგება ძაბვის ცვლილების ნორმა, $\frac{dV}{dt}$. ის აღმოფხვრის ქანქარის უკონტროლო რხევას მოძრაობისას. ძაბვის გაზრდის ლიმიტია $3.2 V/\text{წმ}$.

მართვის კუთხის შეზღუდვა

თავიდან რომ ავიცილოთ ქანქარის წრიულად ბრუნვა სფეროს აჩქარების გარეშე, შეიზღუდება ქანქარის გადახრის კუთხე. მისი ლიმიტი დაყენებულია 70 გრადუსზე ქანქარის ვერტიკალური პოზიციიდან.

ძაბვის ლიმიტი

თავიდან რომ ავიცილოთ სფეროს მაქსიმალური აჩქარება, რომელმაც შეიძლება გამოიწვიოს გარშემო მყოფი საგნებისა და თვით სფეროს დაზიანება, მიწოდებული ძაბვის ლიმიტია $8.0 V$.

თავი 5

კონტროლის მეთოდი, გადახრა

სფერული პროტოტიპი რობოტების გადახრის კონტროლთან ორი ძირითადი საკითხია დაკავშირებული:

- როგორ გადავხაროთ
- როგორ მოხდეს სფეროს გადატრიალების კუთხის სტაბილიზაცია

5.1 შესავალი

იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც არ არის დარეგულირებული დინამიკის მოდელირება და არ არის დაზუსტებული რობოტის სტატუსი ზედაპირის მიმართ, წინა მოდელი გვიჩვენებს გადახრასთან დაკავშირებულ მნიშვნელოვან ფაქტს.

შეტანილი პარამეტრები შეიძლება იქნას გამოყენებული ნორმის კონტროლისათვის, რომელიც ასევე ცნობილია როგორც ბრუნვის რადიუსი: რობოტის სიჩქარე და ქანქარის გადახრის კუთხე. 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.

5.2 გადახრის კუთხის სტაბილიზაცია

დაბალ სიჩქარიან ოპერაციისას სტაბილური გადახრის მისაღწევად, გადახრის კუთხე უნდა იყოს სტაბილიზირებული. მაგრამ, ეს სტაბილიზაციის კონტროლი შეიძლება გამოირთოს როდესაც სფერო მიაღწევს მოძრაობის გარკვეულ სიჩქარეს.

5.3 მოდელირება

გადახრის მოძრაობისას შეიძლება გამოვიყენოთ იგივე განტოლებები (16) და (17)-ში რაც მართვის შესტიკულაციისას იქნა გამოყენებული. განსხვავება მხოლოდ თითოეული პარამეტრის ინტერპრეტაციაშია:

$$T_f - T_s = a_{1s}(J_{1s} + J_{2s} + M_1r^2 + M_2r^2 + M_2e^2 - 2M_2re \cos(\theta_{1s} + \theta_{2s})) + a_{2s}(J_{2s} - M_2re \cos(\theta_{1s} + \theta_{2s}) + M_2e^2) + M_2re \sin(\theta_{1s} + \theta_{2s}) + (\omega_{1s} + \omega_{2s})^2 + M_2re \sin(\theta_{1s} + \theta_{2s}) \quad (126)$$

$$T_s = a_{1s}(J_{2s} - M_2re \cos(\theta_{1s} + \theta_{2s}) + M_2e^2) + a_{2s}(J_{2s} + M_2e^2) + M_2ge \sin(\theta_{1s} + \theta_{2s}) \quad (127)$$

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

გამარტივებული განტოლებები (88) და (89)-ში შეიძლება გამოყენებული იქნას:

$$-T_s + T_f = a_{1s}(J_{1s} + J_{2s} + M_1 r^2 + M_2 r^2 + M_2 e^2 + 2M_2 r e) + a_{2s}(J_{2s} - M_2 r e + M_2 e^2) + M_2 g e(\theta_{1s} + \theta_{2s}) \quad (128)$$

$$T_s = a_{1s}(J_{2s} - M_2 r e \cos(\theta_{1s} + \theta_{2s}) + M_2 e^2) + a_{2s}(J_{2s} + M_2 e^2) + M_2 g e(\theta_{1s} + \theta_{2s}) \quad (129)$$

მაშასადამე შეიძლება გამოვიყენოთ ტრანსფერის ფუნქცია (4.14)

$$\frac{\theta_{1s}}{\theta_{2s}} = \frac{-2s^2 J_{2s} + e(-2g + (-2e + r)s^2)M_2}{-sT_v + 2egM_2 + s^2(J_{1s} + 2J_{2s} + r^2M_1 + (2e^2 - 3er + r^2)M_2)} \quad (130)$$

პროტორიპი რობოტისთვის, ტრანსფერის ფუნქცია შემდეგნაირად შეიძლება გამოითვალოს:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{2.287 + 0.00443s^2}{2.287 + 0.14s + 0.289s^2} \quad (131)$$

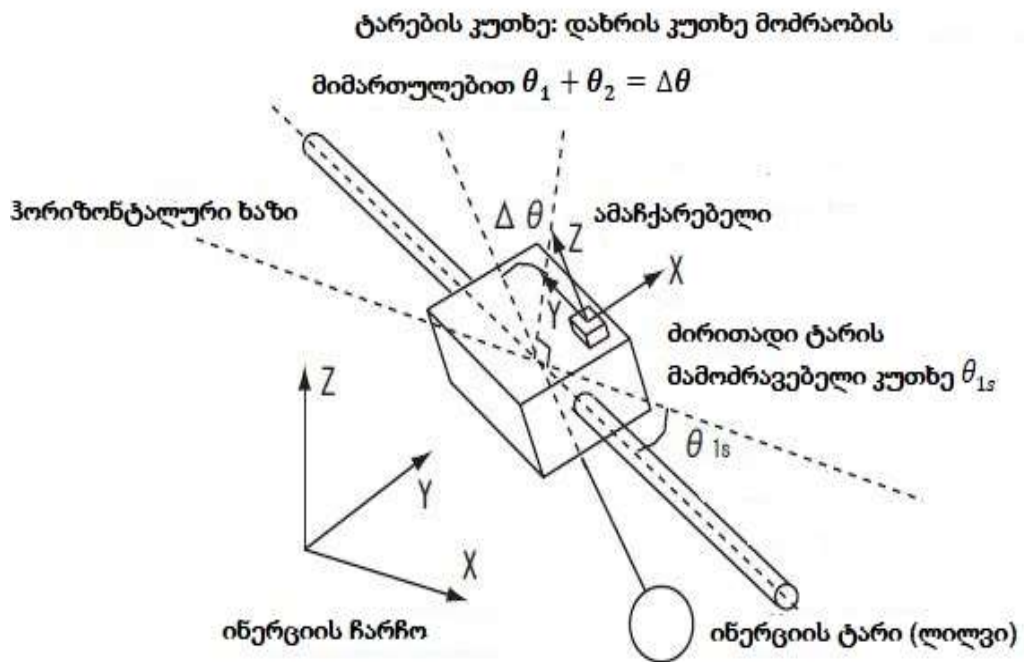
სისტემის პოლუსების რეალური ნაწილები უარყოფითია, რაც ნიშნავს რომ სისტემა სტაბილურია. მაგრამ, დახშობის ნორმა საკმაოდ დაბალია,

დიდ დროს მოითხოვს, რაც ნიშნავს რომ საჭიროა აქტიური უკუკავშირის კონტროლი სწრაფი სტაბილიზაციისთვის.

უკუკავშირის კონტროლის შესამსუბუქებლად უნდა გაიზომოს გადახრის კუთხე. აქ გამოსაყენებელი სენსორი შეიძლება იყოს თვითონ კუთხის აქსელერომეტრი და ჰიროსკოპი კუთხური ნორმისთვის.

5.4 გადახრის კუთხის დაზუსტება

მიუხედავად იმისა, რომ მას შეიძლება გარკვეული ხმაური გაჩნდეს, ამ დაფაზე წაემოდგენილი აქსელერომეტრი გამოიყენება გადატრიალების კუთხის გასარკვევად:



ნახ.47: აქსელერომეტრის მდებარეობა

ინერციული ჩონჩხით დაწყებული, იგი ტრიალებს Y ღერძის გარშემო θ_{1s} კუთხით, შემდეგ X ღერძის გარშემო $\Delta\theta$ კუთხით და Z ღერძის გარშემო 90 გრადუსით.

ჩონჩხის საბოლოო ორიენტაცია, რომელიც აქსელერომეტრის ზედაპირს წარმოადგენს შედარებითაა საწყის ჩონჩხთან შედარებით:

$$I_A R = R_Y(-\theta_{1s}) R_X(\Delta\theta) R_Z(90^\circ) =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1s}) & 0 & -\sin(\theta_{1s}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_{1s}) & 0 & \cos(\theta_{1s}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Delta\theta) & \sin(\Delta\theta) \\ 0 & \sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(132)

დაშვებულია, რომ მხოლოდ გაზომვაში გამოყენებული აჩქარება წარმოადგენს გრავიტაციის აჩქარებას. აქსელერომეტრის ნაწარმოები (g_x , g_y , g_z) შემდეგნაირად შეიძლება იქნას გამოსახული:

$$\begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix} = I_A R^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -g \cos(\theta_{1s}) \sin(\Delta\theta) \\ g \sin(\theta_{1s}) \\ -g \cos(\Delta\theta) \cos(\theta_{1s}) \end{pmatrix}$$

(133)

ახლა შეიძლება გამოვთვალოთ ორი პარამეტრი θ_{1s} და $\Delta\theta$ აქსელერომეტრის წარმოებულის საშუალებით:

$$\theta_{1s} = \arcsin\left(\frac{g_y}{g}\right)$$

(134)

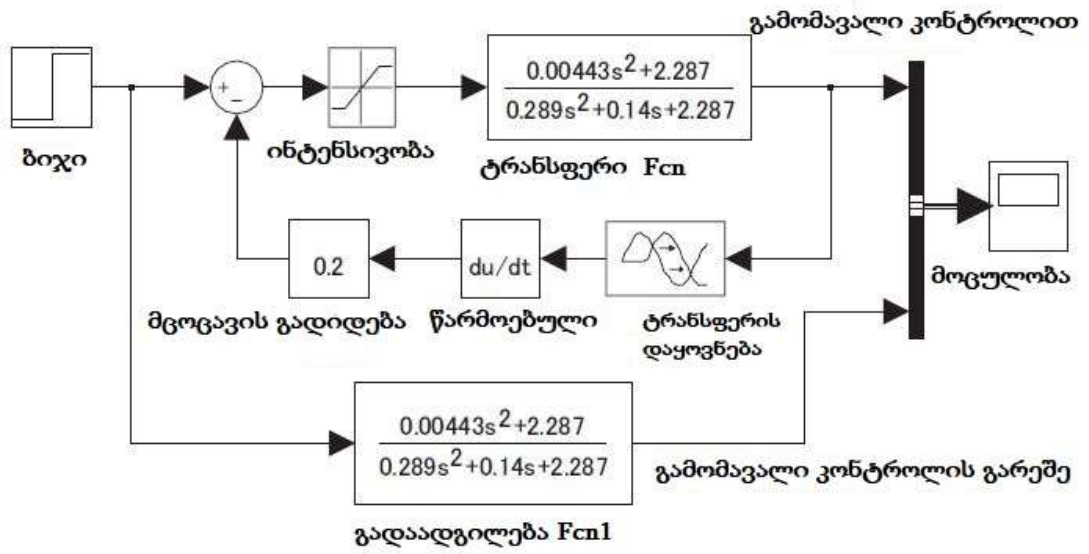
$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{g_y}{g_z}\right)$$

(135)

5.5 სტაბილიზაციის მეთოდი

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

აქ განმასხვავებელი კონტროლის მართოდენ გამოყენების მიზეზია ის, რომ რხევის შესამცირებლად საჭიროა მხოლოდ დახშობის ეფექტი, რომელიც სიჩქარის პროპორციულია.



ნახ.48: გვერდითი მოძრაობის სტაბილიზაციის სტრუქტურული სქემა

დასკვნა

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 გვამლევს საშიალებას რობოტი ადბილად ვამორაოთ ვიწრო ადგილებში. მესამე, სფერული გარსი იცავს შიდა სტრუქტურას გარე შეტევებისა და მტვრისაგან. იგი ასევე შესალებელია გახდეს სითხე და გაზგაუმტარი. ასევე სფეროს გადაყინავების 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 უგულვებელყო მოტირალე სფერული სხეულის შესალებელი ჰიროსკოპის ეფექტი. ეს ეფექტი წარმოიქმნება წარმოიქმნება სფერული სხეულის როტაციისაგან სფერული რობოტის მოძრაობის დროს. მიუხედავად იმისა, რომ ეს ეფექტი შეიძლება არ იყოს გათვალისწინებული დაბალი სიჩქარისას, მისი უგულისყურობა არ შეიძლება მაღალი სიჩქარისას. სხვა კვლევებმა ასევე ვერ შეძლეს მართვის ისეთი მეთოდების განვითარება, რომლებიც ხელს უწყობენ მანუალურ კონტროლს.

მაშასადამე, 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.

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 ამძრავიანისფერული რობოტის მოძრაობის კონტროლისა და მართვის ალგორითმები.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Chemel, B. Mustschler, and Schempf, H. (1999). Cyclops: miniature robotic reconnaissance system. Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on, 3
2. Halme, A. And Wang, T. (1996). Motion control Of a Spherical mobile robot. Advanced Motion Control, 1996. AMC96-MIE. Proceedings., 1996 4 th International Workshop on, 1.
3. Jones, J. (2001). Inflatable robotics for planetary applications. 6 th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics Automation in space: A New Space Odyssey, Montreal, Canada, June 18. 2001.
4. Kano, M. (2005). Control System Designing using Matlab (Matlab riyou shita seigyokeisekkei) (Japanese).
5. Knight, W. (2005). Spherical robot provides rolling security cover. NewScientist.com news service.
URL: <https://www.newscientist.com/article.ns/?id=dn6932>
6. Koshiyama, A. and Fujii, K. (1996). Development and Control of the All-Direction Steering-Type Mobile Robot (4th Report, Mechanisms, Motion Principle, Control Methods and Experimental Results of a Stand-alone Spherical-wheeled Robot). Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C (Japanese).
7. Koshiyama, A. and Yamafuji, K. (1992a). Development and Motion Control of the All Direction Steering-Type Mobile Robot (1 st Report, A Concept of Spherical Shaped Rpbpt, Roll and Running Control). Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C (Japanese).
8. Koshiyama, A. and Yamafuji, K. (1992b). Development and Motion Control of the All Direction Steering-Type Mobile Robot (2 nd Report, Analyses and Experiments on Postural Stability and Ascent/Descent on a Slope). Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C (Japanese).
9. Koshiyama, A. and Yamafuji, K. (1992c). Development and Motion Control of the All Direction Steering-Type Mobile Robot (3rd Report, principle, Control

Methods and Experiments on Steering of the Robot). Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C (Japanese).

10. Laplante, J.F. (2004). Etude de la Dynamique D'un Robot Spherique et de son effet sur L'attantion et la Mobilite de Jeunes Enfants. (French).

11. Michaud, F. and Caron, S. (2000). Roball – An autonomous toy-rolling robot. Proceedings of the Workshop on Interactive Robot Entertainment.

12. Nakamura, T. (2002). Hikaru Halo, Sony ga kyuugata no robotto QTARO wo kaihatu. IT media news (Japanese).

URL: <https://www.itmedia.co.jp/news/0203/27/qtaro.html>

13. Spitzmueller, S. (1998). Microcontroller Based Control System For a Rolling Minirobot. Master's thesis, Helsinki University of Technology.

14. Sugiyama, Y., Shiotsu, A., Yamakaka, M., and Hirai, S. (2005). Circular/Spherical Robots for Crawling and Jumping. Robotics and automation, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference.

15. Tsai, S. Ferreira, E., and Paredis, C.(1999). Control of the Gyrover. A single-wheel gyroscopically stabilized robot. Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS'99. Proceedings. 1999 IEEE/RSJ International Conference.

16. Ylikorpi, T.(2005). A Biologically inspired rolling robot for planetary surface exploration. Degree of licentiate of technology, Helsinki University of Technology, Department of Automation and Systems Technology, Automation Technology Laboratory.

17. Young, K. (2006). Spherical micro-robots could explore Mars. Newscientist.com news service

18. А.В. Борисов, А.А. Килин, И.С. Мамаев. Как управлять шаром Чаплыгина с помощью роторов // Мобильные роботы: робот-колесо и робот-шар. Сб. работ.- М.- Ижевск: Институт компьютерных исследований, РХД, 2013, 131-168

19. Г.П. Терехов, В.Е. Павловский. Управление робот-шаром с помощью маховиков // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2017. N 16,31 с.

20. .В. Борисов, А.А. Килин, И.С. Мамаев. Как управлять шаром Чаплыгина с помощью роторов // Нелинейная динамика, 2012. Т8, 289-307.

21. მიხეილ კაკოჩაშვილი, გოჩა დალაქიშვილი - სფერული ფორმის არაბალანსირებული რობოტის მართვა ზოგიერთ ტრანექტორიაზე, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, გვ. 65, შრომები N2(26), თბილისი 2018წ.
22. მიხეილ კაკოჩაშვილი, ინდირა ნატრიაშვილი, ვლადიმერ კეკენაძე - ორთვლიანი რობოტების კინემატიკური სქემების დამუშავება, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, შრომები N2(24), გვ.89, თბილისი 2017წ.
23. ვლადიმერ კეკენაძე, ინდირა ნატრიაშვილი, მიხეილ კაკოჩაშვილი - მართვის ალგორითმების დამუშავება ბორბლური რობოტებისთვის, გვ.251, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, შრომები N1(28), თბილისი 2019.