

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

Darius Mackevičius

**MOBILAUS ROBOTO TRIJŲ LAISVĖS LAIPSNIŲ
MANIPULATORIAUS MODELIAVIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Aurimas Česnulevičius

PANEVĖŽYS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS
TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas
(parašas) Doc. dr. Arūnas Tautkus
(data)

MOBILAUS ROBOTO TRIJŲ LAISVĖS LAIPSNIŲ
MANIPULATORIAUS MODELIAVIMAS IR TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (kodas 621H30001)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Aurimas Česnulevičius
(data)

Recenzentas

(parašas)
(data)

Projektą atliko

(parašas) Darius Mackevičius
(data)

PANEVĖŽYS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Darius Mackevičius

(Studento vardas, pavardė)

Mechanikos inžinerija (kodas 621H30001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Mobilaus roboto trijų laisvės laipsnių manipulatoriaus modeliavimas ir tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. Gegužės 29 d.
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano **Darius Mackevičius** baigiamasis projektas tema „Mobilaus roboto trijų laisvės laipsnių manipulatoriaus modeliavimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

20..... ..

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Mackevičiui Dariui Grupė PMM-5

1. Darbo tema:
Lietuvių kalba: Mobilaus roboto trijų laisvės laipsnių manipulatoriaus modeliavimas ir tyrimas

Anglų kalba: Modelling and Research of 3-DOF Manipulator for Mobile Robot

Patvirtinta 2017 m. kovo mėn. 30 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-8

2. Darbo tikslas: Sumodeliuoti ir iširti trijų laisvės laipsnių mobilaus roboto manipuliatorių.

3. Reikalavimai ir sąlygos: Manipulatorius turi turėti tris laisvės laipsnius. Manipulatoriaus darbo zona - erdvinė. Manipulatoriaus darbo zonos aukščiausias taškas turi būti ne mažiau kaip 1000 mm nuo žemės paviršiaus. Keliamoji galia - 1 kg.

4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.

Literatūros apžvalga. Manipulatoriaus struktūrinė sintezė. Manipulatoriaus stipruminiai skaičiavimai. Manipulatoriaus kinematinė analizė. Manipulatoriaus jėginė analizė. Išvados.

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas 2017-06-06
(data)

Užduotį gavau: Darius Mackevičius 2017-02-01
(studento vardas, pavardė, parašas) (data)

Vadovas: doc. dr. Aurimas Česnulevičius 2017-02-01
(pareigos, vardas, pavardė, parašas) (data)

Mackevičius D., Mobilaus roboto trijų laisvės laipsnių modeliavimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Česnulevičius A., Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, Technologijų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijos mokslai. Mechanikos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *trys laisvės laipsniai, manipulatorius, darbo zona, sukimo momentas, stipruminiai skaičiavimai.*

Panevėžys, 2017. 46 psl.

SANTRAUKA

Magistro baigiamojo projekto tikslas – sumodeliuoti ir ištirti mobilaus roboto trijų laisvės laipsnių manipuliatorių. Šiame darbe tiriama trijų laisvės laipsnių manipulatoriaus darbo zona, parenkamas optimaliausias manipulatoriaus konstrukcijos variantas. Naudojant SolidWorks programą atliekami manipulatoriaus konstrukcijos stipruminiai skaičiavimai. Analizuojami pavarų sukimo momentai ir parenkamos pavaros manipulatoriaus valdymui.

Mackevičius D., Modelling and Research of 3-DOF Manipulator for Mobile Robot. Final Master's work. Supervisor assoc. doc. Česnulevičius A. The Faculty of Technologies and business ir Panevėžys. Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technology science. Mechanical Engineering.

Key words: *3-DOF, manipulator, work zone, torque, strength calculations.*

Panevėžys, 2017. 46 p.

SUMMARY

The aim of the master's thesis – to model and research a 3-DOF manipulator of a mobile robot. This thesis researches working zone of a 3-DOF manipulator, and the optimal design version for the manipulator is selected. The strength calculations of the manipulator design are performed with the use of the "SolidWorks" software. Torque of the drives is analyzed and the drives are selected for the control of the manipulator.

TURINYS

IVADAS	8
1. Literatūros apžvalga	9
1.1 Robotų vystymosi istorija	9
1.2 Mobilieji robotai	11
1.3 Mobilųjų robotų taikymo sritys.....	11
1.4 Manipuliatorių konstrukcijos	14
1.5 Manipuliatorių vykdomieji įtaisai	18
2. Mobiliojo roboto manipulatoriaus modeliavimas ir tyrimas	19
2.1 Manipulatoriaus techninė specifikacija	19
2.2 Manipulatoriaus modelio sudarymas	20
2.3 Manipulatoriaus darbo zonos analizė	24
2.4 Manipulatoriaus stipruminiai skaičiavimai	29
2.5 Manipulatoriaus dinaminė analizė	37
IŠVADOS	44
LITERATŪRA	45

ĮVADAS

Spaudoje, televizijoje, internete – visur tik ir girdimos kalbos apie robotų pramonę: kuriamus naujus ir protingus robotus, robototeknikoje naudojamas pačias tobuliausias technologijas ir t.t. Robotai gyvena tarp mūsų, jie mums padeda namų ruošoje, atlieka pavojingus ir sudėtingus darbus, gelbsti žmones. Robotai tiesiog pakeičia žmogų ir už jį atlieka darbus. Yra labai daug sričių kur žmogaus darbas yra nepraktiškas arba nepageidaujamas: povandeninio pasaulio tyrinėjimas, planetų tyrinėjimas, darbas pavojingoje ir sprogstamoje, radioaktyvioje aplinkoje. Tokiu atveju galima panaudoti mobiliuosius robotus.

Pirmieji robotai buvo paprasti, iš esmės galintys atlikti tik elementarius veiksmus, pvz. tokius kaip medžiagos pernešimas iš taško A į tašką B. Šiomis dienomis kuriami robotai gali atlikti daug sudėtingų funkcijų, jų konstrukcijos manevringos, tikslios, jutiklių ir valdymo programų pagalba jie gali patys koordinuoti savo veiksmus.

Pagrindinės manipulatoriaus kūrimo problemos yra susijusios su judančių grandžių optimalios trajektorijos parinkimu, tinkamų pavarų parinkimu.

Šiame darbe bus modeliuojamas mobiliojo roboto trijų laisvės laipsnių manipulatorius ir tiriamos jo charakteristikos.

Darbo tikslas – sumodeliuoti mobiliojo roboto trijų laisvės laipsnių manipulatorių ir atlikti jo tyrimą.

Darbo uždaviniai:

- Literatūros analizė.
- Manipulatoriaus modelio sudarymas.
- Manipulatoriaus darbo zonos tyrimas.
- Manipulatoriaus pavarų tyrimas.
- Manipulatoriaus stipruminiai skaičiavimai.

Darbo metodai: literatūros analizė, skaitiniai skaičiavimai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 ROBOTŲ VYSTYMO SI ISTORIJA

Robotas – mechaninis aparatas, galintis atlikti užprogramuotas fizines užduotis. Robotas gali būti valdomas tiesiogiai žmogaus arba veikti valdomas užprogramuoto kompiuterio. Robotai gali atlikti užduotis, kurios yra pavojingos žmogui, dirbti žmonėms kenksmingoje aplinkoje. Jie taip pat gali atlikti monotoniškas, dažnai pasikartojančias užduotis, tokiu būdu pigiai pakeisdami žmogaus rankų darbą.

Žodis „robotas“ kilo iš čekų kalbos žodžio „robota“ – katorgiškas darbas. Sukurta daug ir įvairių robotų apibrėžimų. Tarptautinių žodžių žodyne pateiktas apibrėžimas: robotas – tai mašina, kuri imituoja kai kurias žmogaus savybes ir sąveikaudama su aplinka pavaduoja žmogų (kartais – gyvūną). Amerikos roboto technikos institutas naudoja tokį roboto apibrėžimą: perprogramuojamas daugiafunkcinis manipulatorius, skirtas vykdyti iš anksto užduotus medžiagų, detalių, įrankių perkėlimus ar specialiųjų įtaisų perkėlimus tikslu atlikti įvairius darbus [1].

Žodis „robotas“ taip pat naudojamas apibūdinti protingą mechaninį aparatą, turintį žmogaus formą. Šie robotai vadinami androidais. Robotai yra dažni mokslinės fantastikos veikėjai dirbtinio intelekto tematikos literatūroje ir filmuose.

Pirmą kartą terminas *robotas* buvo paminėtas 1921 m. čekų rašytojo Karelo Čapeko pjesėje „R.U.R“ arba „Rossums Universal Robots“, kurios pagrindinė idėja: žmogus sukuria robotą, kuris jį pakeistų ir šis nužudo savo kūrėją. Toliau, robotikos sritis vystėsi labai sparčiai, jau 1938 m. *Westinghouse* sukonstravo ELEKTRO humanoidinio tipo robotą, kuris galėjo žingsniuoti, kalbėti ir rūkyti, 1954 m. *George Devol* sukonstravo pirmąjį programuojamą robotą, kurį pavadino „Universal Automation“. 1962 m. sukurtas „Unimate“ – pirmasis pramonės srityje pritaikytas robotas. „General Motors“ gamykloje jis buvo naudojamas surinkimo linijoje [2].

Rašytojas Isaac Asimov savo kūrinyje "Runaround" 1942 metais suformulavo tris robototechnikos dėsnius:

1. Robotas negali padaryti žalos žmogui.
2. Robotas privalo paklusti žmogaus nurodymams, jei jie nesikerta su pirmuoju dėsniu.
3. Robotas privalo ginti savo egzistavimą, jei tai nesikerta su pirmaisiais dviem dėsniais [3].

Toliau pateikiami svarbiausi įvykiai turėję svarbią įtaką robotikos vystymuisi:

Iki mūsų eros

Jau iki mūsų eros buvo išrasti tokie daiktai kaip svirtis, pleištas ir ratas. Laikui bėgant žmonės pradėjo gyventi vienoje vietovėje, statė miestus, namus ir vystė įvairias veiklos sritis, tarp jų ir inžineriją.

1600-ieji

1600 metais žmonėms atsirado galimybė sužinoti apie egzistuojančius kontinentus bei šalis. Kopernikas paskelbė savo teoriją, kad Žemė sukasi aplink Saulę. 1475 metais pradėtos spausdinti knygos. Šis atradimas padėjo ilgam išsaugoti užrašytą informaciją.

1800-ieji

1600-1800 metai – tai mokslinės revoliucijos metai. Išrastas mikroskopas, atlikti įvairūs atradimai biologijos srityje, teleskopo dėka patvirtinta Koperniko teorija. 1763 metais išrastas garo variklis sukėlė revoliuciją pramonės ir transporto srityje. 19 amžiaus pabaigoje geležinkeliais buvo gabenami kroviniai į daugelį pasaulio šalių.

20 amžius

20 amžių užkariauja technologijos. Kompiuterių dėka sukurta mikroschema, paskatinusi mokslininkus konstruoti robotus. Mokslinė Aizeko Azimovo fantastika pakeitė požiūrį apie robotus – nuo bejausmių mašinų iki būtybių, sugebančių patirti tokius jausmus, kaip užuojauta ar smalsumas.

21 amžius

Dabartiniais laikais robotų egzistavimas nekelia nepasitikėjimo net patiems didžiausiems skeptikams. Robotai tyrinėja Marsą ir Egipto piramides. Jie naudojami visur – atlieka chirurgines operacijas, tvarko namus, padeda dirbti sunkius darbus, pakeičia žmones gamyklose ir t.t. Tokios stambios kompanijos kaip Honda, Espon, Hitachi, Microsoft, LEGO ir Toyota gamina robotus, kurie naudojami įvairiose srityse. [4]

Įdomesni faktai iš robotikos istorijos:

„Elektro“ — pirmasis pasaulyje humanoidas, debiutavęs dar 1939-aisiais. Beveik septynių pėdų aukščio mašina vaikščiojo ir kalbėjo – iš viso robotas galėjo pasakyti daugiau nei 700 žodžių.

1495 metais Leonardo Da Vinci parengė planą, nurodžiusį, kaip reikia sukurti humanoidą, o inžinierius Markas Rosheimas sukūrė miniatiurinę mašinos versiją, kurią naudojo NASA.

1981 metais pirmąjį kartą pastebėta, kad robotai kelia pavojų. Tada roboto ranka nužudė Japonijos gamyklos darbininką.

Šiuo metu JAV kariuomenė naudoja daugiau nei 400 robotų, kurie sėkmingai atlieka įvairaus pobūdžio užduotis, kurias žmogui atlikti sunku ir pavojinga – išminuoja bombas, atlieka įvairius darbus pavojingose karinėse zonose ar apleistose gamyklose.

Mažasis aš (ang. *Mini Me*) — tai mikroskopinis robotas, kurį sukurti ryžosi Australai. Šio roboto paskirtis atlikti svarbią medicininę misiją – paciento organizme jis turės atlikti biopsiją.

Robotikos ekspertas Henrikas Christensenas prognozuoja, kad ateityje žmonės galės intymiai bendrauti su robotais. Jeigu galvojate, kad svetimauti bus paprasčiau, klystate. Hansas Moravec, „Carnegie Mellon“ robotikos instituto įkūrėjas teigia, kad robotai turės jausmus ir bendraus su į save panašiais kūriniais.

NASA dirba įvairūs robotai, pavyzdžiui, robotas kodiniu pavadinimu „TKS Canadarm2“ gali pakelti ir kontroliuoti labai sunkius objektus, pavyzdžiui, palydovus [5].

1.2 MOBILIEJI ROBOTAI

Mobilusis robotas, tai platforma, galintis judėti tam tikroje aplinkoje (ore, sausumoje, vandenyje), galintis fiksuoti aplinkos parametrų pokyčius ir gebantis savarankiškai priimti sprendimus, kurie leidžia spręsti jam numatytus uždavinius.

Visi mobilieji robotai pasižymi keletu bendrų charakteristikų:

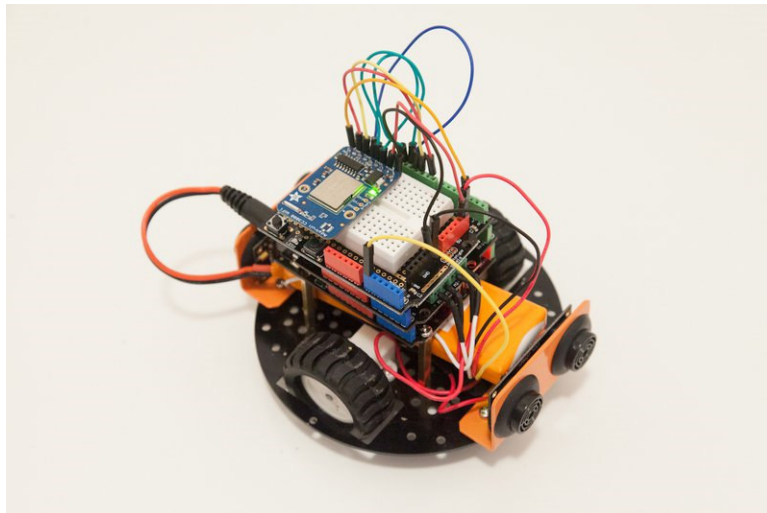
- mobilumu – gebėjimu judėti juos supančioje aplinkoje;
- jutimu – gebėjimu fiksuoti vidinius ir išorinius parametrus;
- intelektu – gebėjimu reaguoti į aplinkos trikdžius ir savarankiškai priimti tinkamiausius sprendimus. [6]

Šiuo metu žinomiausi pasaulyje mobiliųjų robotų gamintojai yra „Kuka“, „Pioneer“, „Universal robots“, „Omron“, „Boston Dynamics“, „Motoman“, „ABB“.

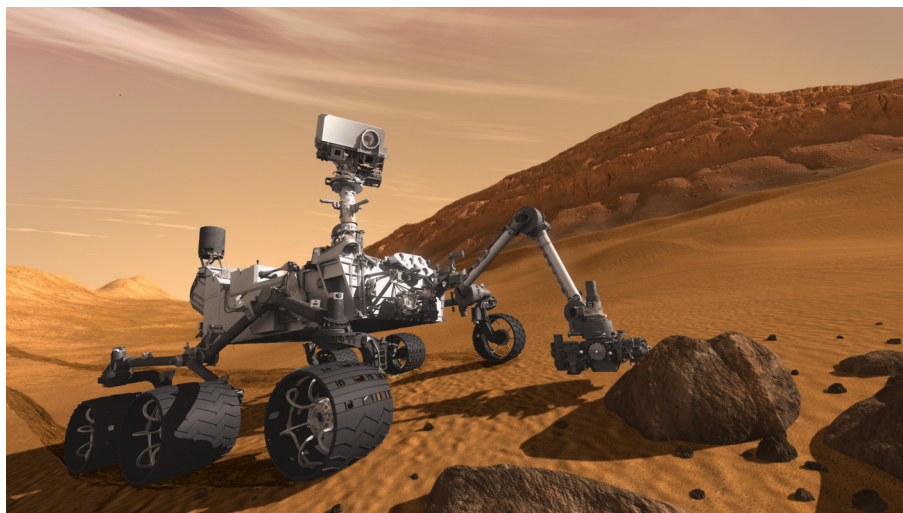
1.3 MOBILIŪJŲ ROBOTŲ TAIKYMO SRITYS

Šiandien sunku rasti sritį, kurioje nebūtų taikomi arba tik pradedami diegti mobilieji robotai. Mobiliųjų robotų taikymo sritys labai įvairios: aplinkos tyrimai sausumoje ir po vandeniu, kosmoso tyrimai, darbas žmogui pavojingoje aplinkoje, medicinoje ir panašiai [8]. Kaip matome, mobiliųjų robotų pritaikymo galimybės yra labai plačios. Trumpai apžvelgsiu pagrindines mobiliųjų robotų pritaikymo galimybes. Mobilieji robotai naudojami mokymo tikslais (1.3.1 pav.), moksliniuose tyrimuose (1.3.2 pav.), statybos sektoriuje (1.3.3 pav.), kariuomenėje (1.3.4 pav.), žemės ūkyje (1.3.5 pav.), buityje (1.3.6 pav.).

Kaip matome, mobiliųjų robotų pritaikymo galimybės yra labai plačios.



1.3.1 pav. Robotas mokslui [14]



1.3.2 pav. Robotas tyrinėjantis Marsą [15]



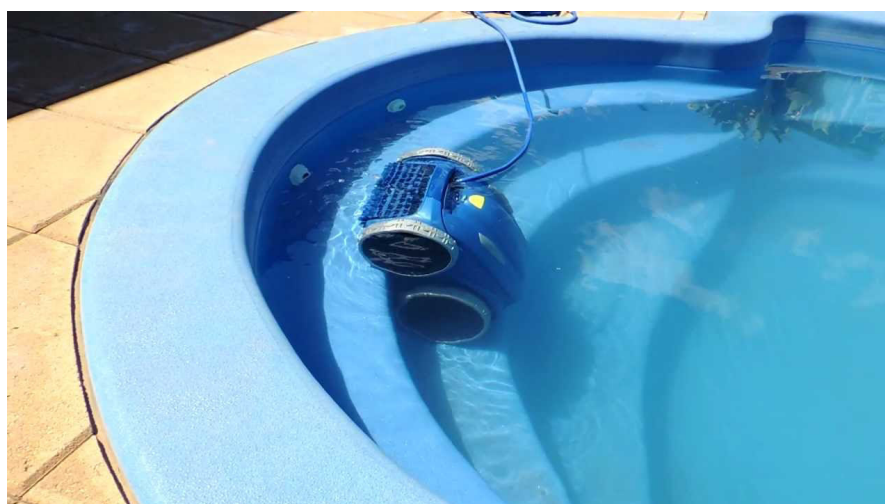
1.3.3 pav. Robotas dirbantis statybos sektoriuje [16]



1.3.4 pav. Robotas atliekantis išminavimo darbus [17]



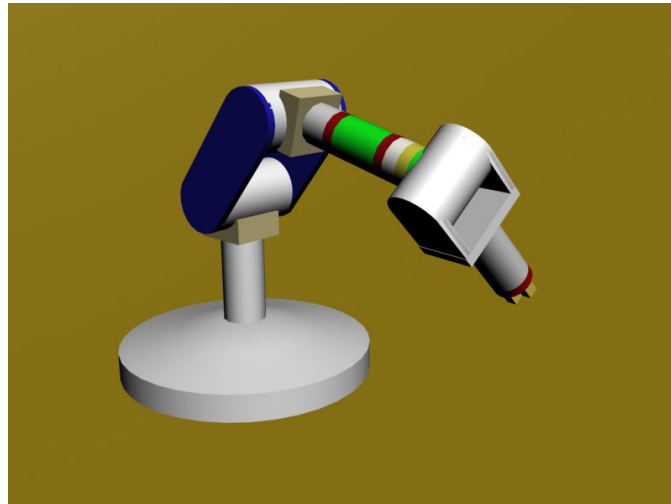
1.3.5 pav. Robotas žemės ūkyje [18]



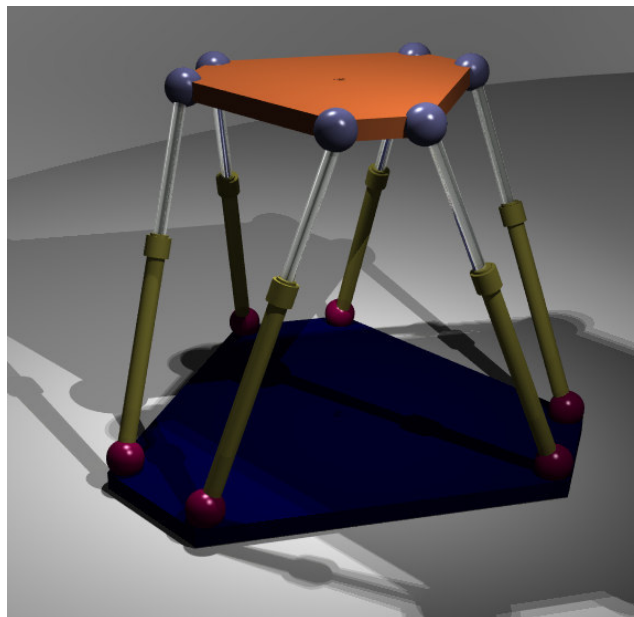
1.3.6 pav. Robotas atliekantis valymo darbus [19]

1.4 MANIPULIATORIŲ KONSTRUKCIJOS

Manipulatorius galima išskirti į dvi grupes: serial tipo arba kitaip vadinami manipulatoriai su atviromis kinematinėmis grandinėmis (1.4.1 pav.) ir paraleliniai manipulatoriai (1.4.2 pav.)



1.4.1 Serial tipo manipulatorius [20]



1.4.2 Paralelinis manipulatorius [21]

Manipulatoriai dažnai turi antropomorfinę rankos struktūrą, apibūdinamą kaip turintys „petį“, „alkūnę“ ir „riešą“.

Manipulatorius – tai atvira kinematinė grandinė, sudaryta iš atskirų grandžių, nuosekliai sujungtų vieno laisvės laipsnio sukamojo tipo kinematinėmis poromis. Dažniausiai manipulatoriuose naudojamos sukimo ir slinkimo kinematinės poros. Kuo daugiau manipulatorius

turi kinematinų porų, tuo jis gali būti tikslesnis. Paprasčiausioms operacijoms atlikti dažnai gali užtekti dviejų, trijų judrumo laipsnių, sudėtingesnėms operacijoms jau gali reikėti ir penkių, šešių arba daugiau judrumo laipsnių.

Manipulatorius mechanikos požiūriu yra sudėtingas erdvinis, kelių laisvės laipsnių valdomas mechanizmas. Dažniausiai manipulatoriaus gale būna sumontuotas griebtuvas ar kitoks darbo įtaisas priklausomai kokios paskirties yra manipulatorius.

Manipulatoriumi vadinama bet kokia mašina skirta vykdyti pagalbines operacijas, susietas su detalės padėties pakeitimu. Manipulatoriai gamybiniuose procesuose su programiniu valdymu vadinami pramoniniais robotais. Manipulatoriai valdomi distanciniu būdu operatoriumi arba programiniu įrenginiu.

Pagal manipulatoriaus valdymo principą robotai skirstomi į tris kartas:

- Pirmos kartos robotai gali atlikti žmogaus užduotį tik jiems gerai pritaikytomis nekintamomis sąlygomis ir valdomi pagal nekintančią programą;
- Antros kartos robotai turi jutiklius ir sugeba prisitaikyti prie kintančios aplinkos;
- Trečios kartos robotai su dirbtiniu intelektu. Tai tobuliausia adaptyvių sistemų klasė, gebanti apdoroti plataus diapazono informaciją, kryptingiau elgtis kintančioje aplinkoje.

Pagal mobilumą manipulatoriai gali būti stacionarūs arba mobilieji. Stacionarūs būna pritvirtinti prie kokio nors korpuso, grindų ar įrenginių, jie būna nejudrūs. Mobilieji manipulatoriai turi judėjimo galimybę, pvz. yra sumontuoti ant platformos, turinčios važiuoklę.

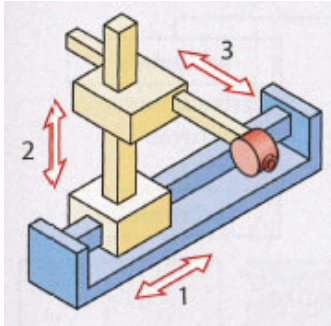
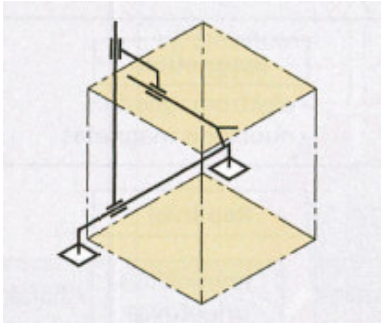
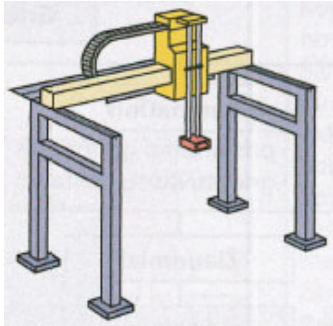
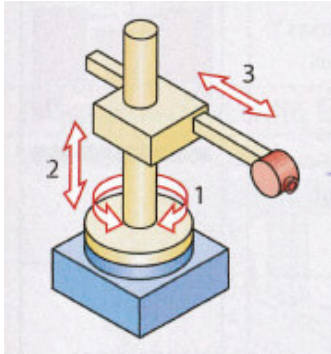
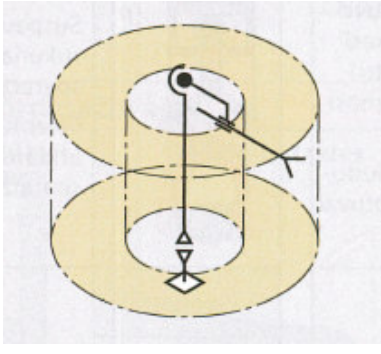
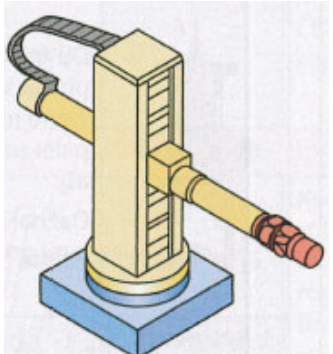
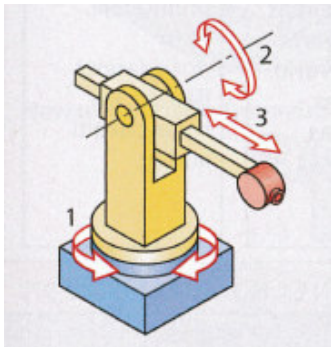
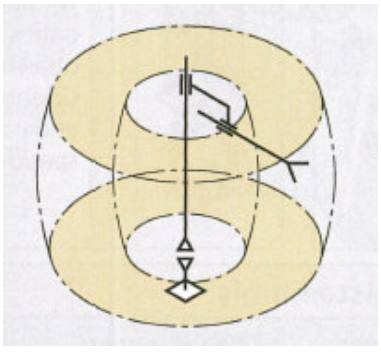
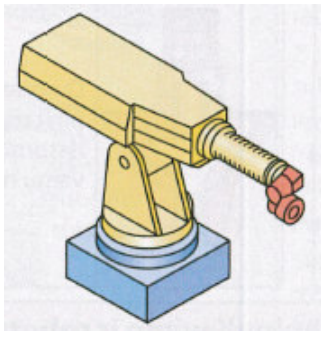
Pagal pozicionavimo tikslumą manipulatoriai yra mažo pozicionavimo tikslumo (pozicionavimo paklaida ± 1 mm), vidutinio pozicionavimo tikslumo (pozicionavimo paklaida nuo $\pm 0,1$ mm iki ± 1 mm) ir didelio pozicionavimo tikslumo (pozicionavimo paklaida ne didesnė kaip $\pm 0,1$ mm).

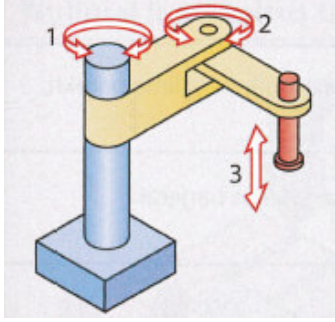
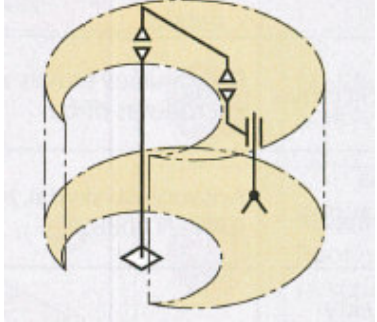
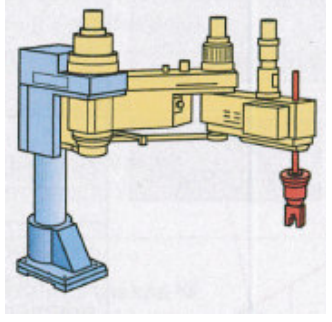
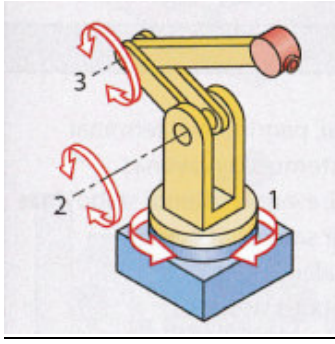
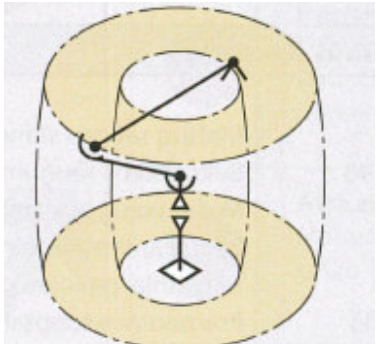
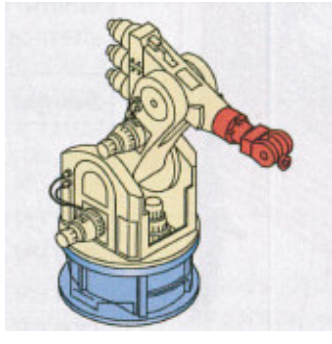
Manipulatoriai pagal keliamąją galią klasifikuojami į super lengvuosius (keliamoji galia iki 1000 g), lengvuosius (keliamoji galia iki 10 kg), vidutinės keliamosios galios (keliamoji galia iki 100 kg).

Robotų konstrukcijos skirstomos pagal mechaninę struktūrą. Pagrindiniai manipuliatorių struktūros elementai: mechaninė struktūra (korpusas, kinematinės grandys, grandžių sujungimai), pavaros, kompiuteris kuris valdo manipulatoriaus judesius, griebtuvas.

Galimos pagrindinės robotų konstrukcijos pateiktos 1 lentelėje [7].

Robotų konstrukcijos

Mechaninės struktūra ¹	Kinematikos ² ir darbo erdvė	Konstrukcijų tipo pavyzdžiai
<p>Dekarto robotai</p> 	<p>TTT kinematika</p> 	<p>Koordinacinis stalas</p> 
<p>Cilindriniai robotai</p> 	<p>RTT kinematika</p> 	<p>Bazinis robotas</p> 
<p>Poliniai robotai 1</p> 	<p>RRT kinematika</p> 	<p>Robotas su vertikalia pasukimo rankena</p> 
<p>Poliniai robotai Tipas: SCARA³ robotas</p>	<p>RRT kinematika</p>	<p>Robotas su horizontalia pasukama rankena</p>

Mechaninės struktūra ¹	Kinematikos ² ir darbo erdvė	Konstrukcijų tipo pavyzdžiai
		
<p>Sąnariniai robotai</p> 	<p>RRR kinematika</p> 	<p>Robotas su vertikalia pasukimo rankena</p> 

- 1) Ašys pažymėtos skaičiais – pirmą ašį pažymi pirmą judesį;
- 2) (R-sukamoji ašis, T-tiesinė);
- 3) SCARA – surinkimo manipuliatorius

1 lentelėje pateiktų robotų konstrukcijų pagrindinės charakteristikos ir taikymo sritys:

Dekarto robotai (TTT kinematika) - pagrindinės ašys: trys tiesinės. Taikymo sritys: transportuoti, pjaustyti lazeriu arba vandens srove, padėklų formavimui.

Cilindriniai robotai (RTT kinematika) - taikymo sritys: tinka sunkiems kroviniams, padėklams transportuoti, „paimk“ ir „padėk“ uždaviniams.

Poliniai robotai 1 tipo (RRT kinematika) - taikymo sritys: tokio tipo robotais galima pasiekti daugiau taškų, taškinis arba paprastas suvirinimas (pvz. automobilių korpusas), „paimk“ ir „padėk“ veiksmas.

Poliniai robotai SCARA tipo (RRT kinematika) - taikymo sritys: vertikalios surinkimo srityje, taškiniam arba paprastajam suvirinimui, „paimk“ ir „padėk“ veiksmui.

Sąnariniai robotai (RRR kinematika) - taikymo sritys: surinkimo srityje, sudėtingai trajektorijai sulgyinti, dažymo darbams, klajavimo darbams.

Modeliuojamam manipuliatoriui pasirenku sąvarinio roboto konstrukciją (RRR kinematika), kurios tyrimas yra aprašytas 2 skyriuje.

1.5 MANIPULIATORIŲ VYKDOMIEJI ĮTAISAI

Manipuliatorių atskiroms funkcijoms realizuoti naudojami įvairių tipų vykdomieji įtaisai. Vykdomieji įtaisai klasifikuojami:

- Pagal naudojamos energijos rūšį (elektra, suspaustas oras, skysčiai; vidaus degimo varikliai; „protingos“ medžiagos);
- Pagal vykdomojo įtaiso darbinio organo judesio pobūdį (posūkis, sukamasis judesys, slenkamasis judesys);

Vykdomieji įtaisai gali būti: servo pavaros, žingsniniai varikliai, nuolatinės srovės varikliai, pneumatiniai varikliai ir hidrauliniai varikliai. Pneumatiniai ir hidrauliniai daugiau naudojami pramonėje, nes jie gali išvystyti dideles jėgas.

Dažniausiai naudojamas vykdomasis įtaisas modeliuojant mobiliuosius robotus yra servo pavaros. Servo pavara paprastai būna sudaryta iš nuolatinės srovės variklio, reduktoriaus ir elektrinės grandinės [8]. Servo pavaros yra montuojamos ant manipulatoriaus grandžių arba ant nejudamo pagrindo. Priklausomai kiek laisvės laipsnių turi manipulatorius, tiek būna sumontuota servo pavarų, kurios judina grandis.

Naujausios kartos servo pavaros yra efektyvios energijos tauso jimo atžvilgiu, jos galingos ir suvaldomos, keičiant jų greitį, pagreitį ir sukimosi momentą. Servo pavaros naudojamos, kaip alternatyva žingsniniams varikliams, tačiau dėka grįžtamojo ryšio sistemos, servo pavaros gali atlikti užduotis, reikalaujančias didelio tikslumo, efektyviau negu žingsniniai varikliai [9].

Servo pavarų pagrindiniai privalumai:

1. Aukštos eksploatacinės savybės
2. Maži gabaritai
3. Plati komponentų įvairovė
4. Galimybė pasiekti didelius greičius

Pagrindiniai minusai:

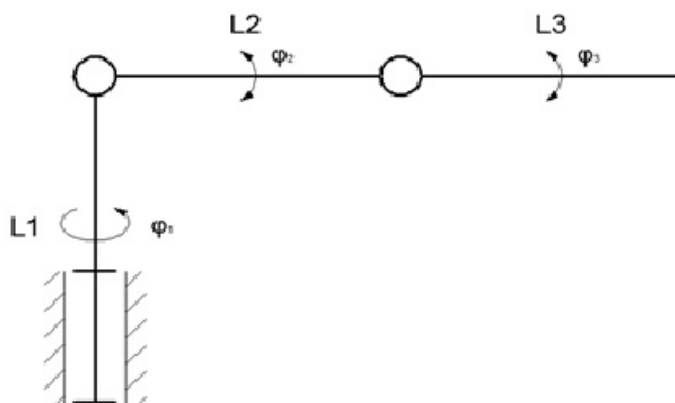
1. Didelė kaina
2. Probleminis veikimas pavojingose aplinkose
3. Didelis greičio sukimo momentas apribotas komutatoriaus arba elektronikos [10].

2. MOBILIOJO ROBOTO MANIPULATORIAUS MODELIAVIMAS IR TYRIMAS

2.1 MANIPULATORIAUS TECHNINĖ SPECIFIKACIJA

Tyrimo objektas yra trijų laisvės laipsnių manipulatorius, sumontuotas ant mobiliojo roboto platformos.

Pagal konfigūraciją sudaroma manipulatoriaus kinematinė schema. Trijų laisvės laipsnių manipulatoriaus kinematinė schema pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Manipulatoriaus kinematinė schema

Pagrindiniai mobiliojo roboto manipulatoriaus parametrai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė

Pagrindiniai manipulatoriaus parametrai

Eil. Nr.	Parametras	Reikšmė
1.	Laisvės laipsnių skaičius	3
2.	Maksimali keliamoji galia, g	1000
3.	Didžiausias rankos siekis nuo platformos, mm	820
4.	L1 grandies ilgis, mm	45
5.	L2 grandies ilgis, mm	410
6.	L3 grandies ilgis, mm	410
7.	Kampinis poslinkis $\varphi 1, ^0$	360
8.	Kampinis poslinkis $\varphi 2, ^0$	180
9.	Kampinis poslinkis $\varphi 3, ^0$	240

2.2 MANIPULATORIAUS MODELIO SUDARYMAS

Pasirenkama manipulatoriaus konfigūracija. Tiriamasis manipulatorius yra RRR konfigūracijos (trys sukamieji judesiai).

Manipulatoriaus judrumo laisvės laipsnių skaičius yra lygus manipulatoriaus nepriklausomų koordinačių, kurios reikalingos jo padėčiai erdvėje apibrėžti, skaičiui, neįskaitant griebtuvo suspaudimo ir atleidimo judesių. Judrumo laisvės laipsnių skaičius apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W = W_t + W_p + W_o \quad (1.1)$$

čia W_t – transportavimo judesių skaičius, W_p – pernešimo judesių skaičius, W_o – orientavimo judesių skaičius.

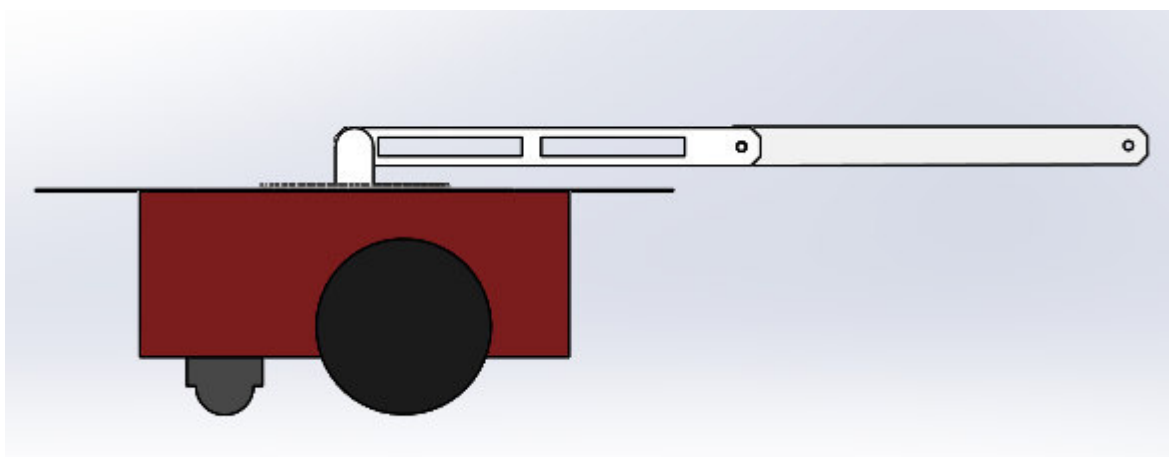
Kinematinėje schemoje manipulatoriaus grandžių sukamieji judesiai žymimi $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$.

Kinematinės schemos porų ir sujungimo tipai pateikti 3 lentelėje.

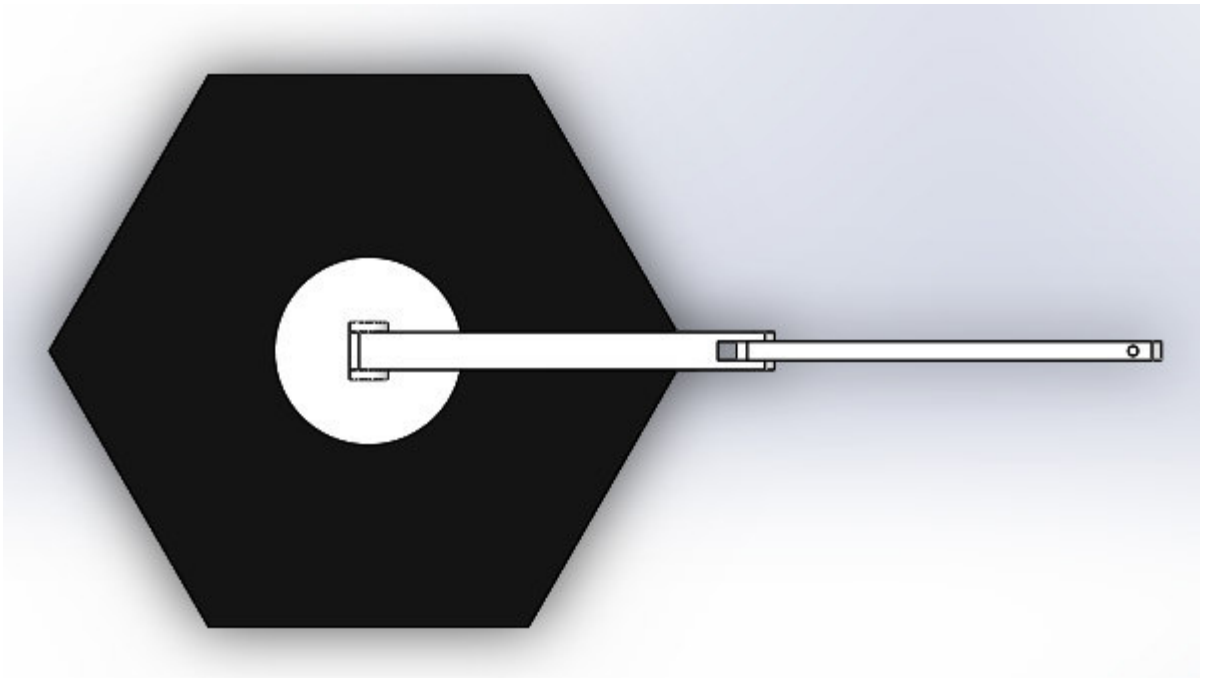
3 lentelė

Grandis	Kinematinė pora	Kinematinės poros tipas
L1	0, 1	Sukamoji
L2	1, 2	Sukamoji
L3	2, 3	Sukamoji

„Solidworks“ programa sumodeliuojamas manipulatorius. Trijų laisvės laipsnių manipulatoriaus vaizdas iš šono pateiktas 2.2.1 paveiksle, vaizdas iš viršaus 2.2.2 paveiksle.

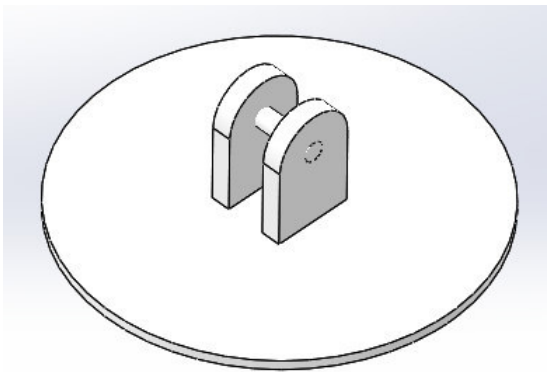


2.2.1 pav. Manipulatoriaus vaizdas iš šono

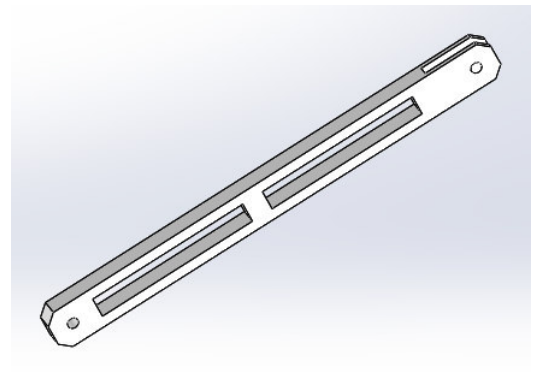


2.2.2 pav. Manipulatoriaus vaizdas iš viršaus

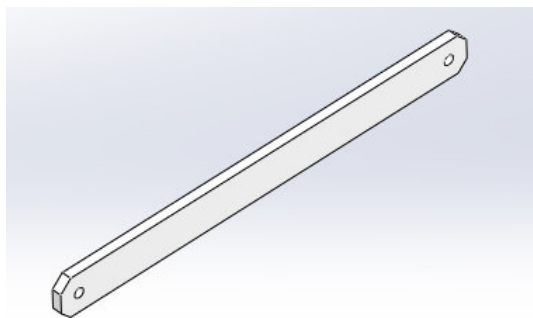
Pagrindiniai manipulatoriaus struktūros elementai pateikti 2.2.3 pav.



a)



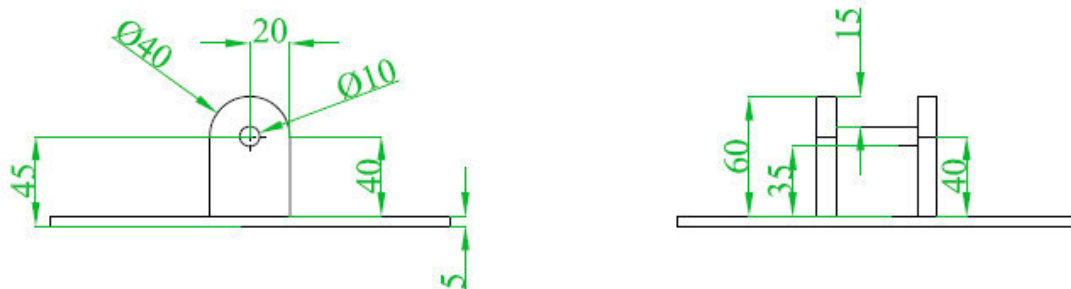
b)



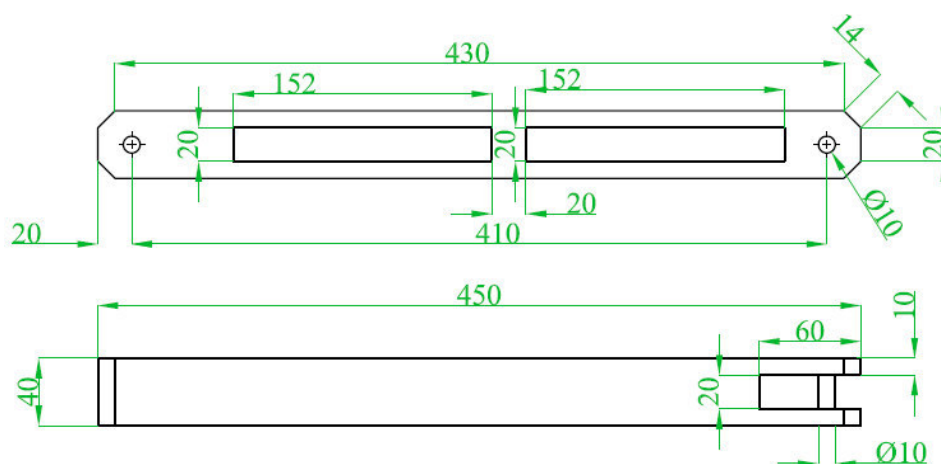
c)

2.2.3 pav. Manipulatoriaus struktūros elementai a) L1 grandis, b) L2 grandis, c) L3 grandis

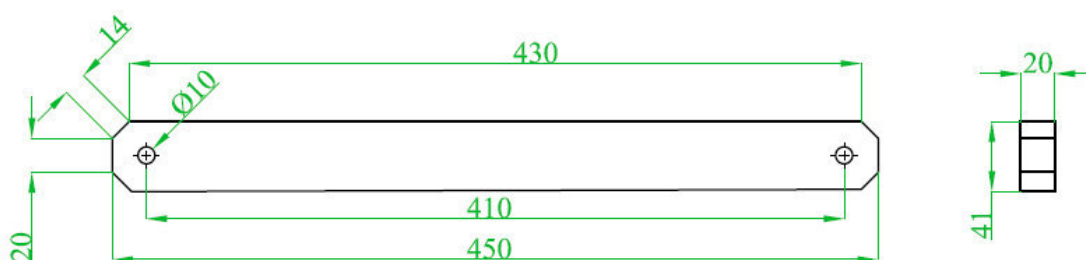
Manipulatoriaus L1 grandies matmenys pateikti 2.2.4 pav., L2 grandies matmenys pateikti 2.2.5 pav., L3 grandies matmenys pateikti 2.2.6 pav.



2.2.4 pav. L1 grandies matmenys

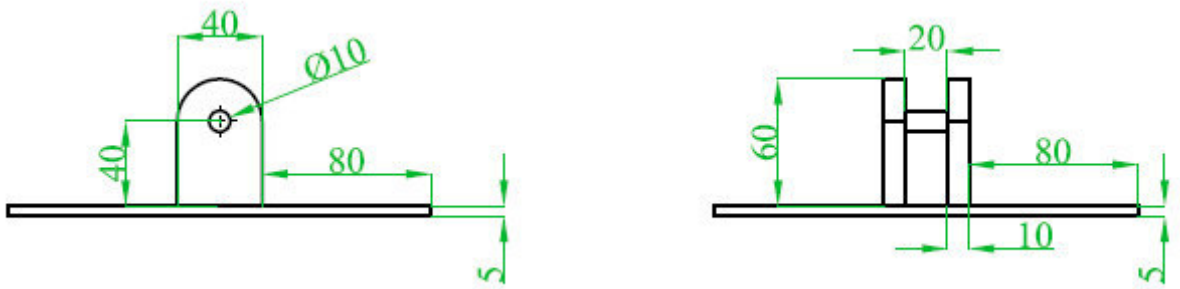


2.2.5 pav. L2 grandies matmenys

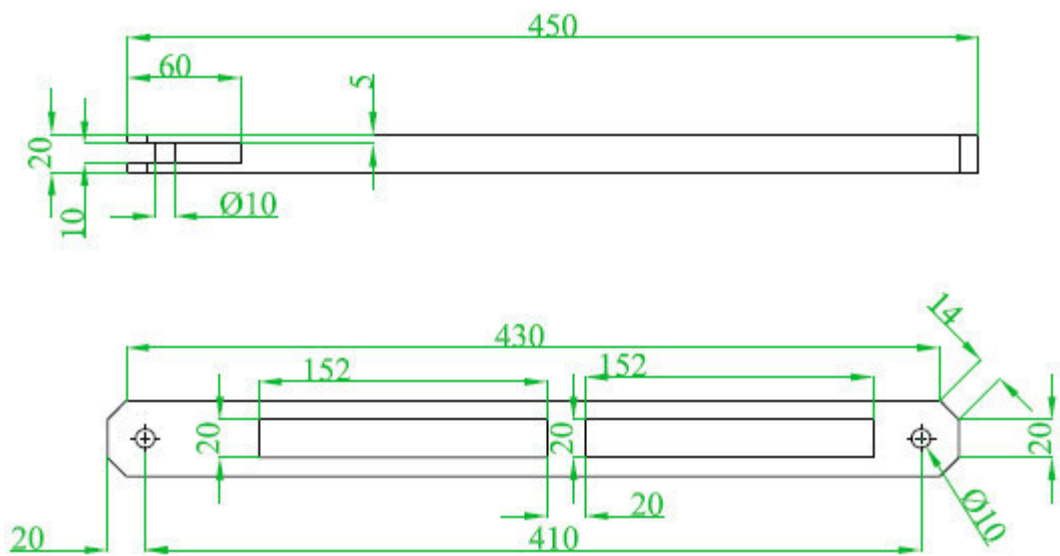


2.2.6 pav. L3 grandies matmenys

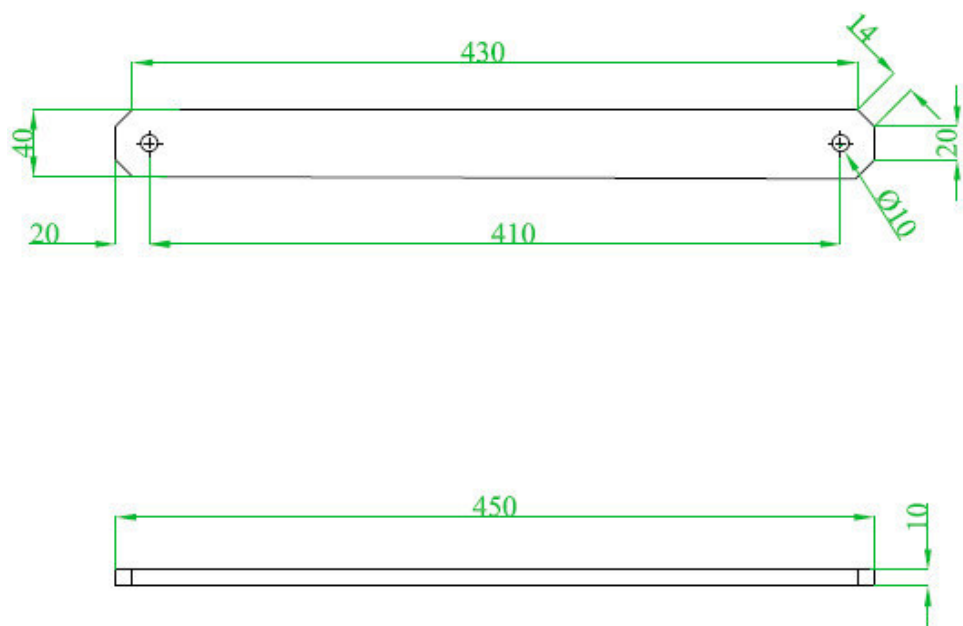
Manipulatoriaus stipruminiai skaičiavimai bus atliekami tiriant ir išlengvintą konstrukciją. Išlengvintos konstrukcijos manipulatoriaus L1 grandies matmenys pateikti 2.2.7 pav., L2 grandies matmenys pateikti 2.2.8 pav., L3 grandies matmenys pateikti 2.2.9 pav.



2.2.7 pav. L1 grandies matmenys (išlengvinta konstrukcija)



2.2.8 pav. L2 grandies matmenys (išlengvinta konstrukcija)



2.2.9 pav. L3 grandies matmenys (išlengvinta konstrukcija)

Sumodeliavus manipulatoriaus modelį, atliekamas manipulatoriaus darbo zonos tyrimas.

2.3 MANIPULATORIAUS DARBO ZONOS TYRIMAS

Darbo erdvė – tai aplinkos dalis, kurią užima robotas ir kurioje negali būti kitų technologinio komplekso įrenginių. Darbo zona – tai erdvės dalis, kurioje gali judėti roboto darbo įtaisas ir erdvės dalis, į kurios bet kurį tašką manipulatorius gali atnešti darbo įtaiso darbinę dalį [11].

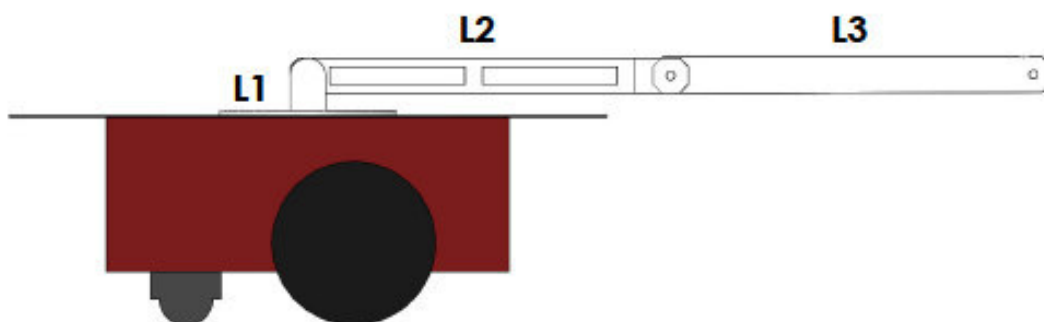
Roboto manipulatoriaus universalumą ir jo platesnį pritaikymą lemia manipulatoriaus darbo zonos dydis. Tinkamai parinkti manipulatoriaus darbo zonos parametrai turi įtakos paties roboto pritaikymo ir valdymo galimybėms.

Manipulatoriaus darbo zonos analizė gali būti atliekama sprendžiant atvirkštinį padėčių uždavinį arba tiesioginį padėčių uždavinį. Savo tyrime naudosisiu tiesioginį padėčių uždavinį, taikant grafinį metodą.

Darbo zonos tyrimo tikslas yra išsiaiškinti kaip keičiasi darbo zona, keičiant manipulatoriaus grandžių ilgio santykius.

Darbo zonos tyrimas atliekamas 4 variantais:

Darbo zonos tyrime keičiamas L2 ir L3 grandžių ilgis (2.3.1 pav.), nekeičiant jų suminio ilgio.



2.3.1 pav. Manipulatoriaus grandys

Tiriami grandžių ilgio santykiai pateikti 4 lentelėje.

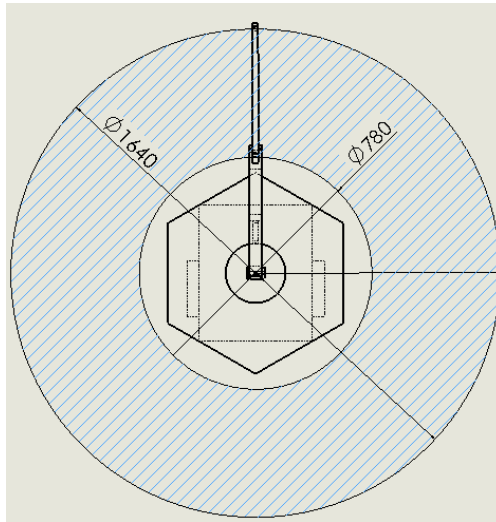
4 lentelė

Manipulatoriaus grandžių ilgio santykiai

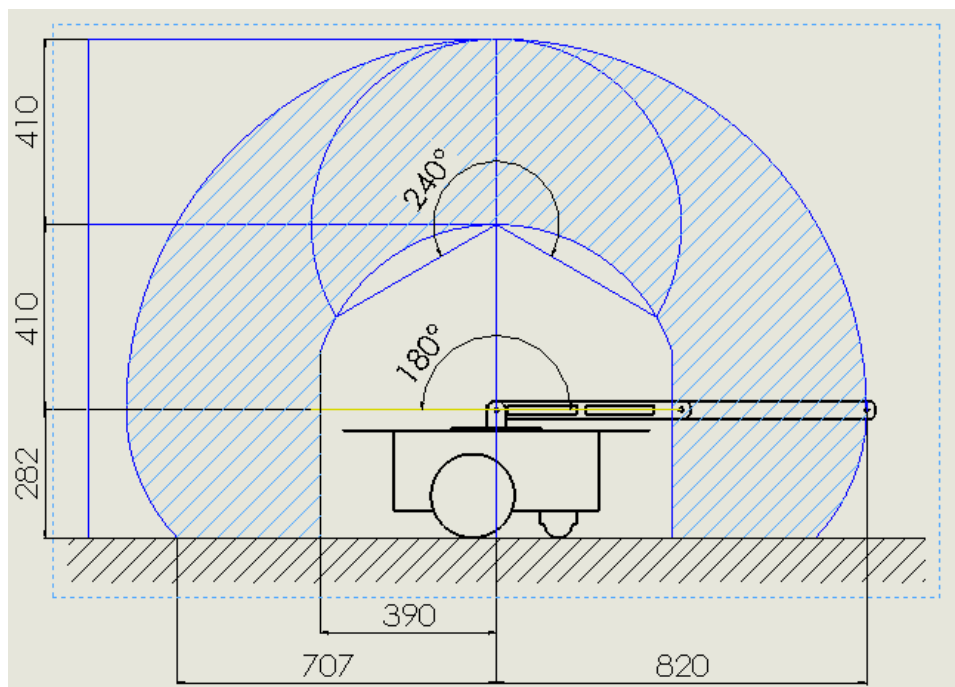
	Grandis L2	Grandis L3	Suminis ilgis	Santykis
1 variantas	410 mm	410 mm	820 mm	1:2
2 variantas	273 mm	547 mm	820 mm	1:3
3 variantas	547 mm	273 mm	820 mm	3:1
4 variantas	205 mm	615 mm	820 mm	1:4

Darbo zonos tyrimas Nr. 1:

Pirmuoju variantu nagrinėjamo manipulatoriaus grandys L2 ir L3 yra lygios, t. y. po 410 mm. Manipulatoriaus tvirtinimo vieta yra platformos centre. Manipulatoriaus darbo zona iš šono ir iš viršaus pateikta 2.3.2 ir 2.3.3 paveiksluose.



2.3.2 pav. Manipulatoriaus darbo zona iš viršaus

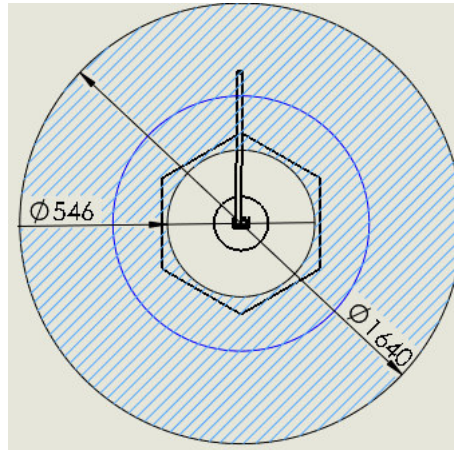


2.3.3 pav. Manipulatoriaus darbo zona iš šono

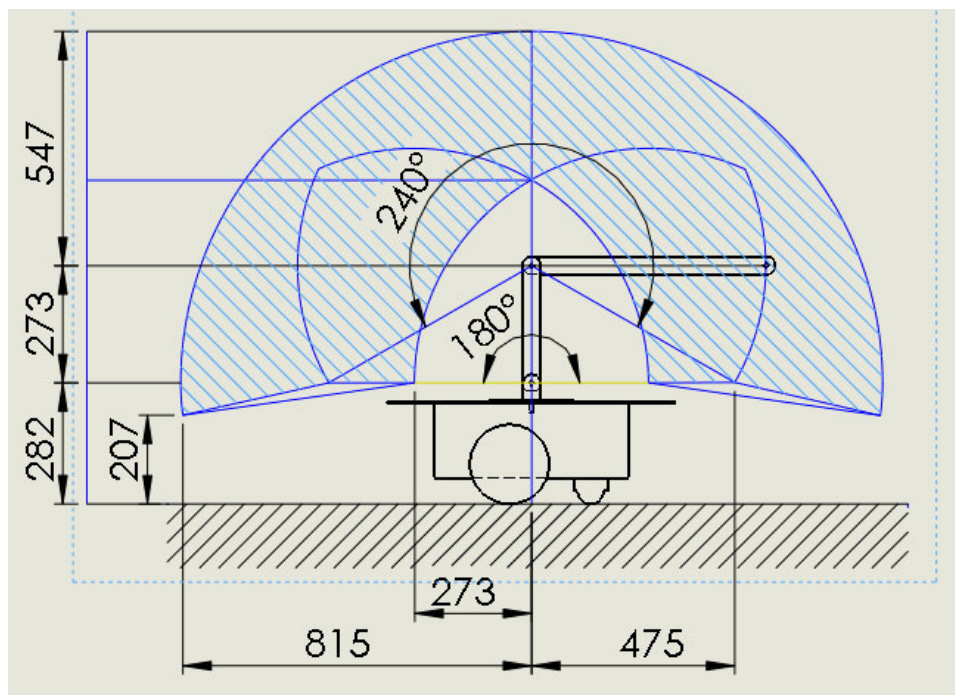
Iš 2.3.2 ir 2.3.3 paveiksluose pateiktų duomenų matyti, kad manipulatorius pakankamai lankstus. L2 grandies kampinis poslinkis siekia 180 laipsnių, o L3 – 240 laipsnių. Didžiausias rankos spindulys nuo roboto platformos 820 mm. Iš pateiktų duomenų matyti, kad roboto manipulatorius pasiekia žemę 390–707 mm atstumu. Mažiausias darbo zonos spindulys siekia 780 mm, o didžiausias – 1640 mm.

Darbo zonos tyrimas Nr. 2:

Antruoju variantu darbo zona nagrinėjama, kai grandis $L_2 = 273$ mm, o grandis $L_3 = 547$ mm, manipulatoriaus tvirtinimo vieta yra platformos centre. Darbo zonos pateiktos 2.3.4 ir 2.3.5 paveiksluose.



2.3.4 pav. Manipulatoriaus darbo zona iš viršaus

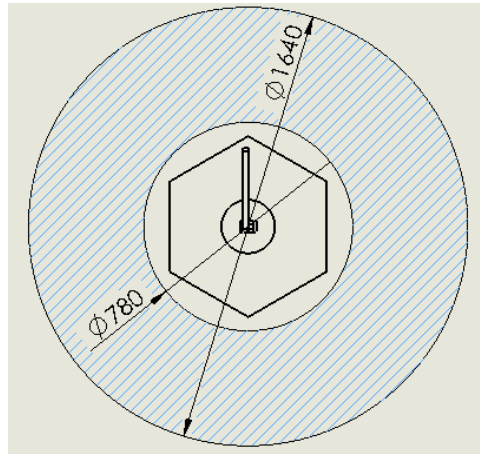


2.3.5 pav. Manipulatoriaus darbo zonos iš šono

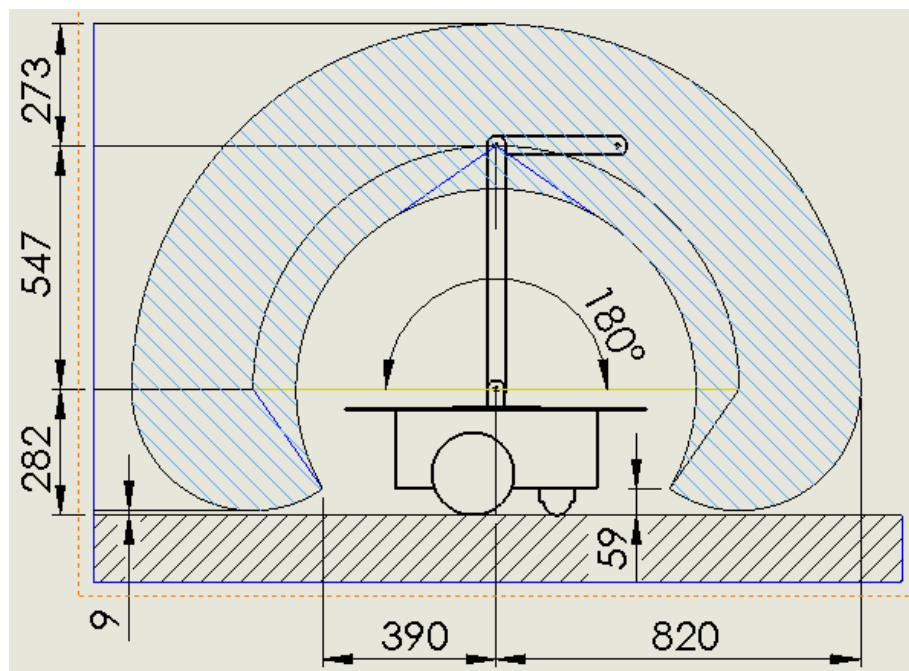
Iš 2.3.4 ir 2.3.5 paveiksluose pateiktų duomenų matyti, kad L_3 grandimi žemiausias pasiekiamas taškas nutolęs 815 mm nuo platformos centro, o žemiausias taškas yra 207 mm nuo žemės, vadinasi, manipulatorius nuo roboto platformos žemės nepasiekia. Mažiausias darbo zonos spindulys siekia 546 mm, o didžiausias – 1640 mm.

Darbo zonos tyrimas Nr. 3:

Darbo zonos nagrinėjimas, kai grandis $L_2 = 547$ mm, o grandis $L_3 = 273$ mm, manipulatoriaus tvirtinimo vieta yra platformos centre. Darbo zonos pateiktos 2.3.6 ir 2.3.7 paveiksluose.



2.3.6 pav. Manipulatoriaus darbo zonos iš viršaus

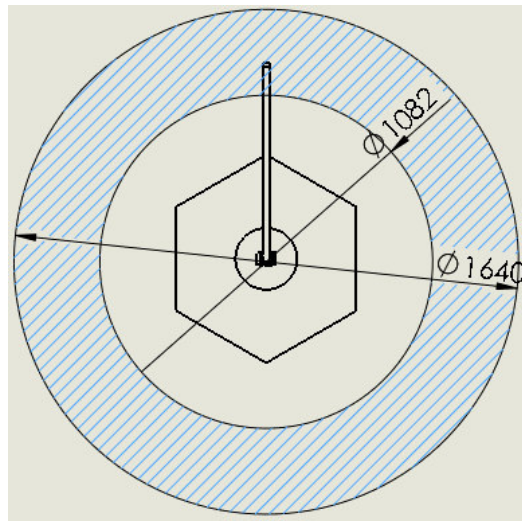


2.3.7 pav. Manipulatoriaus darbo zonos iš šono

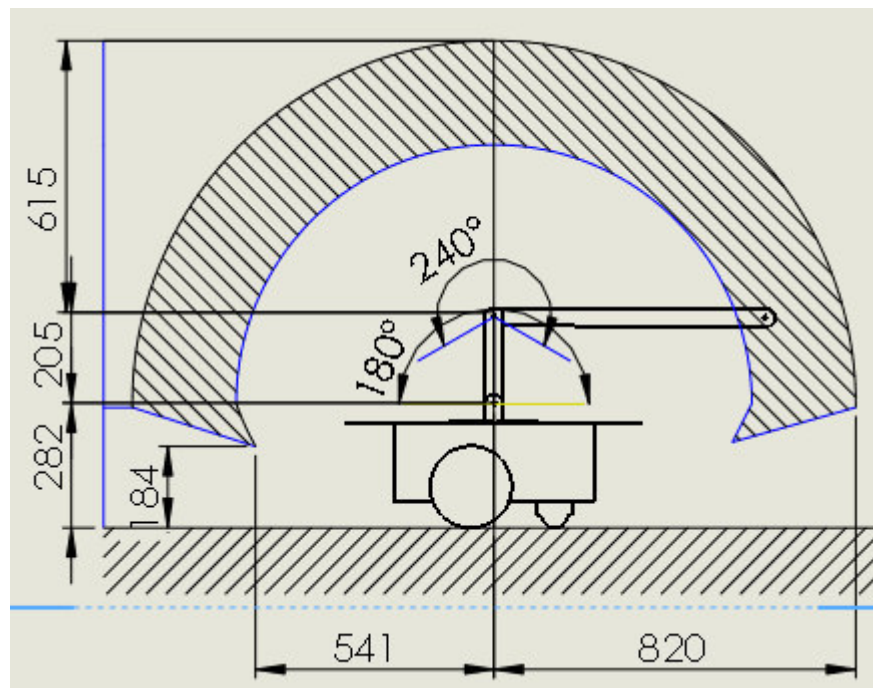
Atlikus 2.3.6 ir 2.3.7 paveikslų duomenų analizę paaiškėjo, kad mažiausias rankos siekis nuo platformos yra 390 mm, žemiausias pasiekiamas taškas iki žemės yra 9 mm, aukščiausias taškas nuo žemės prie platformos 59 mm. Mažiausias darbo zonos spindulys siekia 780 mm, o didžiausias – 1640 mm.

Darbo zonos tyrimas Nr. 4:

Darbo zonos nagrinėjimas, kai grandis L2 = 205 mm, o grandis L3 = 615 mm, manipulatoriaus tvirtinimo vieta yra platformos centre. Darbo zonos pateiktos 2.3.8 ir 2.3.9 paveiksluose.



2.3.8 pav. Manipulatoriaus darbo zona iš viršaus



2.3.9 pav. Manipulatoriaus darbo zona šono

2.3.8 ir 2.3.9 paveiksluose pateikti duomenys rodo, kad šio manipulatoriaus darbo zona yra pati mažiausia. L2 grandies kampinis poslinkis 180 laipsniai, o L3 – 240 laipsniai. L3 grandimi žemiausias pasiekiamas taškas nutolęs nuo pagrindo 541 mm, o nuo žemės 184 mm, šiuo atveju

matyti, kad manipulatorius nuo roboto platformos žemės nepasiekia. Mažiausias darbo zonos spindulys siekia 1082 mm, o didžiausias – 1640 mm.

Atlikus mobiliojo roboto trijų laisvės laipsnių manipulatoriaus darbo zonų tyrimą keičiant manipulatoriaus grandžių ilgio santykius, nustatiau, kad manipulatoriaus pasiekiamumas glaudžiai susijęs su manipulatoriaus grandžių ilgio santykiais.

Atlikus keturių skirtingų manipulatoriaus darbo zonų tyrimą, keičiant grandžių ilgius, bet nekeičiant jų suminio ilgio, daroma išvada, kad tinkamiausias variantas tolimesniems tyrimams – kai grandžių santykis yra vienodas, t.y. po 410 mm.

Ištirus manipulatoriaus darbo zoną atliekami manipulatoriaus konstrukcijos stipruminiai skaičiavimai.

2.4 MANIPULATORIAUS STIPRUMINIAI SKAIČIAVIMAI

Ištirus manipulatoriaus darbo zonas, pavaras ir pasirinkus konstrukciją, kai grandžių santykis yra vienodas, atliekamas konstrukcijos stiprumo tyrimas.

Konstrukcijos stiprumas atliekamas panaudojant „Solidworks“ programinę įrangą. „Solidworks“ programinės įrangos pagalba sumodeliuojamas manipulatorius. Panaudojus simuliaciją patikrinama ar pasirinkta manipulatoriaus konstrukcija atlaikytų ją veikiančias apkrovas. Visuose bandymuose L3 grandies gale yra pridėta 10 N jėga, veikianti vertikaliai žemyn.

Darbo eigoje atliekami bandymai keliais variantais. Visi bandymų variantai pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė

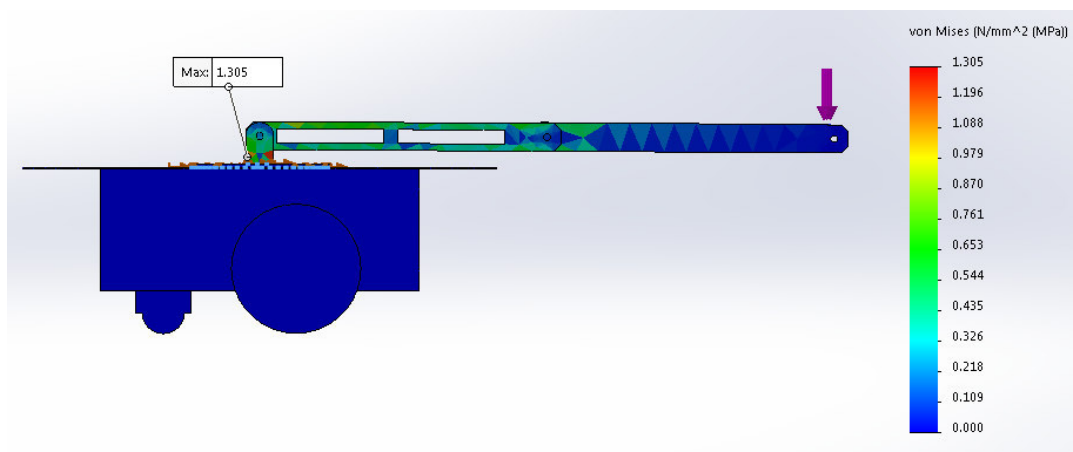
Bandymų variantai

	Konstrukcijos medžiaga	Grandžių ilgiai L1xL2xL3, mm	Grandžių masės L1+L2+L3, g.	Jėga veikianti konstrukciją, N
Variantas Nr. 1	Visos grandys Plastikas ABS PC	45x410x410	1066,45	10
Variantas Nr. 2	Visos grandys Aliuminis 1060 Alloy	45x410x410	2771,27	10
Variantas Nr. 3*	Visos grandys Plastikas ABS PC	45x410x410	657,87	10
Variantas Nr. 4*	Visos grandys	45x410x410	1608,60	10

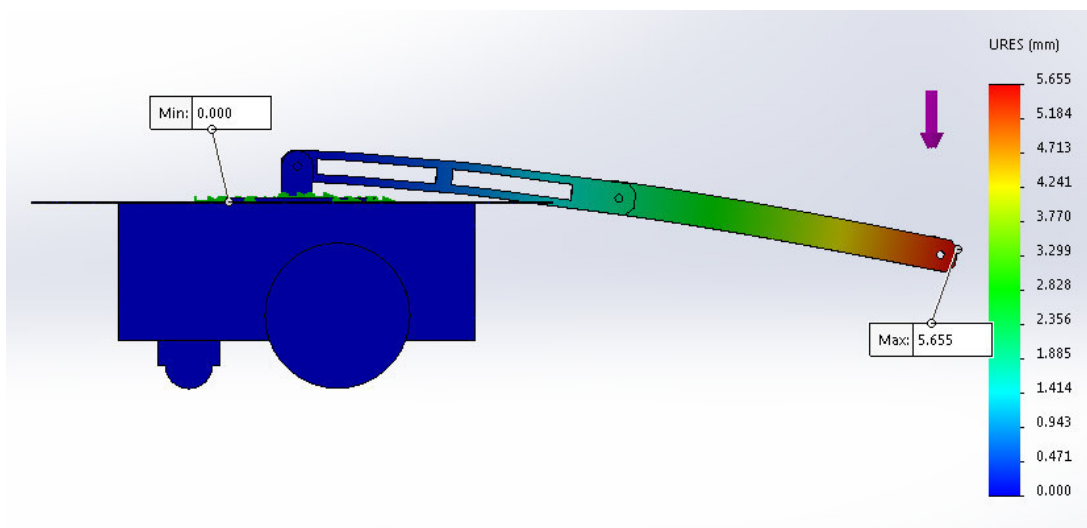
	Aliuminis 1060 Alloy			
Variantas Nr. 5*	L1 ir L2 grandys Aliuminis 1060 Alloy, L3 grandis Plastikas ABS PC	45x410x410	1357,72	10

* Išlengvinta konstrukcija

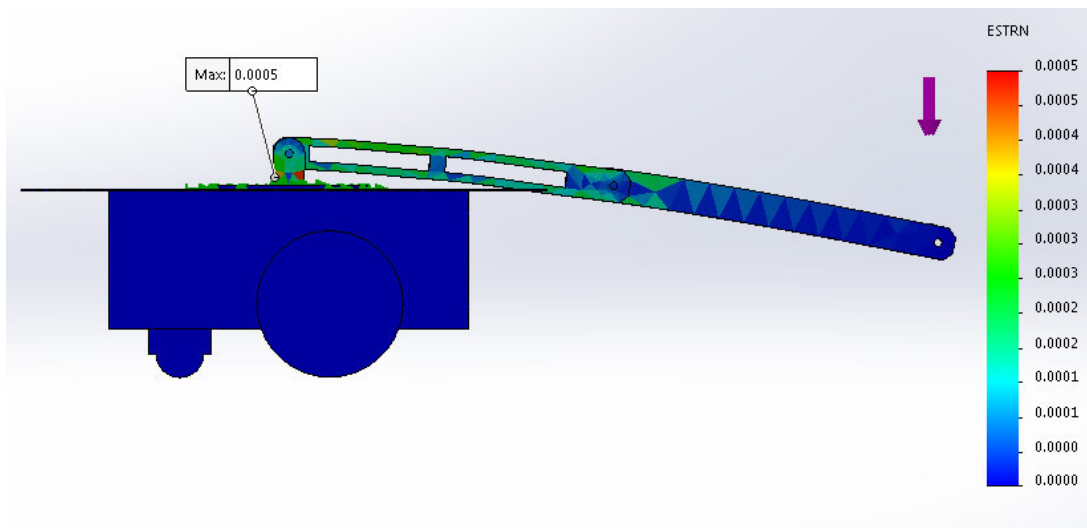
Variantas Nr. 1. „SolidWorks“ programa atliekamas konstrukcijos stiprumo patikrinimas. Gauti rezultatai pateikti 2.4.1, 2.4.2, 2.4.3 pav. Paveikslėlių atvaizdavimo skalė yra 322.



2.4.1 pav. Ekvivalentiniai įtempimai (Stress)



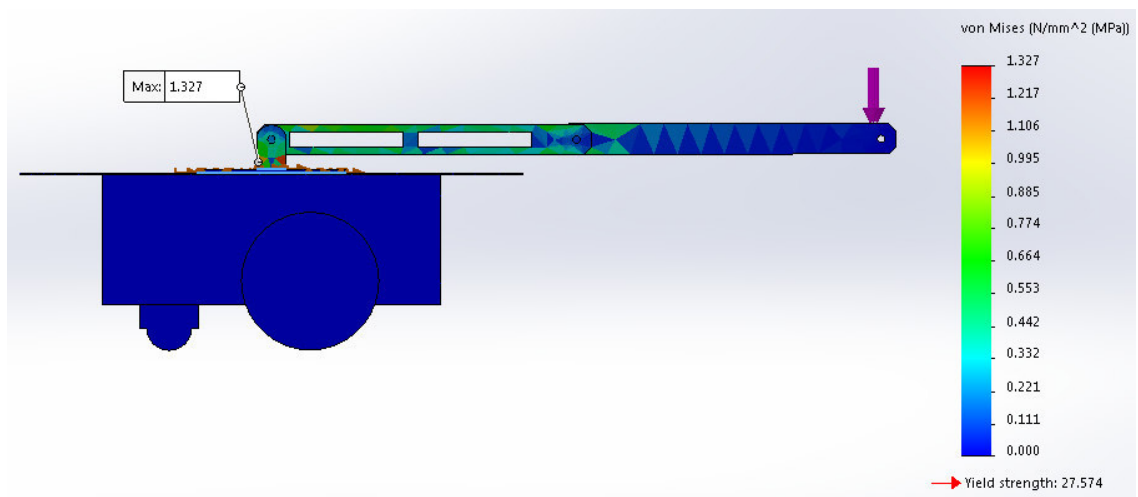
2.4.2 pav. Poslinkiai (Displacement)



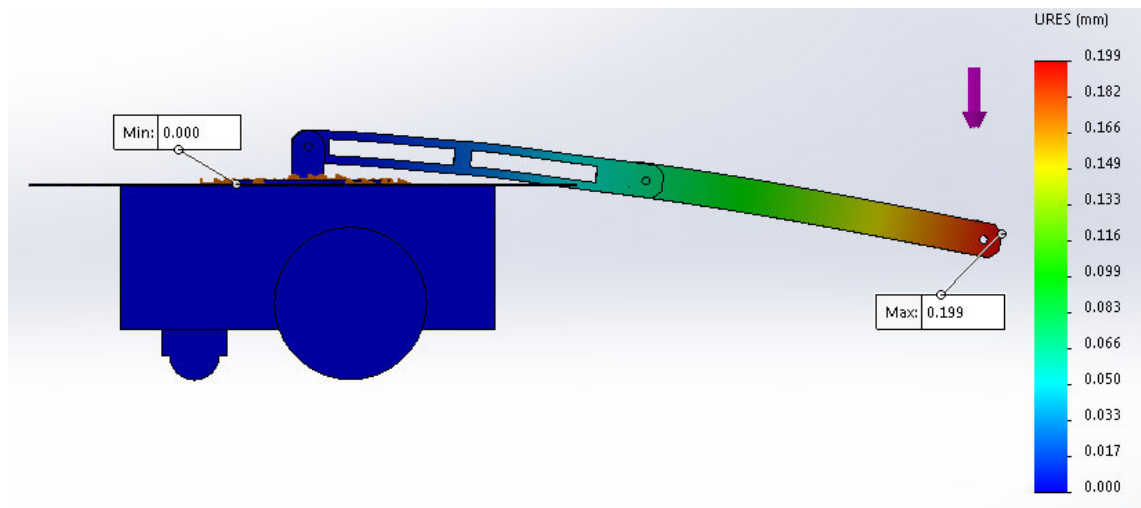
2.4.3 pav. Deformacijos (Strain)

Atlikus simuliacija ir išanalizavus 1 bandymo rezultatus, gaunama, kad konstrukcija atlaikytų ją veikiančią 10 N apkrovą. Maksimalūs įtempimai yra 1,305 MPa (plastiko takumo riba 28 MPa), maksimalūs poslinkiai 5,65 mm, maksimali deformacija 0,0005.

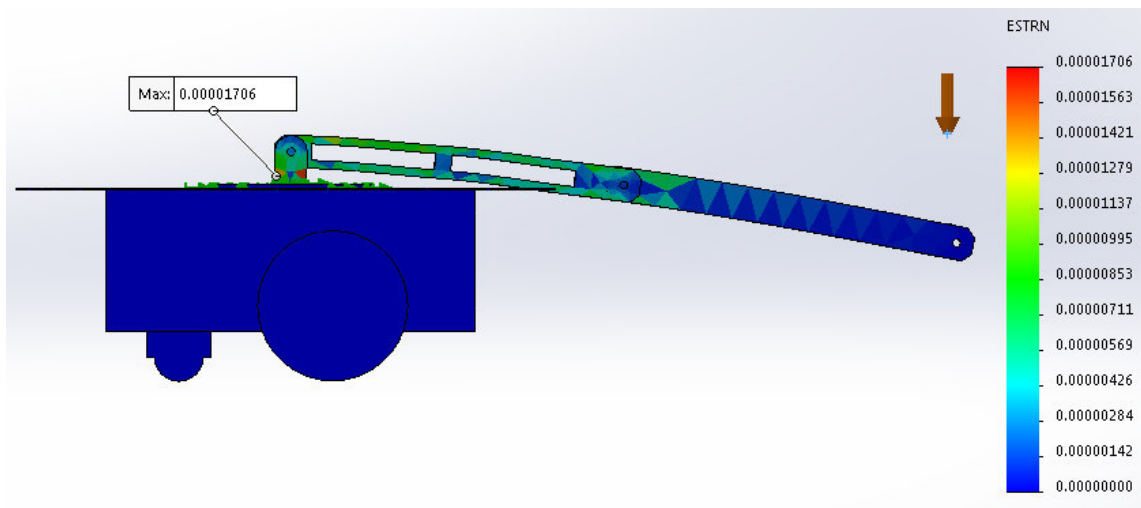
Variantas Nr. 2. „SolidWorks“ programa atliekamas konstrukcijos stiprumo patikrinimas. Gauti rezultatai pateikti 2.4.4, 2.4.5, 2.4.6 pav. Paveikslėlių atvaizdavimo skalė yra 322.



2.4.4 pav. Ekvivalentiniai įtempimai (Stress)



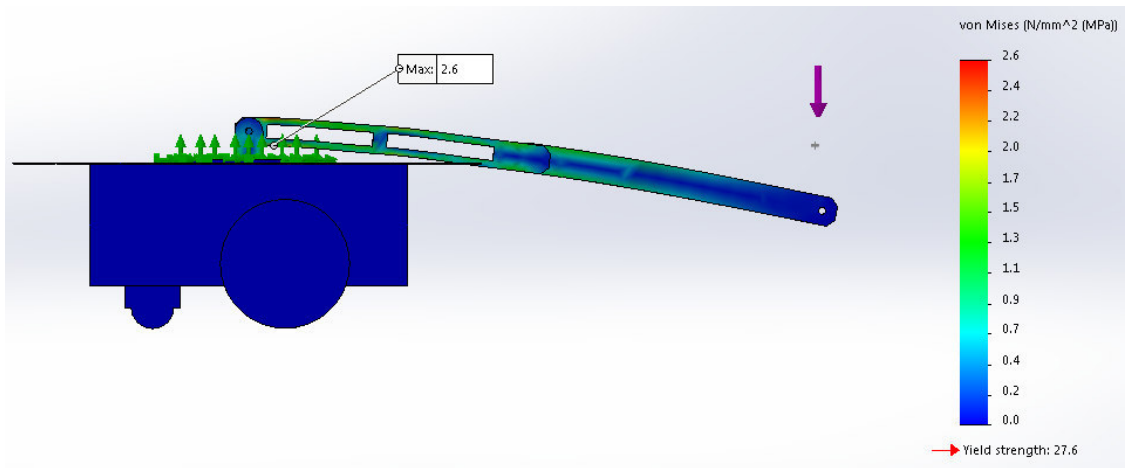
2.4.5 pav. Poslinkiai (Displacement)



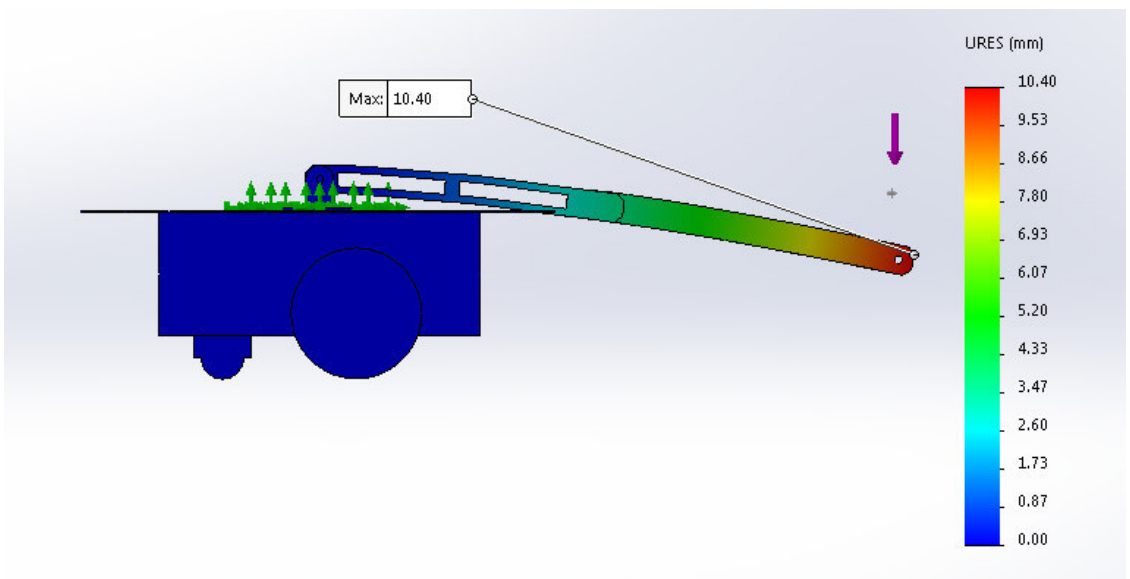
2.4.6 pav. Deformacijos (Strain)

Atlikus simuliacija ir išanalizavus 2 bandymo rezultatus, gaunama, kad konstrukcija atlaikytų ją veikiančią 10 N apkrovą. Maksimalūs įtempimai yra 1,327 MPa (aluminio takumo riba 27,5 MPa), maksimalūs poslinkiai 0,199 mm, maksimali deformacija 0,00001706.

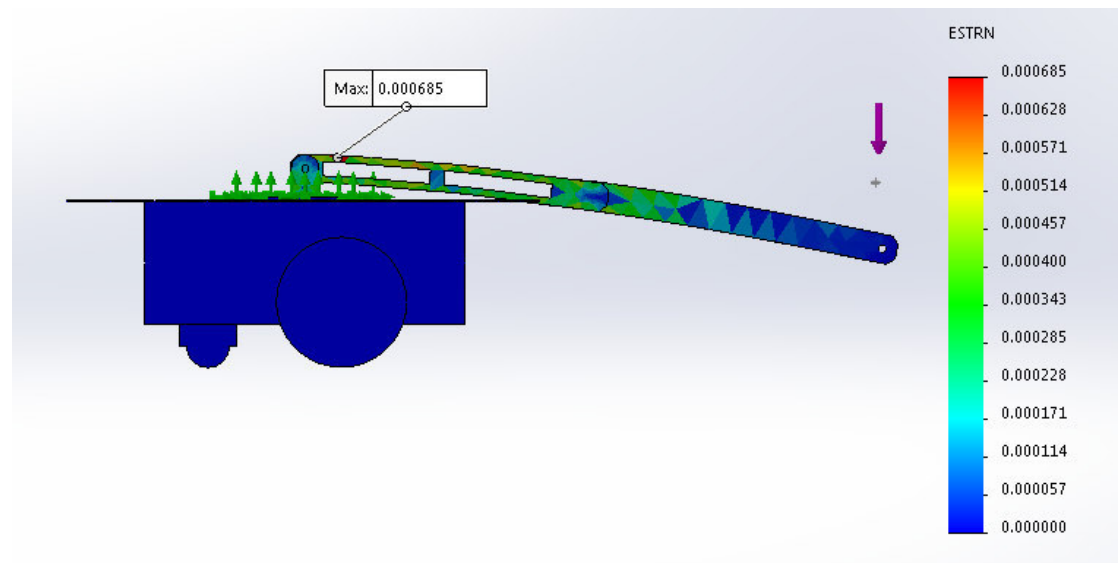
Variantas Nr. 3. „SolidWorks“ programa atliekamas konstrukcijos stiprumo patikrinimas, kai konstrukcija yra išlengvinta. Gauti rezultatai pateikti 2.4.7, 2.4.8, 2.4.9 pav. Paveikslėlių atvaizdavimo skalė yra 322.



2.4.7 pav. Ekvivalentiniai įtempimai (Stress)



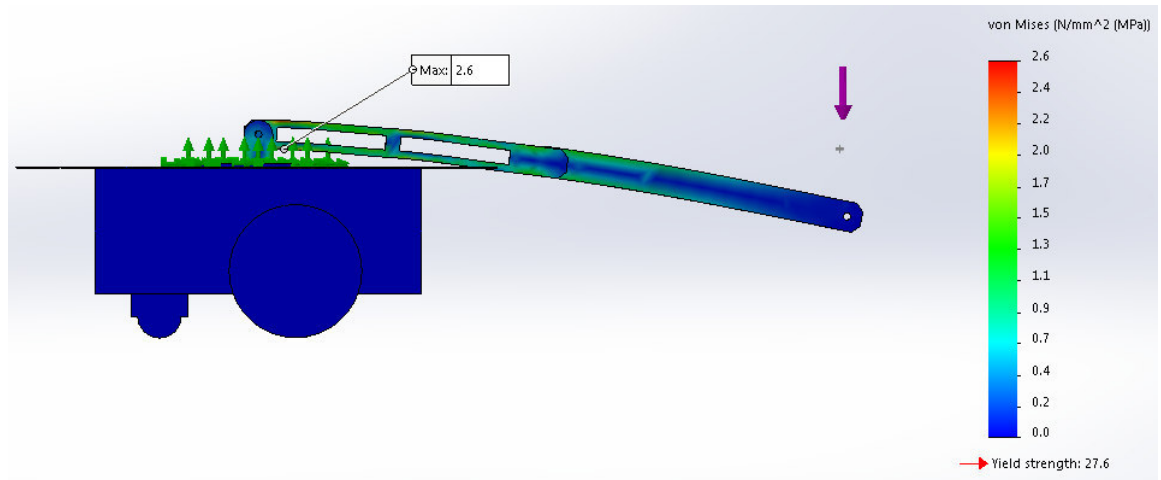
2.4.8 pav. Poslinkiai (Displacement)



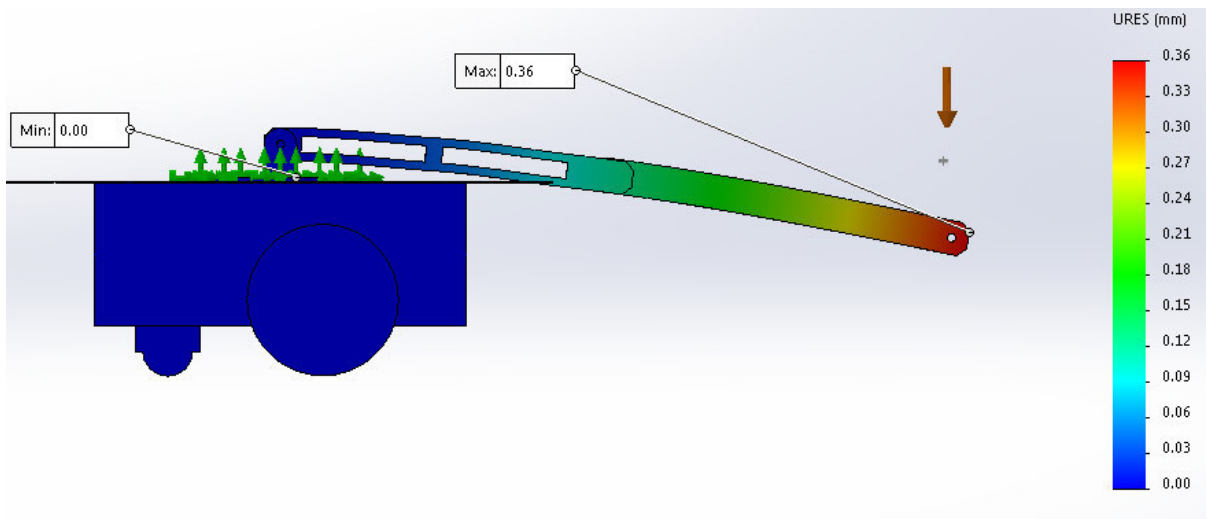
2.4.9 pav. Deformacijos (Strain)

Atlikus simuliacija ir išanalizavus 3 bandymo rezultatus, gaunama, kad konstrukcija atlaikytų ją veikiančią 10 N apkrovą. Maksimalūs įtempimai yra 2,6 MPa (plastiko takumo riba 28 MPa), maksimalūs poslinkiai 10,40 mm, maksimali deformacija 0,000685.

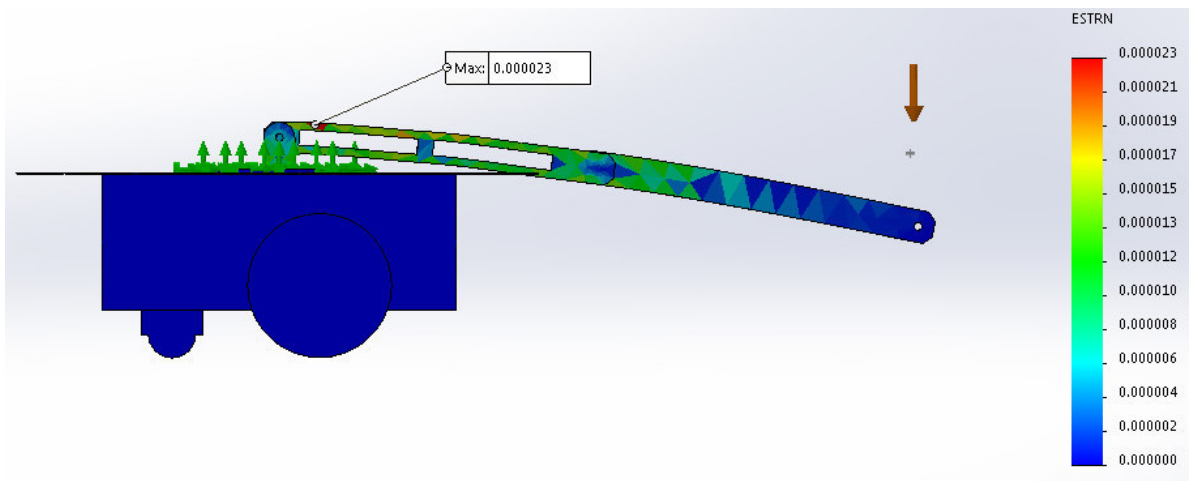
Variantas Nr. 4. „SolidWorks“ programa atliekamas konstrukcijos stiprumo patikrinimas, kai konstrukcija yra išlengvinta. Gauti rezultatai pateikti 2.4.10, 2.4.11, 2.4.12 pav. Paveikslėlių atvaizdavimo skalė yra 322.



2.4.10 pav. Ekvivalentiniai įtempimai (Stress)



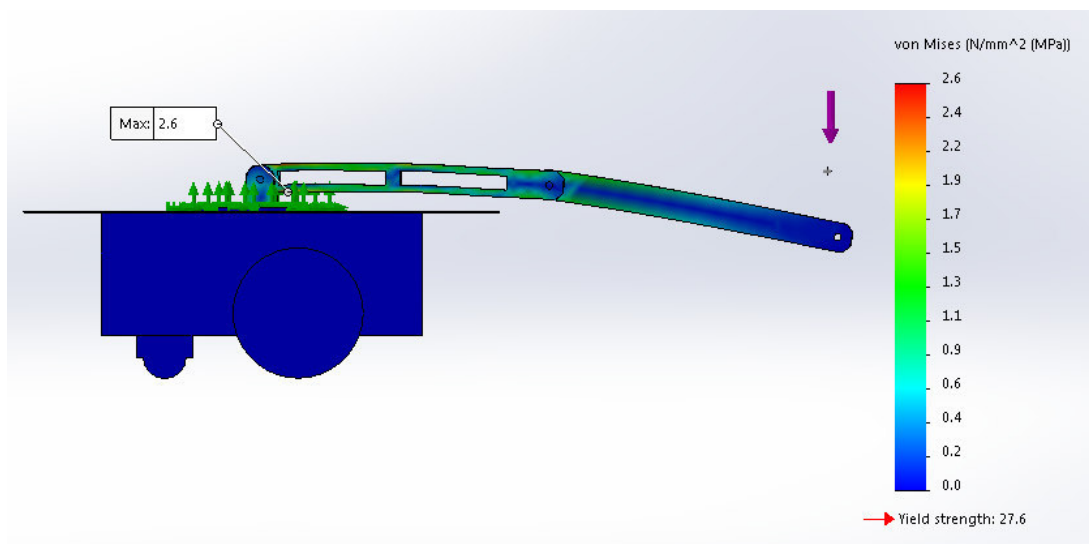
2.4.11 pav. Poslinkiai (Displacement)



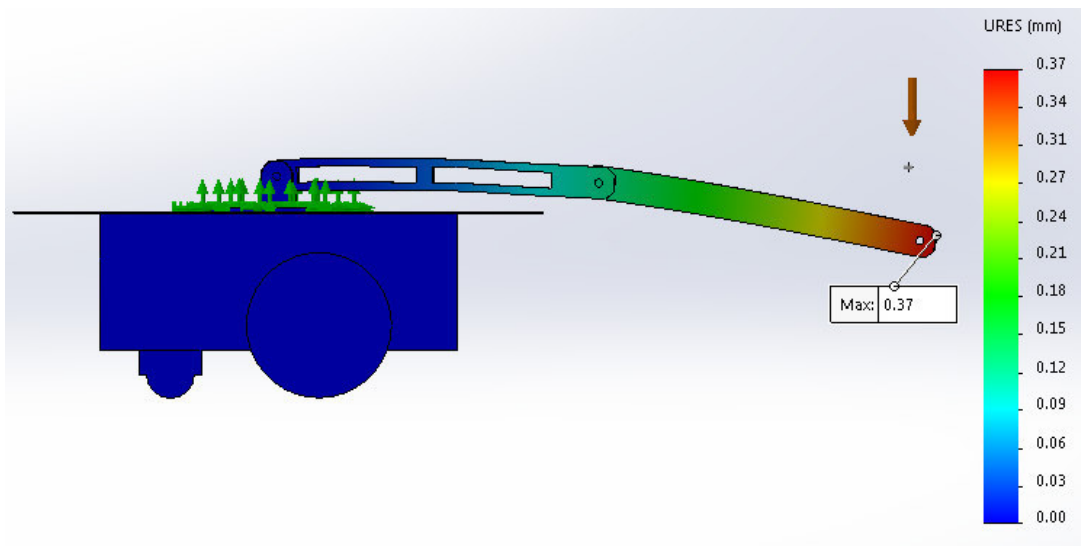
2.4.12 pav. Deformacijos (Strain)

Atlikus simuliacija ir išanalizavus 4 bandymo rezultatus, gaunama, kad konstrukcija atlaikytų ją veikiančią 10 N apkrovą. Maksimalūs įtempimai yra 2,6 MPa (aliuminio takumo riba 27,5 MPa), maksimalūs poslinkiai 0,36 mm, maksimali deformacija 0,000023.

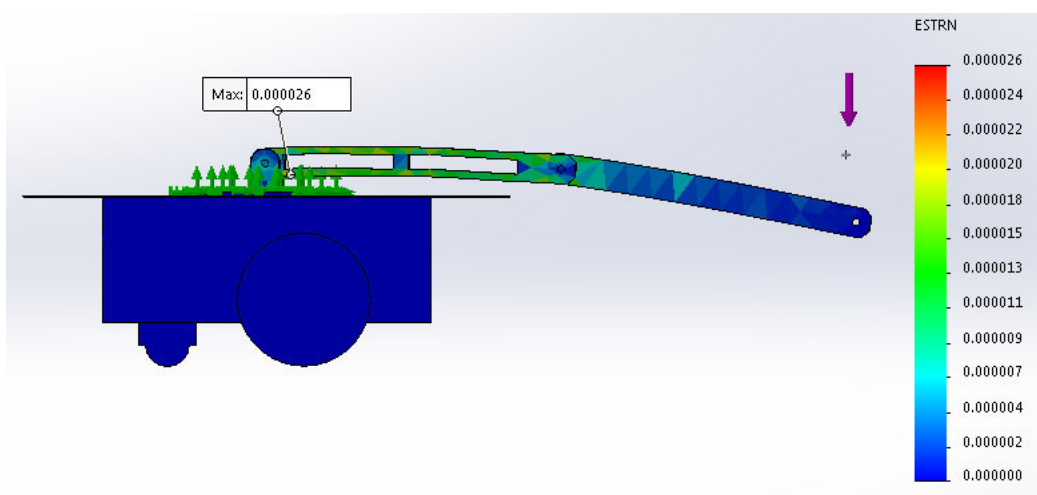
Variantas Nr. 5. „SolidWorks“ programa atliekamas konstrukcijos stiprumo patikrinimas, kai konstrukcija yra išlengvinta. Gauti rezultatai pateikti 2.4.13, 2.4.14, 2.4.15 pav. Paveikslėlių atvaizdavimo skalė yra 322.



2.4.13 pav. Ekvivalentiniai įtempimai (Stress)



2.4.14 pav. Poslinkiai (Displacement)



2.4.15 pav. Deformacijos (Strain)

Atlikus simuliacija ir išanalizavus 5 bandymo rezultatus, gaunama, kad konstrukcija atlaikytų ją veikiančią 10 N apkrovą. Maksimalūs įtempimai yra 2,6 MPa, maksimalūs poslinkiai 0,37 mm, maksimali deformacija 0,000026.

Atliktų penkių bandymų rezultatai pateikti 8 lentelėje.

8 lentelė

Bandymų rezultatai

	Konstrukcijos medžiaga	Maksimalūs Ekvivalentiniai įtempimai (Stress)	Maksimalūs Poslinkiai (Displacement)	Maksimali Deformacija (Strain)

Variantas Nr. 1	Visos grandys Plastikas ABS PC	1,305 MPa	5,65 mm	0,0005
Variantas Nr. 2	Visos grandys Aliuminis 1060 Alloy	1,327 MPa	0,199 mm	0,00001706
Variantas Nr. 3*	Visos grandys Plastikas ABS PC	2,6 MPa	10,40 mm	0,000685
Variantas Nr. 4*	Visos grandys Aliuminis 1060 Alloy	2,6 MPa	0,36 mm	0,000023
Variantas Nr. 5*	L1 ir L2 grandys Aliuminis 1060 Alloy, L3 grandis Plastikas ABS PC	2,6 MPa	0,37 mm	0,000026

* Išlengvinta konstrukcija

Atlikus visus bandymus galima teigti, kad visų variantų konstrukcijos atlaikytų užduotą apkrovą, bet konstrukcijoje, kurioje visos grandys yra iš plastiko ABS PC (variantas Nr. 1) susidaro 5,65 mm poslinkiai, o išlengvintoje konstrukcijoje, kurioje visos grandys taip pat iš plastiko ABS PC (variantas Nr. 3) susidaro 10,40 mm. Mažiausi poslinkiai susidaro konstrukcijoje, kurios grandys yra iš aliuminio 1060 Alloy (variantas Nr. 2), bet tokia konstrukcija yra sunkesnė už konstrukciją, kurios L1 ir L2 grandys yra iš aliuminio 1060 Alloy, o L3 grandis iš plastiko ABS PC (variantas Nr. 5) ir kurios poslinkiai 0,37 mm.

Tolimesniems tyrimams pasirenku konstrukciją, kurios L1 ir L2 grandys yra iš aliuminio 1060 Alloy, o L3 grandis iš plastiko ABS PC.

2.5 MANIPULATORIAUS DINAMINĖ ANALIZĖ

Šiame skyriuje bus apžvelgiamas mobiliojo roboto trijų laisvės laipsnių manipulatoriaus pavary sukimo momentų nustatymas ir parenkamos tinkamos grandžių judesiui atlikti servo pavaros.

Manipulatoriaus dinaminę analizę galima atlikti panaudojus Lagranžo, Niutono – Oilerio, Keino metodus. Šiame darbe manipulatoriaus dinamikos tyrimas bus atliekamas naudojant „Solidworks“ programinę įrangą.

Grandžių ilgiai ir jų pradinės padėties turi didelę įtaką sukimo momentų dydžiams. Todėl nustatysiu sukimo momentų priklausomybes nuo grandžių ir posūkio kampų, taip pat skirtingų tarpusavio padėčių.

Tyrimas sukimo momentams nustatyti bus atliekamas keliais variantais:

Variantas Nr. 1 – sukant tik pirmąją grandį L1;

Variantas Nr. 2 – sukant tik antrąją grandį L2;

Variantas Nr. 3 – sukant tik trečiąją grandį L3;

Variantas Nr. 4 – sukant L2 ir L3 grandis kartu ta pačia kryptimi.

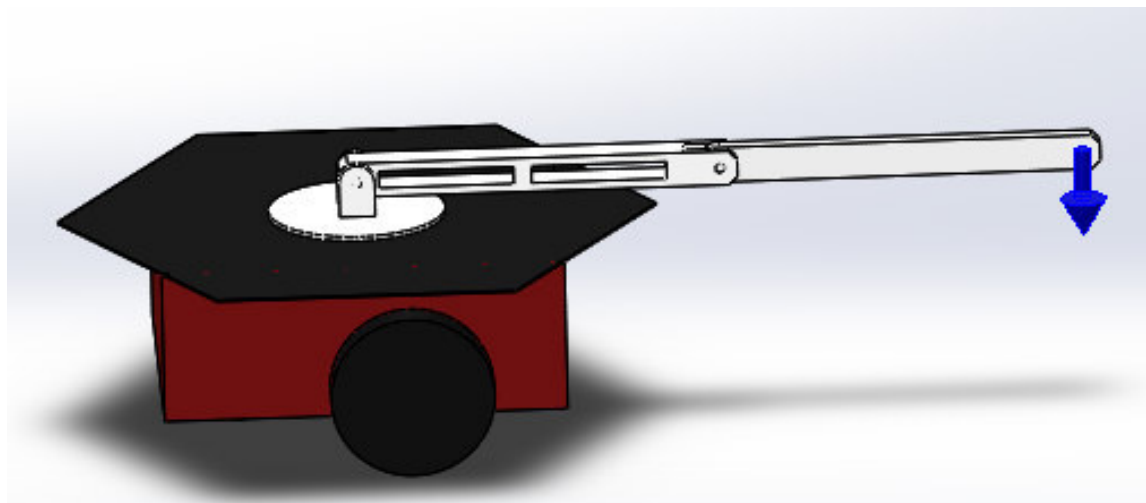
Manipulatoriaus grandžių medžiaga ir svoriai pateikti 9 lentelėje.

9 lentelė

Manipulatoriaus grandžių svoriai

Eil. Nr.	Grandis	Medžiaga	Grandies svoris, g
1.	L1	Aliuminis 1060 Alloy	557,17
2.	L2	Aliuminis 1060 Alloy	567,59
3.	L3	Plastikas ABS PC	232,96

Bandymų metu tiriama kaip keičiasi sukimo momentai didinant apkrovas nuo 0N iki 10N (2.5.1 pav.)

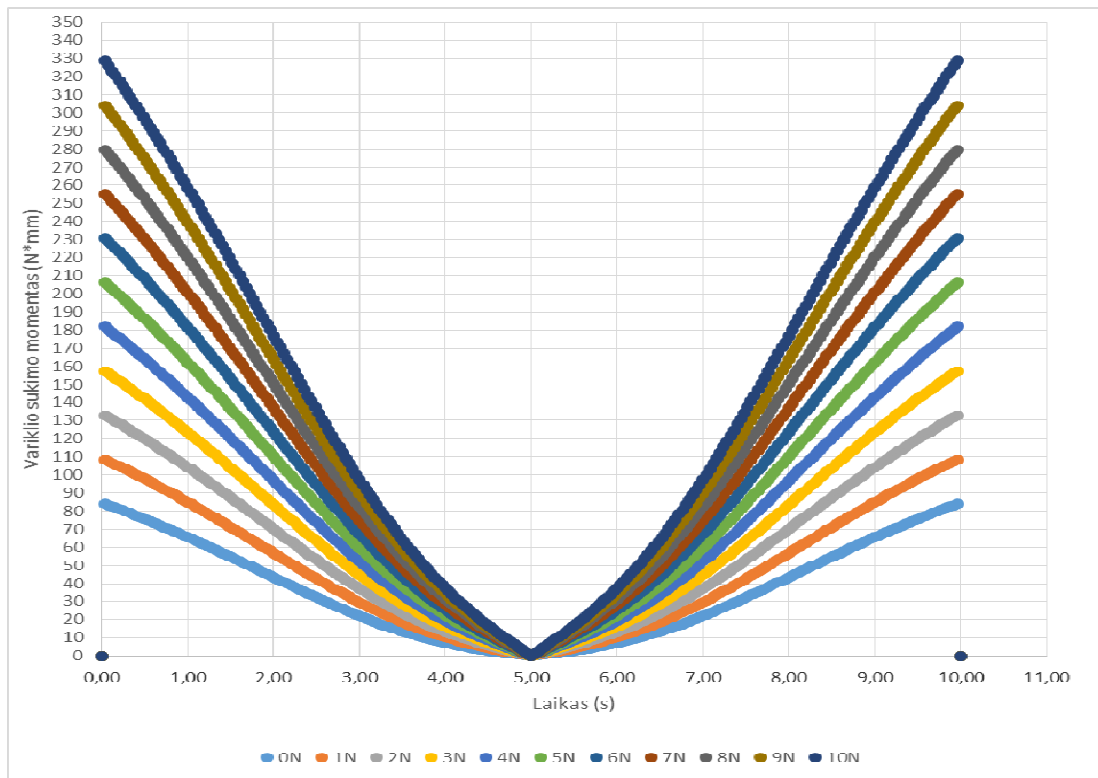


2.5.1 pav. Apkrovos uždėjimo vieta

Variantas Nr. 1 – tiriamas L1 grandies variklio sukimo momentas.

Pirma grandis L1 yra pritvirtinta ant mobiliojo roboto platformos. L1 grandis sukasi 360° per 10 sekundžių. Grandys L2 ir L3 yra toje pačioje padėtyje, t.y. horizontalioje linijoje. Pirmuoju

atveju vertinamas tik grandžių savasis svoris, antruoju pridedama 1N jėga ir didinama kas 1 N iki 10N. Gauti bandymų rezultatai pateikti 2.5.1 pav.

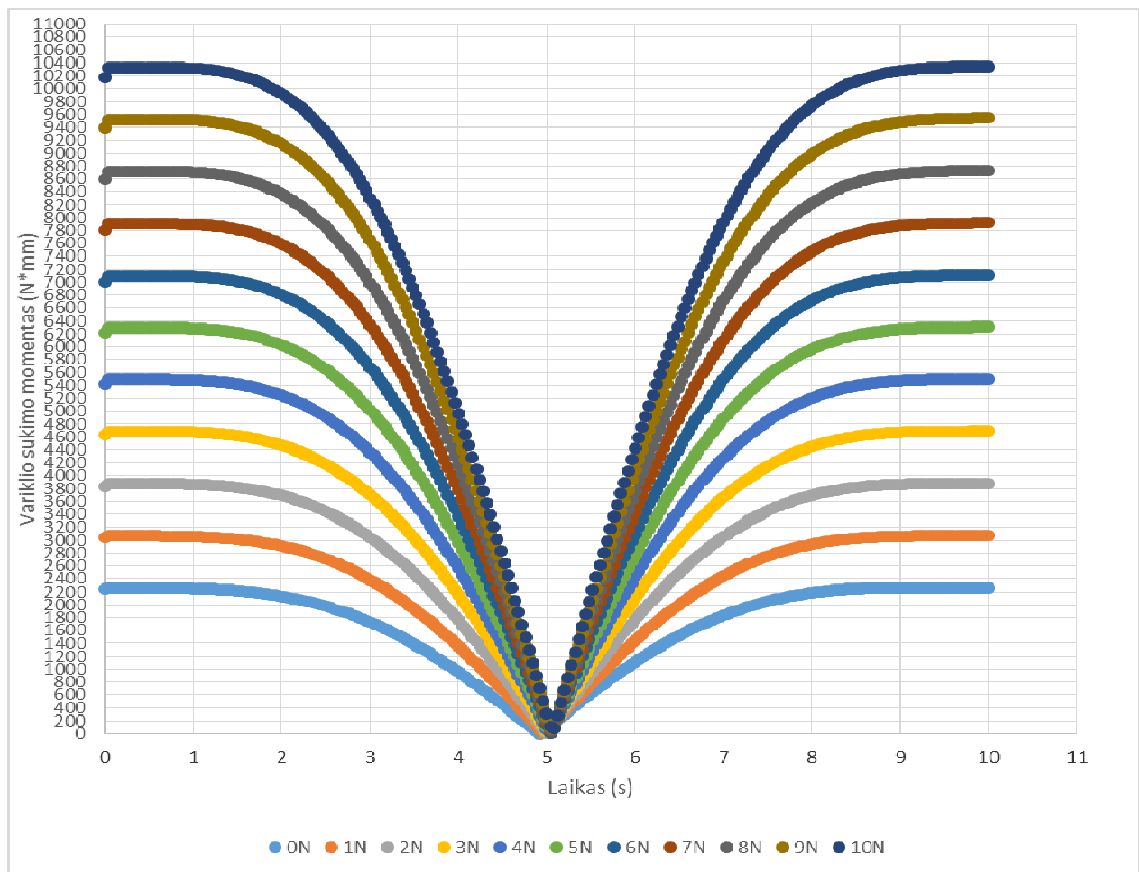


2.5.2 pav. L1 grandies pavaros sukimo momentai

Pagal 2.5.2 paveiksle pateiktus duomenis matome, kad didžiausias sukimo momentas susidaro pačioje pradžioje ir judesio pabaigoje, ir siekia 330 N*mm.

Variantas Nr. 2 – tiriamas L2 grandies variklio sukimo momentas.

Pirma grandis L1 yra pritvirtinta ant mobiliojo roboto platformos. L2 grandis sukasi 184° prieš laikrodžio rodyklę per 10 sekundžių. Grandys L2 ir L3 yra toje pačioje padėtyje, t.y. horizontalioje linijoje. Pirmuoju atveju vertinamas tik grandžių savasis svoris, antruoju pridedama 1N jėga ir didinama kas 1 N iki 10N. Gauti bandymų rezultatai pateikti 2.5.3 pav.

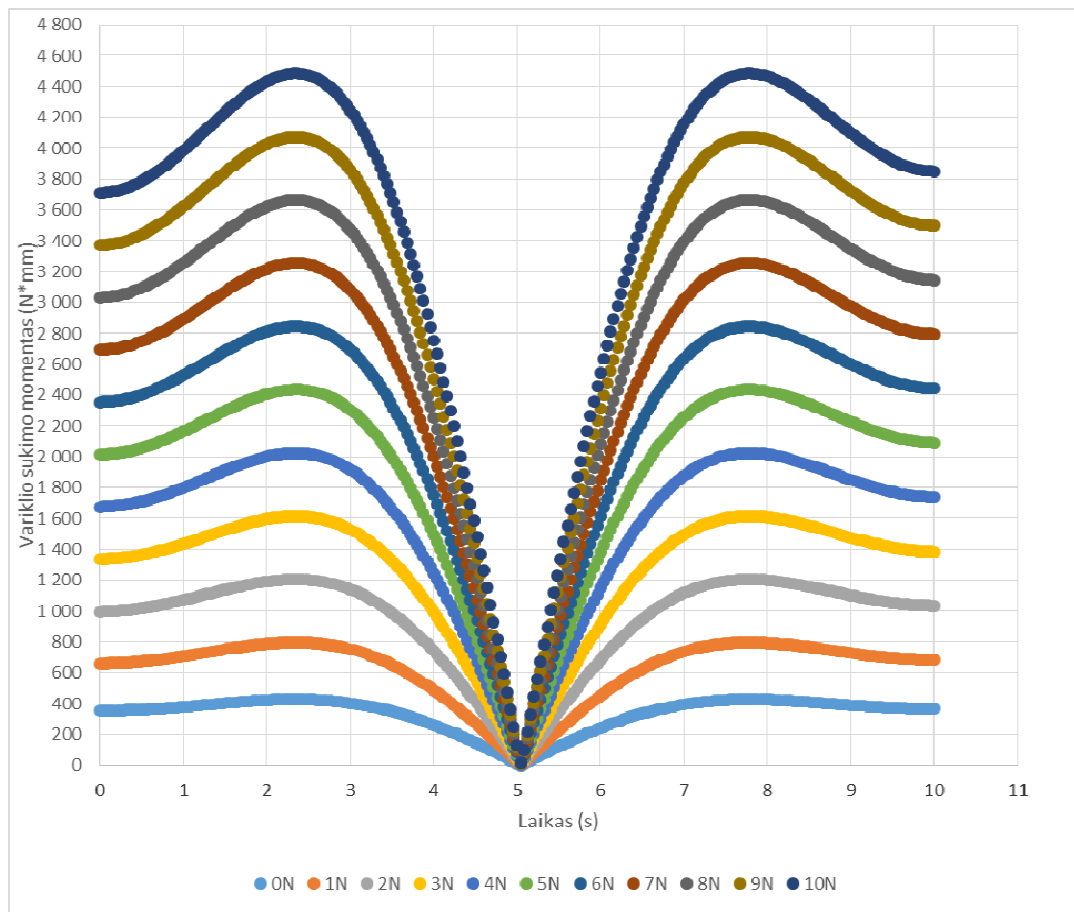


2.5.3 pav. L2 grandies sukimo momentų grafikas

Pagal 2.5.3 paveiksle pateiktus duomenis matome, kad didžiausias sukimo momentas siekia 10326 N*mm. Ties 5 sekunde sukimo momentas tampa artimas nuliui dėl to, kad grandžių svorio centras sutampa su vertikaliąja grandžių ašimi.

Variantas Nr. 3 – tiriamas L3 grandies variklio sukimo momentas.

Pirma grandis L1 yra pritvirtinta ant mobiliojo roboto platformos. L2 grandis stovi statmenai platformos. L3 grandis sukasi 275° prieš laikrodžio rodyklę per 10 sekundžių. Gauti bandymų rezultatai pateikti 2.5.4 pav.

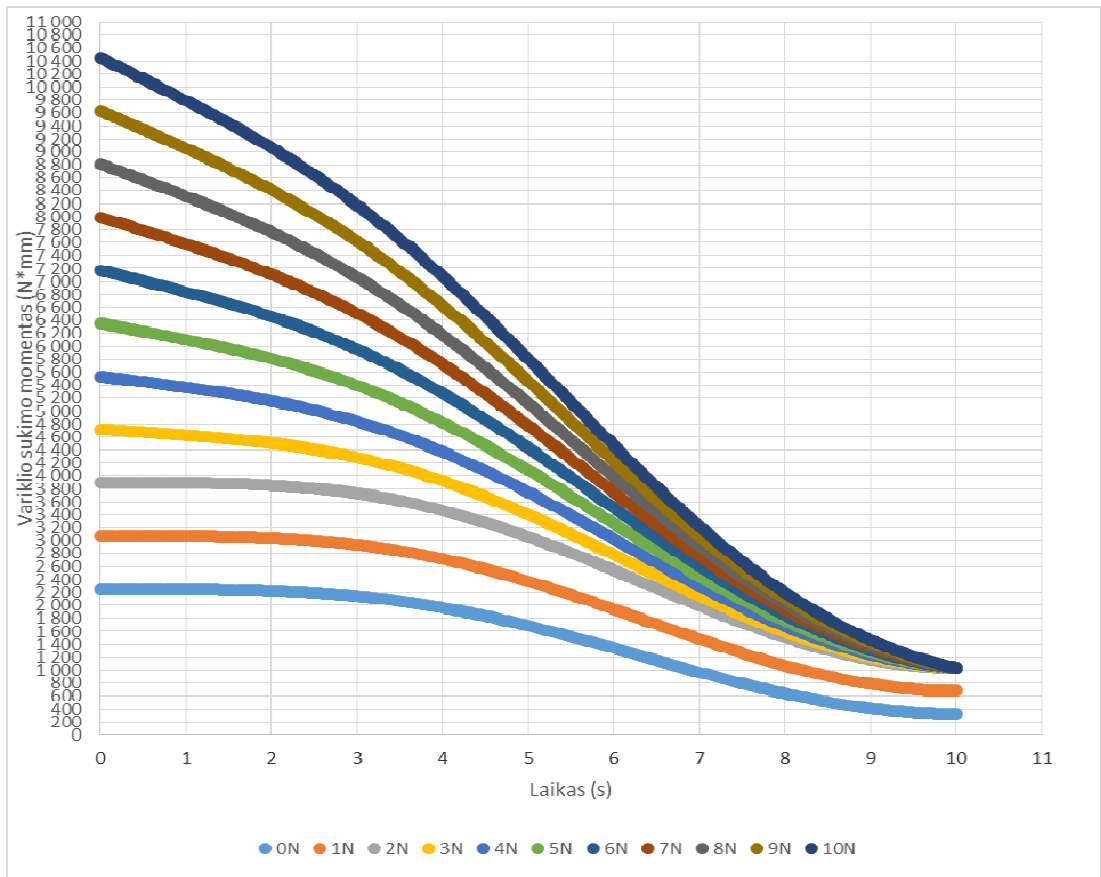


2.5.4 pav. L3 grandies sukimo momentų grafikas

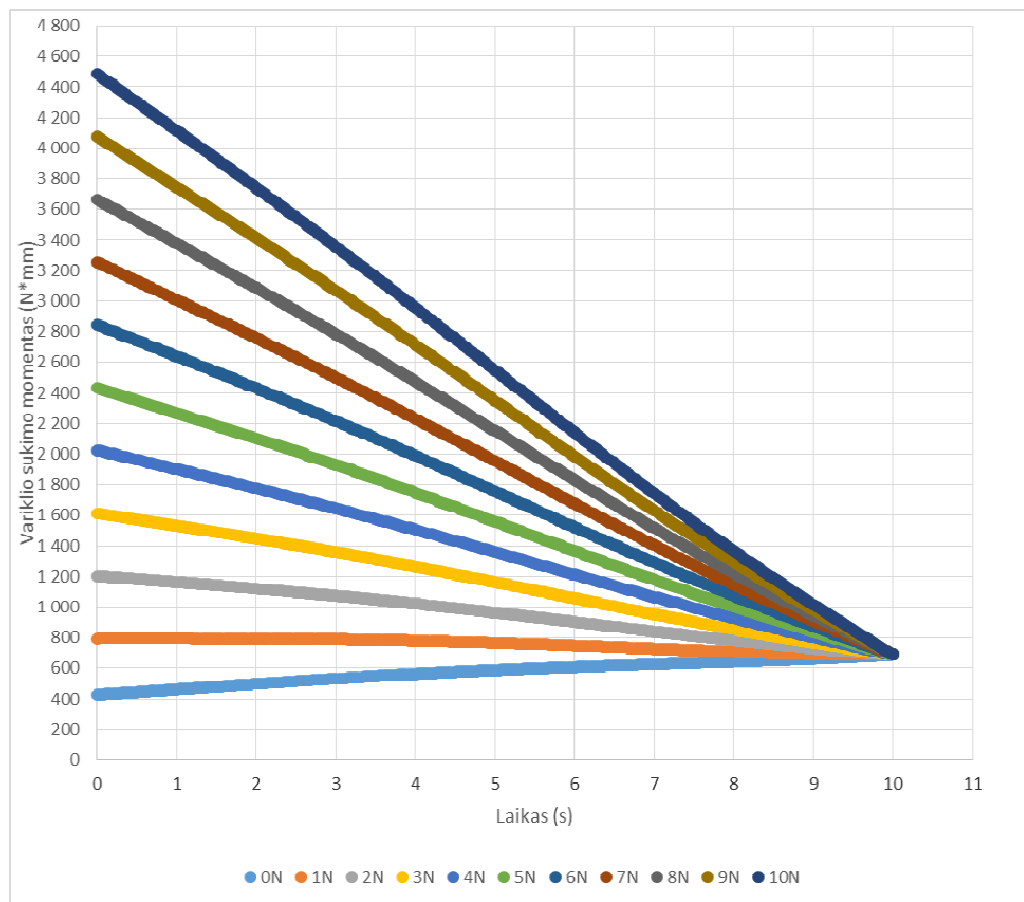
Pagal 2.5.4 paveiksle pateiktus duomenis matome, kad didžiausias sukimo momentas siekia 4485 N*mm. Ties 5 sekunde sukimo momentas tampa artimas nuliui dėl to, kad grandies svorio centras sutampa su vertikaliąja grandžių ašimi.

Variantas Nr. 4 – tiriama L2 ir L3 grandžių variklių sukimo momentai.

Pirma grandis L1 yra pritvirtinta ant mobiliojo roboto platformos. L2 grandis ir L3 grandis juda tuo pačiu metu. L2 grandis juda 90° prieš laikrodžio rodyklę, o L3 grandis tuo pačiu metu juda 150° pagal laikrodžio rodyklę per 10 sekundžių (2.5.5 pav.). Gauti bandymų rezultatai pateikti 2.5.5 pav. ir 2.5.6 paveikslėliuose.



2.5.5 pav. L2 grandies pavaros sukimo momentai kai grandys juda kartu



2.5.6 pav. L3 grandies pavaros sukimo momentai kai grandys juda kartu

Pagal 2.5.5 ir 2.5.6 paveiksluose pateiktus duomenis matome, kad kai abi grandys juda tuo pačiu metu, L2 grandies didžiausias sukimo momentas siekia 10447 N*mm, o L3 grandies sukimo momentas – 4483 N*mm.

Atlikus visus bandymus ir išanalizavus gautus rezultatus sudaroma gautų maksimalių sukimo momentų lentelė. 10 lentelėje pateiktos gautos didžiausios sukimo momentų reikšmės, kai grandis veikia 10 N jėga.

10 lentelė

Sukimo momentų reikšmės

Grandis	Apkrova, N	Didžiausias sukimo momentas, N*mm
L1 grandis	10	330
L2 grandis	10	10326
L3 grandis	10	4485
Grandys juda kartu (L2, L3)	10	10447, 4483

Atlikus bandymus ir išnagrinėjus gautus rezultatus galima daryti išvadas:

- didinat apkrovas sukimo momentas didėja.
- manipuliatoriui pakelti 1000 g svorį reikalinga ne mažesnė, kaip 10447 N*mm sukimo momentą išvystanti pavara.
- L3 grandžiai pakelti 1000 g svorį reikalinga dvigubai mažesnio galingumo pavara.

IŠVADOS

1. Atlikus manipulatoriaus darbo zonų tyrimą, daroma išvada, kad keičiant grandžių ilgi, maksimalus manipulatoriaus spindulys nesikeičia, t. y. visais atvejais išlieka 820 mm (skaičiuojant nuo platformos paviršiaus).
2. Analizės metu gauti duomenys parodė, kad manipulatoriaus pasiekiamumas yra didžiausias ir jis pasiekia žemę, kai L2 ir L3 grandžių ilgis yra vienodas, t.y. po 410 mm.
3. Manipulatoriaus darbo zonos tyrimo metu paaiškėjo, kad keičiant manipulatoriaus grandžių L2 ir L3 ilgius, nekeičiant grandžių suminio ilgio, manipulatoriaus darbo zonos ribos mažėja.
4. Manipulatoriaus konstrukcija kai visos grandys yra iš plastiko yra netinkama, nes atlikus stipruminius skaičiavimus gaunamas poslinkis daugiau kaip 10 mm.
5. Manipulatoriaus konstrukcija kai L1 ir L2 grandys yra iš aliuminio (1060 Alloy), o L3 grandis iš plastiko (ABS PC), atlaikytų apkrovas.
6. Atlikus manipulatoriaus dinaminę analizę, daroma išvada, kad manipulatoriui pakelti 1000 g svorį reikalinga ne mažesnė, kaip 10447 N*mm sukimo momentą išvystanti pavara.

LITERATŪRA

1. Autonominių mobilių robotų valdymas [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.elen.ktu.lt/studentai/lib/exe/fetch.php?media=autmobrobotuvaldymas.pdf>
2. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/448/robotikos-sistemu-modeliavimas-ir-valdymas/> [žiūrėta 2017.01.12]
3. Prieiga per internetą: <https://lt.wikipedia.org/wiki/> [žiūrėta 2017.01.12]
4. Prieiga per internetą: www.robotika.lt [žiūrėta 2017.03.28]
5. Prieiga per internetą: <http://www.inforeg.lt/tag/robotas/> [žiūrėta 2017.03.27]
6. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/448/robotikos-sistemu-modeliavimas-ir-valdymas/> (155 psl.) [žiūrėta 2017.03.29]
7. Europa Lehrmittel „Mechanikos inžinieriaus žinynas“, 2014 metai, 1-oji laida. (404-405 psl.)
8. <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/448/robotikos-sistemu-modeliavimas-ir-valdymas/> (155 psl.) [žiūrėta 2017.03.29]
9. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/448/robotikos-sistemu-modeliavimas-ir-valdymas/> (215 psl.) [žiūrėta 2017.03.29]
10. Prieiga per internetą: <http://www.baldor.com/Shared/manuals/1205-394.pdf> [žiūrėta 2017.03.29]
11. J. Griškevičius, J. Žižienė, J. V. Astrauskas „Automatinis valdymas“, 2012 metai, Vilnius (11 – 12 psl.)
12. Prieiga per internetą <http://ppf.ktu.lt/vaiciulis/> [žiūrėta 2015.11.20]
13. Bakšys B., Fedaravičius A., „Robotų technika“, 2004.
14. Prieiga per internetą: <https://learn.adafruit.com/wifi-controlled-mobile-robot/introduction>
15. Prieiga per internetą: https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/gallery/pia14156.html [žiūrėta 2017.01.17]
16. Prieiga per internetą: <https://www.linkedin.com/pulse/robotics-civil-engineering-keerthana-mahalingam> [žiūrėta 2017.01.17]
17. Prieiga per internetą: <http://www.army-technology.com/projects/talon-tracked-military-robot/> [žiūrėta 2017.01.17]
18. Prieiga per internetą: https://www.eurekalert.org/pub_releases/2016-08/cu-cma082216.php [žiūrėta 2017.01.17]
19. Prieiga per internetą: <http://roboticpoolcleanerscompared.com/> [žiūrėta 2017.01.17]

20. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_manipulator [žiūrėta 2017.01.17]

21. Prieiga per internetą: http://www.wikiwand.com/en/Parallel_manipulator [žiūrėta 2017.01.17]