



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

Arvydas Gaurilka

ROBOTO ERDVINIO JUDESIO JUTIKLIO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. Vytenis Sinkevičius

PANEVĖŽYS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS
TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas doc. Arūnas Tautkus

ROBOTO ERDVINIO JUDESIO JUTIKLIO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas Prof. Vytenis Sinkevičius

Recenzentas

Projektą atliko Arvydas Gaurilka

PANEVĖŽYS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Arvydas Gaurilka

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Roboto erdvinio judesio jutiklio tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. birželio 1 d.

Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, **Arvydo Gaurilkos**, baigiamasis projektas tema „**Roboto erdvinio judesio jutiklio 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)

Gaurilka, A. Roboto erdvinio judesio jutiklio tyrimas. Magistrinio darbo baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vytenis Sinkevičius; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, technologijų katedra.

Panevėžys, 2015. 53 psl.

SANTRAUKA

Šiame darbe atliekamas jutiklių arba jų derinių pritaikymo universaliam erdviniam valdymo įtaisui sudaryti tyrimas ir eksperimentiniai bandymai. Taip pat apžvelgiamos poveikio įtaisų struktūros, pritaikymo galimybės. Atlikus jutiklių apžvalgą ir įvertinus jų privalumus ir trūkumus buvo sudaryti du poveikio įtaisai. Pagal valdymo įtaiso formuojamus signalus jo poveikio metu, sudaryti judėjimo deriniai, kurie aprašo roboto judesius, leidžiančius valdyti robotą sekos režime.

Išanalizavus anksčiau sukurtą roboto valdymo sekos režime sistemą ir tęsiant pradėtus darbus, buvo praktiškai surinktas ir eksperimentiškai išbandytas teorinis modelis.

Raktiniai žodžiai: *robotas, valdymas, sistema, erdvinis poveikio įtaisas.*

Gaurilka, A. Research of robot three-dimensional motion sensor. Master thesis final project / Supervisor Prof. Vytenis Sinkevičius; Kaunas University of Technology, Panevėžys Faculty of Technology and Business, Department of Technologies.

Panevėžys, 2015. 53 pages.

SUMMARY

This paper presents analysis of investigation of sensor combination for universal spatial control device creation. Review of impact devices structures, application possibilities. After sensors and combination of sensors analyse decided to test two models of impact devices. According to signals of the control device during exposure, created movement combinations which describe the movements of the robot, which makes it possible to control robot in following mode.

Investigation of postgraduate student work have been done, and continued. The theoretical model was assembled and experimentally tested.

Keywords: *robot, control, system, spatial control device.*

TURINYS

ĮVADAS	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ	9
1.1 Judesio valdymo metodai.....	9
1.1.1 Vaizdų atpažinimo metodas.....	10
1.1.2 Jutiklių sistema.....	10
1.1.3 Poveikio įtaisas.....	11
1.2 Poveikio įtaisų apžvalga.....	12
1.2.1 „Triax“ pramoninis jutiklis.....	12
1.2.2 Judesį fiksuojantis kostiumas.....	13
1.2.3 Pramoninio roboto valdymas garso komandomis ir „Wii“ pultu.....	14
1.2.4 Erdvinis jutiklis.....	16
1.2.5 Įmonės „Robotiq“ manipulatoriaus valdymo prototipas.....	17
1.3 Skyriaus išvados.....	18
2. ANALITINĖ DALIS	19
2.1 Projektuojamo poveikio įtaiso veikimo principas.....	19
2.2 Poveikio įtaiso sudarymas naudojant inklinometrus.....	19
2.2.1 Inklinometro veikimo principas.....	19
2.2.2 Jutiklių komunikacijos parametrai.....	20
2.3 6 laisvės laipsnių vairalazdė sudaryta iš Holo efekto jutiklių.....	24
2.4 Poveikio įtaiso sudarymas naudojant jėgai jautrią varžą.....	26
2.4.1 Poveikio įtaiso mechaninė dalis.....	28
2.4.2 Kuriamam valdymo įtaisui naudojamas mikrovaldiklis.....	29
2.5 Skyriaus išvados.....	30
3. TIRIAMOJI DALIS	31
3.1 Bandymas su inklinometrais.....	31
3.1.1 Jutiklių tyrimas.....	33
3.2 Bandymas su jėgai jautria varža.....	35

3.2.1	Jutiklių išdėstymas ir kombinacijos.....	35
3.2.2	Jutiklių poveikio ploto tyrimas ir elektrinių sujungimų schema	36
3.2.3	Poveikio įtaiso suderinimas	40
3.2.4	Valdymo įtaiso poveikio jėgos tyrimas	42
3.3	Ekspirimentinis poveikio įtaiso tyrimas	45
3.3.1	Valdomo objekto parinkimas.....	45
3.3.2	Valdomo objekto ir poveikio įtaiso sujungimas	46
3.4	Skyriaus išvados	50
	IŠVADOS	51
	LITERATŪRA	52
	PRIEDAI	Error! Bookmark not defined.

IVADAS

Pramonėje, medicinoje, logistikos centruose ir kasdienybėje vis dažniau susiduriama su poreikiu valdyti realius arba virtualius objektus. Šiam tikslui paprastai pasitelkiami vaizdų ar gestų atpažinimo metodai arba naudojami įvairūs poveikio įtaisai. Pramonėje valdant didelių matmenų krovinius yra taikomi ypatingi saugumo reikalavimai ir naudojami poveikio įtaisai su preciziškais tikslumais, dažniausiai pats poveikio įtaisas sujungtas su valdomu objektu standžiai, kad būtų tiesioginis grįžtamasis ryšys.

Temos aktualumas. Buvo atlikta daug tyrimų, kaip robotą programuoti netiesiogiai (garso komandomis, gestais). Esminis skirtumas tai, kad minėti programavimo būdai neturi tiesioginio sąlyčio su pačiu roboto manipulatoriumi, todėl norint programuoti saugiai būtina papildoma įranga. Taip pat kiekvienas valdomas objektas turi savo valdymo specifiką, pramoniniai ir mobilūs robotai pasižymi savo programavimo kalbų gausybe, norint išmokyti programuoti bent viena iš jų reikia nemažai laiko bei pastangų.

Galimybė valdyti bei programuoti bet kurio gamintojo pramoninį ar mobilų robotą virtualizacijoje, taip pat supaprastinant ir pagreitinant programavimo ir valdymo procesą būtų naudinga daugeliui įmonių ir įstaigų. Daugelis smulkių ar vidutinių (kurios sudaro apie 95% visų pasaulio) įmonių dažnai turi pritaikymą bent vienam pramoniniam robotui. Šiuo metu dažniausiai robotas yra perkamas iš specialios įmonės kuri atlieka įrengimo, programavimo bei priežiūros darbus. Specializuota įmonė atlieka profesionalų darbą, bet ir nemažai kainuoja. Nedidelėms įmonėms, ypač kuriose gaminama produkcija dažnai keičiasi, labai pasitarnautų nebrangus ir paprastai valdomas prietaisas, kuris lengvai prijungus prie roboto manipulatoriaus leistų jį valdyti bei programuoti. Tai duotų neribotą laisvę nedidelėms įmonėms įsigyti ir valdyti bet kurio gamintojo pramoninį robotą.

Tyrimo objektas:

Jutikliai.

Tyrimo tikslas:

Ištirti jutiklių arba jų derinių pritaikymą universaliam erdviniam valdymo įtaisui sudaryti, pasiūlyti modifikacijas.

Tyrimo uždaviniai:

1. Apžvelgti esamas valdymo sistemas;
2. Išanalizuoti esamus jutiklius arba jų sistemas poveikio įtaisui sudaryti;
3. Sudaryti poveikio įtaisą naudojant skirtingus jutiklius;
4. Eksperimentiškai ištirti sudarytus poveikio įtaisyse.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, eksperimentai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ

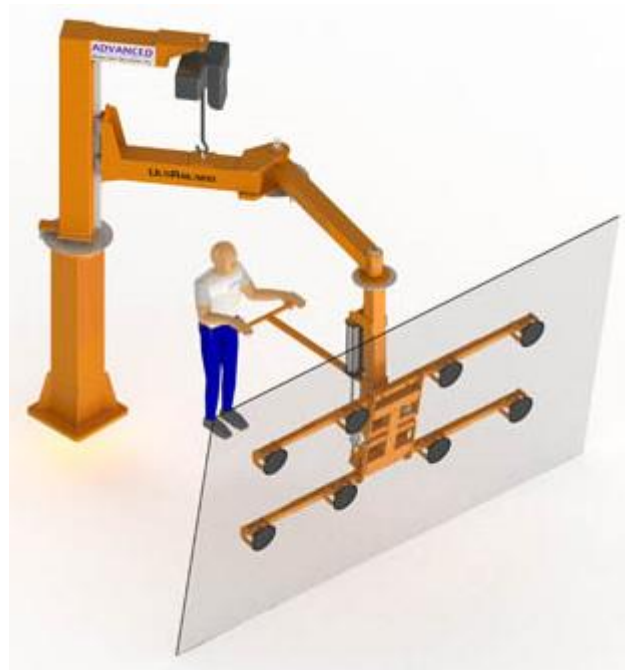
1.1 Judesio valdymo metodai

Valdomas objektas tai dažniausiai realus mechaninis prietaisas arba virtualus objektas kuris susideda iš kelių arba net keliolikos jungčių (sąnarių). Bendraisiais atvejais objektas yra valdomas erdvėje. Pagal valdomus objektus būtų galima išskirti šias valdymo ar poveikio sistemas:

Judesio kopijavimas (master – slave) (1 pav. a) ir judesys su grįžtamoju ryšiu (feedback) (1 pav. b).



a)



b)

1 pav. Judesio valdymo metodai: a) judesys valdomas kopijavimo metodu; [1] b) – judesys su grįžtamoju ryšiu [2]

Abi valdymo sistemos turi savo privalumų bei trūkumų. Judesio valdymas kopijavimo metodu yra plačiai naudojamas aplinkoje kuri yra žalinga tiesioginiam sąlyčiui (karšto metalo perkėlimui, radijo aktyvių medžiagų tvarkymui ir t.t.) , aplinkoje kurioje turi būti išlaikoma precizinė švara, taip pat norint perkelti sunkius objektus. Šio principo trūkumas yra toks, kad operatorius turi atkartoti manipulatoriaus judesius – kas reikalauja nemažų pastangų, taip pat norint padaryti didesnę judesį dažnai valdomąją rankeną reikia perimti kelis kartus. Negaunamas grįžtamasis ryšys, operatorius pakreipęs svirtį netinkamu kampu gali sugadinti tiek valdomą įrangą tiek ir perkeliama objektą.

Sekantis valdymo metodas tai judesys su grįžtamuju ryšiu. Šis metodas plačiai naudojamas gamyklose, kuriose kilnojami didelių gabaritų ir trapūs gaminiai, tokie kaip stiklas. Šiam metodui yra naudojamas grįžtamasis ryšys su tikslu, kad operatorius visą valdymo laiką išliktų budrus ir jaustų kuria kryptimi juda kūnas. Šio metodo valdymas pagrįstas valdymo panele su diskretingais mygtukais, paspaudus krypties mygtuką manipulatorius juda norima kryptimi, atleidus – sustoja. Vienu metu galima judėti tik viena kryptimi. Tai apsunkina darbą ir, norint objektą nugabenti ilgesnį atstumą arba sudėtingesne trajektorija, procesas užima daugiau laiko.

1.1.1 Vaizdų atpažinimo metodas

Šiam metodui realizuoti yra naudojama viena arba kelios vaizdo kameros ir programinė įranga, kuri apdoroja gautus vaizdus (2 pav.). Tiksliesniems rezultatams gauti objektas žymimas specialiomis spalvomis ar žymėmis.



2 pav. Žmogaus egzoskeleto atkartojimas naudojant „Kinetic“ sistemą [3]

Vaizdų atpažinimui reikalinga brangi įranga, norint gauti reikalingus rezultatus būtina užtikrinti tinkamas aplinkos sąlygas (apšvietimą), taip pat yra nemažai ribojančių veiksnių tokių, kaip vanduo arba šaltis, kuris taip pat turi neigiamą įtaką šio metodo efektyvumui. Sekantis svarbus požymis tai, kad norint valdyti erdvinius kūnus turi būti speciali įranga kuri vaizdą stebėtų ne tik iš šonų bet ir iš viršaus ir iš apačios, kas dar labiau apkrauna sistemą. Taip pat norint valdyti daugiau objektų susiduriama su kitomis problemomis. Valdant objektą vaizdų atpažinimu negaunamas grįžtamasis ryšys.

1.1.2 Jutiklių sistema

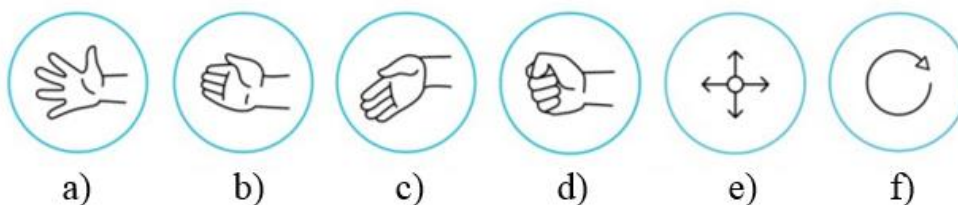
Jutiklių sistema – tai iš kelių ar keliolikos jutiklių sudaryta sistema, kurios sudėtingumas priklauso nuo valdomo objekto. Esama tokių sistemų, kuriose jutikliai matuoja kiekvieno sąnario erdvinę padėtį, tai tarsi kostiumas su integruotais jutikliais kuris nuskaityt esamą kūno dalių padėtį

ir nuotoliniu būdu perduoda informaciją kompiuteriui, kuris duomenis apdoroja ir pateikia norimu formatu. Dar vienas jutiklių sistemos pavyzdys tai „Myo“ apyrankė (3 pav.). Ši sistema paremta alkūnės raumenų impulsų nuskaitymu. Žmogus gestų pagalba vado nutolusius objektus. Ant riešo dėvimas jutiklis nuskaityto raumenų grupių siunčiamus impulsus ir atitinkamai generuoja signalus valdomam objektui.



3 pav. „Myo“ apyranke su integruotais jutikliais [4]

Šio jutiklio valdymas nesudėtingas, žmogus žinodamas gestų arba judesių kombinacijas (4 pav.) valdo nutolusius objektus. Šis jutiklių tipas plačiai naudojamas valdyti virtualius objektus, bei objektus erdvėje, norint gauti grįžtamąjį ryšį reikalinga papildoma įranga. Taip pat žmonės sergantys nervų ligomis negali naudotis šiuo įtaisu, kadangi nervų signalus skaitantys jutikliai nuskaityto ir nesąmoningus nervų impulsus, ko pasekoje gali būti sužaloti žmonės arba sugadinta įranga.



4 pav. „Myo“ jutiklių sistemos kombinacijos: a) išskleisti; b) mojuoti į dešinę; c) mojuoti į kairę; d) kumštis; e) aukštyn - žemyn, kairė - dešinė; f) sukti [4]

1.1.3 Poveikio įtaisas

Patogios formos įtaisas, kuris leidžia vartotojui valdyti išorinius kūnus. Šie įtaisai dažniausiai specializuoti konkrečiam valdomam objektui ir atlieka tiek funkcijų kiek reikia. Jų sudėtingumas priklauso nuo valdomo objekto mechaninių ašių skaičiaus. Įtaisas pritvirtintas prie valdomo objekto, o reikiamas judesys nurodomas paveikiant jautrų elementą – svirtį, sensorinius mazgus ir kt. Praktiškai buvo sudaryta pramoninio roboto valdymo sekos režimu sistema, atlikti eksperimentai ir testavimai kurių metu pastebėta, kad poveikio įtaisas (5 pav.), sudarytas iš

paprastos vairalazdės nėra geriausias sprendimas šiam valdymo metodui. Norint pasiekti precizines pozicijas potenciometro pagrindu paremtu valdymo įtaisu praktiškai neįmanoma dėl to, kad jo išduodamos reikšmės nėra tikslios.



5 pav. Poveikio įtaisas sumontuotas ant pramoninio roboto

Projektuojamo poveikio įtaiso išskirtinė savybė ta, kad jo jautrųjį elementą paveikus jėga ar momentu, valdomas objektas pradeda slinkti jėgos veikimo kryptimi arba sukctis momento sukimosi kryptimi. Tokiu būdu gaunamas tiesioginis grįžtamas ryšys. Pramonėje judesio valdymui yra sukurta daug poveikio įtaisų, kurie turi savo privalumus ir trūkumus. Daugumą poveikio įtaisų sudaro keletas arba keliolika jutiklių, atitinkamai išdėstytų ir privirtintų prie poveikio įtaisų sudarančių dalių. Paveikiant poveikio įtaisą jutiklis (varžiniai, talpiniai, pjezoelektriniai, giroskopai, akselerometrai ir kt.) ar jutiklių pora išduoda atitinkamus signalus (analoginis ar skaitmeninis), jutiklių signalai siunčiami į mikrovaldiklį, jie apdorojami pagal sudarytą programą, o mikrovaldiklio išduodami atitinkami signalai siunčiami į valdomojo prietaiso valdymo spintoje esančio valdiklio įėjimus.

1.2 Poveikio įtaisų apžvalga

1.2.1 „Triax“ pramoninis jutiklis

Poveikio įtaisu [5] pavadintas 6-į jautrumo laipsnių elementas (6 pav.). Tai „Triax“ jutiklis, kurio veikimo principas paremtas giroskopais. Šis „Amtele“ jutiklis plačiai naudojamas automobilių pramonėje. Poveikio įtaisas tinkamas valdyti objektus be grįžtamojo ryšio, taip pat šį poveikio įtaisą primontavus prie valdomo objekto korpuso gaunamas grįžtamasis ryšys. Vienintelė problema ta, kad pasivertus valdomo objekto ašimis (pramoninio roboto įrankio galo centro taškui)

šis jutiklis jau išduoda vertes, kurios reiškia judesį, bet tai tik roboto centro taško pokytis. Norint naudoti šį jutiklį su grįžtamoju ryšiu reikalinga sudėtinga programa apskaičiuojanti valdomo objekto padėtį erdvėje.



6 pav. „Amtele – Triax“ jutiklis [5]

Svarbu pažymėti ir tai, kad giroskopai nėra patys stabiliausi jutikliai rinkoje. Svarstant apie galimybę šiuos jutiklius pritvirtinti ant pramoninio roboto įrankio centro galo (TCP), sistemoje turėtų būti įrengtas nulinis taškas į kurį nuvažiuavęs robotas sukalibruotų giroskopus. Tai turėtų būti atliekama kas 15 minučių ir kiekvieną kartą pradėdant darbą. Kitokiu atveju valdant pramoninį robotą bus gaunami judesio nuokrypiai.

1.2.2 Judesį fiksuojantis kostiumas

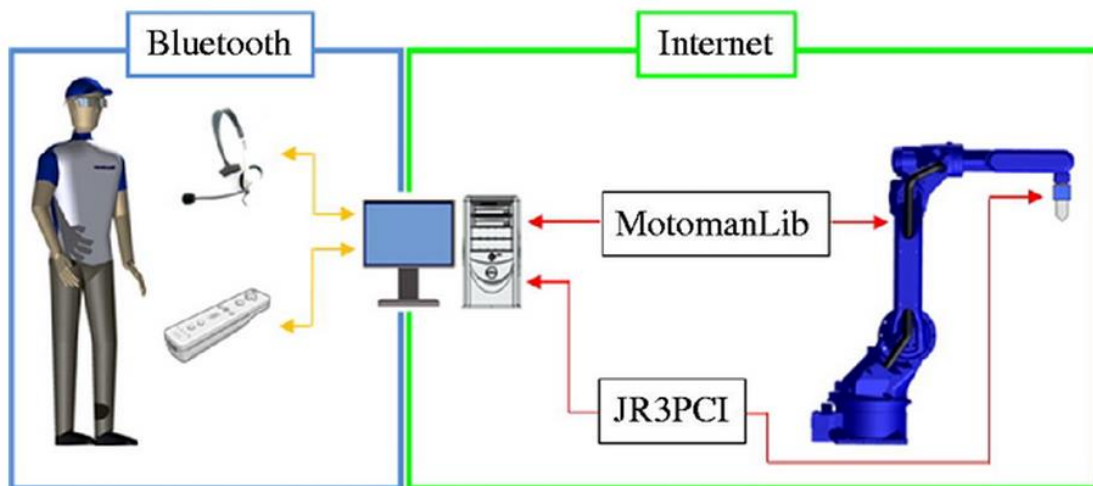
Kitą poveikio sistemą „Xsens MVN“ [6] sudaro 17 modulių, sudarytų iš akselerometrų ir magnetinių jutiklių (7 pav.). Duomenys perduodami bevieliu ryšiu į kompiuterį, kur jie apdorojami ir vizualizuojamas rezultatas. Kostiumas naudojamas greitam ir patogiam jutiklių užsidėjimui. Gamintojas teigia, kad tai nebrangi, lengvai naudojama viso kūno judesiams fiksuoti ir įrašinėti skirta sistema. Šiuo atveju nereikalingi jokie papildomi komponentai kaip kameros arba žymekliai, nesvarbus ir apšvietimas. Galima naudoti tiek viduje, tiek ir lauke. Nors pagrindinė paskirtis yra judesio tyrimai ar 3D animacinių filmų kūrimas, tačiau ją galima pritaikyti nuotoliniam egzoskeletų valdymui. Taip pat šis metodas nėra patogus norint greitai ir trumpam valdyti objektą, kadangi kostiumo apsivilkimas ir jutiklių kalibravimas užima nemažai laiko.



7 pav. „Xsens MVN“ kostiumas [6]

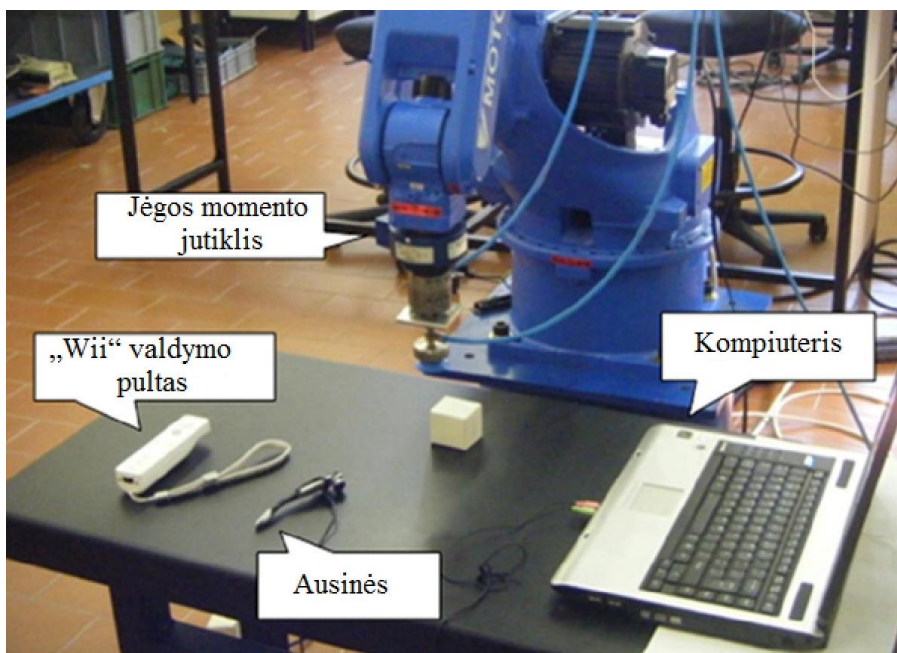
1.2.3 Pramoninio roboto valdymas garso komandomis ir „Wii“ pultu

Portugalijos inžinieriai yra sukūrę jutiklių sistemą, kuri naudojama pramoninių robotų valdymui. Tai roboto valdymas ausinėmis ir „Wii“ valdymo pultu paremtu giroskopo pagrindu. Principinė schema (8 pav.). Vartotojas užsideda bevielės ausines ir pasiima valdymo pultą, kuris taip pat bevielės. Visas valdymas vyksta per atstumą, kompiuteris laukia signalų iš įvesties įtaisų ir siunčia atitinkamą atoveiksmį į robotą per interneto ryšį.



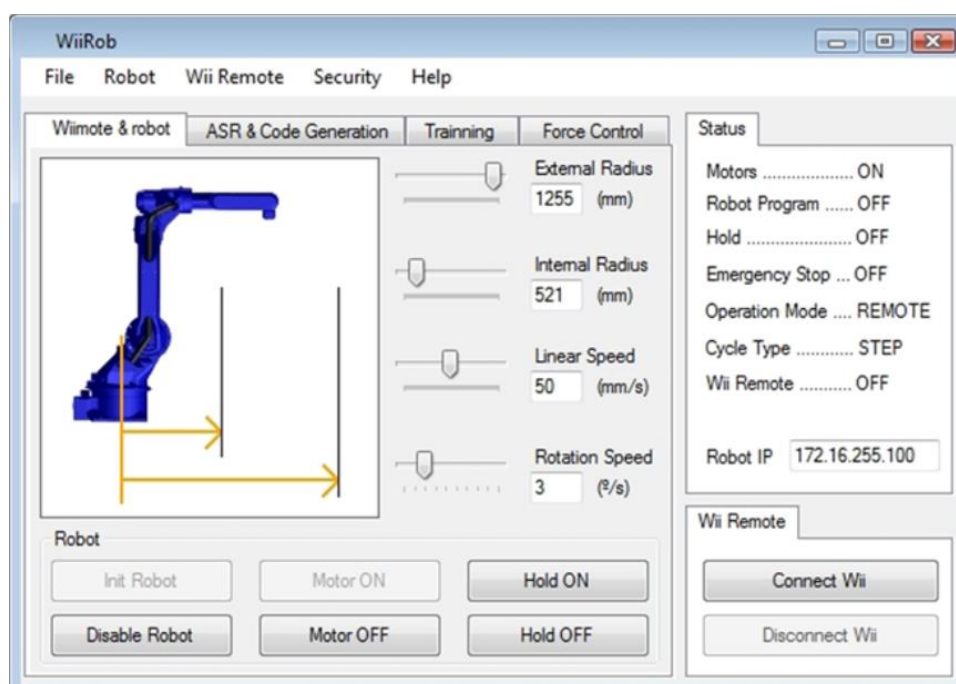
8 pav. Pramoninio roboto valdymo sistemos principinė schema [7]

Visa sistema susideda iš „Wii“ valdymo pulto, ausinių, personalinio kompiuterio ir jėgos momento jutiklio (9 pav.).



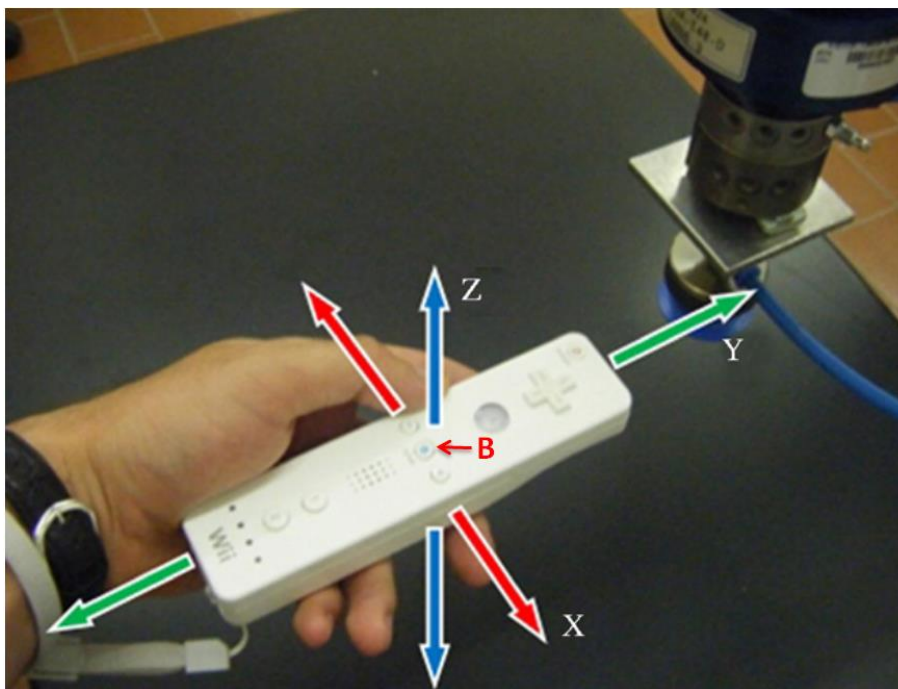
9 pav. Valdymo pulto arba ausinėmis valdomas pramonino roboto sistema [7]

Atsidarius programą (10 pav.) kompiuteryje nusistatoma manipulatoriaus darbo zona, maksimali ir minimali judesio vertės saugumo sumetimais. Taip pat pasirenkamas linijinis ir apsisukimo greitis.



10 pav. Pradinis programos langas [7]

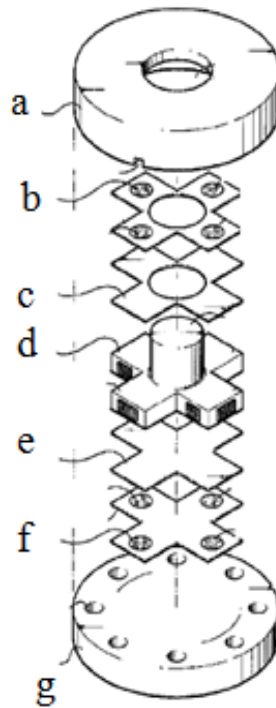
Sistemos įvesties įtaisas gali būti arba „Wii“ pultas, kuris paremtas viduje įmontuotu giroskopu arba mikrofonu, kuris atpažįsta operatoriaus balso instrukcijas ir jas vykdo. Valdymas pultu vyksta elementariai: nuspaudus mygtuką B ir vartant vairalazdę, kaip pavaizduota (11 pav.), roboto manipulatorius juda atitinkama kryptimi tol, kol nuspaustas B mygtukas iš anksto nustatytoje manipulatoriaus darbo zonoje (11 pav.), atleidus mygtuką manipulatorius sustoja esamoje pozicijoje.



11 pav. Roboto valdymo paremto „Wii“ pultu veikimo principas [7]

1.2.4 Erdvinis jutiklis

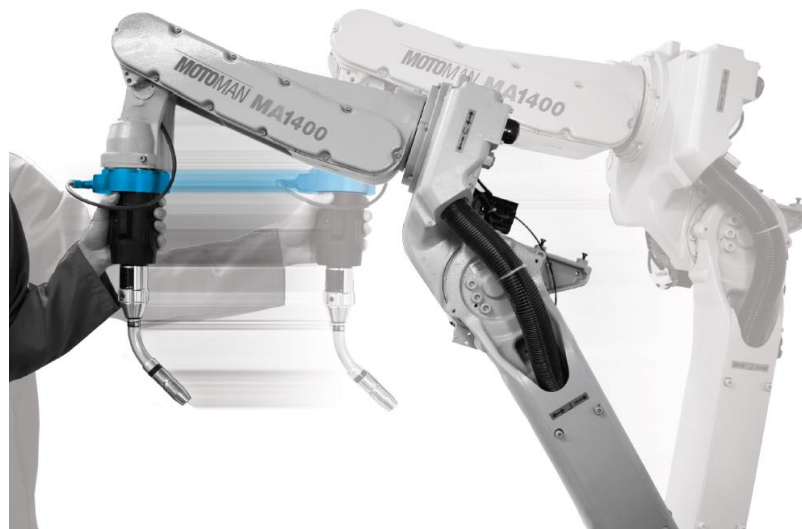
Dar vienas poveikio įtaisas [8] yra 6 ašių jutiklis, skirtas matuoti jėgos vektorių ir sukimo momento vektorių (12 pav.). Tai užpatentuotas poveikio įtaisas, kurį sudaro cilindras iš dviejų dalių. Cilindro viduje yra pilnavidurė detalė, kurios plokštumose yra pritvirtinta 16 jutiklių. Patente nebuvo nurodyti tikslūs jutikliai, tik išvardinti kokie tai galėtų būti – varžiniai, talpiniai arba pjezoelektriniai jutikliai. Tampant ar sukant įtaiso valdomą detalę (12 pav. pozicija d) įvairiomis kryptimis, paveikiama atitinkama jutiklių pora. Pagal jutiklių signalų pasikeitimą yra apskaičiuojama kuria kryptimi poveikio įtaisas yra veikiamas ir kaip turėtų judėti valdomas objektas.



12 pav. 6 ašių jutiklis: a – cilindro viršutinė dalis; b – viršutinės plokštumos jutikliai; c – tarpinė; d – valdoma detalė su pritvirtintais jutikliais atitinkamose plokštumose; e – tarpinė; f – apatinės plokštumos jutikliai; g – cilindro apatinė dalis [8]

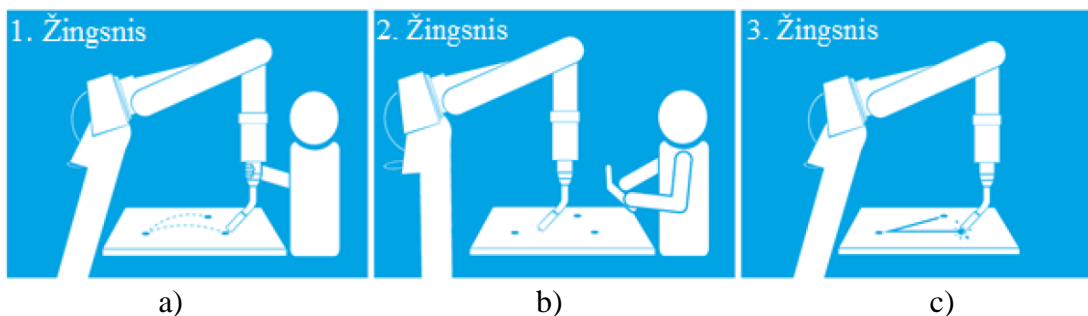
1.2.5 Įmonės „Robotiq“ manipulatoriaus valdymo prototipas

Sekantis specializuotas įmonės „Robotiq“ sukurtas valdymo metodas „Kinetic Teaching“ 13 pav. Šio metodo širdis tai tarpinė tarp suvirinimo antgalio ir roboto flanšo. Pagrindinis pritaikymas tai roboto valdymas ir suvirinimo tako apmokymas. Šio poveikio įtaiso veikimo principas yra aiškus, tačiau vidinė konstrukcija ir naudojami jutikliai – įmonės komercinė paslaptis.



13 pav. Kinetinis pramoninio roboto programavimas [9]

Veikimo principas trimis paprastais žingsniais pavaizduotas 14 pav. Operatorius paprasčiausiu rankos judesiu vedžioja manipuliatorių į norimas pozicijas ir valdymo pultu registruoja reikiamus taškus (koordinates) taip pat nurodo kada įjungti įrankį (šiuo atveju virinimą) arba išjungti. Pabaigus programavimą, sugeneruojamas pilnas programos kodas ir robotas atlieka apmokyta darbą savarankiškai.



14 pav. Kinetinio roboto valdymo veikimo principas [9]: a) nurodomi takai per kurius judės manipuliatorius; b) perkeliamas sugeneruotas programos kodas į valdymo spintą; c) robotas savarankiškai atlieka veiksmus

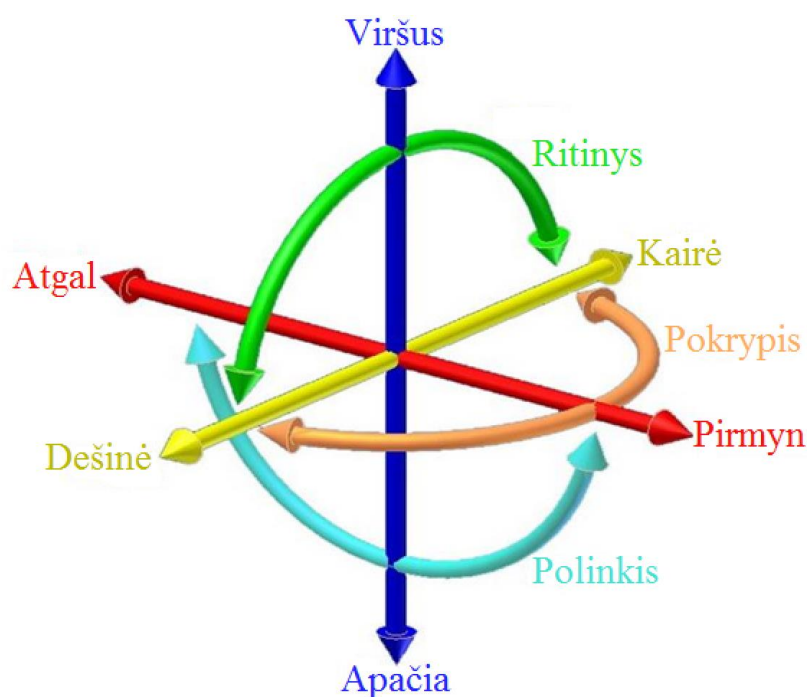
1.3 Skyriaus išvados

1. Pirmieji trys apžvelgti įtaisai naudoja giroskopus, kurie praktikoje nėra stabilūs ir laikui bėgant išsikalibruoja. Nuspręsta sudaryti poveikio įtaisą, kuris naudotų inklinometrus. Šie jutikliai matuoja absoliutinį posvyrio kampą nuo krypties į Žemės centrą.
2. Poveikio įtaisas, kuris naudoja jėgai jautrius jutiklius, pasižymi ypač paprasta konstrukcija, patikimumu ir nedidele savikaina.
3. Yra daug įrenginių skirtų mechaninėms konstrukcijoms valdyti su grįžtamoju ryšiu, bet jie pritaikyti konkrečioms darbovietėms – kelių ašių valdymui, taigi jų pritaikymo sritis yra siauri, o kaina didelė.

2. ANALITINĖ DALIS

2.1 Projektuojamo poveikio įtaiso veikimo principas

Projektuojamas valdymo įtaisas tai toks prietaisas kuris leidžia supaprastintai valdyti ir programuoti kitus įrenginius. Tai supaprastintas 6 laisvės laipsnių (15 pav.) valdymo įtaisas kurio pagrindinės charakteristikos: nedidelės sudarymo ir aptarnavimo išlaidos, naudojimosi paprastumas, lengvumas ir patogumas, nesudėtingas suderinimas su įvairiausiai valdomais objektais.

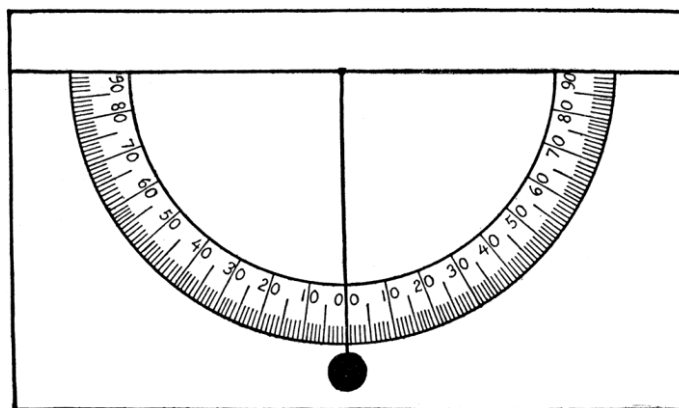


15 pav. 6 laisvės laipsnių principinė schema

2.2 Poveikio įtaiso sudarymas naudojant inklinometrus

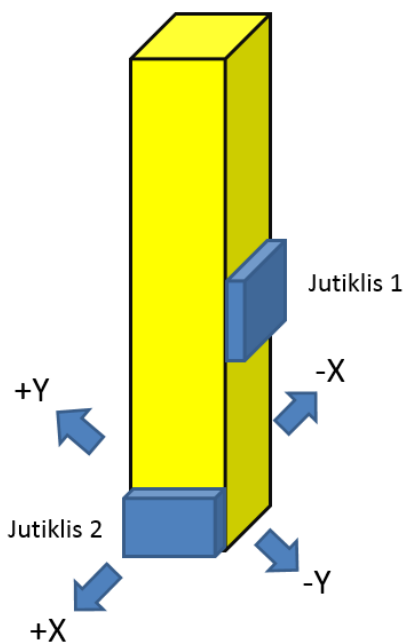
2.2.1 Inklinometro veikimo principas

Inklinometras tai prietaisas naudojamas išmatuoti pokrypio kampą žemės traukos atžvilgiu (16 pav.), taip pat dar vadinamas „pokrypio jutikliu“. Šis prietaisas gali būti naudojamas išmatuoti tam tikro objekto pokrypį, sekti objekto pasislinkimą (pastato). Inklinometras gali būti naudojamas tiek vertikaliai tiek horizontaliam kampo matavimui [10]. Projektuojamoje sistemoje pasirinkti naudoti „Adis 16203“ inklinometrai.



16 pav. Inklinometro veikimo principas [11]

Projektuojamame poveikio įtaise jutikliai inklinometrai bus montuojami sekančiai: (17 pav.) vienas jutiklis naudojamas matuoti pokrypį kampą X ašyje, kitas Y. Žinant valdymo įtaiso pokrypį plokštumoje galima apsiskaičiuoti kuria kryptimi yra veikiamas įtaisas. Kuo didesne jėga veikiamas įtaisas tuo didesnis pokrypio kampas – tuo greičiau juda valdomas objektas.



17 pav. Jutiklių išdėstymas

2.2.2 Jutiklių komunikacijos parametrai

Jutikliai su išoriniais įrenginiais komunikuoja per „SPI – serial peripheral interface“ sąsaja. Keletas faktų apie šią komunikaciją:

- Sukurta Motorola korporacijos;
- Duomenų mainai vyksta pagal vedantysis – vedamas bendravimo logiką;

- Gali būti vienas vedantysis(master) ir keli vedamieji(slave) įrenginiai;
- SPI – nuosekli sąsaja. Tuo pačiu metu gali būti perduodami duomenys iš vedančiojo į vedamąjį ir atvirkščiai.
- Kaip jau buvo aptarta naudojami 4 signalai;
- SS- vedamojo aktyvavimas;
- SCLK – taktiniai impulsai (synchronizacijos impulsai);
- MOSI, MISO – duomenų perdavimas, priėmimas;
- Nėra patvirtinimo, kad duomenys gauti
- Negalima valdyti duomenų srauto;
- Greitis iki 4Mb/s.

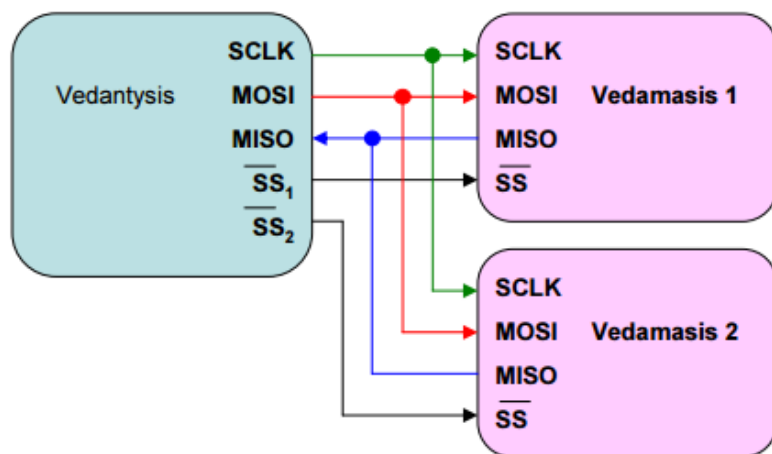
Apžvelgus jutiklių parametrus nustatyta, kad jutiklių komunikacijai yra reikalingi 6 laidai: 4 SPI komunikacijai ir 2 maitinimui. Taip pat kiekvienam naujam jutikliui reikalingas papildomas laidas. Ši komunikacija neturi adresavimo, dėl to kiekvienas naujas jutiklis yra suaktyvinamas diskretiniu signalu. Jutiklių duomenims nuskaityti ir pateikti buvo naudojamas atviro kodo mikrovaldiklis “Arduino”, kuris paremtas “Atmel” mikroprocesoriumi. Daugiau informacijos ir faktų apie naudojamus jutiklius ir mikrovaldiklį pateikta 1 priede.

1 lentelė

Jutiklio sujungimas su mikrovaldikliu

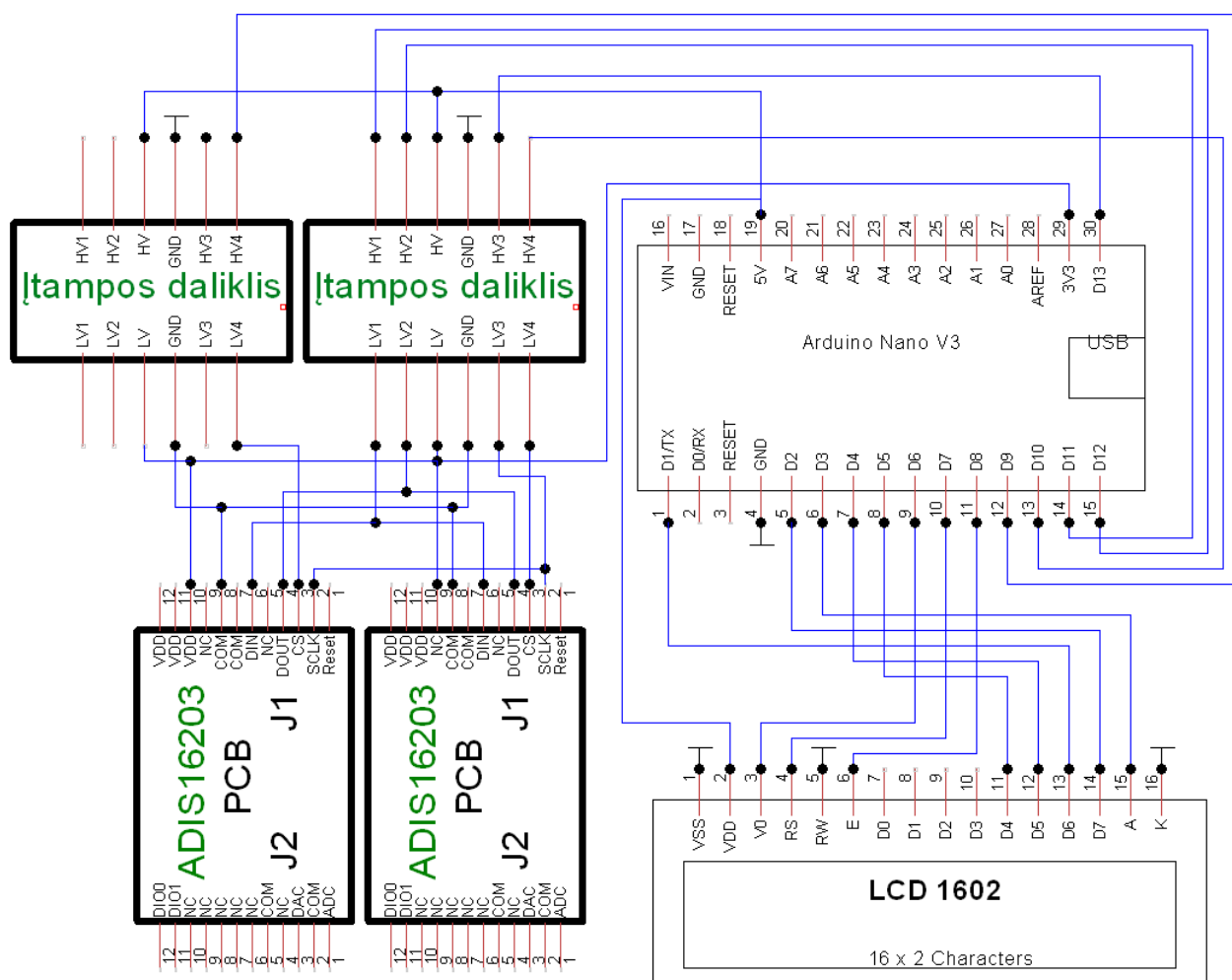
Jutiklis(ADIS16203)	Mikrovaldiklis(Arduino Nano)	Paaiškinimas
2 SCLK	13 SCLK	Taktiniai impulsai
3 CS	10 DIGITAL OUT	Vedamojo aktyvavimas
4 DOUT	12 MISO	Duomenų perdavimas
6 DIN	11 MOSI	Duomenų priėmimas
7 COM	GND	GND
11 VDD	+3.3V	+3.3V

Kadangi sistemoje buvo naudojami du jutikliai (vienas X kitas Y ašies) pokrypio matavimams atlikti pagal sekančią schemą (18 pav.) jungiami keli „vedamieji“ su vienu „vedančiuoju“.



18 pav. Dviejų jutiklių jungimo principas[12]

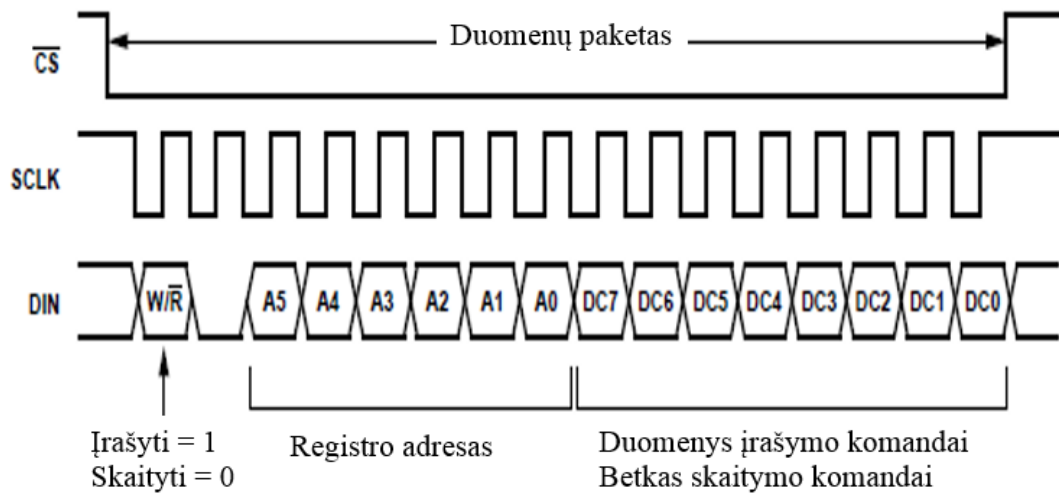
Pilna poveikio įtaiso sudaryto iš dviejų jutiklių inklinometrų elektrinių sujungimų schema pateikta 19 pav.



19 pav. Eksperimento metu naudojama elektrinių sujungimų schema

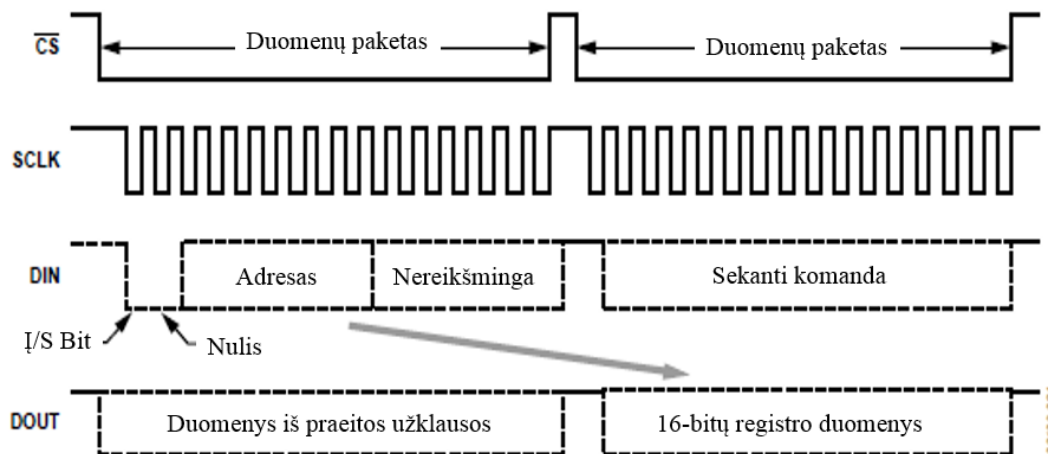
Duomenys jutikliui perduodami sekančia tvarka: (20 pav.)

CS pasirenkamas vedamasis, pirmuoju siunčiamu bitu nurodomas informacijos mainų tipas, įrašymas arba nuskaitymas. Sekantis bitas nesvarbus, o likę 6 bitai nusako adresą, į kurį duomenys bus įrašomi arba iš kurio nuskaitymi. Sekantys 8 bitai (baitas) tai duomenys, kurie bus įrašyti, o skaitymo komandai tinkama bet kokia kombinacija.



20 pav. Jutiklio SPI sąsaja [10]

Perdavus 16 bitų (2 baitus) duomenų paketą gaunamas vienas perdavimų ciklas. Išsiuntus duomenis sekantį kartą aktyvavus CS vedamąjį jis atsiunčia taip pat 16 bitų kombinaciją, kurioje perduodami duomenys kurie buvo užklausti praeitime cikle.



21 pav. SPI Duomenų mainai [10]

Jutiklio adresai ir jų aprašymas pateikti (2 lent.) [10]. Daugiau informacijos apie naudojamus jutiklius, vidines sujungimų schemas pateikta 1 priede.

Jutiklių adresavimas

Pavadinimas	Funkcija	Adresas	Rezoliucija(bit)	Formatas	Skalė
Supply_out	Informacija apie maitinimo šaltinį	0x03, 0x02	12	Dvejetainis	1.22mV
Aux_ADC	Analoginis išėjimas	0x09, 0x08	12	Dvejetainis	0.61mV
Temp_out	Jutiklio temperatūros duomenys	0x0B, 0x0A	12	Dvejetainis	-0.47°C
Incl_out	Pasvirimo duomenys	0x0D, 0x0C	14	Dvejetainis	0.025°
Incl_180_out	Pasvirimo duomenys +-180° formate	0x0F, 0x0E	14	„Twos complement“	0.025°

2.3 6 laisvės laipsnių vairalazdė sudaryta iš Holo efekto jutiklių

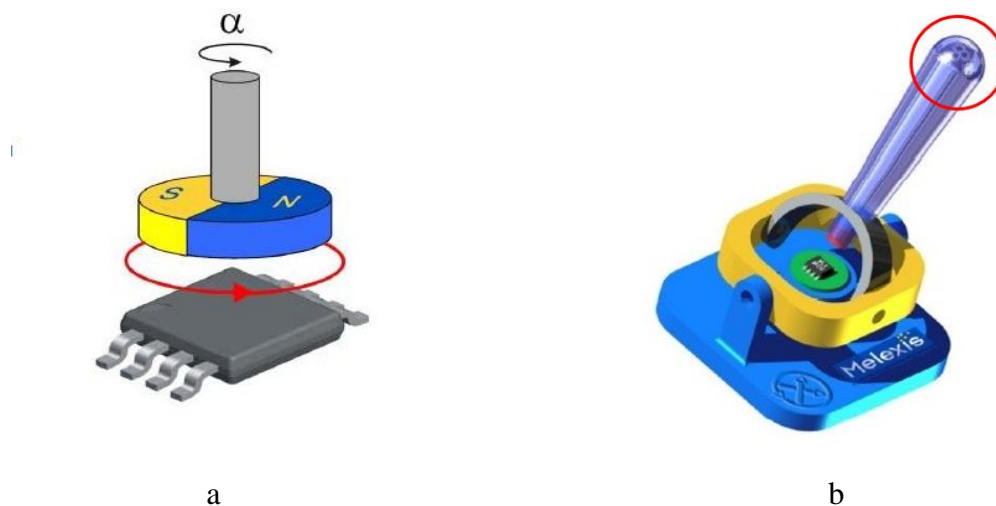
Hall efekto sensorius gaminati ir tobulinanti kompanija „Melexis“ į rinką išleido naujų sensorių liniją „Triaxis™“ (22 pav), kurie „jaučia“ ne tik sukamuosius arba linijinius judesius bet ir sferinius judesius. Naudojant šios serijos gaminius galima sudaryti erdvinį poveikio įtaisą. Toliau bus aptarta, kuriose vietose turėtų būti montuojami jutikliai norint išgauti valdymą erdvėje.[14]



22 pav. „Melexis“ jutiklis ir vairalazdės jo pagrindu: a - „MLX90333 3D“ jutiklis [14]; b - „Thrustmaster Warthog“ [15]; c - „T.16000M“ [16]

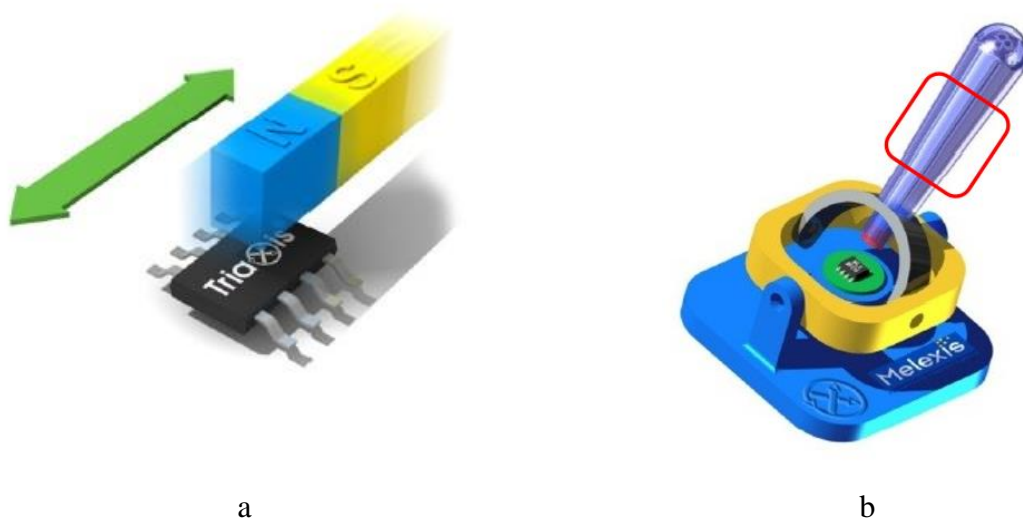
„MLX90333 3D“ trijų matmenų holo daviklis plačiai naudojamas prestižinių vairalazdžių tokių, kaip „Thrustmaster Warthog“ arba „T.16000M“ (22 pav.) pagrindiniam jutimo sensoriui. Naudojant šį jutiklį bendrai gaunamos polinkio (pitch) ir pokrypio (yaw) reikšmės.

Sekantis žingsnis tai vairalazdės apsisukimas aplink savo ašį. Šis sprendimas realizuojamas su „MLX90316“ sukamuoju holo efekto jutikliu. Jis montuojamas ant vairalazdės galo, kad magnetiniai laukai netrukdytų vienas kitam.



23 pav. „Melexis“ sukamojo judesio jutiklis (a) ir montavimo pavyzdys (b) [17]

Paskutinis žingsnis realizuoti linijinį judesį naudojant Holo efekto sensorių „MLX90333 3D“ (24 pav), tai tas pats sensorius kaip ir paminėtas pradžioje, jis gali būti sukonfigūruotas naudoti linijiniam judesiui atpažinti.

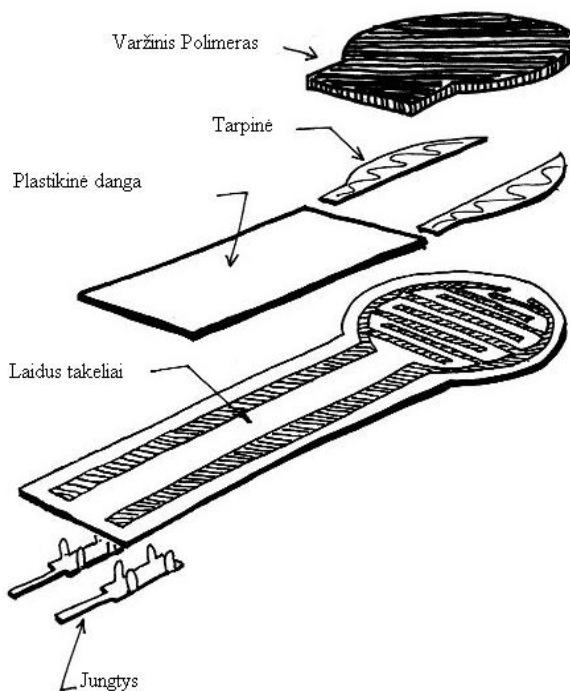


24 pav. Linijinio judesio jutiklis (a) ir montavimo pavyzdys (b) [18]

Sujungus visus šiuos sensorius gaunamas 6 laisvės laipsnių valdymo įtaisas paremtas magnetiniais holo sensoriais. Šie sensoriai yra plačiai naudojami automobilių pramonėje ir pasižymi patikimumu ir tikslumu, bet yra brangūs ir jautrūs išoriniams magnetiniams laukams.

2.4 Poveikio įtaiso sudarymas naudojant jėgai jautrią varžą

Dar vienas jutiklių tipas tai jėgai jautri varža (25 pav.) „force sensitive resistor“.



25 pav. Jutiklio jėgai jautrios varžos sandara

Jėgai jautrios varžos veikimo principas [19] ganėtinai senas. Senuose telefonuose mikrofonai būdavo vadinami anglies mikrofonais, nes viduje mikrofono buvo anglies granulės, kurios turėjo nedidelę varžą. Kai žmogus kalbėdavo į mikrofoną, mikrofono diafragma suspausdavo granules viduje ir padidindavo kontaktų skaičių tarp granulių. Esant didesniam kontaktų skaičiui, daugiau kelių srovei tekėti, todėl atitinkamai kisdavo varža. Jėgai jautrios varžos gamyboje panaudotas varžinis polimeras ir gaunamas toks pat efektas. Jutiklio charakteristikos [20] pateikiamos 3 lentelėje.

3 lentelė

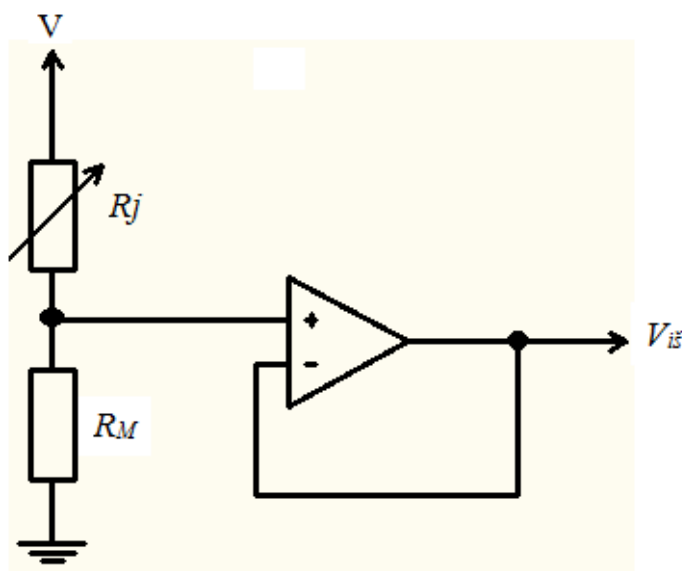
Jutiklio jėgai jautrios varžos charakteristikos

Charakteristikos pavadinimas	Reikšmė
Jutiklio numeris	402

3 lentelės tęsinys sekančiame puslapyje

Jutiklio maitinimo įtampa	5 V
Jutiklio minimali suveikimo jėga	0.1 N
Jutiklio veikimo diapazonas	0.1 – 10 N
Jutiklio diametras	18.28 mm
Jutiklio storis	0,55 mm
Jutiklio darbinė temperatūra	-30 +70 °C
Jutiklio jungimu skaičius	10 milijonų

Jutiklio elektrinė jungimo schema pateikta 26 pav.

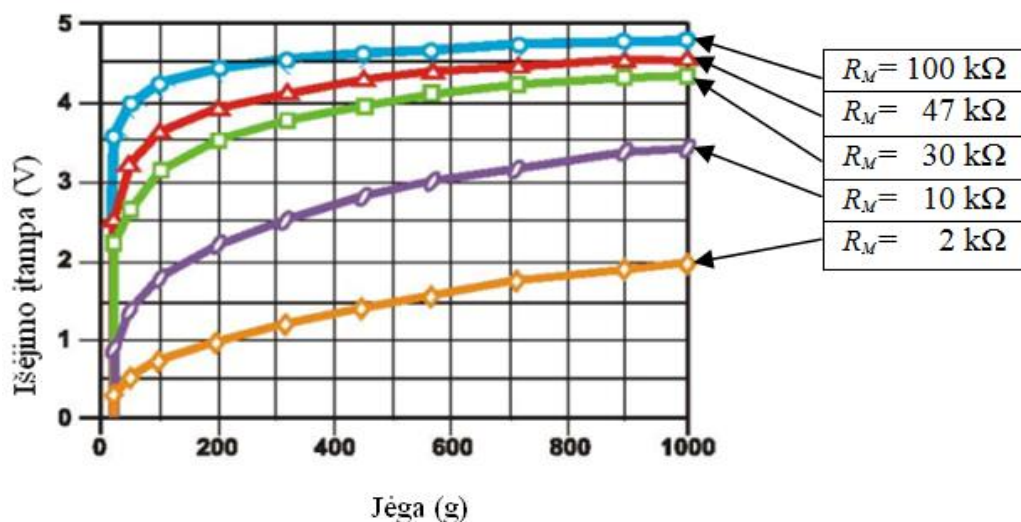


26 pav. Jėgai jautrios varžos jutiklio elektrinė jungimo schema su operaciniu stiprintuvu

Pagal jutiklio elektrinę jungimo schemą (26 pav.) yra matuojama jutiklio išėjimo įtampa. Išėjimo įtampa yra matematiškai aprašoma pagal sekančią lygtį:

$$V_{i\dot{s}} = \frac{R_M \times V}{(R_M + R_j)} \quad 1$$

čia: $V_{i\dot{s}}$ – jutiklio išėjimo įtampa; R_M – atitinkamo dydžio varža; V – jutiklio maitinimo įtampa; R_j – jutiklio varža.

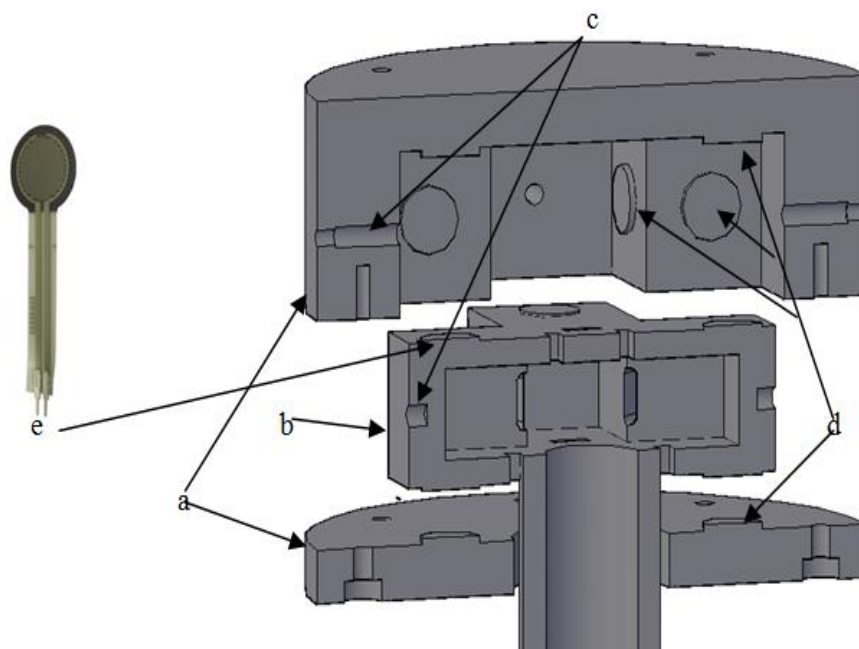


27 pav. Jutiklio įtampos kitimo priklausomybės nuo veikiančios jėgos panaudojant įvairių dydžių varžas

Jutiklio įtampos kitimo priklausomybės nuo veikiančios jėgos panaudojant įvairių dydžių varžas pagal pateiktus grafikus (27 pav.). Pagal šiuos grafikus, keičiant varžos didį parenkamas jutiklių jautrumas.

2.4.1 Poveikio įtaiso mechaninė dalis

Tai anksčiau aptartas užpatentuotas poveikio įtaisas, mechaninė dalis sudaryta iš dviejų dalių cilindro. Viduje cilindro yra detalė ant kurios pritvirtinta 16 varžinių jėgai jautrių jutiklių (28 pav.).



28 pav. Kuriamo valdymo įtaiso konstrukcija: a – cilintras iš dviejų dalių; b – valdoma detalė;

c – 4 sujungimai spyruolėmis (valdomos detalės ir cilindro); d – 16 iškilimų, cilindro vidinės dalies paviršiuje (po 4 viršutinėje ir apatinėje ploštumoje ir po 4 šoninėse ploštumose); e – 16 jutiklių: jėgai jautri varža 402 (išdėstyti ant detalės lygiagrečiai su iškilimais)

2.4.2 Kuriamam valdymo įtaisui naudojamas mikrovaldiklis

Norint valdyti sukurtu valdymo įtaisu, reikia sudaryti programą tiek valdymo įtaisui, tiek valdomam objektui. Kaip jau buvo minėta, kuriamą valdymo įtaisą sudarys 16 analoginių jutiklių. Kiekvienas analoginis jutiklis bus jungiamas į mikrovaldiklio „Arduino mega“ atitinkamą analoginį įėjimą.

Kadangi kuriamą valdymo įtaisą sudarys 16 analoginių jutiklių reikia, kad mikrovaldiklis turėtų 16 analoginių įėjimų, o mikrovaldiklis „Arduino mega“ turi lygiai 16 analoginių įėjimų. Mikrovaldiklio charakteristikos[22] pateikiamos 4 lentelėje

4 lentelė

„Arduino mega“ mikrovaldiklio charakteristikos

Mikrovaldiklis	Arduino MEGA
Maitinimo įtampa, V	5V
Įėjimų įtampa (rekomenduojama)	7-12V
Įėjimų įtampa (ribos)	6-20V
Skaitmeniniai įėjimai/išėjimai (I/O)	54
Analoginiai įėjimai/išėjimai (I/O)	16
Nuolatinė srovė įėjimuose/išėjimuose	40 mA
Nuolatinė srovė 3.3 V įėjimuose/išėjimuose	50 mA
Laikinoji (Flash) atmintis	128 KB
Statinė atmintis (SRAM)	8 KB
Nuolatinė atmintis (EEPROM)	4 KB
Taktinis dažnis	16 MHz

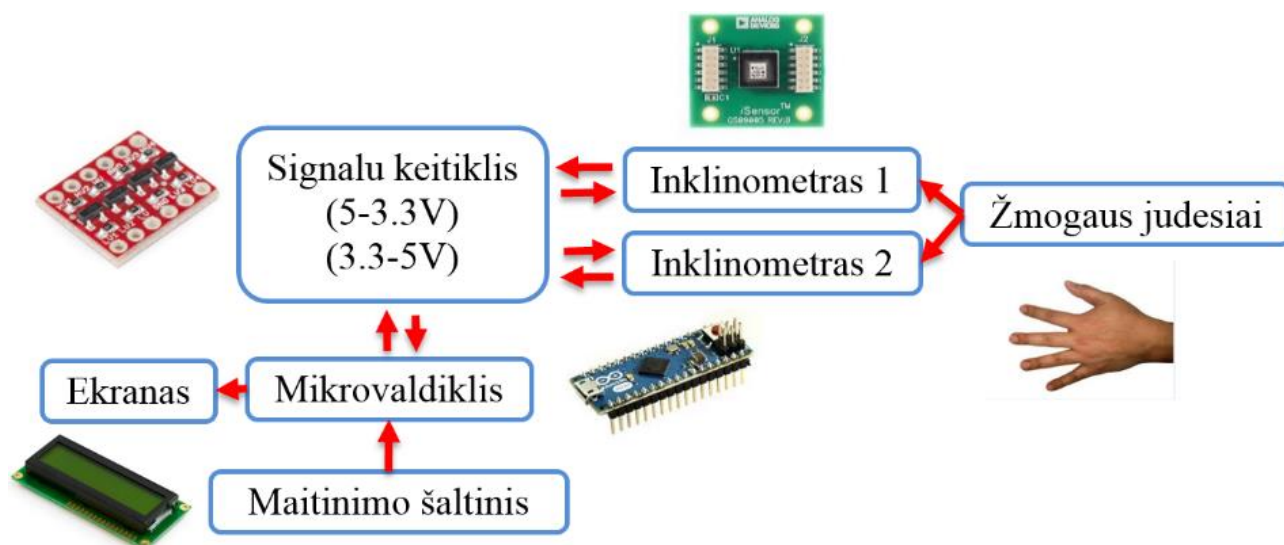
2.5 Skyriaus išvados

1. Jutikliai inklinometrai pasižymi ypatingu tikslumu ir išduodamomis absoliutinėmis vertėmis kurios stabilios ir bėgant laikui lieka vienodos. Norint inklinometrų naudoti platformos valdymui būtina žinoti pačios platformos posvyrio kampą. Siekiant nustatyti padėties kitimą erdvėje reikalinga papildoma jutiklių pora sumontuota ant platformos.
2. Nustatyta, kad poveikio įtaisai su holo davikliais pasižymi aukštu patikimumo lygiu, bet yra brangūs, jautrūs magnetiniams laukams, taip pat negali būti montuojami vienas šalia kito.
3. Nustatyta, kad poveikio įtaisai su mechaniniam poveikiui (jėgai) jautriais varžiniais jutikliais, gali būti naudojami matuoti koku greičiu, kuria kryptimi judėti valdančiam objektui (matuojant poveikio jėgą). Šis jutiklių tipas pats paprasčiausias tiek savo konstrukcija, tiek veikimu, tiek ir sujungimu. Vienintelis šių jutiklių trūkumas tai, kad jų išduodami signalai – analoginiai, ko pasėkoje gaunamas „triukšmingas“ signalas išėjime. Atsižvelgus į jutiklių privalumus bei trūkumus, buvo nuspręsta ištirti inklinometrų ir jėgai jautrių jutiklių pritaikymą poveikio įtaisui sudaryti.

3. TIRIAMOJI DALIS

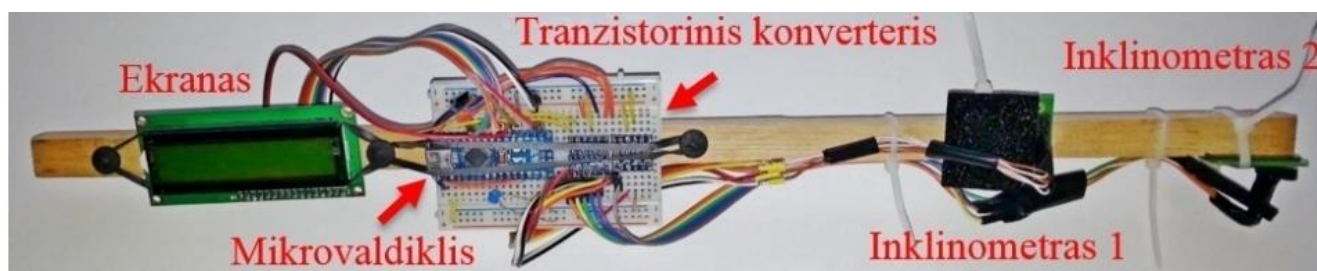
3.1 Bandymas su inklinometrais

Sudaryta posvyrio matavimo su inklinometrais struktūrinė schema (29 pav.). Žmogaus rankos krypties kampas, atžvilgiu žemės centro, išmatuoja du jutikliai: vienas sumontuotas X plokštumoje, kitas Y. Signalų keitiklis suderina įtampų lygius ir perduoda jutiklių duomenis į mikrovaldiklį. Pastarasis duomenis dekoduoja ir matavimo rezultatus išveda į skystųjų kristalų ekrano displėjų.



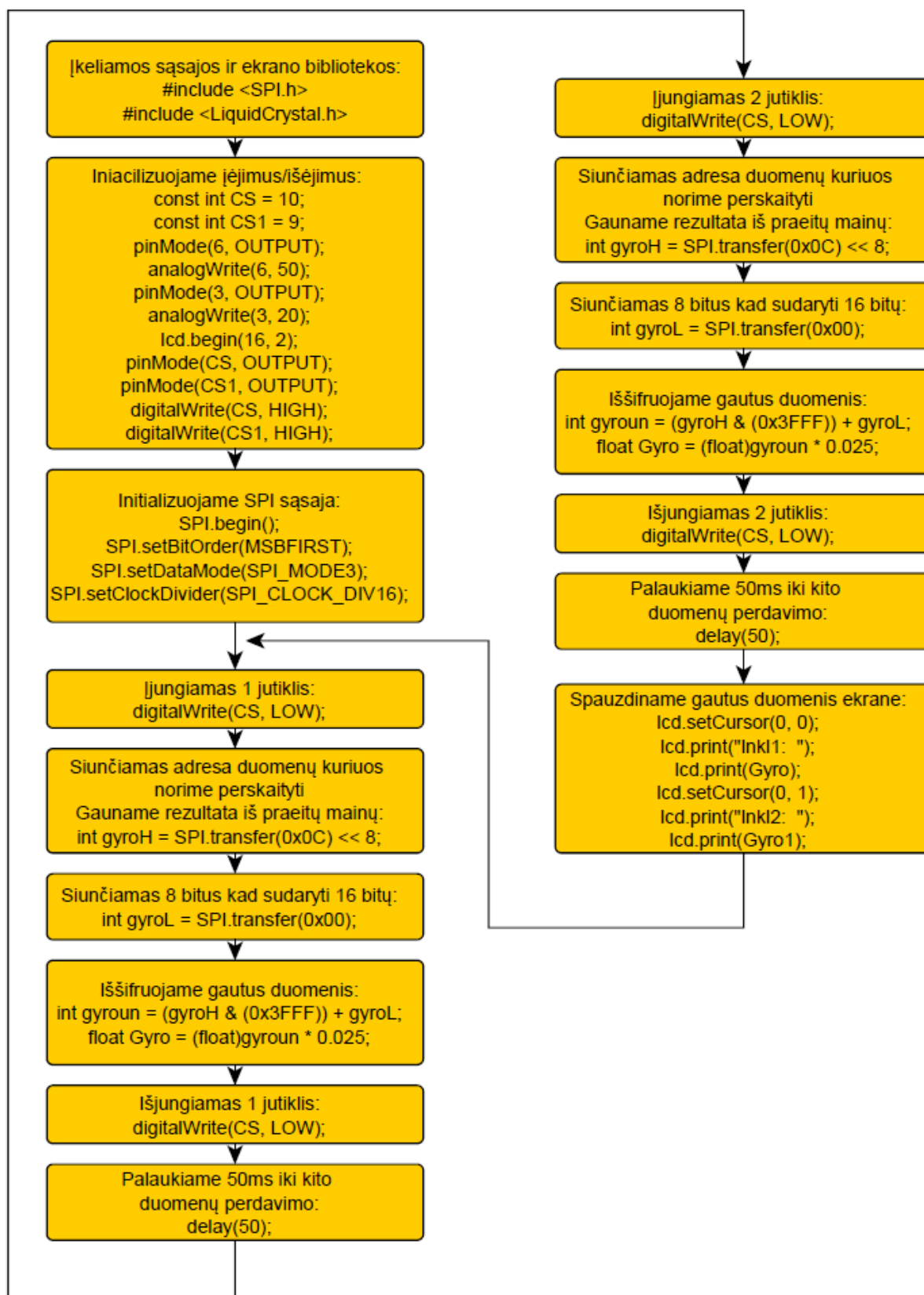
29 pav. Struktūrinė sujungimų schema

Eksperimentinėje sistemoje buvo panaudotas „Arduino Nano“ mikrovaldiklis. Mikrovaldiklio darbinė įtampa 5 V, o jutiklių 3,3 V. Norint, kad jutiklis funkcionuotų stabiliai, mikrovaldiklio 5 V signalai buvo sumažinti iki 3,3 V. Šiam tikslui schemeje naudojamas tranzistorinis signalų keitiklis. Realus sujungto maketo vaizdas pateiktas 30 pav.



30 pav. Sujungto maketo vaizdas

Parašyta programa kuri nuskaitytų jutiklių duomenis ir išveda juos į displejų, parašytos programos algoritmas (31 pav.). Pilnas programos kodas su komentarais pateiktas 2 priede.



31 pav. Mikrovaldiklio programos veikimo algoritmas

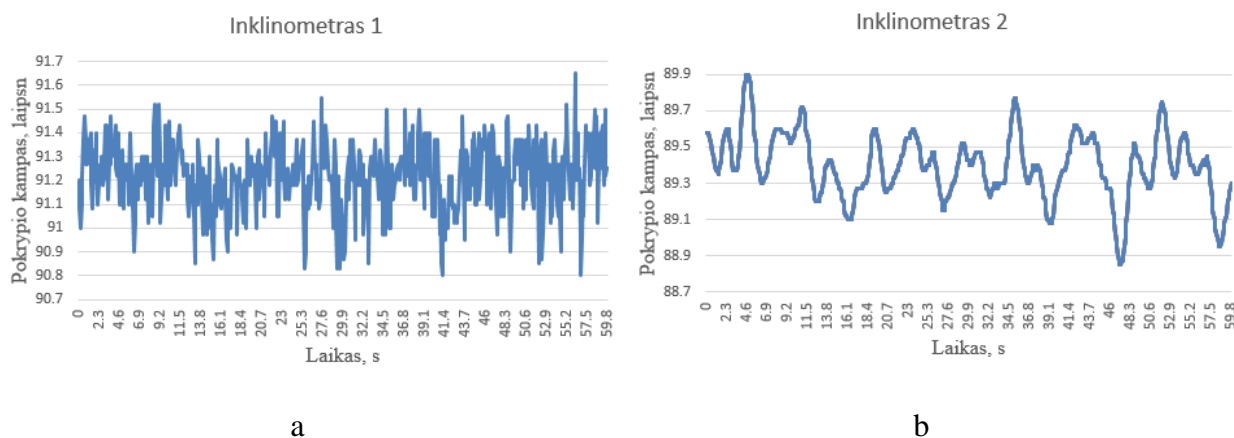
Pradinėje bandymų stadijoje rezultatai buvo išvedami į ekraną. Momentinės ekrano nuotraukos pateiktos 32 pav. Čia matomi duomenys (posvyrio kampai) iš jutiklių.



32 pav. Ekrane išvedami jutiklių duomenys – posvyrio kampai

3.1.1 Jutiklių tyrimas

Sujungus pilną sistemą ir išvedus duomenis ekrane pastebėta, kad vienas jutiklis atsilieka nuo kito (greičiau reaguoja į pasikeitusi posvyrio kampą). Atliktas tyrimas kurio metu abu jutikliai buvo palikti ramybės būsenoje ir nuskaitomi jų duomenys 1 minutę. Rezultatai pateikti 33 pav.

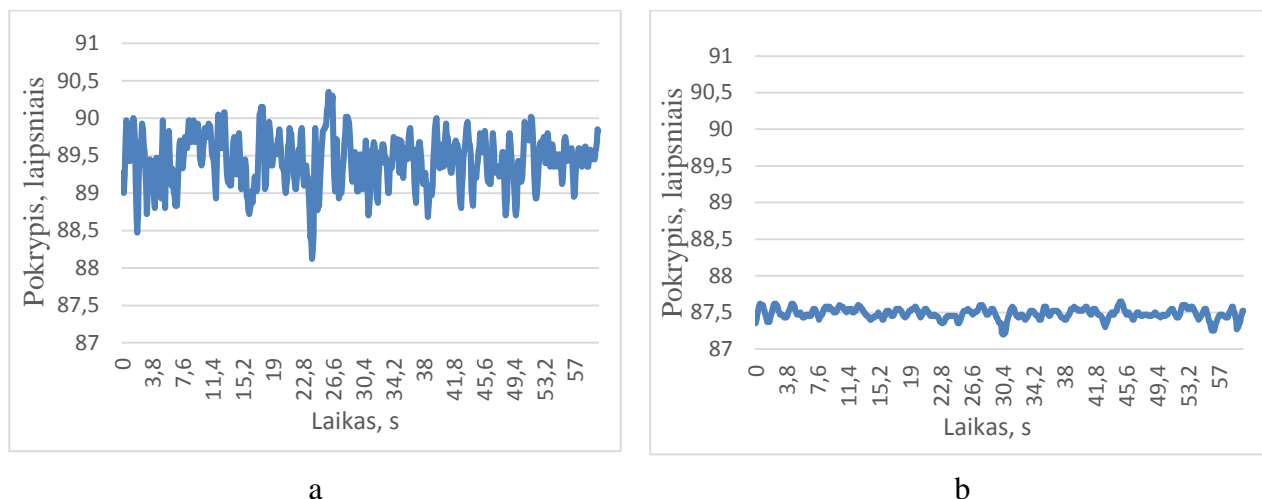


33 pav. Tyrimo duomenys: a) pirmo jutiklio duomenys; b) antro jutiklio duomenys

Iš gautų duomenų grafikų galima spręsti, kad jutiklių išvedamų duomenų dažnis nėra vienodas (vienas jutiklis išduoda duomenis greičiau nei kitas). Sudarius poveikio įtaisą iš jutiklių kurių duomenų išvesties dažnis nėra vienodas – nesinchronizuotas, paveikus jėga vienas jutiklis jau išves esamą posvyrio kampą, o kitas dar ne, ko pasekoje valdomas objektas judės su krypties ir greičio paklaida.

Kadangi jutikliai yra programuojami ir turi parametras nusakantį kiek kartų nuskaityti duomenis ir sudaryti vidurkį „Average rate“ (adresas 0xB8) ir parametras „Sampling rate“ (adresas 0xB6), kuris nusako koku greičiu nuskaityti duomenis, abiejų šių parametru vertės gali būti keičiamos ribose 0 – 8 dešimtainės vertės, kas atitinka 2 ir 256 kartus. Šie parametrai praktikoje yra keičiami (mažinami) kada nereikalingas ypatingas tikslumas, energijos taupymo būsenoje.

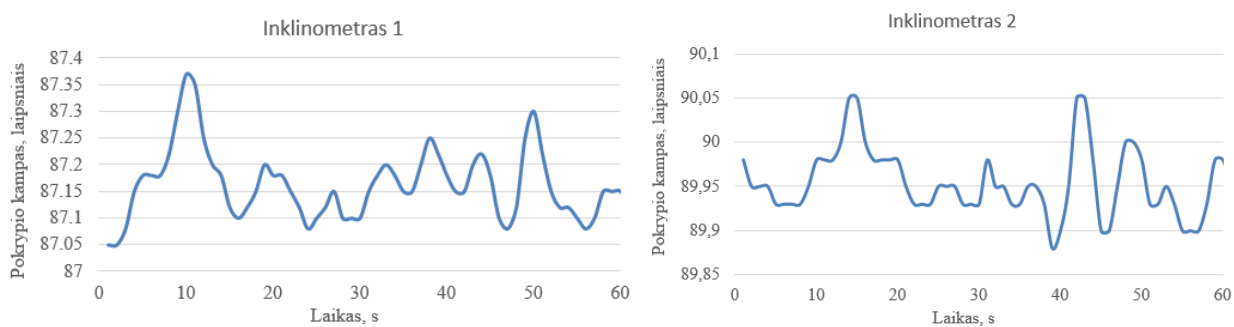
Antro tyrimo metu abejiems jutikliams buvo nustatytas skirtingas duomenų nuskaitymo dažnio koeficientas (kiek verčių paimti norint išvesti vidurkį) „Average rate“, kuris reikalingas vidurkio sudarymui. Pirmajam jutikliui nurodytas duomenų dažnio koeficientas 4, o antrajam 8. Dar kartą atlikto tyrimo rezultatai pateikti 34 pav.



34 pav. Antrojo tyrimo rezultatai: a) dažnio koeficientas 4 (N-16); b) dažnio koeficientas 8 (N-256)

Eksperimento metu nustatyta, kad jutiklis kurio duomenų dažnio koeficientas yra didesnis (34 pav. b) rezultate išveda duomenis keturis kartus tiksliau (0,45 laipsnio) negu jutiklis kurio dažnio koeficientas mažesnis (34 pav. a) (2.18 laipsnio). Galima daryti prielaidą, kad parametru pakeitimas arba išbalansavimas turi didelę įtaką galutiniams rezultatams. Taip pat keičiant šį parametru galima reguliuoti jutiklių triukšmo lygį.

Trečiojo bandymo tikslas nustatyti maksimalias dažnio koeficientų ir duomenų nuskaitymo reikšmes ir išbandyti abiejų jutiklių išduodamų verčių atitikimą.



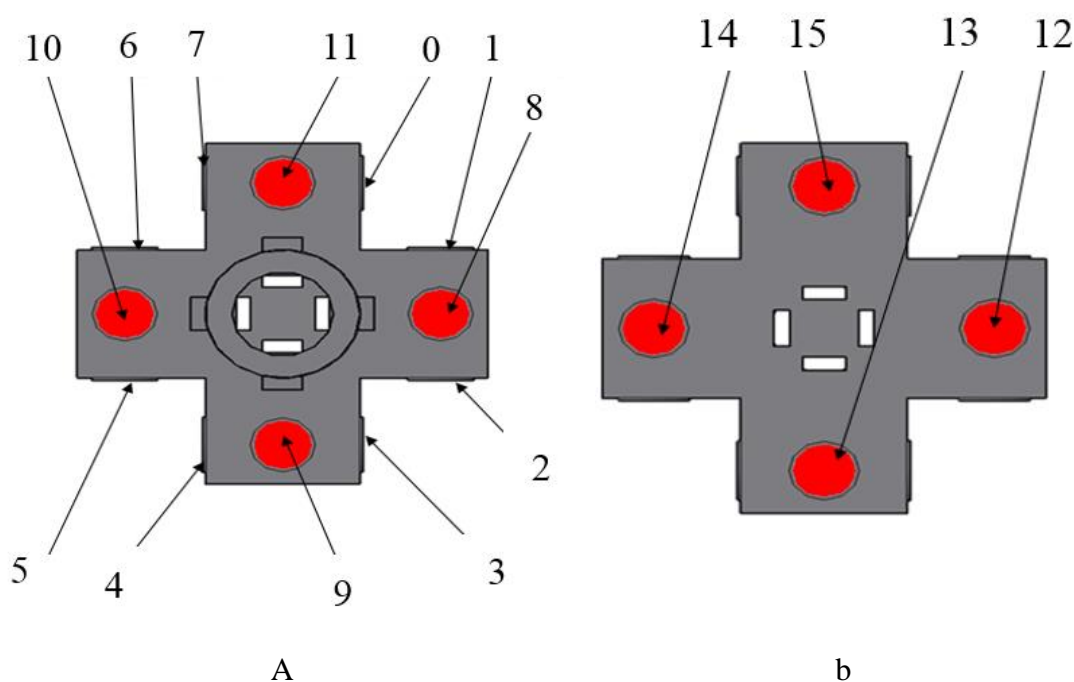
35 pav. Rezultatai po inklinometrų parametru suvienodinimo

Iš atlikto paskutiniojo bandymo rezultatų matyti, kad jutiklių išvedami duomenys panašūs. Jutiklių triukšmo lygis nesiekė pusės laipsnio (0.32 laipsnio) ką galima laikyti tiksliais rezultatais. Jutikliai su šiais parametrais buvo naudojami tolimesniems bandymams.

3.2 Bandymas su jėgai jautria varža

3.2.1 Jutiklių išdėstymas ir kombinacijos

Varžiniai jutikliai buvo jungiami tiesiogiai į įterptinio mikrovaldiklio „Arduino Mega“ analoginius įėjimus. Kai valdoma detalė nėra paveikiama išorinės jėgos, visų varžinių jutiklių (36 pav.) išduodamos atitinkamos įtampos yra labai mažo dydžio ir tai priimama kaip ramybės būsena.



36 pav. Jutiklių išdėstymas ant valdančios detalės: a – vaizdas iš viršaus;
b – vaizdas iš apačios

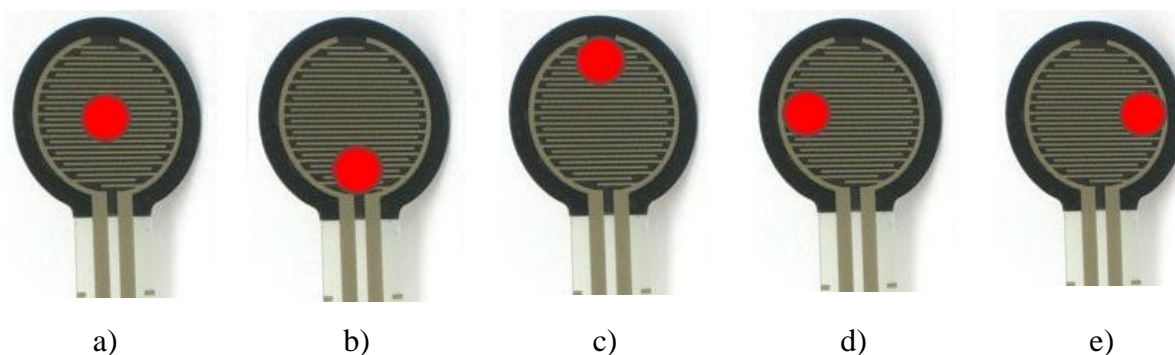
Kai įtaiso valdoma detalė bus paveikiama išorinės jėgos, atitinkamų jutiklių varžos keisis, analogiškai keisis ir jutiklių išėjimo įtampos. Įtampos išėjimo pokytis apskaičiuojamas ir peržengus užduotas vertes, mikrovaldiklis išduoda signalą atitinkamai judėjimo kryptčiai. Kiekvienai jutiklio porai buvo nurodomas judesio derinio pavadinimas (5 lent.). Kad palengvinti judesio derinių sudarymą, visi jutikliai buvo sužymėti nuo 0 iki 15 (36 pav.).

Sudarytos jutiklių kombinacijos

Jutiklių suveikimas	Veiksmas
8 ir 14	Stumiama kairėn
10 ir 12	Stumiama dešinėn
9 ir 15	Stumiama į priekį
11 ir 13	Stumiama atgal
12, 13,14 ir 15	Spaudžiama į vidų
8, 9, 10 ir 11	Traukiama į išorę
2 ir 6	Sukama pagal laikrodžio rodyklę
3, 5 ir 7	Sukama prieš laikrodžio rodyklę

3.2.2 Jutiklių poveikio ploto tyrimas ir elektrinių sujungimų schema

Kiekvieno jutiklio jėgai jautraus ploto skersmuo lygus 12.7 mm. Norint sužinoti koku plotu yra efektyviausia paveikti jautrią zoną, kad išėjime būtų gautas aukščiausias signalas, buvo atliktas bandymas. Bandymo metu jutiklio aktyvus plotas buvo veikiamas koncentruotai 1 mm, 4 mm, 6 mm ir 8 mm skersmens plastikiniais strypais ta pačia jėga, skirtingose jutiklio vietose (37 pav.). Duomenys buvo nuskaitomi mikrovaldiklio, kuris turi 10 bitų ASK analoginį-skaitmeninį keitiklį (ADC – analog to digital converter). Galimos keitiklio vertės nuo 0 iki 1023 atitinkamai įėjimo įtampai nuo 0 iki 5 voltų. Keitiklis sugeba nuskaityti jutiklio vertę 10000 kartų per sekundę.



37 pav. Bandymas spaudžiant ta pačia jėga su skirtingu diametru strypais skirtingose vietose: a) viduryje; b) pradžioje; c) pabaigoje; d) kairėje; e) dešinėje

Pradžioje buvo atliktas bandymas, kurio tikslas sužinoti kokios maksimalios ir minimalios jutiklio su 6,8 k Ω varža vertės. Atlikus bandymą iš gautų rezultatų matyti, kad minimaliai jutiklis išduoda 0 ASK verčių, o maksimaliai 900 ASK verčių.

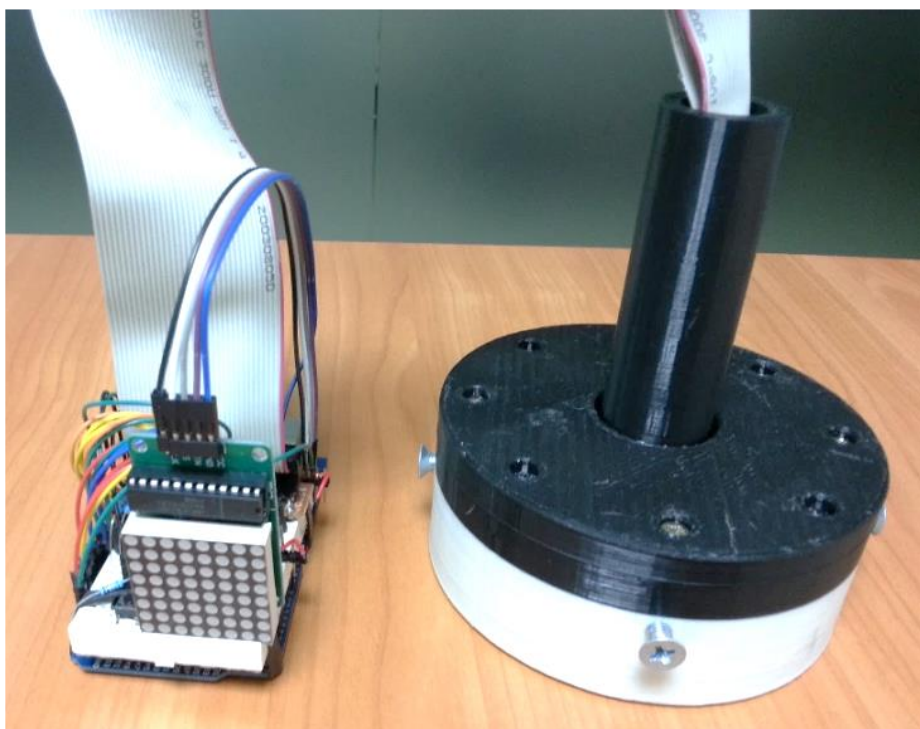
6 lentelė

Varžos priklausomybė nuo veikiamo ploto duomenys

Strypo diametras	Duomenys spaudžiant viduryje	Duomenys spaudžiant pradžioje	Duomenys spaudžiant pabaigoje	Duomenys spaudžiant kairėje	Duomenys spaudžiant dešinėje
1 mm	627	640	580	578	542
4 mm	780	720	706	695	720
6 mm	798	818	756	764	779
8 mm	802	822	760	787	807

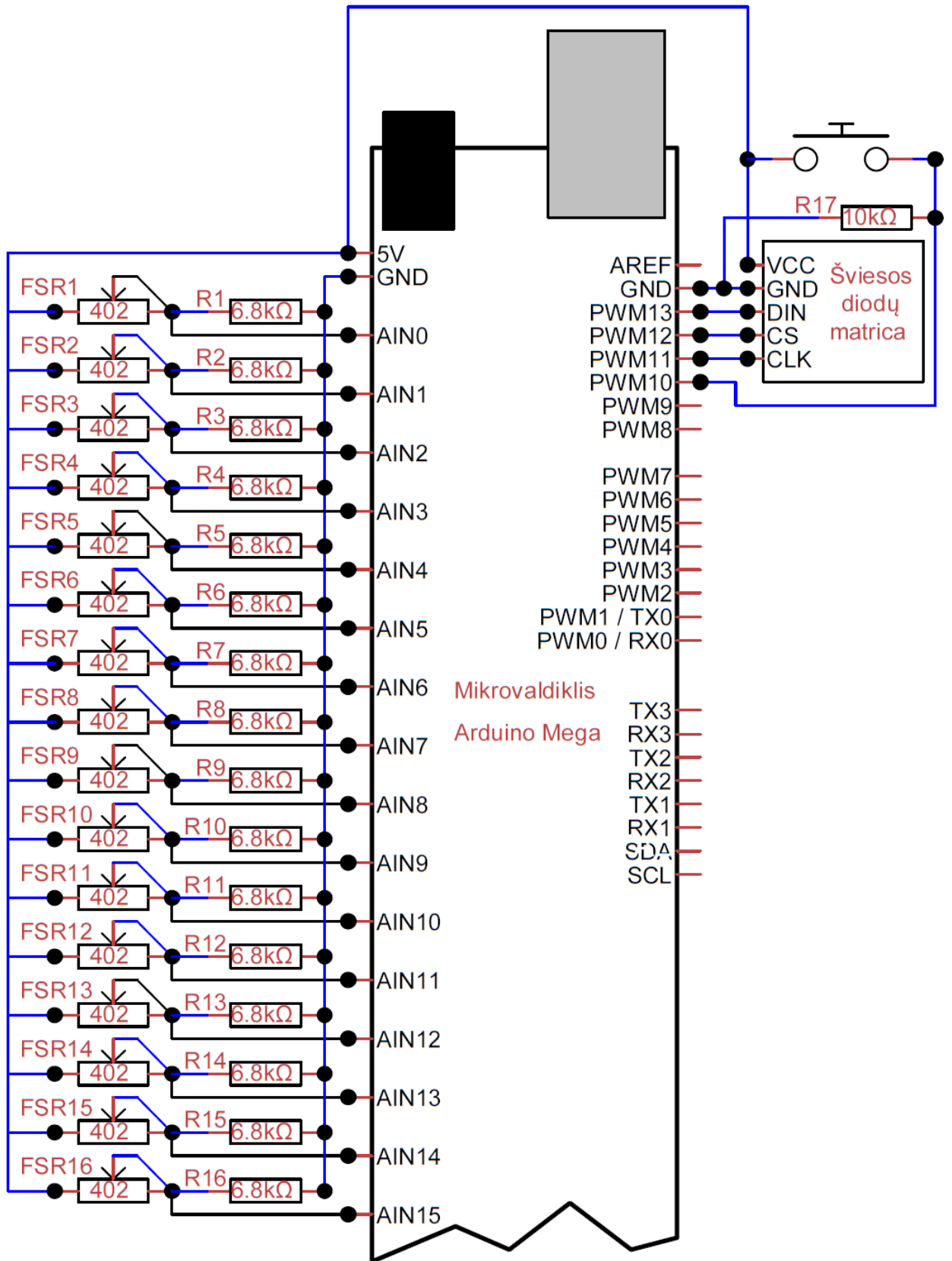
Iš bandymų rezultatų matyti, jog kuo platesniu plotu veikiamas jutiklis tuo didesnės reikšmės išėjime. Galima daryti prielaidą, jog jutiklio plotas turi būti pilnai išnaudotas, tada rezultatai bus tiksliausi. Suprojektuotos vairalazdės viduje atspausdinti 12,5 mm skersmens iškilimai kurie yra tinkami tolimesniems darbams.

Jutikliai buvo sumontuoti į 3D spausdintuvu atspausdintą korpusą. Parašytas jutiklių duomenis nuskaitantis programos kodas mikrovaldikliui. Atlikus pirmuosius eksperimentinius bandymus pastebėta, kad sunku atpažinti kuri jutiklių pora suveikė ir koks signalas išėjime, dėl to atlikti pirmieji pakeitimai. Nuspręsta panaudoti 8x8 šviesos diodų (LED) matricą rezultatams išvesti. Taip pat pakeistas programos kodas, kad peržengus užduotąsias vertes atitinkamai porai jutiklių (5 lent.) ne tik atsirastų signalas išėjime, bet ir užsidegtų indikacija. Sumontuotos vairalazdės sistemos vaizdas su pirmaisiais pakeitimais pateiktas 38 pav.



38 pav. Realus sumontuotos vairalazdės vaizdas

Atsižvelgus į jutiklio įtampos kitimo priklausomybės nuo veikiančios jėgos pateiktus grafikus (27 pav.) panaudojant įvairių dydžių varžas matoma, kad kitimo priklausomybės nuo veikiančios jėgos nėra tiesinės. Tačiau naudojant mažesnio dydžio varžas kai grafikas pavaizduotas su $2\text{ k}\Omega$ varža įtampos kitimo priklausomybės nuo veikiančios jėgos artėja link tiesinės. Problema išskyla tokia, kad naudojant nedidelio dydžio varžą, įtampos kitimas yra nedidelis prie skirtingų jėgų, o sudarant judėjimo derinius valdymo įtaisui reikia, kad įtampos kitimas nuo veikiančios jėgos būtų kuo vienodesnis, kadangi kiti valdymo įtaiso deriniai bus sudaromi iš tų pačių jutiklių porų, tik programos sąlygoje bus nurodomos skirtingos įtampų vertės, bei atitinkamai priskiriami skaitmeniniai išėjimai. Bandymams atlikti naudotos sistemos elektrinė sujungimų schema pateikta 39 pav. Jutikliams su mikrovaldiklių sujunti buvo parinkta $6.8\text{ k}\Omega$ varža.


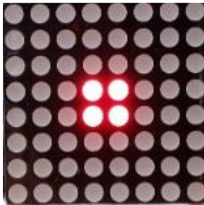

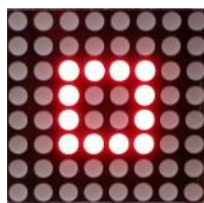



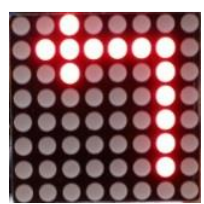
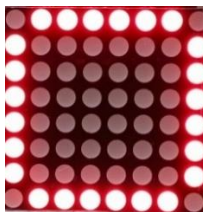
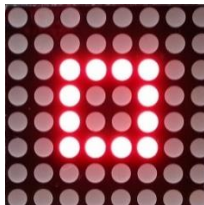


39 pav. Sistemos elektrinių sujungimų schema

Sujungtoje sistemoje, šviesos diodų matricoje buvo sudaryti deriniai, šių derinių paaiškinimas pateiktas 7 lentelėje.

7 lentelė

Šviesos diodų matricoje išvedami vairalazdės išėjimo rezultatai

Vaizdas išėjime	Reikšmė	Vaizdas išėjime	Reikšmė
	Stumiama kairėn		Spaudžiama į vidų
	Stumiama dešinėn		Traukiama į išorę
	Stumiama į priekį		Sukama pagal laikrodžio rodyklę
	Stumiama atgal		Sukama prieš laikrodžio rodyklę
	Kalibravimas pradėtas		Kalibravimas baigtas

3.2.3 Poveikio įtaiso suderinimas

Atlikus sekančius bandymus pastebėta, kad pavertus vairalazdę į vieną arba į kitą pusę arba apvertus, keičiasi jutiklių išduodamos vertės. Todėl buvo sukurta įtaiso kalibravimo programa,

skirta nurodyti poveikio dydį kiekviena kryptimi. Prieš eksploatuojant jutiklį būtina atlikti dviejų etapų suderinimą, pirmajame suvaržomos poveikio įtase esančios spyruoklės ir antrajame atliekamas programinis jutiklių kalibravimas. Pirmajame etape įveržiamos spyruoklės taip, kad visų jutiklių išduodamos įtampos būtų minimalios. Tai įmanoma tik tada, kai jutikliai nėra veikiami jėgos. Antrajame etape patikrinamos ir sukalibruojamos jutiklių išduodamos įtampos judinant poveikio įtaisą kiekviena ašimi atskirai ir sukant aplink kiekvieną ašį atskirai. Sekančiais bus apžvelgtas suderinimo procesas paėiliui.

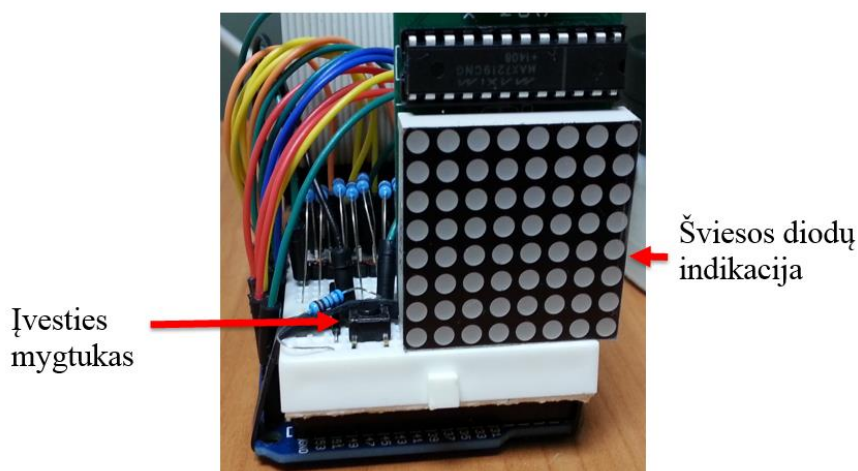
Poveikio įtaiso suvaržymas vyksta sekančia tvarka:

1. Poveikio įtaisas prijungiamas prie kompiuterio;
2. Paleidžiama „Arduino IDE“ programa;
3. Atidaromas „Serial monitor“ langas;
4. Mikrovaldiklis spausdina esamas jutiklių reikšmes (nuo 0 iki 15) (40 pav.).

COM12															
A0: 0	A1: 0	A2: 0	A3: 0	A4: 96	A5: 0	A6: 0	A7: 0	A8: 0	A9: 0	A10: 0	A11: 0	A12: 0	A13: 48	A14: 0	A15: 0
A0: 0	A1: 0	A2: 0	A3: 0	A4: 91	A5: 0	A6: 0	A7: 0	A8: 0	A9: 0	A10: 0	A11: 0	A12: 0	A13: 48	A14: 0	A15: 0
A0: 0	A1: 0	A2: 0	A3: 0	A4: 92	A5: 0	A6: 0	A7: 0	A8: 0	A9: 0	A10: 0	A11: 0	A12: 0	A13: 48	A14: 0	A15: 0
A0: 0	A1: 0	A2: 0	A3: 0	A4: 90	A5: 0	A6: 0	A7: 0	A8: 0	A9: 0	A10: 0	A11: 0	A12: 0	A13: 48	A14: 0	A15: 0
A0: 0	A1: 0	A2: 0	A3: 0	A4: 89	A5: 0	A6: 0	A7: 0	A8: 0	A9: 0	A10: 0	A11: 0	A12: 0	A13: 48	A14: 0	A15: 0
A0: 0	A1: 0	A2: 0	A3: 0	A4: 89	A5: 0	A6: 0	A7: 0	A8: 0	A9: 0	A10: 0	A11: 0	A12: 0	A13: 48	A14: 0	A15: 0

40 pav.16 Jutiklių duomenys „Serial monitor“ lange

Toliau reguliuojami vairalazdės šonuose esantys varžtai – taip, kad visų signalų išėjimuose būtų nuliai arba kuo mažesnė vertė. Atlikus vairalazdės nunulinimą, nurodoma jėga, kuria paveikus jutiklių kombinacijas, gaunamas signalas išėjime.



41 pav. Mikrovaldiklis su šviesos diodų indikacija ir įvesties mygtuku

Poveikio įtaiso kalibravimas vyksta sekančia tvarka:

1. Ramybės būsenoje spaudžiamas įvesties mygtukas, pasirodo kalibravimo pradžios indikacijos ženklas – „Kalibravimas pradėtas“(7 lent.);
2. Pakreipus vairalazdę norima kryptimi užsidega tos krypties indikacija šviesos diodų matricoje (jeigu vaizduojama ne norimos krypties indikacija reikalinga spausti „įvesties mygtuką“ ir pradėti darbą nuo pradžių);
3. Vairalazde įveržiama norima jėga ir spaudžiamas įvesties mygtukas, šviesos diodų indikacija turi rodyti „Kalibravimas baigtas“ (7 lent.) ženklą ir naujai įvesti duomenys išsaugomi;
4. Norint kalibruoti kitas kryptis reikia pakartoti procedūrą norimai kryptčiai.

Atlikus poveikio įtaiso kalibravimą dviem etapais rezultate gaunami stabilesni ir konkrečiam valdomajam objektui pritaikyti duomenys išėjime. Norint išgauti dar tikslesnius duomenys buvo atlikti papildomi tyrimai.

3.2.4 Valdymo įtaiso poveikio jėgos tyrimas

Taip pat buvo atliktas vairalazdės kalibravimas paveikiant kiekviena kryptimi ta pačia jėga. Šiam tikslui buvo naudojamos elektroninės svarstyklės, ant poveikio įtaiso valdančios detalės buvo pritvirtintas laikiklis, kuris buvo veikiamas ta pačia jėga įvairiomis kryptimis. Rezultate buvo gauta: (patamsinti langeliai – tai sudarytos kombinacijos kryptčiai).

8 lentelė

Veikiant poveikio įtaisą įvairiomis kryptimis ta pačia jėga rezultatai

Jutiklio Nr	Stumiama atgal	Stumiama į priekį	Stumiama kairėn	Stumiama dešinėn	Traukiama į išorę	Spaudžiama į vidų
A0	184	0	0	313	150	0
A1	0	0	0	0	0	0
A2	0	0	0	1	0	0
A3	0	0	0	163	0	0
A4	106	31	31	144	167	79
A5	460	0	0	0	349	0
A6	0	632	0	0	0	0
A7	0	0	589	0	2	0
A8	0	0	65	0	128	0

8 lentelės tęsinys senkančiame puslapyje

A9	0	452	0	0	89	0
A10	336	0	5	783	823	0
A11	795	0	0	0	755	0
A12	0	0	2	137	0	4
A13	294	0	354	0	0	492
A14	0	422	527	0	0	720
A15	8	65	8	8	8	8

Bandymai rodo, kad paveikus poveikio įtaisą norimomis kryptimis, išėjimo jutiklių vertės ne visada didžiausios tų jutiklių iš kurių sudarytos krypčių kombinacijos (5 lent.). Kadangi jutiklių kombinacijos nesikartoja, išėjime gaunami norimi rezultatai. Taip pat iš rezultatų matyti, kad poveikio įtaiso vidinė mechaninė dalis nėra idealiai vienoda, todėl paveikus vienoda jėga norima kryptimi rezultate gaunamas vieno jutiklio didesnės vertės, o kito mažesnės.

Atlikus pirmuosius bandymus nuspręsta patikrinti vairalazdės jutiklių išvedamų duomenų triukšmingumą. Šis tyrimas atliekamas norint ištirti kaip jutiklių parametrai kinta nuo vairalazdės padėties erdvėje, kadangi poveikio įtaisas gali būti tvirtinamas įvairiausiose padėtyse. Taip pat valdant objektą kurio padėtis erdvėje keičiasi (pvz. mobilų robotą, kuris leidžiasi nuo platformos arba pramoninio roboto įrankio centro tašką (TCP)). Bandymų metu vairalazdės padėtis buvo keičiama erdvėje ir nuskaitomi visų 16 jutiklių išvedami duomenys vieną minutę. Bandymas buvo atliktas laikant vairalazdę statmenai į viršų, atvirksčiai, pavertus vienu iš 4 kampų ir vartant poveikio įtaisą (42 pav.). 9 lentelėje pateikiamas jutiklių išvedamas triukšmo lygis, taip pat reiktų pažymėti, kad jutiklių darbo diapazonas yra nuo 0 iki 900 „adc“ keitiklio verčių.



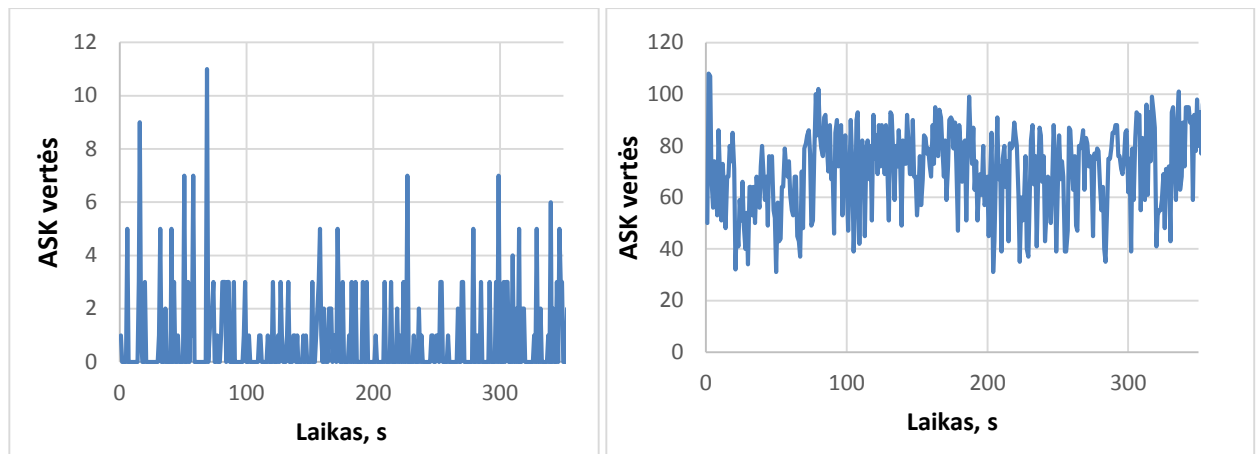
42 pav. Poveikio įtaiso duomenų nuskaitymas

Jutiklių triukšmo lygis

Jutiklio Nr	Statmenai	Apversta	Paverstas kairiau	Paverstas dešiniau	Vartant statmena	Vartant apversta
A0	15	6	9	6	54	13
A1	9	5	7	5	15	15
A2	13	7	4	5	13	7
A3	15	7	5	9	14	11
A4	110	62	111	73	77	71
A5	29	17	3	7	21	19
A6	7	5	7	185	6	172
A7	10	15	9	5	7	11
A8	13	7	4	14	9	11
A9	13	6	5	7	13	9
A10	11	24	25	9	31	32
A11	40	42	34	31	23	27
A12	13	3	4	4	11	18
A13	37	15	20	5	22	123
A14	43	3	7	5	27	101
A15	0	9	5	17	7	14

Iš gautų rezultatų matyti, kad ne visi jutikliai nukrypsta vienodai. Jutiklių A1-A3, A5, A7-A12 ir A15 vertės visų bandymų metu nebuvo pakilusios aukščiau 100 „ADC“ keitiklio verčių ką galima laikyti teigiamu rezultatu. Jutiklis A4 paverstas kairiau ir stovint statmenai vairalazdei ir jutiklis A6 pavertus poveikio įtaisą dešiniau ir vartant statmenai, išduoda vertes didesnes negu 100 „ADC“, ką galima laikyti priimtina nors ir gerai būtų pakartotinai atlikti kalibravimo procesą, akcentuojant spyruoklių įveržimą. Taip pat jutikliai A13 ir A14, kurie sumontuoti ant poveikio įtaiso pagrindo, nežymiai viršija 100 „ADC“ keitiklio vertę.

Reiktų pažymėti, kad jutikliai, kurie nėra veikiami jėgos ir jų išduodamos vertės nėra didelės (0-50 43 pav. a) yra neperspausti, o jeigu jutiklis perveržtas, jo vertės 30-100 (43 pav. b) ir nesiekia nulinės reikšmės, galutinio rezultato nuokrypiai yra didesni.



43 pav. Jutiklių išėjimo vertės: a) normalios būsenos; b) perspausto

Norint gauti stabilesnius rezultatus vairalazdei judant erdvėje reikia standesnių spyruoklių, kad įveržimas būtų stipresnis. Taip pat mikrovaldikliui turi būti užtikrinta mažiausiai 5V įtampa, kadangi nukritus įtampai žemiau numatytos normos analoginius signalus skaitantys įėjimai nukrypsta nuo savo darbinių reikšmių, ko pasekoje gaunami nestabilūs rezultatai išėjime.

3.3 Eksperimentinis poveikio įtaiso tyrimas

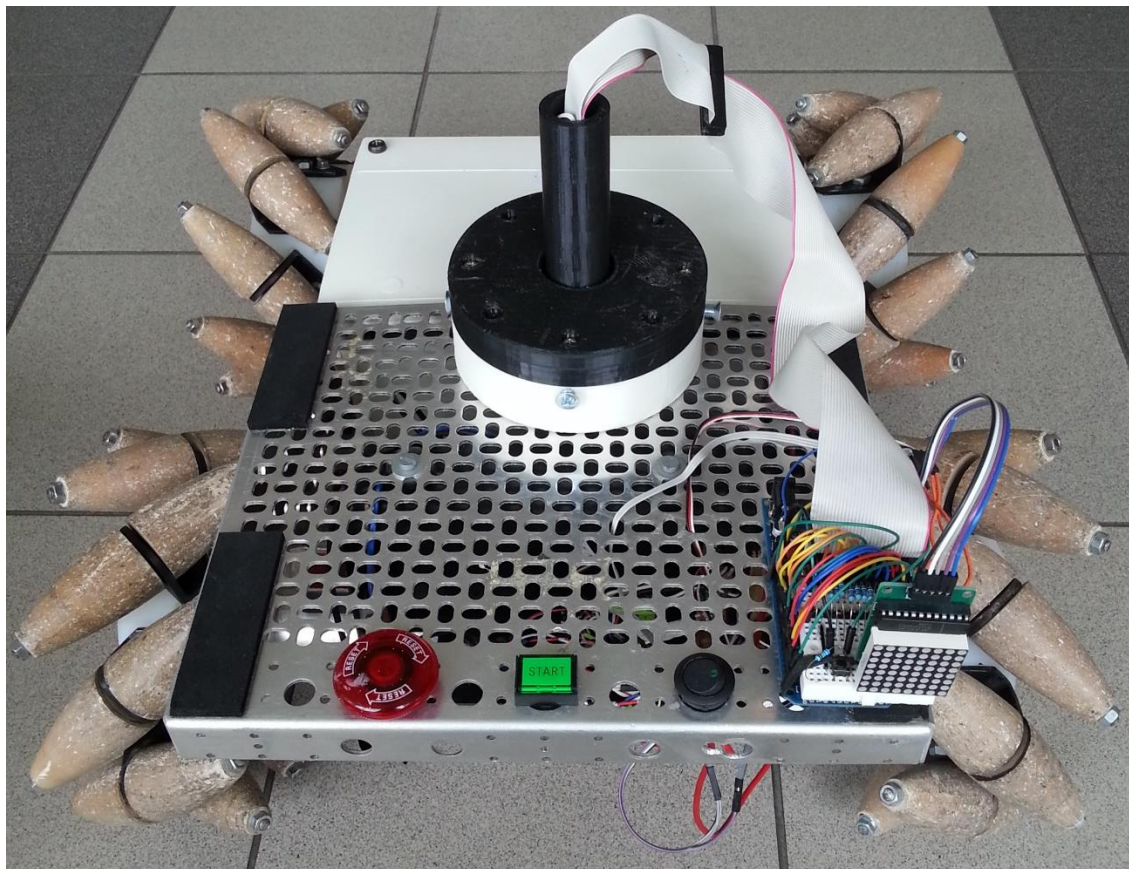
3.3.1 Valdomo objekto parinkimas

Apžvelgus turimus, esamus jutiklius ir jų sistemas, nuspręsta praktiškai pritaikyti pjezo elektrinių jutiklių valdymo įtaisą. Kaip jau buvo minėta, valdymo įtaisas skirtas 6 judrumo laipsnių įtaisams valdyti. Buvo apžvelgti laboratorijoje turimi įrenginiai:

Pramoniniai robotai – tai įrenginys stovintis stacionariai ir savo įrankio galu (TCP – tool center point) judantis erdvėje. Šis robotas puikiausiai tiktų vykdymo įtaisui išbandyti, bet laboratorijoje esantys robotai „ABB IRB1400“, „Fanuc S6“ neturi pakankamai diskretinių įėjimų, analoginių įėjimų norint reikiamai išbandyti (erdvėje judant tam tikra kryptimi išgauti skirtingus greičius priklausomai nuo jutiklius veikiamos jėgos) vairalazdės veikimą. Kiti turimi laboratorijoje įrengimai tai „ADEPT“ kompanijos kuriami mobilūs robotai, kurie gali būti parenkami pagal pirkejo parametrus. Šie robotai taip pat nėra tinkami bandymams, kadangi negali judėti šonu. Šiuo atveju turėtų būti parašyta speciali programa: vairalazde paveikus išilgai roboto padėties, robotas turėtų savarankiškai apsisukti vietoje veikiamos jėgos kryptimi, ir tik tada pradėti judėti jėgos veikimo kryptimi. Tai išeitis, bet ne sprendimas. Dar vienas mobilus robotas tai įvairiakryptis (omnidirectional) robotas turintis „Babaninius“ (44 pav.) ratus, šio roboto išskirtinė savybė ta, jog jis gali judėti bet kuria iš 8 krypčių iš ramybės būsenos. Nors ir negali judėti aukštyne – žemyn, bet

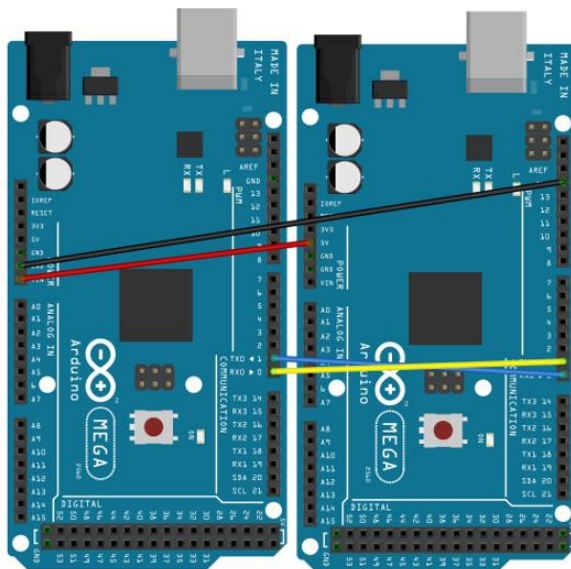
bandymams tinka, kadangi valdomas mikrovaldiklio kuris turi pakankamai įėjimų bei išėjimų valdymo signalams.

3.3.2 Valdomo objekto ir poveikio įtaiso sujungimas



44 pav. Įvairiakryptis mobilus robotas su primontuotu poveikio įtaisu

Bandymo metu buvo primontuotas 6 laisvės laipsnių valdymo įtaisas ant mobilaus roboto korpuso (44 pav.). Mobilus robotas valdomas mikrovaldiklio „Arduino Mega“ (taip pat kaip ir valdymo įtaisas), komunikacijai buvo pasirinktas „Serial“ komunikacija. Dviejų mikrovaldiklių sujungimų schema pavaizduota 45 pav. Kadangi robotą valdantis mikrovaldiklis yra maitinamas roboto baterijų, poveikio įtaiso mikrovaldiklis maitinamas nuo roboto mikrovaldiklio.



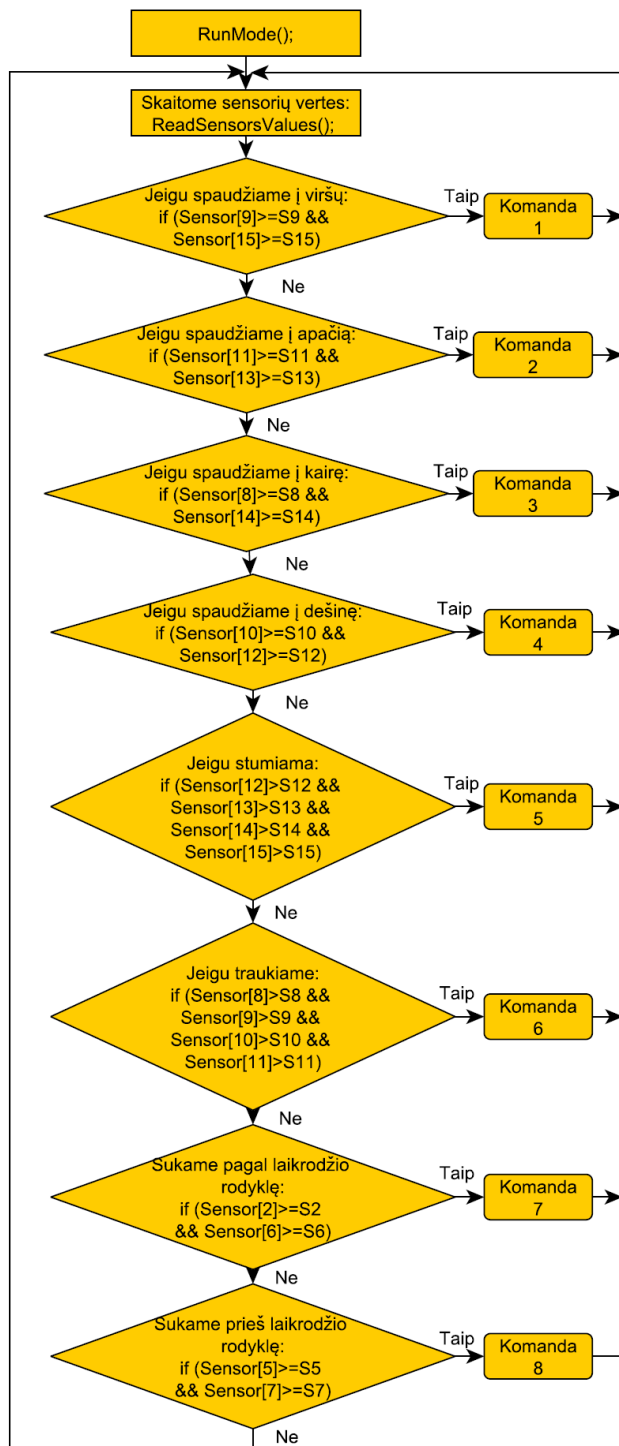
Poveikio įtaisas Robotas

45 pav. Mikrovaldiklių sujungimu schema

Sujungus poveikio įtaisą su valdomu robotu buvo parašytas programos kodas kurio algoritmas pateiktas 46 paveiksle. Duomenys nuskaitomi mikrovaldiklio ir suveikus atitinkamai kombinacijų jutiklių vaizduojama šviesos diodų matricoje ir išsiunčiama komanda valdomam objektui, šiuo atveju mobiliam robotui, judėjimo kryptis. Pilnas algoritmas ir programos kodas su komentarais pateiktas 3 ir 4 prieduose.

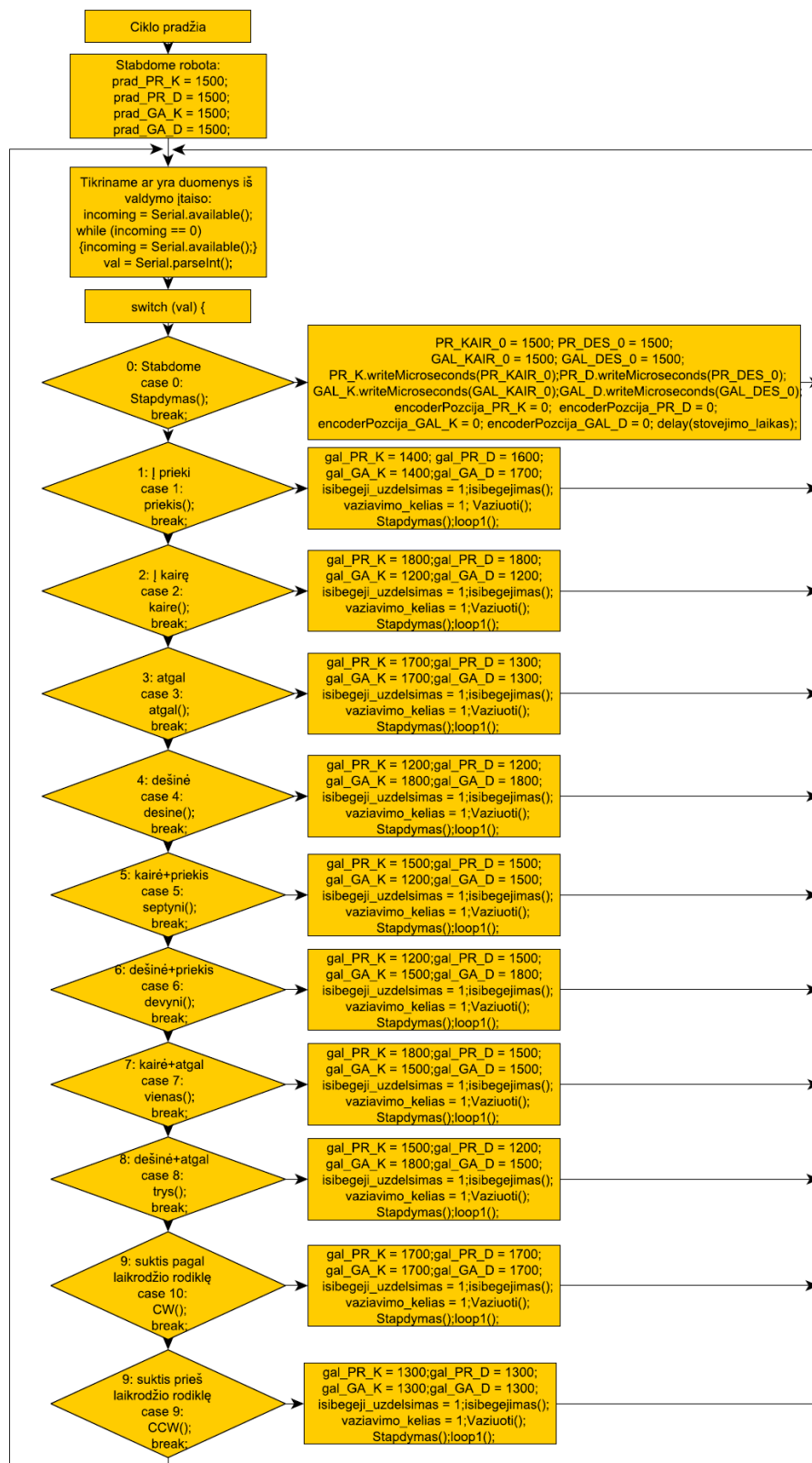
Atlikus pirmuosius praktinius bandymus su vairalazde, sudaryta iš jėgai jautrių jutiklių primontuota prie mobilaus roboto, kuriam konstrukciniai sprendimai leidžia judėti visomis 4 kryptimis iš ramybės būsenos, pastebėta, kad poveikio įtaisą viena kryptimi reikia paveikti didesne jėga negu kita. Dėl šios priežasties buvo atliktas kalibravimas po kurio ši problema išsprendė.

Sekantis pastebėjimas, kad robotas startuoja per dideliu greičiu ir nuvažiuoja per didelį atstumą, todėl buvo pakoreguotas robotą valdančio mikrovaldiklio kodas, padidintos įsibėgėjimo vertės ir sumažintos atstumo vertės. Galutinis robotą valdančio mikrovaldiklio programos kodas su komentarais pateiktas 5 priede. Iš praktinių bandymų rezultatų galima daryti išvadą, kad teoriškai aptaptas ir sujungtas modelis veikia.



46 pav. Poveikio įtaiso išduodamos komandos

Atitinkamai mobilaus roboto valdikliui buvo parašytas programos kodas, kuris tikrina gaunamas komandas iš poveikio įtaiso ir atitinkamai jas vykdo.



47 pav. Roboto valdiklio algoritmas

3.4 Skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad poveikio įtaisas naudojantis inklinometrus yra pilnai veikiantis ir tinkamas valdyti objektų poslinkį X ir Y kryptimis plokštumoje. Naudojant šiuos jutiklius negaunamas sukamojo ir keliamojo (leidžiamojo) judesio.
2. Poveikio įtaisas naudojantis jėgai jautrias varžas gali matuoti 6 judrumo laipsnius, 3 linijinius ir 3 sukamuosius. Mechaninė poveikio įtaiso dalis nėra ideali ir gaunamos paklaidos.

IŠVADOS

1. Poveikio įtaisas su inklinometrais tinka valdyti judesį plokštumoje, nurodant linijinę kryptį. Jei judanti platforma gali pasvirti tai posvyriui įvertinti būtina papildoma inklinometrų pora sumontuota ant platformos. Taip pat naudojant šiuos jutiklius negaunamas sukamojo ir keliamojo (leidžiamojo) judesio nuskaitymas.
2. Nustatyta kad erdviniam judesiui tinka prietaisas turintis varžinius jutiklius. Šiuo prietaisu galima paveikti X, Y, Z ašimis ir sukima aplink šias ašis RX, RY, RZ.
3. Eksperimento būdu nustatyta, kad poveikio įtaisą ir jį sudarančius varžinius jutiklius reikia kruopščiai suderinti atitinkamai suvaržant ir atliekant kalibravimą.
4. Atliktas eksperimentinis bandymas su erdviniu poveikio įtaisu, nustatyta, kad jį galima naudoti mobiliems robotams valdyti.

LITERATŪRA

1. Judesio valdymas kopijavimo metodu. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-05-20. Prieiga per internetą: <http://www.hwm.com/12-1-Manipulator+A100.html>;
2. Judesio valdymas su grįžtamuoju ryšiu. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-05-20. Prieiga per internetą: <http://www.advancedmanipulator.com/>;
3. „Kinect“ vaizdų atpažinimo jutiklis [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-12-20. Prieiga per internetą: <http://www.digitaltrends.com/home-theater/apple-primense/>;
4. „Myo“ raumenų impulsus skaitanti apyranke [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-12-21. Prieiga per internetą: <https://www.thalmic.com/en/myo/>;
5. Triax sensor block for 6 degree of freedom (6DoF). [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-12-21. Prieiga per internetą: <http://www.amtele.se/en/content/triax-sensor-block-6-degree-freedom-6dof>;
6. „Xsens MVN“ kostiumas. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-01-15. Prieiga per internetą: <https://www.xsens.com/products/xsens-mvn>;
7. Pedro Neto, J. Norberto Pires, A. Paulo Moreira, "High-level programming and control for industrial robotics: using a hand-held accelerometer-based input device for gesture and posture recognition", Industrial Robot: An International Journal, Vol. 37 Iss: 2, pp.137 – 147, 2010;
8. 6-axis sensor structure using force sensor and method of measuring force and moment therewith US8156823 B2. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-1-21. Prieiga per internetą: <http://www.faqs.org/patents/app/20110107850>;
9. Pramoninio roboto programavimo sprendimai, „Robotiq“ kompanijos internetinis tinklapis [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-01-22. Prieiga per internetą: <http://robotiq.com/en/applications/robotic-welder.php>;
10. Informacija apie inklinometrą „ADIS16203“. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-02-21. Prieiga per internetą: <http://www.analog.com/en/memsensors/memsinertialsensors/adis16203/products/product.html>;
11. Inklinometro veikimo principo nuotrauka [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-10-20. Prieiga per internetą: http://etc.usf.edu/clipart/62900/62931/62931_clinometer.htm;
12. Informacija apie SPI sąsaja [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-11-15. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus;
13. Force Sensing Resistor 402 Datasheet. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-12-21. Prieiga per internetą: <http://www.interlinkelectronics.com/>;
14. Apie Hall efekto jutiklius. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-12-21. Prieiga per internetą: <https://forums.robertspaceindustries.com/discussion/33766/mr-144-s-10-axis-6-dof-custom->

- [astrobatic-flight-yoke-projecthttps://forums.robertsspaceindustries.com/discussion/33766/mr-144-s-10-axis-6-dof-custom-astrobatic-flight-yoke-project;](https://forums.robertsspaceindustries.com/discussion/33766/mr-144-s-10-axis-6-dof-custom-astrobatic-flight-yoke-project)
15. „Wardog“ vairalazdės nuotrauka: [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-12-21. Prieiga per internetą: [http://www.alasrojas.com/3.0/?page_id=662;](http://www.alasrojas.com/3.0/?page_id=662)
 16. „T.16000M“ vairalazdės nuotrauka: [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-12-21. Prieiga per internetą: [http://www.amazon.com/Hercules-2960706-Thrustmaster-T-16000M-Flight/dp/B001S0RTU0;](http://www.amazon.com/Hercules-2960706-Thrustmaster-T-16000M-Flight/dp/B001S0RTU0)
 17. Informacija apie sukamąjį holo efekto jutikli, [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-12-21. Prieiga per internetą: [http://www.melexis.com/Position--Speed-Sensors/Triaxis%C2%AE-Hall-ICs/Rotary-Position-Sensor-IC-566.aspx;](http://www.melexis.com/Position--Speed-Sensors/Triaxis%C2%AE-Hall-ICs/Rotary-Position-Sensor-IC-566.aspx)
 18. Informacija apie linijini holo efekto jutikli [Interaktyvus]. Žiūrėta 2014-12-21. Prieiga per internetą: [http://www.melexis.com/Position--Speed-Sensors/Triaxis%C2%AE-Hall-ICs/Triaxis-Programmable-Position-Sensor-IC-758.aspx;](http://www.melexis.com/Position--Speed-Sensors/Triaxis%C2%AE-Hall-ICs/Triaxis-Programmable-Position-Sensor-IC-758.aspx)
 19. Jėgai jautrio varžos sandara B2 [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-12-20. Prieiga per internetą [http://www.openmusiclabs.com/learning/sensors/fsr/;](http://www.openmusiclabs.com/learning/sensors/fsr/)
 20. Jėgai jautrio varžos parametrai [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-12-15 Prieiga per internetą [http://www.steadlands.com/data/interlink/fsr402.pdf;](http://www.steadlands.com/data/interlink/fsr402.pdf)
 21. Robotų klasifikacija, jų taikymo sritys. Terminai. Koordinatės [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-03-27. Prieiga per internetą: [http://www.looptechnology.com/robotic-robot-types.asp;](http://www.looptechnology.com/robotic-robot-types.asp)
 22. Mikrovaldiklio arduin mega charakteristikos [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-01-15 Prieiga per internetą: [http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560;](http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560)
 23. T. Jukna Pramoninių robotų apmokymas sekos režime tyrimas magistrinis darbas.
 24. Five axis robotic motion controller [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-02-02. Prieiga per internetą [http://www.liftarchitects.com/blog/2011/10/11/;](http://www.liftarchitects.com/blog/2011/10/11/)
 25. DARPA – Biomechaninės rankos prototipas [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-04-05. Prieiga per internetą [http://www.clemson.edu/ces/crb/students/vilas/photographs/swri06.htm;](http://www.clemson.edu/ces/crb/students/vilas/photographs/swri06.htm)
 26. Intuitive human robot interaction and workspace surveillance by means of the kinect sensor [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-04-05. Prieiga per internetą <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=2198971&fileOId=2214422.;>
 27. Informacija apie įrankio centro tašką (TCP). [Interaktyvus] žiūrėta 2014 08 20. Prieiga per internetą: <http://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tccncprogramming/html/rotationtoolcenterpointtcp.htm&id=;>