



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Gediminas Baranauskas

**TRUMPO NUOTOLIO RAKETOS VALDYMO SISTEMOS
KŪRIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. Algimantas Fedaravičius

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
GAMYBOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(parašas) Doc. dr. Kazimieras Juzėnas

(data)

TRUMPO NUOTOLIO RAKETOS VALDYMO SISTEMOS
KŪRIMAS IR TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Mechatronikos studijų programa (621H73001)

Vadovas

(parašas) Prof. Algimantas Fedaravičius

(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Laima Patašienė

(data)

Projektą atliko

(parašas) Gediminas Baranauskas

(data)

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Gediminas Baranauskas

(Studento vardas, pavardė)

Mechatronika (621H73001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Trumpo nuotolio raketos valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. birželio 5 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Gedimino Baranausko** baigiamasis projektas tema „Trumpo nuotolio raketos valdymo sistemos kūrimas 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.

(Vardas, pavardė)

(parašas)

Baranauskas G., Trumpo nuotolio raketos valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas. *Mechatronikos magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. Algimantas Fedaravičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos ir dizaino fakultetas, mechatronikos katedra.

Kaunas, 2015. 61 psl.

SANTRAUKA

Tiriamajame darbe padaryta šiuolaikinių trumpojo nuotolio raketų apžvalga ir nustatyti svarbiausi jų parametrai turintys įtaką jų valdymui. Atlikus kompiuterinę oro srauto analizę nustatyta, kaip keičiasi raketą veikiančios jėgos. Analizės metu atsižvelgta į skirtingo greičio, sparnų geometrijos, atakos kampų ir sparnuotės pozicijos įtaką raketą veikiančioms jėgoms bei sukimosi momentui apie svorio centrą. Pagal šiuos duomenis kurta greitai reaguojanti sistema, kuri raketos valdymą atlieka sparnais tvirtinamais jos priekyje. Projektuojamai valdymo sistemai buvo sukurtas skaičiavimo algoritmas ir valdymo struktūrograma. Didelis dėmesys buvo skirtas jutiklių signalų apdorojimui ir siekta sudaryti kuo tiksliau veikiančią orientavimosi sistemą. Norint pasiekti nuoseklų ir be trikdžių veikiantį dinaminių parametru išvedimą integravimo būdu, sistema buvo suskaidyta į 2 dalis: orientacijos ir vykdymo. Sistemai buvo parinkti jutikliai ir vykdikliai. Atliktuose tyrimuose buvo ištirti akselerometrai ir giroskopas. Šių tyrimų metu nustatytos jų paklaidos ir naudojimo ypatybės.

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Tvirtinu:

Gamybos inžinerijos
katedros vedėjas

(parašas, data)

Kazimieras Juzėnas

(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa MECHATRONIKA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo ar taikomojo pobūdžio darbas (projektas), kuriam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu magistrantas turi parodyti, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, įgijęs pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Baigiamuoju darbu bei jo gynimu magistrantas turi parodyti savo kūrybingumą, gebėjimą taikyti fundamentines mokslo žinias, socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinių galimybių išmanymą, informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės įgūdžius, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo įgūdžius, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžius, gebėjimą tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema

Trumpo nuotolio raketos valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas

Patvirtinta dekanu 20__ m. _____ mėn. __ d. įsakymu Nr. _____

2. Darbo tikslas

Išanalizuoti trumpo nuotolio raketų valdymo sistemas, sukurti ir ištirti kuriamos sistemos ypatybes.

3. Darbo struktūra

Atlikti šiuo metu naudojamų raketų apžvalgą. Išsiaiškinti jų veikimo principus taip pat ištirti skirtingų raketų tipų privalumus ir trūkumus. Pagal pasirinktą raketos tipą sudaryti preliminarų jos modelį ir nustatyti esminių geometrinių parametrų įtaką aerodinaminių jėgų atsiradimui ir veikimo pobūdžiui. Taip pat sudaryti sistemos veikimo struktūrogramą ir ištirti parinktus jutiklius bei vykdyklius.

4. Reikalavimai ir sąlygos

Ištirti svarbius artimojo nuotolio raketų valdymo aspektus. Nustatyti tinkamiausią raketos sparnuotės poziciją atsižvelgiant į konstrukcines galimybes siekiant sukurti raketą pasižyminčią manevringumu. Ištirti pasirinktų akselerometro ir giroskopo teikiamus duomenis. Sudaryti valdymo sistemos veikimo blokinę struktūrogramą naudojant efektyvų jutiklių signalų apdorojimą ir informacijos perdavimą.

5. Darbo pateikimo terminas 2015 m. birželio mėn. 5 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis

Išduota studentui Gediminui Baranauskui

Užduotį gavau

Gediminas Baranauskas

(studento vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas

prof. Algimantas Fedaravičius

(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

TURINYS

ĮVADAS	7
1. RAKETŲ VALDYMAS	9
1.1 Skrendančio objekto orientavimasis erdvėje	9
1.2 Raketų tipai	10
1.3 Naudojamų raketų apžvalga	13
1.4 Navigacijos ir valdymo sistemos	13
2. SISTEMOS PROJEKTAVIMAS	16
2.1 Aerodinaminių charakteristikų nustatymas	16
2.2 Kinematinų ir dinaminių parametų apskaičiavimas	23
2.3 Vykdikliai	25
2.4 Valdymo sistemos veikimo blokinės schemos sudarymas	26
3. ELEKTRONINĖS VALDYMO SISTEMOS KŪRIMAS IR TYRIMAS	27
3.1 MEMS jutikliai dinaminių ir padėties parametų nustatymui	27
3.2 Jutiklių tyrimas. Aparatūra, metodika ir atlikimo tvarka	28
3.3.1 MEMS talpinis akselerometras ADXL335	29
3.3.2 Tyrimas ir gauti rezultatai	31
3.4 Skaitmeninio akselerometro tyrimas	36
3.4.1 Skaitmeninis ADXL345 akselerometras	36
3.4.2 Tyrimas ir gauti rezultatai	36
3.5 Koriolio vibracinio giroskopo (CVG) tyrimas	38
3.5.1 MEMS CVG L3G4200	38
3.6 Valdymo sistemos elektrinė schema	41
IŠVADOS IR SIŪLYMAI	43
LITERATŪRA	44
PRIEDAI	45

IVADAS

Šiame darbe atliekama raketų konstrukcijos, jų valdymo sistemų ir naudojamų elementų apžvalga, valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas. Priklausomai nuo raketos paskirties ir dydžio naudojamos skirtingos navigacijos bei kontrolės sistemos. Raketas taip pat galima lyginti pagal jų mases, išvystomą greitį, maksimalų skrydžio nuotolį bei diametrą. Jų konstrukcija projektuojama atsižvelgiant į naudojimo paskirtį, todėl raketos skirtos nejudantiems taikiniams dažniausiai būna mažesnio skridimo greičio su didesniu maksimaliu skridimo nuotoliu, naudoja palydovinę navigaciją, gali būti naudojamas valdymas, kai raketos variklis nustoja veikęs (raketa sklendžia minimaliai koreguodama savo judėjimo kryptį). Tuo tarpu judančių taikinių eliminavimui reikalingos didelio skridimo greičio raketos (dažniausiai viršgarsinio) su taikinio sekimo sistemomis. Tokių raketų patikimumas itin priklauso nuo krypties koregavimo laiko todėl sekimo sistemos bei navigacijos informacija turi būti greitai apdorojama. Objekto judėjimui stebėti reikalinga informacija ne tik apie jo judėjimo greitį ar pagreitį, bet ir jo pasisukimo kampus su laisvojo kritimo pagreičiu bei trajektorija. Skraidančiuose aparatuose, įskaitant ir sraigtasparnius bei lėktuvus, naudojami įvairios konstrukcijos akselerometrai, giroskopai ir pito vamzdeliai. Šių matavimo prietaisų paskirtis – teikti informaciją apie skrendančio objekto kinematinis parametrus.

Visa raketos valdymo sistema iš esmės susideda iš dviejų dalių: navigacijos ir kontrolės. Navigacijos modulis – tai sistemos dalis skirta raketos padėties, kinematinėms parametrų nustatymui ir taikinio sekimui (reikiamos trajektorijos nustatymui). Valdymo modulis pagal anksčiau įvardintus duomenis atlieka skrydžio koregavimą. Tai atliekama dviem būdais: keičiant variklio sukuriamos jėgos vektoriaus kryptį arba naudojant oro pasipriešinimo (tiksliau slėgių skirtumo sukuriama) jėga, kuri veikia raketos sparnuotę raketai judant dideliu greičiu. Sparnuotės kampas su skridimo trajektorija gali būti keičiamas naudojant įvairius mechanizmus, tačiau valdymo pavaros būna dviejų tipų: hidraulinės arba elektromechaninės.

Darbo metu pasirinkta projektuoti sparnuote valdomos, nesisukančios raketos valdymo sistema su orientacijos nustatymo jutikliais. Tokios sistemos tikslas – pagal navigacinės sistemos duomenis atlikti raketos skrydžio trajektorijos pakeitimus. Ši sistema turi ne tik atlikti sparnų valdymą, bet ir atsižvelgti į jos orientaciją normaliosios žemės koordinačių ašies atžvilgiu.

Tiriamajo darbo tikslas

Tiriamajo darbo tikslas – suprojektuoti ir iširti mažo nuotolio raketos sparnų valdymo sistemą.

Darbo uždaviniai

- Padaryti šiuo metu naudojamų raketų apžvalgą;
- Išsiaiškinti jų valdymo ypatumus ir naudojamas sistemas;
- Nustatyti esminių raketos geometrinių parametrų įtaką aerodinaminių jėgų atsiradimui ir veikimo pobūdžiui;
- Sudaryti sistemos veikimo struktūrogramą;
- Parinkti sistemos navigacinius jutiklius ir sparnuotės valdymo vykdiklius bei patikrinti jų teorinius duomenis eksperimentiniu būdu;

1. RAKETŲ VALDYMAS

1.1 Skrendančio objekto orientavimasis erdvėje

Skrendančio kūno dinamika gali būti aprašoma naudojant inercinę atskaitos sistemą ir vieną ar kelias koordinačių sistemas (jų tarpusavio ryšį). Dažniausiai naudojamos koordinačių sistemos yra šios:

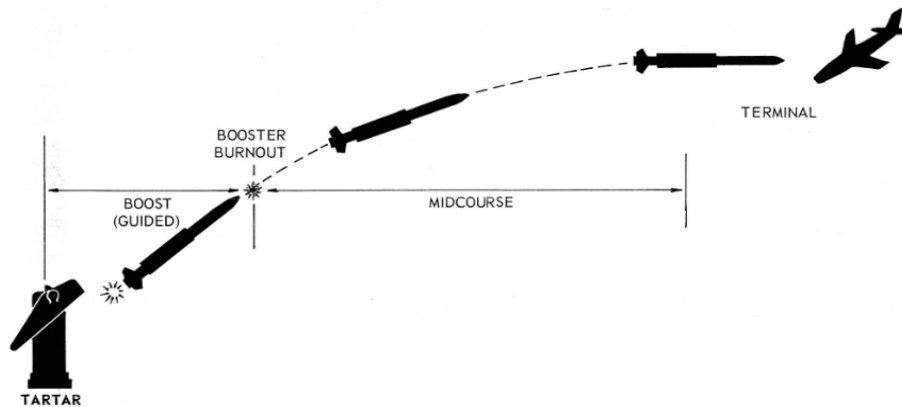
- Normalioji žemės koordinačių sistema – naudojama skrendančio kūno masės centro padėčiai erdvėje nustatyti. Jų pradžia yra žemės paviršiuje, o ašys nejudamai susietos su žeme.
- Normalioji koordinačių sistema – pradžia sutampa su skrendančio objekto masės centru, o ašys lygiagrečios normaliosios žemės koordinačių sistemos ašims.
- Siejamoji koordinačių sistema – skirta skrendančio objekto orientacijai nustatyti normaliosios koordinačių sistemos atžvilgiu. Jos pradžia taip pat sutampa su objekto masės centru, tačiau išilginė ašis (X) sutampa su objekto simetrijos plokštuma, o kitos ašys yra jai statmenos.
- Greituminė koordinačių sistema – naudojama aerodinaminių jėgų nustatymui. Ši sistema nuo siejamosios skiriasi tuo, kad išilginė ašis sutampa su objekto judėjimo vektoriumi, vertikaloji yra statmena išiginei, o skersinė yra statmena objekto simetrijos ašiai.

Kadangi raketos variklio sukuriama jėgos vektorius dažniausiai sutampa su jos simetrijos ašimi (jei raketa valdoma sparnuote ar užsparniais), tai siejamosios ir normaliosios koordinačių naudojimas yra tinkamiausias. Raketos padėtį žemės atžvilgiu sekti nėra būtina, nes kuriama sistema raketoms, kurios seka judančius taikinius. Raketos judėjimas nuo skrydžio pradžios turi būti pastoviai sekamas ir koreguojamas užtikrinant greitą reagavimą į pasikeitusią trajektoriją, todėl jai pastoviai reikalingi dinaminiai duomenys judėjimo greičio bei krypties koregavimui. Akselerometru galima nustatyti kokiais pagreičiais kūnas juda inercinės sistemos X , Y ir Z kryptimis. Giroskopas leidžia nustatyti raketos sukimosi greitį. Šių jutiklių duomenys gali būti integruojami arba diferencijuojami, kad būtų gaunami reikalingi duomenys, kurie priklauso nuo skaičiavimo metodikos. Šie jutikliai ir jų nustatomi duomenys yra būtini betkokio skraidančio aparato valdymui (giroskopą galima pakeisti papildomu akselerometru, kurio padėtis nėra objekto masės centre, tačiau tai tik dar labiau apsunkina skaičiavimus). Raketos trajektorijos ir jos dinaminių parametrų tikslinimui gali būti naudojami magnetinio lauko jutikliai (ašių orientacijai žemės šiaurinio poliaus atžvilgiu), palydovinės navigacijos sistemos (greičio ir pėties nustatymui, akselerometro duomenų tikslinimui) ir kitos stacionarios

sistemos (radaro duomenys, judėjimas radio bangų šaltinių atžvilgiu), tačiau šių sistemų naudojimas nėra būtinas ir neturi tokios naudos kaip raketoms skrendančioms į nejudančius taikinius.

1.2 Raketų tipai

Pagal variklio darbo režimą raketos gali būti tolygaus ar staigaus greitėjimo, tačiau svarbiausias skirtumas – jos skrydžio metu variklis dirba tik paleidimo metu ar visą laiką. Raketų skrydis turi 3 fazes: kilimo, sklendimo ir sunaikinimo. Jeigu variklis yra naudojamas tik jos pakėlimui ir pradinio greičio sukūrimui, tai tokiose raketose yra sklendimo fazė (1.2.1 pav.). Jos priskiriamos balistinėms raketoms ir yra naudojamos nejudančių objektų neutralizavimui. Raketos naudojamos prieš judančius objektus turi nuolatos veikiančią variklį.

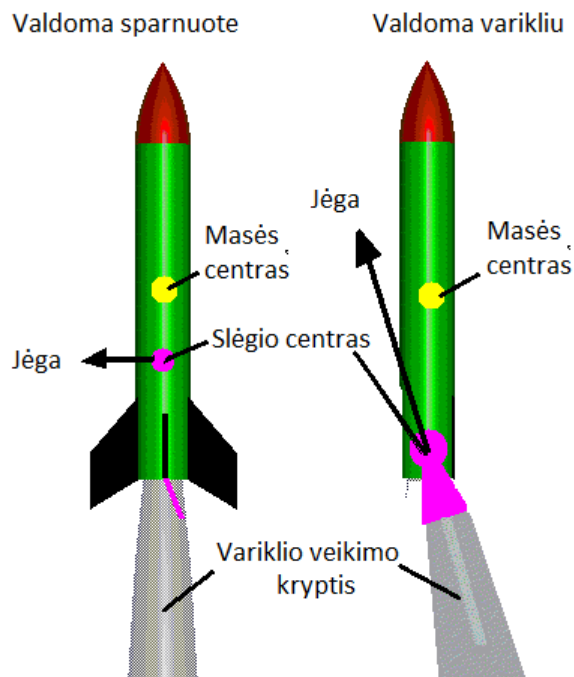


1.2.1 pav. Raketos skrydžio stadijos

Pagal valdymo būdą raketos gali suskirstyti į 3 grupes: valdomas varikliu, sparnais ir besisukančios (1.2.2 pav.). Varikliu valdomose raketose jų skrydžio trajektorijos koregavimas atliekamas keičiant variklio sukuriamo jėgos vektoriaus kryptį. Kadangi pasukus variklį jėgos vektorius pasikreipia ir nebesutampa su masės centru, tai raketą pradeda veikti sukimosi momentas apie raketos vertikalią ašį.

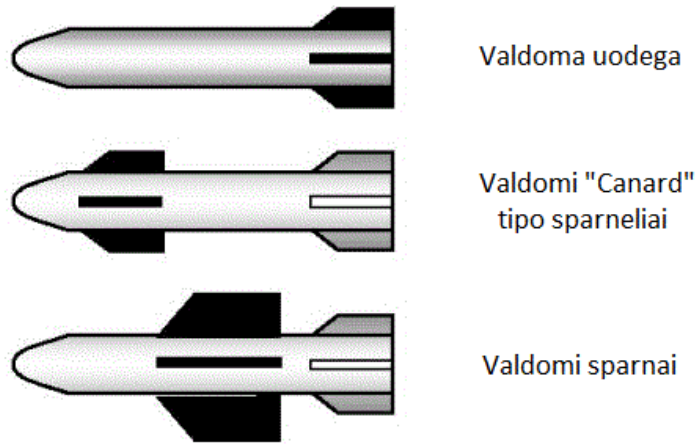
Besisukančių raketų valdymas šiek tiek sudėtingesnis. Tokios raketos sukasi apie savo ašį apie 8,5 Hz pastoviu dažniu, o jų krypties koregavimas atliekamas sukinėjant sparnelius jos priekyje (tokiam valdymui užtenka 2 sparnelių, bet gali būti naudojama ir daugiau). Kai sparnelių pasisukimo kampai su išilgine ašimi yra vienodi, tai aerodinaminis pasipriešinimas raketos greičio vektoriui yra vienodas iš abiejų pusių ir raketa skrenda tiesiai. Raketa pasukama tuomet, kai yra skirtingi sparnelių pasukimo

kampai ir sparnelį su didesniu pasisukimo kampu veikia didesnė pasipriešinimo jėga. Tuomet dėl pasipriešinimo jėgų skirtumo atsiranda sukimosi momentas, kurio dėka pakreipiama raketa. Kadangi raketa pastoviai sukasi, tai sparnelių atlenkimas turi būti valdomas faziškai, pagal pasisukimo kampą apie išilginę ašį.



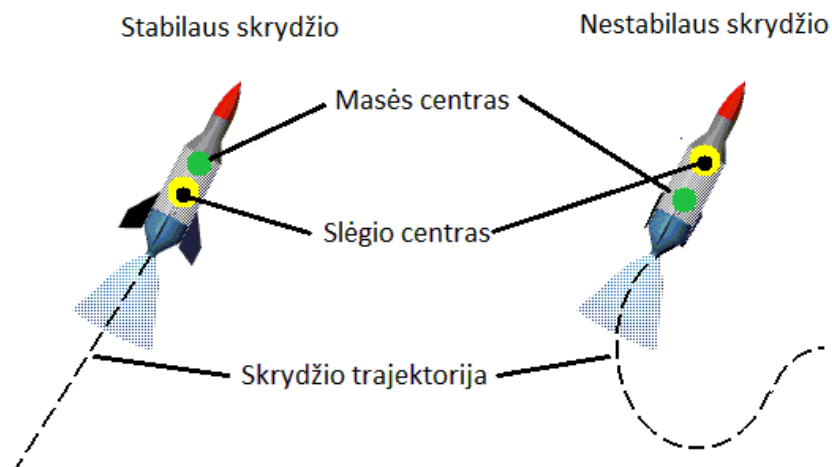
1.2.2 pav. Sparnuote ir varikliu valdomos raketos.

Sparnuote valdomas raketos taip pat galima suskirstyti į 3 grupes pagal sparnų padėtį (1.2.3 pav.). Valdamos uodegos tipo raketos pasižymi manevringumu, kai yra didelis atakos kampas. Tokia sistema dažniausiai naudojama didelio nuotolio raketose. Tokio tipo raketose papildomi sparnai stabilizavimui ir aukščio palaikymui gali būti nenaudojami. „Canard“ tipo raketos naudojamos mažo nuotolio skrydžiams ir pasižymi geresniu manevringumu, kai reikalingas nedidelis skrydžio trajektorijos kampo pakeitimas. Šie sparneliai gali greitai atlikti destabilizaciją, nes šių raketų slėgio centras yra priekyje masės centro. Sparnais valdomos raketos naudojamos rečiau. Jų privalumas – mažesnis raketos sukimasis keičiant kryptį, todėl sekimo sistemoms lengviau išlaikyti užfiksuotą taikinį, tačiau jų valdymui reikalingi didelių gabaritų sparnai. Sparnai gali turėti užsparnius. Tuomet sparnas susideda iš judančios ir nejudančios dalių. Nejudančioji dalis atlieka stabilizavimo paskirtį, o judančioji – valdymo.



1.2.3 pav. Sparnuotės tipai pagal sparnų padėtį.

Vienas svarbiausių raketos parametrų – jos stabilumas. Valdomos raketos projektuojamos taip, kad būtų nestabilios. Tuomet yra lengviau pakeisti jos skrydžio kryptį, ją pasukti. Tam pasiekti, aerodinaminio pasipriešinimo atstojamoji (veikianti iš slėgio centro) turi veikti arčiau raketos nosies nei yra jos masės centras (1.2.4 pav.). Dažniausiai raketos variklis yra sunkesnis už valdymo ir navigacijos skyrius ar kovinę galvutę, todėl masės centras yra šiek tiek arčiau jos uodegos. Raketų sparnai turi labai didelę reikšmę slėgio centro padėčiai (juos veikia didelė dalis pasipriešinimo jėgos), todėl naudojant sparnuotę jos priekyje, slėgio centras yra arti jos nosies ir raketa yra manevringesnė.



1.2.4 pav. Stabilumo priklausomybė nuo masės ir slėgio centrų.

1.3 Naudojamų raketų apžvalga

Šiame darbe tiriama galimybė suprojektuoti bei pagaminti valdomos raketos prototipą. Kadangi dėmesys skiriamas nedidelio skridimo nuotolio raketoms, todėl atlikta būtent tokių raketų apžvalga. Svarbiausi jų techniniai parametrai pateikti 1.3.1 lentelėje. Tai raketos, kurios yra naudojamos mažu nuotoliu ir joms nereikalingas paleidimo stovas.

1.3.1 lentelė. Artimojo nuotolio raketų pagrindiniai duomenys

Raketos modelis	9K34 Strela-3 /SA-14	9K38 Iгла /SA-18	9K310 Iгла-1 /SA- 16	9K338 Iгла-S /SA-24	FIM-92C Stinger	Grom	Starstreak
Pradėta naudoti	1974	1983	1981	2004	1987	1995	1997
Raketos masė	10.3 kg	10.8 kg	10.8 kg	11.7 kg	10.1 kg	10.5 kg	14 kg
Kovinės galvutės masė	1.17 kg	1.17 kg	1.17 kg	2.5 kg	3.0kg	1.27 kg	0.9 kg
Vidutinis skridimo greitis	470 m/s	600 m/s	570 m/s	-	700 m/s	580 m/s	1,190 m/s
Maksimulus skrydžio nuotolis	4,100 m	5,200 m	5,000 m	6,000 m	4,500 m	5,500 m	7,000 m

Apibendrinant šiuos duomenis galima pastebėti, kad tokio tipo raketų svoris būna tik šiek tiek didesnis nei 10 kg iš kurių net iki 3 kg sudaro kovinės galvutės svoris. Nors tokių raketų skridimo nuotolis vos keli kilometrai, tačiau jų vidutinis skridimo greitis yra daugiau nei 330 m/s, šios raketos yra viršgarsinės.

Raketos naudojamos su stovais (t. y. joms reikalingas įtvirtinimas) būna didesnės ir gali įveikti didesnį nuotolį. Jų masė siekia apie 20 kg (be stovo).

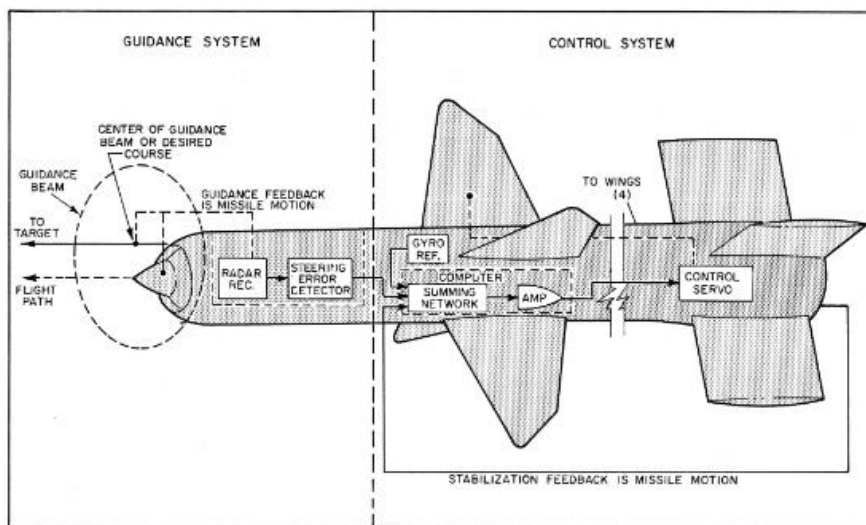
1.4 Navigacijos ir valdymo sistemos

Objekto judėjimui stebėti reikalinga informacija ne tik apie jo judėjimo greitį ar pagreitį, bet ir jo pasisukimo kampus su laisvojo kritimo pagreičiu bei trajektorija. Skraidančiuose aparatuose, tokiuose kaip sraigtasparniai ar lėktuvai naudojami įvairios konstrukcijos akselerometrai, giroskopai ir

pito vamzdeliai . Šių matavimo prietaisų paskirtis – teikti informciją apie skrendančio objekto kinematinis parametrus.

Kalbant apie raketos valdymą, jos sistema iš esmės susideda iš dviejų dalių: navigacijos ir kontrolės (1.4.1 pav.). Navigacijos modulis – tai sistemos dalis skirta taikinio sekimui bei trajektorijos neatitikimui nustatyti. Ši sistemos dalis gali būti sudaryta iš įvairios sekimo įrangos (infraraudonųjų spindulių šaltinio sekimo, radaro ar palydovinės navigacijos), kurios duomenys yra pateikiami į valdymo modulį apie tai, kokius trajektorijos keitimo manevrus turi atlikti raketa. Valdymo modulis pagal ankščiau įvardintus duomenis atlieka skrydžio koregavimą – keičia sparnuotės paukimo kampus arba veriklio jėgos vektoriaus kryptį. Raketos dinaminis parametrų nustatymas ir orientacija žemės normaliosios koordinatinių sistemos atžvilgiu dažniausiai priskiriami valdymo sistemai, kadangi šie duomenys teikia informaciją apie raketos judėjimą, o ne jos padėtį taikinio atžvilgiu.

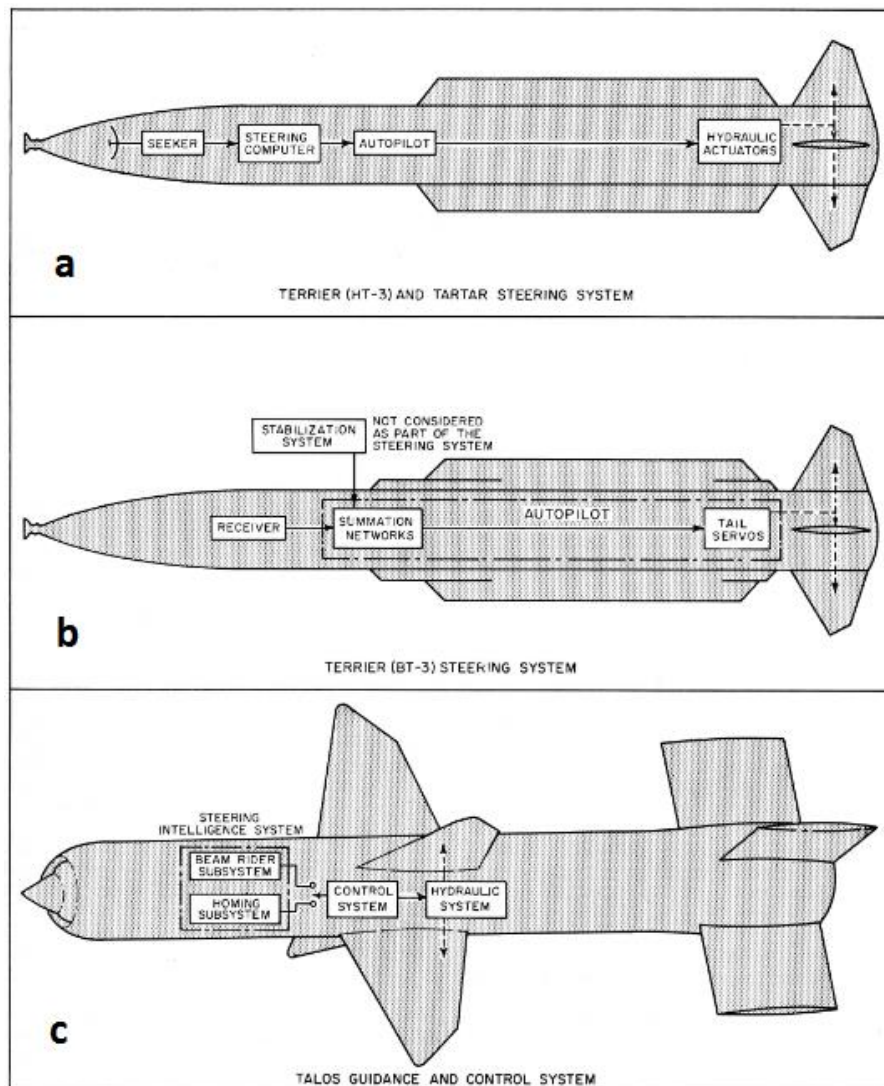
Orientavimosi sistema skirta taikinio padėčiai nustatyti ir skridimo trajektorijai sudaryti. Šios sistemos gali remtis sekimo sistemos arba žmogaus siunčiamų radijo signalų interpretavimu. Valdymo sistema atlieka skridimo trajektorijos korekcijas. Pagal orientavimosi sistemos duomenis valdymo sistema įvertina raketos padėtį erdvėje ir naudojant sparnų valdymo pavarą reguliuoja skrydimo kryptį. Raketos valdymo sistema turi grįžtamąjį ryšį, todėl realiu laiku reaguoja į sparnų sukeltus judėjimo pokyčius ir juos pastoviai koreguoja.



1.4.1 pav. Orientavimosi ir valdymo sistemos raketoje.

1.4.2 paveikslėlyje pateiktos principinės orientavimosi ir valdymo sistemos naudojamos Tartar, Terrier ir Talos raketose. Terrier (modelis HT-3) ir Tartar raketose (1.4.2 pav. a dalis) reikiamos trajektorijos koordinatės perduodamos į valdymo kompiuterį, kuris autopiloto pagalba reguliuoja

hidraulines sparnų pavaras. Terrier (modelis BT-3) raketoje (1.4.2 pav. b dalis) sumuojami duomenys surinkti iš radijo bangomis atsiųstų signalų ir stabilizavimo sistemos. Pagal šiuos duomenis valdomos servo pavaros raketos galinėje dalyje. Šiame paveikslėlyje punktyrine linija išskirta valdymo sistema nuo orientavimosi. Talos raketose (1.4.2 pav. c dalis) naudojama radaro veikimo principu paremta sekimo sistema ir pagalbinė padėties nustatymo sistema, kurios kartu sudaro intelektualią skridimo krypties nustatymo sistemą. Šios sistemos duomenys apdorojami ir pateikiami valdymo sistemai, kuri reguliuoja hidraulines sparnų pavaras.

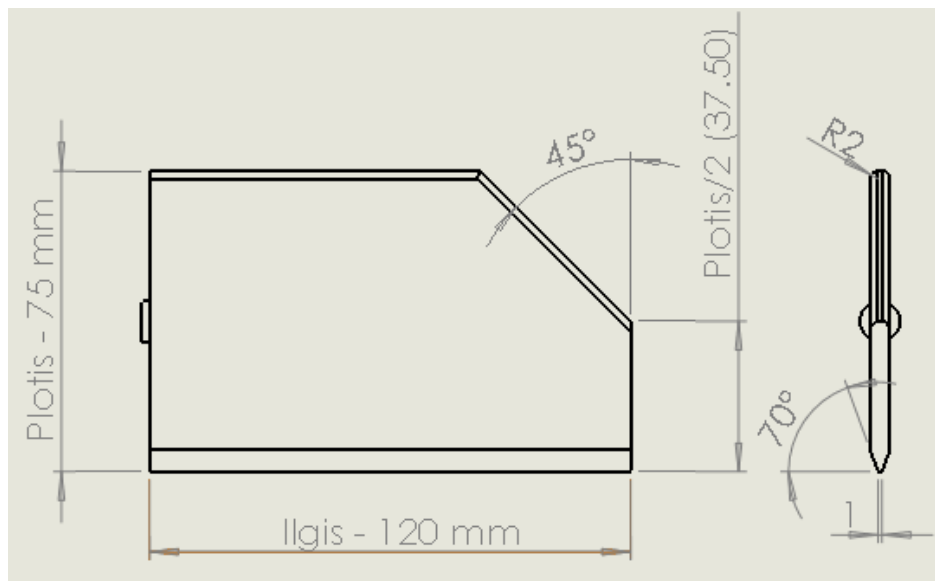


1.4.2 pav. Orientavimosi – valdymo sistemos Tartar, Terrier ir Talos raketose.

2. SISTEMOS PROJEKTAVIMAS

2.1 Aerodinaminių charakteristikų nustatymas

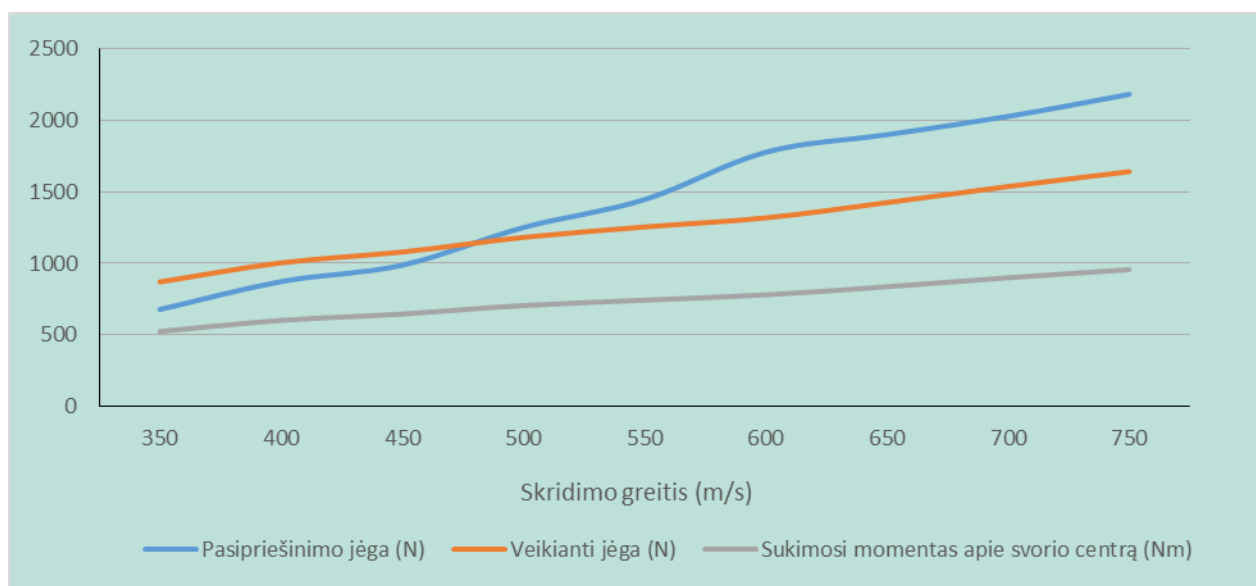
Naudojantis SolidWorks projektavimo ir analizės programa buvo sumodeliuotas raketos modelis, kurio matmenys parinkti intuityviai, be skaičiavimų, atsižvelgiant į šiuo metu naudojamų tokio tipo raketų matmenis. Šiomis analizėmis siekta nustatyti kaip oro srautas veikia raketą, kaip keičiasi ją veikiančios jėgos priklausomai nuo pagrindinių jos konstrukcinių parametru, todėl rezultatai yra skirti nustatyti tų parametru svarbai, o ne oro srauto poveikį faktiniam modeliui. Parinktas 1500 mm raketos ilgis ir 90 mm skersmuo, o jos priekyje suformuota sferinė galvutė. Visi duomenys buvo gauti atliekant atskiras „Flow Simulation“ analizes, kuriu metu buvo nustatoma pasipriešinimo jėga [Fx], jėga veikianti statmenai raketos judėjimo kryptiai [Fz], sukimosi momentas veikiantis apie raketos masės centrą [Ty] ir slėgio centro padėtis masės centro atžvilgiu [d] (2.1.1). Šios analizės keičiant tik vieną iš raketos konstrukcinių parametru. Bendri naudoti nekintantys dydžiai (jeigu nenurodyta kitaip): skridimo greitis – 600 m/s, sparnu ilgis - 120 mm, plotis - 75 mm, atstumas nuo sparnu sukimosi ašies iki raketos priekio - 200 mm, sparnu pasukimo kampas judėjimo krypties atžvilgiu - 20°. 2.1.1 paveikslėlyje pateikti pagrindiniai trapezoido formos sparnu matmenys.



2.1.1 pav. Analizių metu naudojamų sparnu pagrindiniai matmenys.

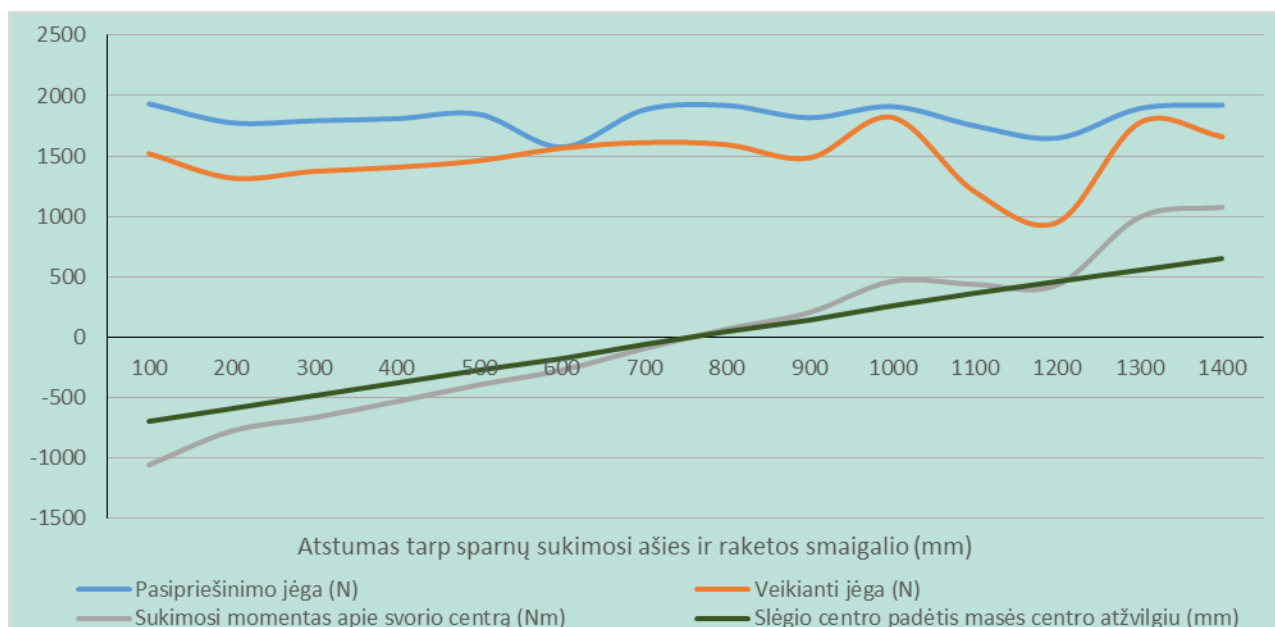
$$P_x = \frac{T_y}{F_z} \cdot 10^3 \text{ (m)} \quad (2.1.1)$$

Daugumos mažo skrydžio nuotolio raketų vidutinis greitis būna 1,5 – 2 kartus didesnis nei garso greitis, t.y. 450 – 700 m/s, todėl prieš atliekant geometrijos įtakos analizės sudarytas skrydžio greičio įtakos grafikas (2.1.2 pav.). Šiame grafike matosi, kad didėjant raketos greičiui, ją veikianti pasipriešinimo jėga didėja labiau nei sparnų sukuriama kėlimo jėga ar sukimo momentas. Didesniu greičiu skrendanti raketa yra stabilesnė, sunkiau pakeisti jos skrydimo kryptį.



2.1.2 pav. Raketą veikiančių jėgų priklausomybė nuo jos greičio.

Teoriškai, sparnų sukuriama jėga, sukimosi momentas ir slėgio centro padėtis priklauso nuo to, kurioje raketos vietoje išdėstyti valdymo sparnai. Keičiant jų sukimosi ašies atstumą nuo raketos priekio buvo gautas sekantis grafikas (2.1.3 pav.).

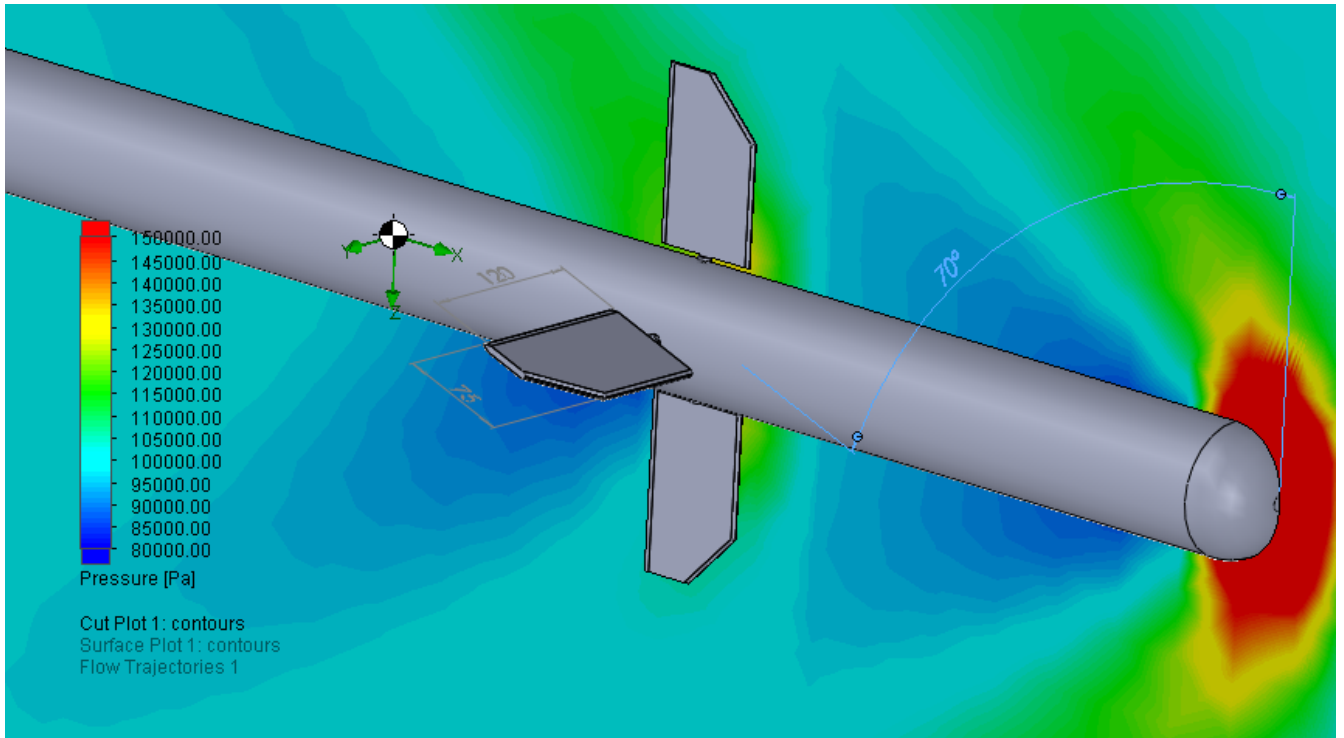


2.1.3 pav. Raketą veikiančios jėgos, sukimosi momentas ir slėgio centras priklausomai nuo valdomų sparnų padėties.

Pastaruoju grafiku atskleidžiami pagrindiniai raketos valdymo ypatumai priklausantys nuo jos konstrukcijos. Galima pastebėti, kad sparnuotės padėtis beveik neturi įtakos oro srauto pasipriešinimo jėgai, o ją statmenai veikianti F_z jėga nežymiai didėja sparnus atitraukus nuo raketos nosies. Oro dalelės atsimušusios nuo sferinio raketos priekio juda nuo raketos korpuso į šalis, todėl sukuria žemo slėgio zoną apie ją bei valdymo sparnus. Tuomet žemo slėgio veikiamos dalelės pradeda užpildyti tuštumą ir juda link raketos korpuso, o susidaręs vakuumas mažėja link raketos uodegos (2.1.4 pav.). Grafiniame absoliutinio slėgio vaizdo pradžioje matome, kad sparnuotę tvirtinant pačiame raketos priekyje galima gauti didesnę Z kryptimi veikiančią jėga, nes oro srauto dalelės dar nebūna taip toli atitrūkusios, kad sudarytų žemo slėgio sritį aplink raketos sparnuotę. Tiesa, ši padėtis konstrukciniu požiūriu nėra tinkama, kadangi raketos priekyje montuojama kovinė galvutė. Taip pat valdomų sparnų sistemą labai sunku padaryti raketos uodegoje, ypač, jei raketa varoma kietuoju kuru.

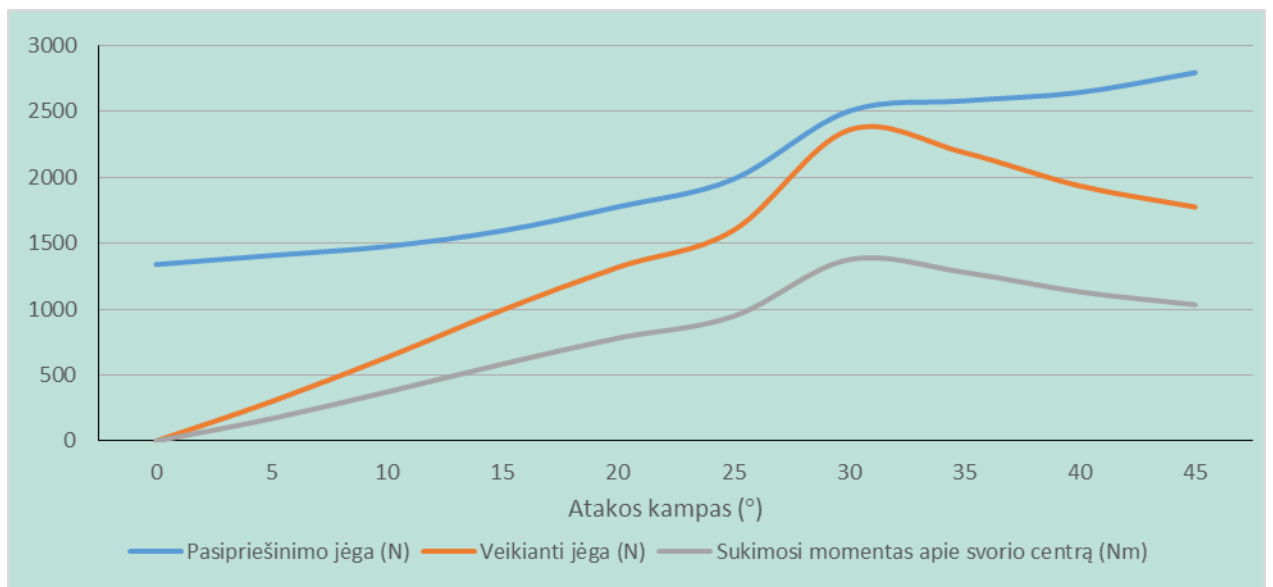
Kaip ir tikėtasi, sukimo momentas didžiausias, kai sparnuotė tvirtinama raketos priekyje arba uodegoje. Kadangi didžioji dalis jėgos, sukurtos slėgių skirtumu, veikia sparnelių sieneles, tai slėgio centras (visų veikiančių jėgų atstojamosios veikimo taškas) yra toje raketos pusėje, kurioje yra sparnuotė. Taigi raketos su valdoma sparnuote priekyje arba gale lengviau (su mažesniu sparnų plotu ar pasukimo kampų) pasisuka apie savo masės centrą, tuo tarpu, kai sparnuotė valdoma ties raketos masės centru, raketa ne sukasi, o juda tiesiškai. Raketos su tokia konstrukcija greičiau pajuda iš savo

trajektorijos, tačiau nėra tokios manevringos didesniame nuotolyje kaip sukamos. Ypatingai dideliu manevringumu pasižymi raketos su sparnuote priekyje, kadangi jų slėgio centras yra priekyje masės centro.

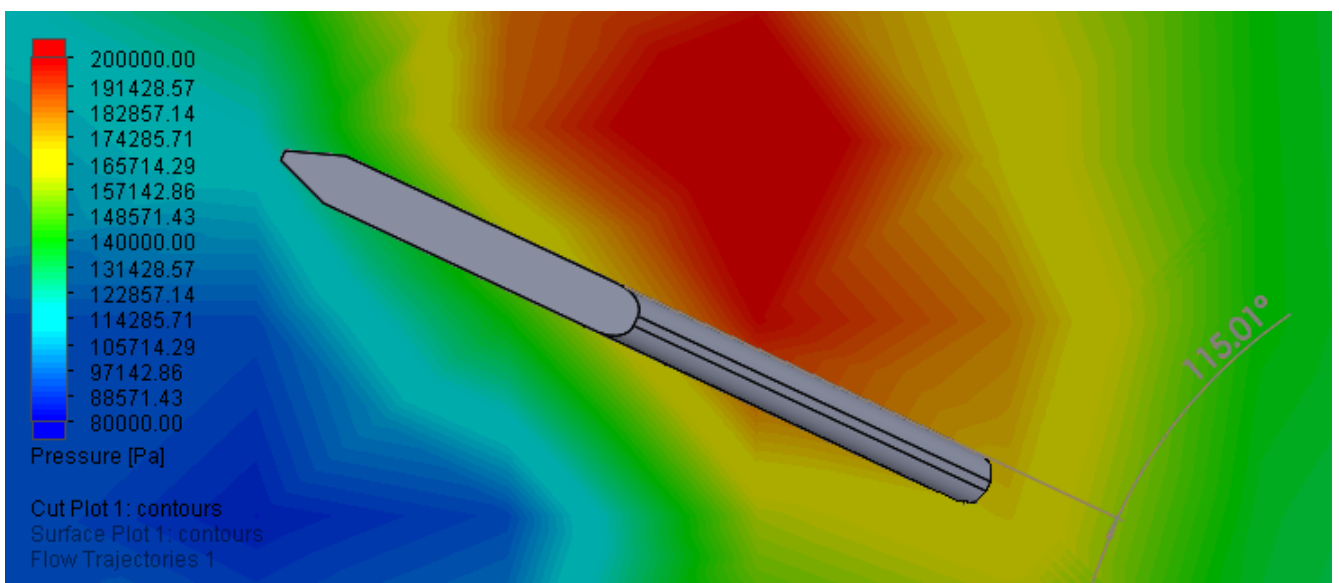


2.1.4 pav. Slėgių skirtumo susidarymas aplink raketos nosį ir jos sparnuotę.

Lėktuvuose naudojami nesimetriško profilio sparnai, nes jų tikslas visada veikti viena kryptimi – kelti į viršų. Toks sparnų poveikis atsiranda dėl skirtingo oro aptekėjimo kelio, todėl skiriasi oro srauto greitis virš sparno ir po juo – susidaro skirtingo slėgio zonos. Tokių sparnų efektyvumas didėja iki pasiekia 18 – 20 ° „atakos“ kampą ir pradeda mažėti. Kadangi raketos valdomos į visas puses, tai jose naudojama simetriška sparnuotė. Sekančiame bandyme buvo patikrinta ar raketų sparnuotė taip pat efektyvi tik iki 20°. Raketą veikiančių jėgų priklausomybė nuo „atakos“ kampo pateikta 2.1.5 paveikslėlyje. Grafike matome, kad raketos sparnuotės veiksmingas pasukimo kampas yra iki maždaug 30°. Toliau didinant pasukimo kampą netik labiau stabdoma raketa, bet ir ją veikiantis sukimo momentas mažėja. Žinoma, tokiu kampu raketa bus valdoma itin retai (varikliams reikia daugiau laiko pasisukti tokiu kampu), todėl sparnų geometrijos analizės atliktos sparnus pasukant iki 20°. Skirtingų slėgių susidarymas pateiktas 2.1.6 paveikslėlyje (absoliutinio slėgio grafinio vaizdo pjūvis kerta sparną ties jo viduriu).

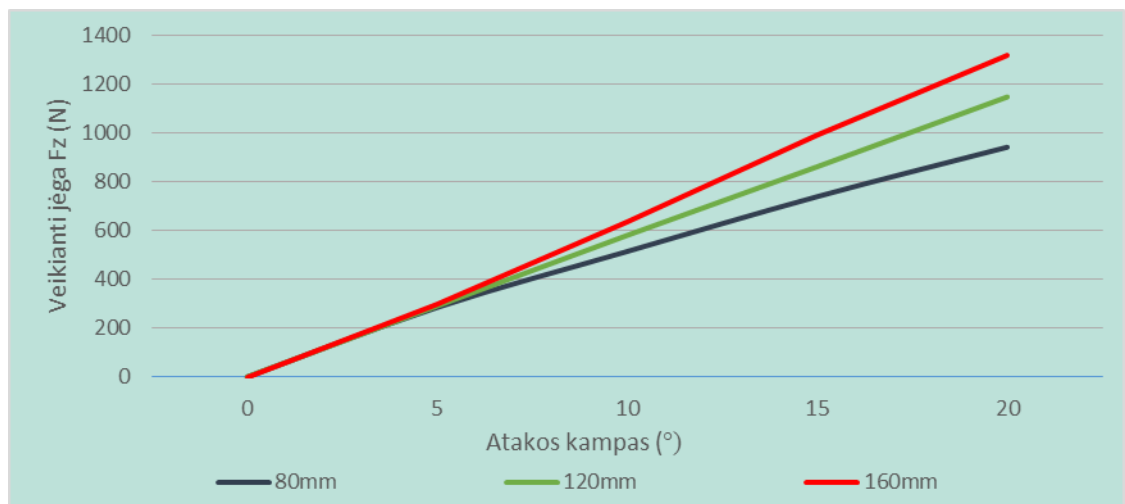


2.1.5 pav. Raketą veikiančių jėgų priklausomybė nuo sparnuotės pasukimo kampo.

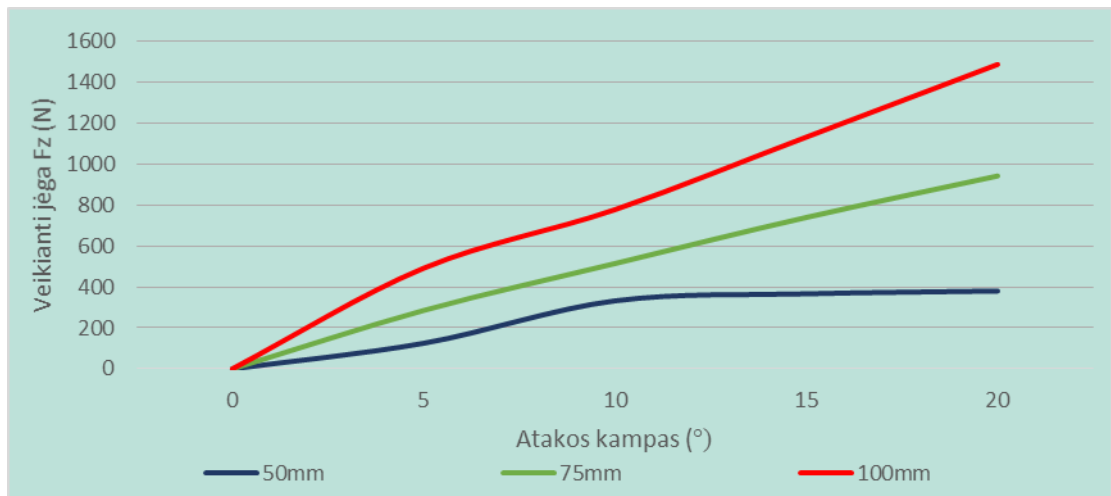


2.1.6 pav. Skirtingo slėgio zonos oro srautui aptekant raketos sparną (pasukimo kampas 25°).

Sparnų geometrijos parinkimui buvo atliktos analizės, kuriose buvo keičiami: sparnų ilgiai, sparnų pločiai ir jų pasukimo kampas. Keičiant sparnų ilgį gautas veikiančios jėgos F_z grafikas pateiktas 2.1.7 paveikslėlyje, o keičiant plotį – jėgos grafikas pateiktas 2.1.8 paveikslėlyje.



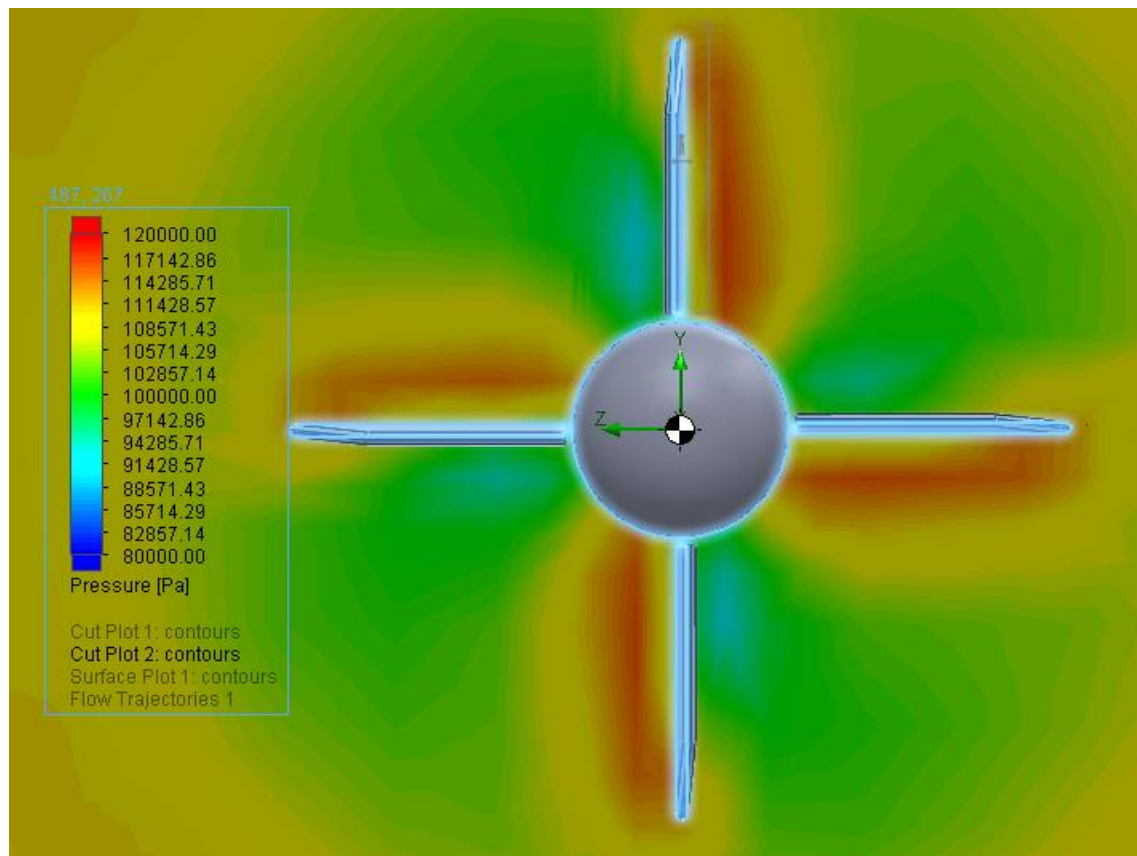
2.1.7 pav. Skirtingų sparnų ilgių sukuriama Fz jėgos priklausomybė nuo pasukimo kampo.



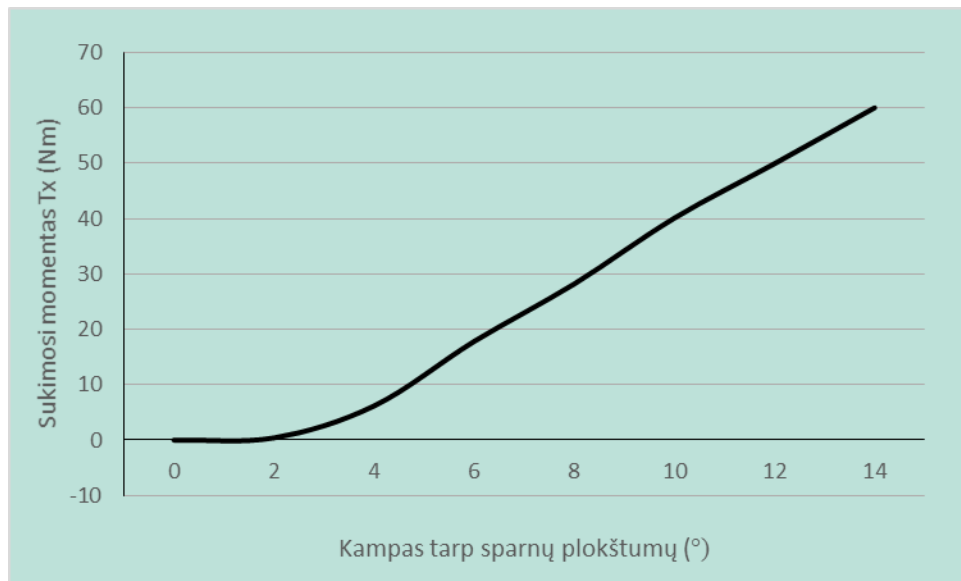
2.1.8 pav. Skirtingų sparnų pločių sukuriama Fz jėgos priklausomybė nuo pasukimo kampo.

Keičiant sparnų geometriją pastebėta, kad jų ilgis raketos valdymui turi didesnę įtaką, kai yra didesni pasukimo kampai. Esant mažam atakos kampui (iki 5°) žymūs jėgos pasikeitimai nepastebėti. Oro srautas į platesnius ar siauresnius sparnus veikia šiek tiek kitaip – didesnės Fz jėgos susidarymas pastebimas net tuomet, kai atakos kampas mažas. Taip pat reiktų atkreipti dėmesį, kad siauri sparnai praranda savo efektyvumą, kai pasukimo kampas viršija 10° . Pagal šiuos bandymus nustatyta, kad didinti sparnų ilgį yra neracionalu, kadangi menkas veikiančios jėgos Fz padidėjimas neatperka padidėjusios pasipriešinimo jėgos Fx (sparnai turi ilgesnę briauną, kuri priešinasi judėjimui) ir susidaro didesni sparno lenkimo momentai apie jo ašį (didesnis veikiančios išskirstyto slėgio jėgos atstojamosios petis).

Dėl raketos netobulos simetrijos ir variklio jėgos vektoriaus nelygiagretumo X ašies atžvilgiu, oro srauto netolygumo, raketa gali pradėti sukintis apie X ašį arba būti pasisukus taip, kad jos navigacinei ir valdymo sistemai būtų sunku veikti (keičiasi Y ir Z ašių padėtis laisvojo kritimo pagreičio ir horizonto atžvilgiu). Raketą pasukti ar sustabdyti jos sukimąsi galima naudojant skirtingą tos pačios ašies sparnų pasukimo kampą, kadangi dėl skirtingo dydžio veikiančių Fz jėgų atsiranda sukimosi momentas apie X ašį. Sukimosi momentui nustatyti buvo atliktos analizės su skirtingais sparnų pasukimo kampais, tačiau šiuo atveju buvo pasukama ne vienos ašies sparnų pora, bet visi 4 sparnai (vienodais kampais su X ašimi). Skirtingų slėgių susidarymą aplink raketos sparnuotę, kai jų pasukimo kampai yra po 6° galima pamatyti 2.1.9 pav. 2.1.10 paveikslėlyje pateiktas grafikas, kuriame matome, kokia yra sukimosi momento Tx priklausomybė nuo kampo tarp tos pačios ašies sparnų plokštumų (grafike pateiktas dvigubai didesnis kampas nei yra kampas tarp sparnų ir X ašies). Pagal šį grafiką galima spręsti, kad tuomet, kai kampas tarp sparnų plokštumų yra iki 2°, raketos neveikia sukimosi momentas Tx (tikslus momentas, kai kampas lygus 2° - 0,417 Nm), tačiau nuo maždaug 2° sukimosi momentas didėja tiesiškai ir tiesiogiai priklauso nuo pasukimo kampų skirtumo.



2.1.9 pav. Absoliutinio slėgio grafikas, kai sparnai pasukti į priešingas puses po 6°.



2.1.10 pav. Susidarančio Tx sukimosi momento priklausomybė nuo kampo tarp sparnų plokštumų.

2.2 Kinematinių ir dinaminių parametrų apskaičiavimas

Kinematiniai raketos parametrai priklauso nuo jos masės, inercijos momento ir ją veikiančių jėgų bei sukimosi momentų. Dėl aptakančio oro srauto susidariusios aerodinaminės jėgos ir momentai raketą stabdo, suka apie jos ašis ir stumia vertikaliai bei horizontaliai jos ašimis. Raketa yra 6 laisvės laipsnių objektas, todėl reikia sekti jos judesius visomis kryptimis.

Visų pima reiktų nustatyti jos greičio priklausomybę nuo laiko. Tai galima nustatyti žinant jos masę (m), variklio sukuriamos jėgos priklausomybę nuo laiko ($F_v(t)$) ir pasipriešinimo jėgą nuo jos skrydžio greičio ($F_p(V)$). Raketos pagreitis apskaičiuojamas pagal 2.2.1 formulę. Žinant raketos pagreitį ir jį integruojant iš skrydžio laiko galima rasti jos greitį (v). Kadangi tuomet, kai raketos greitis $v \neq 0$, oro srauto pasipriešinimo jėga $F_p(v)$ taip pat nelygi nuliui. Tuomet raketos pagreitis išilgine ašimi bus apskaičiuojamas 2.2.2 formule.

$$a(t) = \frac{F_v(t)}{m} \quad (2.2.1)$$

$$a(t) = \frac{F_v(t) - F_p(v)}{m} \quad (2.2.2)$$

Kadangi raketos valdymui naujamas akselerometras, o jos variklio duomenys nėra visada vienodi, pasipriešinimo jėga priklauso nuo oro parametrų, tai jos pagreitį tikslinga nustatyti būtent juo. Jos judėjimas y ir z ašimis priklauso nuo jų veikiančių jėgų atstojamosios tomis ašimis. Tuomet jos pagreitis tomis ašimis gali būti apskaičiuojamas 2.2.3 ir 2.2.4 formulėmis.

$$a_y = \frac{F_y}{m} \quad (2.2.3)$$

$$a_z = \frac{F_z}{m} \quad (2.2.4)$$

Pagreičio nustatymas tokiu būdu nėra reikalingas skrydžio metu, kadangi tai atliekama akselerometru (atsižvelgiant į laisvojo kritimo pagreičio dedamąją), tačiau projektuojant valdymo sistemą galima nustatyti, kokie bus kinematiniai raketos parametrai naudojant tam tikrą jos konstrukciją ir geometriją.

Raketos sukimasis apie jos ašis apskaičiuojamas žinant jų veikiančius sukimosi momentus (T) ir inercijos momentus (I). Skrydžio metu, tai atliekama giroskopu, tačiau projektavimo stadijoje svarbu žinoti kaip greitai raketa galės pakeisti kryptį. Tuomet sukimosi pagreitis apie kiekvieną iš jos ašių apskaičiuojamas pagal 2.2.5 formulę.

$$\alpha = \frac{T}{I} \quad (2.2.5)$$

Žinant raketos juėjimo pagreičius integravimo būdu randami jos greičiai ir padėtis. Ypač svarbu žinoti jos orientaciją horizonto atžvilgiu (polinkio kampą θ) ir pasisukimo kampą apie išilginę ašį (posvyrio kampą γ). Kadangi valdoma raketa dažniausiai naujama sekant judantį objektą, tai jos pokrypio kampą ψ galima laikyti lygų 0 (raketos išilginė ašis visada yra jos xy plokštumoje), svarbus tik jos sukimosi greitis šia ašimi.

Taikant šią metodiką yra suprastinamas skaičiavimas, kadangi matuojamas kūnas tampa 5 laisvės laipsnių kūnu. Tuomet žinant sukimosi greičius apie X ir Z ašis galima apskaičiuoti orientavimosi kampus. Polinkio kampas apskaičiuojamas 2.2.6 formule, o posvyrio - 2.2.7-ąja. 2.2.7-oji formulė tinkama naudoti tik tuomet, kai $\sin(\theta) > 0$ (raketos nosis ir išilginė ašis yra nukreiptos į viršų), kitu atveju turi būti naudojama 2.2.8 formulė, nes keičiasi sukimosi kryptis apie Y ašį.

$$\theta = \theta_0 + [\omega_C \cdot \cos(\gamma_0) + \omega_B \cdot (\sin(\gamma_0) - \sin(\theta_0)) - \omega_A \cdot \cos(\theta_0)] \cdot (t - t_0) \quad (6)$$

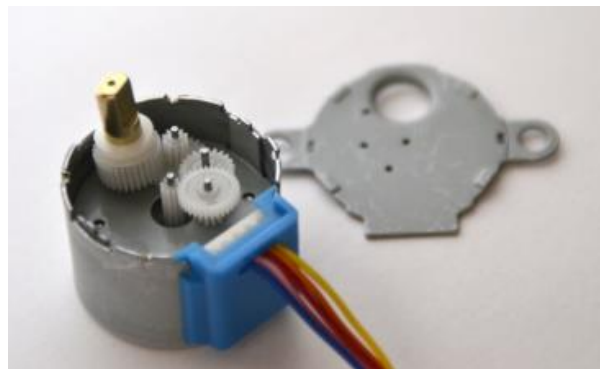
$$\gamma = \gamma_0 + [\omega_A \cdot \cos(\theta_0) + \omega_B \cdot (\sin(\theta_0) - \sin(\gamma_0)) - \omega_C \cdot \sin(\gamma_0)] \cdot (t - t_0) \quad (7)$$

$$\gamma = \gamma_0 + [\omega_A \cdot \cos(\theta_0) + \omega_B \cdot (\sin(\theta_0) - \sin(\gamma_0)) + \omega_C \cdot \sin(\gamma_0)] \cdot (t - t_0) \quad (8)$$

2.2.6, 2.2.7 ir 2.2.8 formulėse ω žymimi sukimosi greičiai A, B ir C ašimis, kurie nustatomi groskopu. Kintamieji su indeksu 0 žymi parametru pradines reikšmes (apskaičiuotas ankstesnio ciklo metu). Kampo pokytis gaunamas integruojant sukimosi greičius iš laiko tarp matavimo ciklų ($t - t_0$).

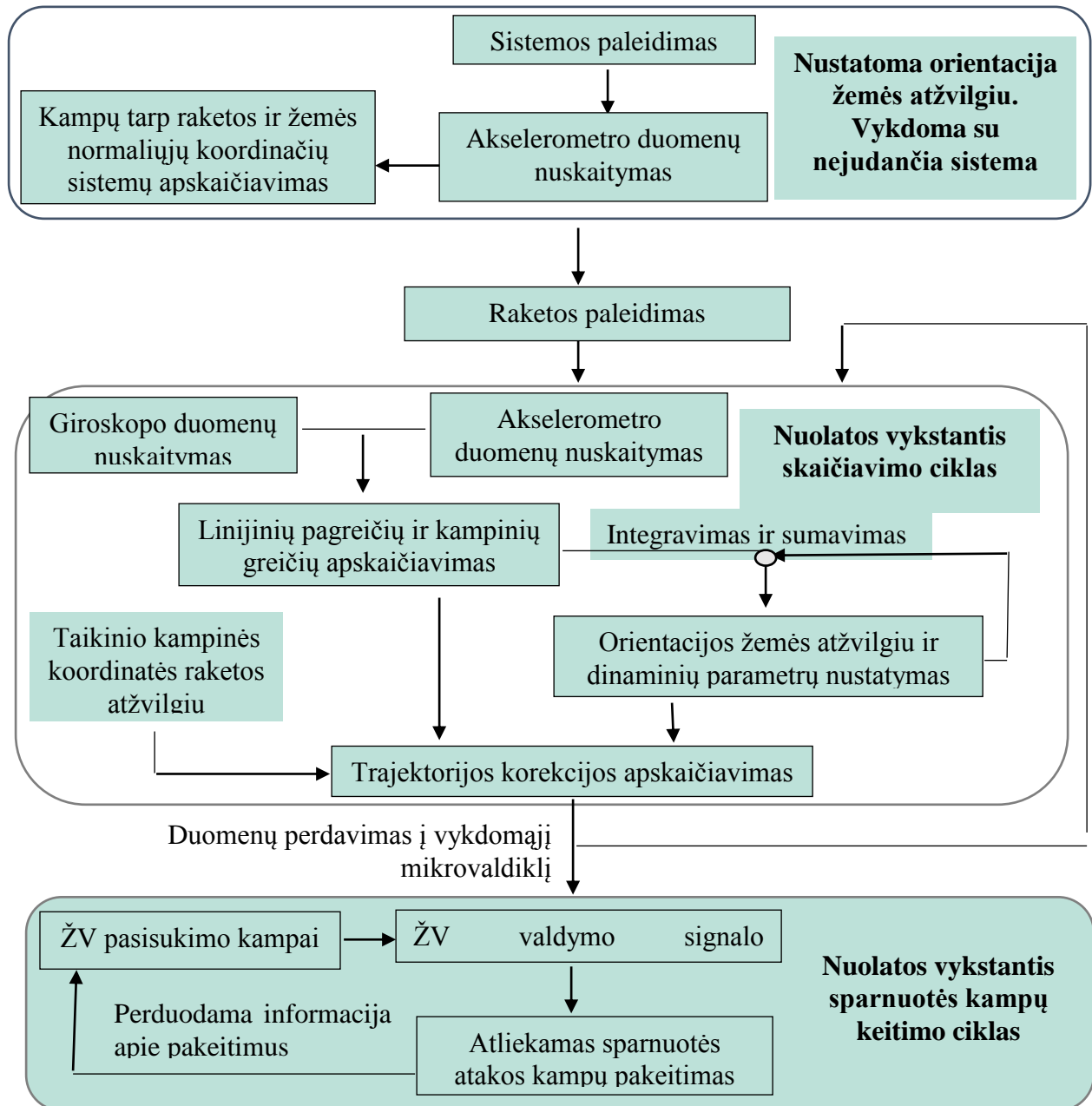
2.3 Vykdikliai

Vykdikliais parenkami 28BYJ-48 žingsniniai varikliai turintys 4 pakopų reduktorių (2.3.1 pav.). Tokio tipo varikliai pasirinkti dėl mažų gabaritinių matmenų ir santykinai didelio sukimosi momento (34 mNm). Šių variklių viduje įmontuotas reduktorius, kurio perdavimo santykis 64. Dėl šios priežasties jų sukimosi greitis yra žymiai mažesnis, tačiau visiškai pakankamas, nes bus atliekami posūkiai tik iki 30° , reikalingos labai nedidelės korekcijos. Variklio sukimosi momentą reiktų parinkti bent 2-3 kartus didesnę nei reikalingas, tačiau sukimosi ašies padėtį projektuojant sparne atsirandančių aerodinaminių jėgų atstojamosios veikimo linijoje, galima rasti pusiausvyros padėtį, kai veikiančios jėgos nesukuria sparno sukimosi momento apie savo ašį ir tik lenkia jį. Tuomet reikalingas variklio momentas yra minimalus.



2.3.1 pav. 28BYJ-48 ŽV vidus

2.4 Valdymo sistemos veikimo blokinės schemos sudarymas



2.2.1 pav. Valdymo sistemos blokinė schema

2.2.1 paveikslėlyje pateikta projektuojamos sistemos veikimo struktūrograma, kurioje matome jos suskirtymą į 3 dalis: orientacijos nustatymo, skaičiavimo ir valdymo. Reiktų atkreipti dėmesį, kad skaičiavimo ir valdymo dalys yra atskirtos (be grįžtamojo ryšio). Toks veikimo principas, kai skaičiavimo modulis nepriklauso nuo vykdomojo, laidžie išvengti papildomų trikdžių dėl vykdomojo modulio užimtumo.

3. ELEKTRONINĖS VALDYMO SISTEMOS KŪRIMAS IR TYRIMAS

3.1 MEMS jutikliai dinaminių ir padėties parametrų nustatymui

Akselerometrai – tai matavimo prietaisai, kurie teikia informaciją apie jį veikiančias jėgas, tokiu būdu leisdami nustatyti jų kinematinis duomenis. Nepriklausomai nuo jo tipo, akselerometras iš esmės susideda iš tampriai įtvirtinto svarelio, kurio padėtis korpuso atžvilgiu keičiasi dėl jį veikiančių jėgų. Kadangi akselerometras parodo jį veikiančių jėgų dydį, o ne tik jį veikiančius pagreičius, tai tiesiogiai spręsti apie jo judėjimo parametrus negalima. Pavyzdžiui objektui su įmontuotu akselerometru būnant rimties būsenoje bus gaunami duomenys, kad objektas juda laisvojo kritimo pagreičiu į viršų, nes bus išmatuota svarelio sunkio jėgos atstojamoji. Taip pat jei akselerometras įmontuotas ne objekto svorio centre, tai jam sukantis apie savo ašį akselerometras rodys pastovų greitėjimą ašimi nuo sukimosi ašies, nes svarelį veiks išcentrinis pagreitis. Kadangi piezoelektriniuose akselerometruose signalas sukuriamas keičiantis piezo elemento deformavimo metu todėl jais galima matuoti tik didesnio kaip 0,5Hz dažnio virpesius. Tokio tipo akselerometrai netinkami pastovaus pagreičio matavimui, todėl skrydžio kontrolei reikalingas talpinis arba piezorezistorinis akselerometras.

Giroskopai – tai prietaisai skirti matuoti arba palaikyti tam tikrą objekto orientaciją erdvėje. Šiais jutikliais nustatomi objekto pasisukimo kampai su pradine pozicija. Jie naudojami įvairiose sistemose objektui stebėti, kai reikia žinoti objekto judėjimo kryptį erdvėje: lėktuvuose, sraigtasparniuose, raketose ir t.t. Kadangi akselerometru nustatomi tik objekto judėjimo pagreičiai visose ašyse, be giroskopų negalima nustatyti tų ašių krypties, todėl objekto valdymas atviroje erdvėje praktiškai neįmanomas. GPS imtuvai gali nustatyti objekto judėjimo kryptį, tačiau be giroskopo negalima nustatyti judėjimo krypties realiu laiku. Pats mažiausias ir dažniausiai naudojamas giroskopo tipas – CVG (anglų k. *Coriolis Vibratory Gyroscopes*). Tai MEMS turintis vibruojantį piezo elementą.

Skrendančio kūno greitis nebus tiksliai nustatomas naudojantis akselerometru. Greičio nustatymui yra naudojamas Pito vamzdelis. Jame greitis išskaičiuojamas iš dinaminio slėgio taikant Bernulio lygtį. Slėgiui nustatyti yra prikurta įvairaus tipo ir veikimo MEMS barometru, tačiau šiame darbe jų veikimas netiriamas.

Taip pat navigacijai, priklausomai nuo jos reikalavimų (pagreičių dydžio, skrydžio nuotolio, galimybės naudoti stabilią atskaitos sistemą) naudojami GPS imtuvai, radiolokacija, kompasai ir t.t.

Kadangi praktiškai visuose autopilotuose būtina naudoti akcelerometrus ir giroskopus, šiame darbe apsiribojama būtent jų tyrimu.

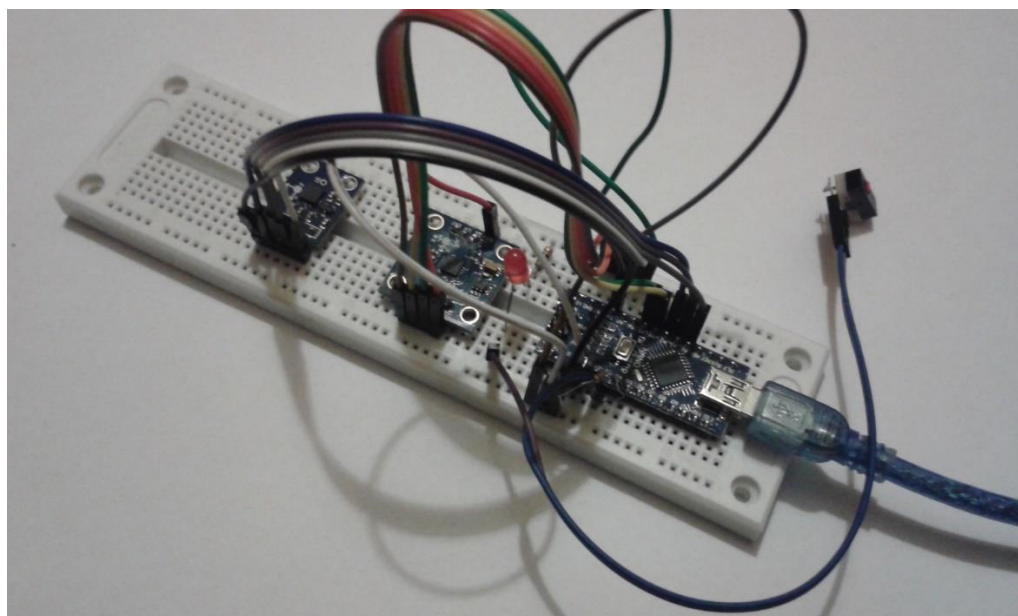
3.2 Jutiklių tyrimas. Aparatūra, metodika ir atlikimo tvarka

Tyrimė siekiama susipažinti su analoginio akcelerometro ir skaitmeninio giroskopo naudojimu. Nors analoginio akcelerometro išėjimo signalų stebėjimui galima naudoti ir osciloskopą, tačiau jų apdorojimui ir giroskopo informacijai nuskaityti paprasčiau naudoti mikroprocesorių (3.2.1 pav.) susietą su kompiuteriu.



3.2.1 pav. DCCDuino Nano programatorius su ATmega328P-PU mikroprocesoriumi.

Tyrimų metu sukonstruotas tyrimų stendas pavaizduotas 3.2.2 paveikslėlyje. Jame sumontuotas mikroprocesorius, jutikliai ir mygtukas atskaitos sistemos nustatymui. Procesorius užprogramuojamas jutiklių informacijai nuskaityti ir pateikti ją kompiuteryje. Vėliau ši informacija naudojama tyrimo duomenis kaupti ir analizuoti. Kadangi dėl ne itin tikslių matavimo sąlygų ir prastos kokybės jutikliai teikia informaciją su nukrypimais, jų eliminavimui reikalingas papildomas kalibravimas. Tai atlieka papildomas mygtukas. Jis panaudojamas, kai norima pradėti matavimą ir yra užtikrintas stendo stabilumas. Jo nuspaudimo metu programa sustabdoma. Tuomet paskutiniai jutiklių duomenys panaudojami pastovaus nukrypimo eliminavimui, o kaupiami duomenys (pvz. pasisukimo kampas apskaičiuotas iš sukimosi greičio) prilyginami nuliui. Detalesnis paaiškinimas pateiktas programų koduose (1-as ir 2-as priedai). Giroskopo ir akcelerometro tyrimai atlikti atskirai dėl galimų papildomų nenumatytų paklaidų.

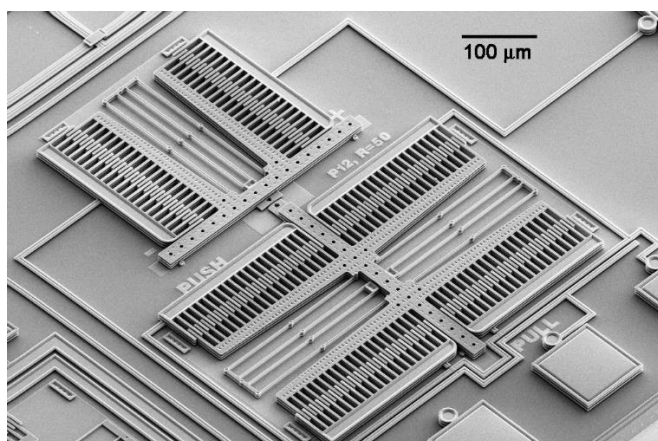


3.2.2 pav. Surinktas tyrimo stendas.

3.3 Analoginio akselerometro tyrimas

3.3.1 MEMS talpinis akselerometras ADXL335

Talpiniai akselerometrai geriausiai tinka žemo dažnio virpesių stebėjimui. Kaip ir kiti akselerometrai, jie taip pat turi bent vieną inercinę masę pritvirtintą prie korpuso, o prie masės tvirtinami silicio mikro jutikliai (3.3.1.1 pav.). Inercinę masę veikiant tam tikru pagreičiu deformuojasi jos lankstūs laikikliai. Keičiantis masės padėčiai jutikliuose keičiasi kaupiamas elektros krūvis, kadangi pasikeičia persiklojimo plotas (panašiai kaip ir radijo imtuvuose). Dėl itin mažų jutiklio matmenų gaunamas labai mažas kaupiamasis krūvis. Signalo apdorojimui (elektrinės talpos pavertimui įtampa bei jos stiprinimui) naudojamos įvairios jungimo schemos su operaciniais stiprintuvais. Tiriama talpinio akselerometro modulis pateiktas (3.3.1.2 pav.).

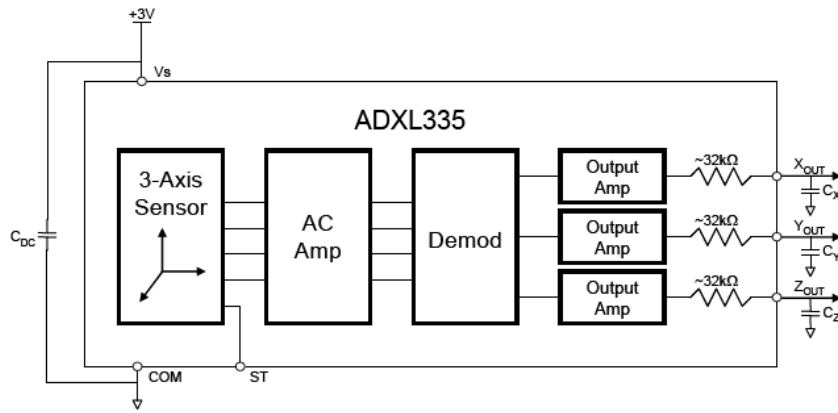


3.3.1.1 pav. Talpinis akcelerometras.



3.3.1.2 pav. Analoginio akcelerometro modulis GY-61 (ADXL335).

Tiriamą akcelerometro duomenims ir veikimui patikrinti buvo surinkta informacija, kurią pateikia jutiklio gamintojas. 3.3.1.3 paveikslėlyje pateikta jutiklio su kartu integruotu stiprintuvu funkcinė blokų diagrama. Jo maitinimo įtampa 3V, tačiau pačiame akcelerometro modulyje yra įmontuotas tranzistorius, kuris tiekiamą 4,7V įtampą (tokia yra tikroji mikroprocesoriaus tiekiamą įtampa, kai jo maitinimas pajungtas nuo USB jungties) pakeičia į $3V \pm 0,06V$ įtampą. Svarbiausi šio jutiklio duomenys pateikti 3.3.1.1 lentelėje.



3.3.1.3 pav. ADXL335 funkcinė blokų diagrama.

3.3.1.1 lentelė. Svarbiausi ADXL335 duomenys.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT					
Measurement Range	Each axis	±3	±3.6		<i>g</i>
Nonlinearity	% of full scale		±0.3		%
Package Alignment Error			±1		Degrees
Interaxis Alignment Error			±0.1		Degrees
Cross Axis Sensitivity ¹			±1		%
SENSITIVITY (RATIOMETRIC)²					
Sensitivity at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	Each axis V _S = 3 V	270	300	330	mV/ <i>g</i>
Sensitivity Change Due to Temperature ³	V _S = 3 V		±0.01		%/°C
ZERO <i>g</i> BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)					
0 <i>g</i> Voltage at X _{OUT} , Y _{OUT}	V _S = 3 V	1.35	1.5	1.65	V
0 <i>g</i> Voltage at Z _{OUT}	V _S = 3 V	1.2	1.5	1.8	V
0 <i>g</i> Offset vs. Temperature			±1		mg/°C

3.3.2 Tyrimas ir gauti rezultatai

Iš pradžių reikia sukalibruoti ir patikrinti gamintojo teikiamą informaciją bei išsiaiškinti ar jutiklis nėra brokuotas. Jutiklis buvo pakreipiamas visomis kryptimis ieškant didžiausių bei mažiausių signalo reikšmių. Kadangi akselerometrą stabilioje būsenoje veikia tik laisvojo kritimo pagreitis, tai pagal signalo dydį buvo nustatytas jautris bei signalo įtampa kai akselerometras yra nesvarumo būsenoje.

Išmatuotos reikšmės:

$$x_{\max} := 42\epsilon \quad y_{\max} := 427 \quad z_{\max} := 437$$

$$x_{\min} := 28\zeta \quad y_{\min} := 281 \quad z_{\min} := 29\epsilon$$

Kadangi $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, tai 1 m/s^2 signalo dydis bus (versti į įtampa nėra prasmės):

$$x_m := \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2 \cdot g} = 7.342 \quad y_m := \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2 \cdot g} = 7.444 \quad z_m := \frac{z_{\max} - z_{\min}}{2 \cdot g} = 7.24$$

Tuomet patikrinama ar eksperimentiškai išmatuotas jautris toks kaip pateiktas gamintojo (gamintojas nurodo $300\text{mV} \pm 30\text{mV}$ jautrį):

$$x_s := \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} = 72 \quad y_s := \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} = 73 \quad z_s := \frac{z_{\max} - z_{\min}}{2} = 71$$

$$\frac{72}{1024} \cdot 4.7 = 0.33 \frac{\text{V}}{\text{g}} \quad \frac{73}{1024} \cdot 4.7 = 0.335 \frac{\text{V}}{\text{g}} \quad \frac{71}{1024} \cdot 4.7 = 0.326 \frac{\text{V}}{\text{g}}$$

Tolimesniame darbe reikia žinoti signalų reikšmes, kurios yra jutiklo neveikiant jokiems pagreičiams. Šiuos duomenis taip pat palyginame su gamintojo (apie $1,5\text{V}$):

$$x_{\text{avg}} := \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} = 354 \quad y_{\text{avg}} := \frac{y_{\max} + y_{\min}}{2} = 354 \quad z_{\text{avg}} := \frac{z_{\max} + z_{\min}}{2} = 366$$

$$354 \frac{4.7\text{V}}{1024} = 1.625\text{V} \quad 354 \frac{4.7\text{V}}{1024} = 1.625\text{V} \quad 366 \frac{4.7\text{V}}{1024} = 1.68\text{V}$$

Žinant šiuos duomenis galima išvesti formulę, kuri mikroprocesoriumi išmatuotą signalo įtampą kompiuteryje pateiktų kaip pagreitį:

$$X = \frac{(x - x_{\text{avg}})}{x_m} \quad Y = \frac{(y - y_{\text{avg}})}{y_m} \quad Z = \frac{(z - z_{\text{avg}})}{z_m}$$

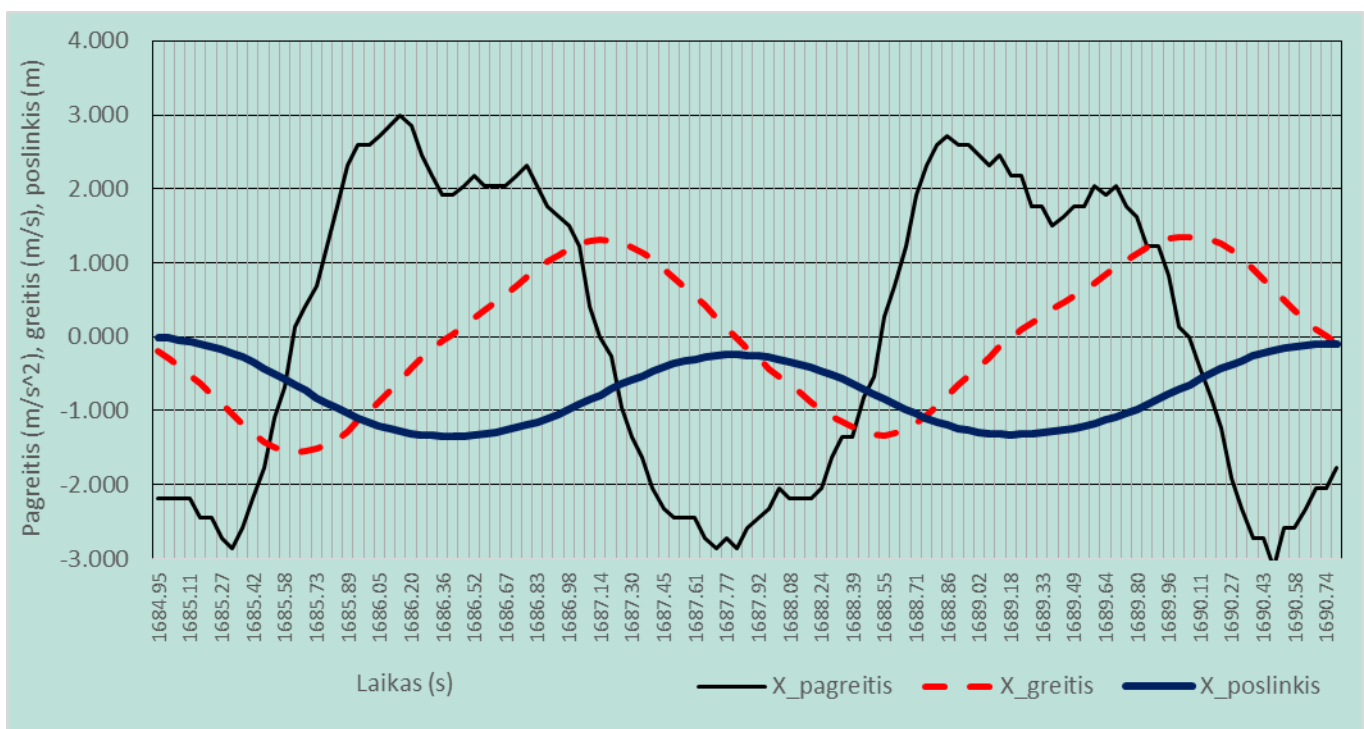
x_m , y_m ir z_m įrašomos kalibravimo metu gautos reikšmės (konstantos). x_{avg} , y_{avg} ir z_{avg} paliekami kaip kintamieji tam, kad būtų galima betkada nuimti jų 0 reikšmę.

Akselerometras po šių operacijų rodo pagreitį tačiau sunku jį patikrinti. Dukart integravus pagreitį iš laiko gauname poslinkio priklausomybę nuo laiko:

$$a = \frac{a_n + a_{n+1}}{2} \quad v_{n+1} = v_n + \int \frac{a_n + a_{n+1}}{2} dt \rightarrow v_{n+1} = t \cdot \left(\frac{a_{n+1}}{2} + \frac{a_n}{2} \right) + v_n$$

$$s_{n+1} = s_n + \int t \cdot \left(\frac{a_{n+1}}{2} + \frac{a_n}{2} \right) + v_n dt \rightarrow s_{n+1} = \frac{\left[t \cdot \left(\frac{a_{n+1}}{2} + \frac{a_n}{2} \right) + v_n \right]^2}{2 \cdot \left(\frac{a_{n+1}}{2} + \frac{a_n}{2} \right)} + s_n$$

Čia n žymi matavimo numerį, o t – laikas tarp matavimų. Tokiu būdu galime integruodami galime sužinoti akselerometro judėjimo greitį ir pozicija kiekvienu laiko momentu. Poslinkį išmatuoti žymiai lengviau, o dar paprasčiau tiesiog atlikti poslinkį ir sugrįžti atgal, tuomet poslinkis turi būti lygus 0.



3.3.2.1 pav. Pagal akselerometro duomenis sudarytas dinaminių parametų grafikas.

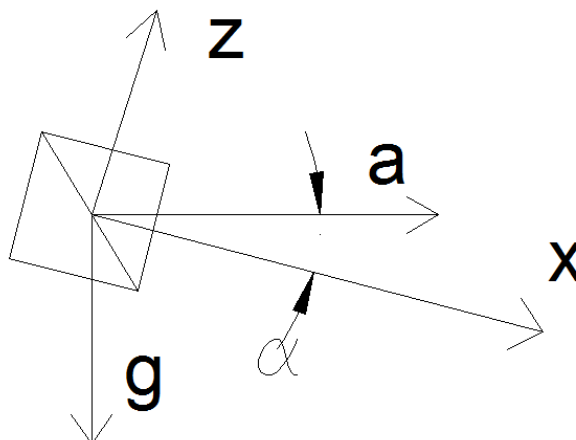
3.3.2.1 paveikslėlyje pateikti eksperimentiniai duomenys (integravimas atliktas kompiuteriu, nes tai apsunkina ir taip silpną mikroprocesorių). Grafike pateikti: išmatuoto pagreičio kitimas, apskaičiuotas

greitis ir akcelerometro pozicija. Duomenys pateikti tik x ašies, nes tik šia kryptimi tikslingai buvo judinamas matavimo standas. Tikslūs surinkti bandymo duomenys pateikti 3-iame priede.

Kadangi anksčiau išvestoje poslinkio formulėje turime daliklį, kuris gali būti lygus 0, tai ši formulė buvo pakeista naudojant tik jau apskaičiuotus greičių kintamuosius:

$$s_{n+1} = s_n + \frac{v_n + v_{n+1}}{2} \cdot t$$

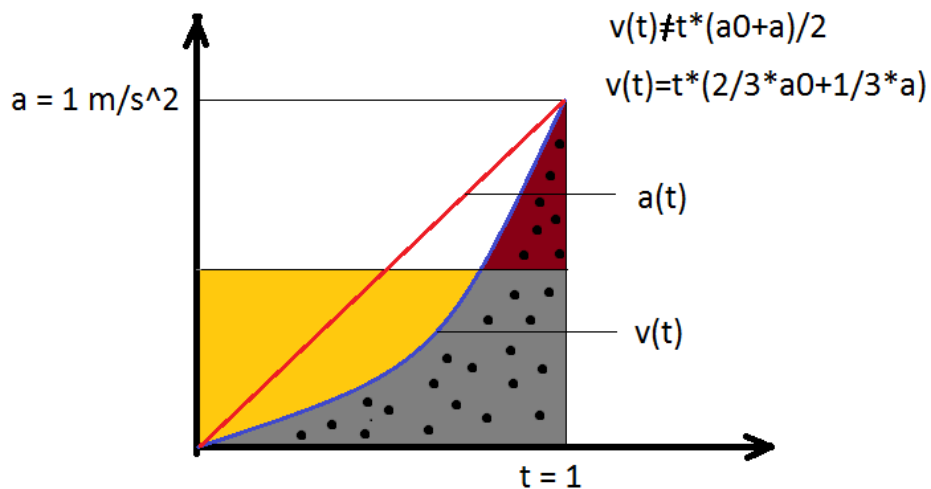
Praktinio darbo metu pastebėta, kad akcelerometro tyrimui atlikti reikia itin tikslaus matavimo būdo ir sąlygų, todėl tokiu būdu (be įtvirtinimų užtikrinančių stabilumą ir t.t.) galima tik susipažinti su jutiklio teikiamais duomenimis ir jų apdorojimu. Anksčiau pateiktą grafiką pavyko gauti tik atlikus keletą bandymų, kadangi akcelerometras dažnai susvyruodavo ar pakrypdavo ir buvo gaunami rezultatai, kurie neteikė jokios informacijos. Tam, kad būtų galima tirti akcelerometro tikslumą ar paklaidas atsirandančias dėl išorinių poveikių, visų pirma būtina sukonstruoti patikimą tyrimų standą ir užtikrinti, kad akcelerometras nepasisuktų apie kurią nors ašį. 3.3.2.2 paveikslėlyje pateiktas pavyzdys, kodėl gali būti iškraipyti duomenys. Jei atliekant matavimus matuojamo pagreičio kryptis nesutampa su akcelerometro ašimi, tai akcelerometre gausime signalą parodantį ne ta ašimi veikiančią pagreitį, veikiančio pagreičio ir laivojo kritimo pagreičio projekcijų į matuojamą ašį sumą ($x = \cos(\alpha) \cdot a + \sin(\alpha) \cdot g$). Tokie pat matavimų neatitikimai atsiras ir akcelerometrui pasisukus apie Z ašį. Tuomet matysime rezultatuose matysime judėjimą Y ašimi. Šiai problemai bent santykinai išspręsti reikalingi itin standūs bėgiai, skaičiavimuose įtraukti giroskopo duomenis arba kitaip kontroliuoti (pavyzdžiui IR lazeriu ir CCD matrica).



3.3.2.2 pav. Netinkamas matavimas dėl pasvyrimo.

Atliekant bandymus gauta ir kita naudinga informacija. Kadangi tyrime naudotas akselerometras turi gana plačias matavimo ribas ($\pm 3g$, t.y. apie $\pm 30m/s^2$), o jo analoginis signalas būna nuo 0.6V iki 2.4V, tai tokį signalą matuojant per 10 bitų keitiklį, kurio ribos 0 – 5V, gaunama didelė vienos padalos vertė – apie $0,14 m/s^2$ per 1 bitą. Tai reiškia, kad nekoreguojant signalo, neišnaudojama daugiau kaip 50% galimos raiškos. Dėl šios priežasties gaunamos gan didelės atsitiktinės paklaidos.

Taip pat papildomos paklaidos atsiranda dėl integravimo dažnio. Kuo integravimo dažnis didesnis ir tikslesnis, tuo tiksliau galima apskaičiuoti greitį ir poslinkį. 3.3.2.3 paveikslėlyje pateiktas tiesiškai kintančio pagreičio pavyzdinis grafikas ir iš jo apskaičiuojamas greitis. Tyrime buvo skaičiuojama, kad greitis yra lygus laiko tarp matavimų ir tų pagreičių vidurkio sandaugai (apačioje nudažytas plotas atskirtas horizontaliu brūkšniu), bet ištikrųjų pagreičiui kintant tiesiškai, greitis keičiasi parabolės forma todėl bus mažesnis nei skaičiuojant ansktesne formule (nudažytas plotas išmargintas taškais). Nors tikroji pagreičio kitimo funkcija gali būti ne tiesiška, tačiau didinant integravimo dažnį ir taikant prie grafiko parašytą formulę, galima sumažinti paklaidas iki minimumo. Dėl šios priežasties atlikus matavimus $\sim 5Hz$ dažniu buvo gauti visiškai netinkami naudojimui duomenys (ansčiau pateikto grafiko duomenys gauti matuojant beveik $20Hz$ dažniu).



3.3.2.3 pav. Paklaida priklausanti nuo integravimo dažnio.

3.4 Skaitmeninio akselerometro tyrimas

3.4.1 Skaitmeninis ADXL345 akselerometras

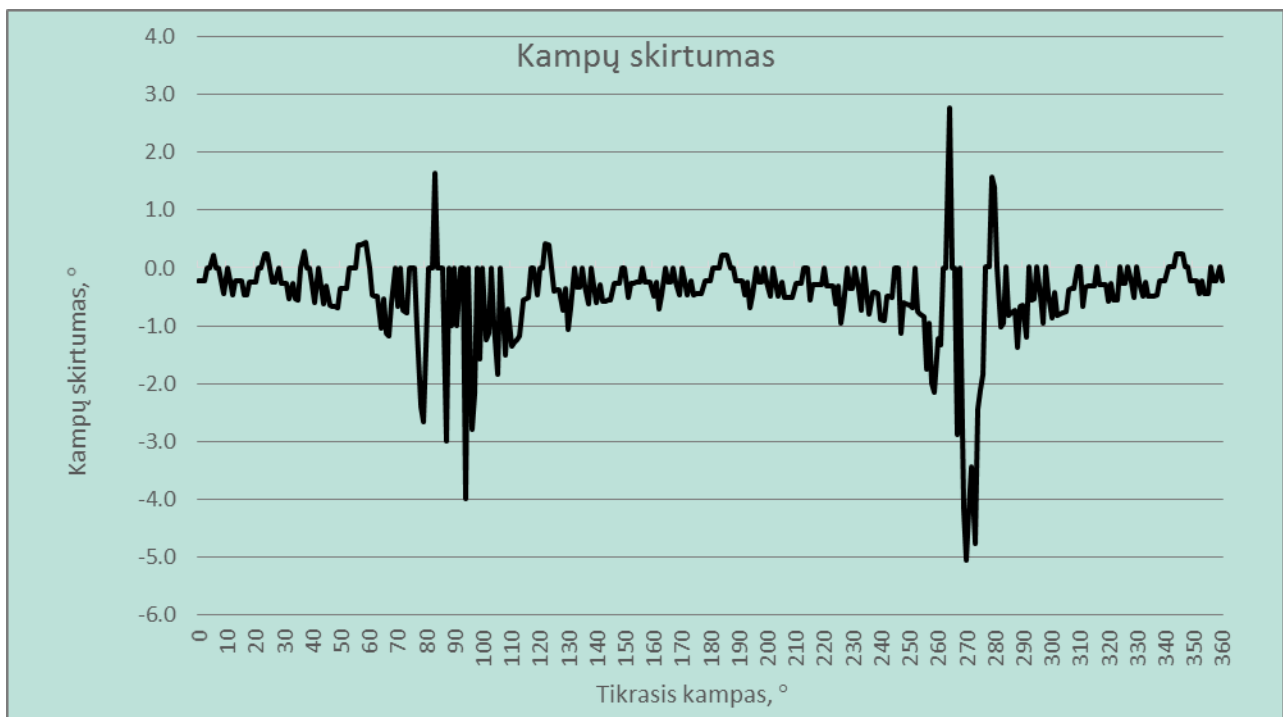
Kadangi analoginio ADXL335 akselerometro jautris ir matavimo ribos buvo netinkamos naudoti tokio tipo sistemai, tai pagreičių nustatymui buvo pasirinktas ADXL345 akselerometras su skaitmeniniu signalų nuskaitymu. Pastarasis jutiklis ne tik pranoksta matavimo ribomis ($\pm 16g$), bet ir savo jautriu. Informacijos išvedimą galima pasirinktinai pateikti iki 13 bitų (kai matavimo diapazonas yra $\pm 16g$). Teorinis tokio jutiklio jautris yra $0,038 \text{ m/s}^2$ per 1 bitą (256 LSB/g), t.y. beveik 4 kartus didesnis jautris nei ADXL335. Raketos pagreitis išilgine ašimi viršija šio jutiklio matavimo ribas tik paleidimo metu (apie 1 – 1,5 sekundės nuo variklio uždegimo). Kadangi iki maksimalaus greičio pasiekimo ir orientavimosi žemės atžvilgiu pradžios raketos pagreitis nėra svarbus, tai tokio tipo akselerometras yra tinkamas naudoti su projektuojama sistema.

3.4.2 Tyrimas ir gauti rezultatai

Kadangi viena iš pagrindinių šio akselerometro paskirčių yra pradinio kampo horizonto atžvilgiu nustatymas, tai buvo atliktas tyrimas norint nustatyti jo teikiamą informaciją apie matuojamą laisvojo kritimo pagreitį keičiant jo kampą su horizontu. Tyrimui atlikti buvo panaudota 3.2 skyriuje aprašyta mikroprocesorinė technika. Atliekant bandymą jutiklis buvo įtvirtintas CNC frezavimo staklių A ašies griebtuve ir jį sukant apie savo ašį mikroprocesoriumi nuskaityti jo teikiami duomenys. Matuojamo kampo apskaičiavimui buvo naudojamas laisvojo kritimo pagreitis $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ir gamintojo techniniame apraše pateiktas jautris. Absoliutinės paklaidos apskaičiavimas:

$$\sin\left(\frac{0.038}{9.81}\right) = 0.22^\circ \quad (3.4.2.1)$$

Kadangi gamintojo nurodoma tarpašinė paklaida yra $0,1^\circ$, tai teoriniuose skaičiavimuose tokio akselerometro paklaidos turėtų būti nedidelės. Kampo apskaičiavime tikrąjį kampą pažymėję α_t , jutiklio nuskaitytus duomenis S , o apskaičiuotąjį kampą α_{aps} , gausime 3.4.2.2 ir 3.4.2.3 formules akselerometru nustatyto kampo ir paklaidos apskaičiavimui. Atlikto bandymo duomenys pateikti 4 priede, o realaus ir išmatuoto kampų skirtumo grafikas – 3.4.1 paveikslėlyje.



3.4.1 pav. Išmatuoto ir tikrojo kampų skirtumas

$$\alpha_{\text{aps}} = \text{asin}\left(\frac{S \cdot 0.038}{9.81}\right) \quad (3.4.2.2)$$

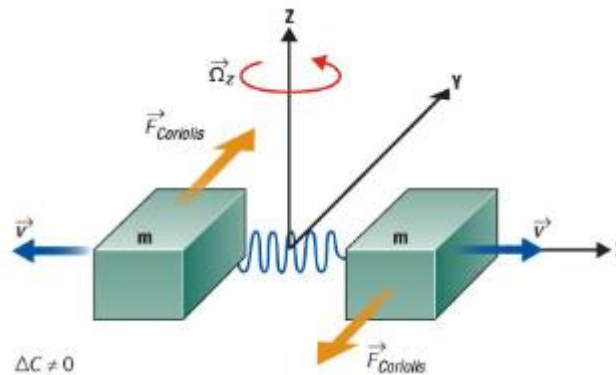
$$\Delta = \alpha_t - \alpha_{\text{aps}} \quad (3.4.2.3)$$

Grafike matoma, kad didžiausios paklaidos yra tuomet, kai jutiklis pasuktas 90 ir 270 laipsnių. Šios paklaidos yra didelės, nes tokioje padėtyje esančio jutiklio kampo jautris yra mažiausias ir atsitiktinės paklaidos turi labai didelę reikšmę. Kadangi yra atveju, kai akselerometras rodo didesnę pagreitį nei laisvojo kritimo, tai apskaičiuoti kampo pagal 3.4.2.2 negalima. Tais atvejais laikoma, kad akselerometro reikšmė yra maksimaliai didelė arba maža. Valdymo sistemoje tokie duomenys taip pat išfiltruojami, o tai tik mažina paklaidas.

3.5 Koriolio vibracinio giroskopo (CVG) tyrimas

3.5.1 MEMS CVG L3G4200

Giroskopas – tai prietaisas skirtas kuno sukimuisi matuoti. Jie gali būti mechaniniai, lazeriniai, MEMS ir t.t. Mechaniniuose giroskopuose yra sąlyginai didelės masės diskas, kuris dėl didelio sukimosi greičio ir inercijos priešinasi išoriniam poveikiui. MEMS vibraciniuose giroskopuose sukimosi apie kurią nors ašį greitis yra nustatomas pagal koriolio efektą. Jeigu kažkokią masę turintis kūnas, kuris juda tiesiai, pradeda sukintis apie savo ašį, tai jį pradeda veikti Koriolio jėga (3.5.1.1 pav.). Vibraciniuose giroskopuose dažniausiai būna dvi simetriškai išdėstytos masės vibruojančios kryptimi [v]. Tuomet dėl Koriolio jėgos veikimo yra deformuojama MEMS jutiklio geometrija ir talpiniu, piezoelektriniu arba piezorezistoriniu veikimu išgaunamas sukimosi greičiui proporcingas signalas.

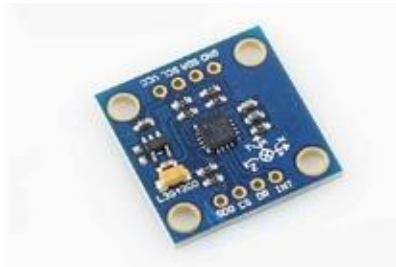


3.5.1.1 pav. CVG veikimas.

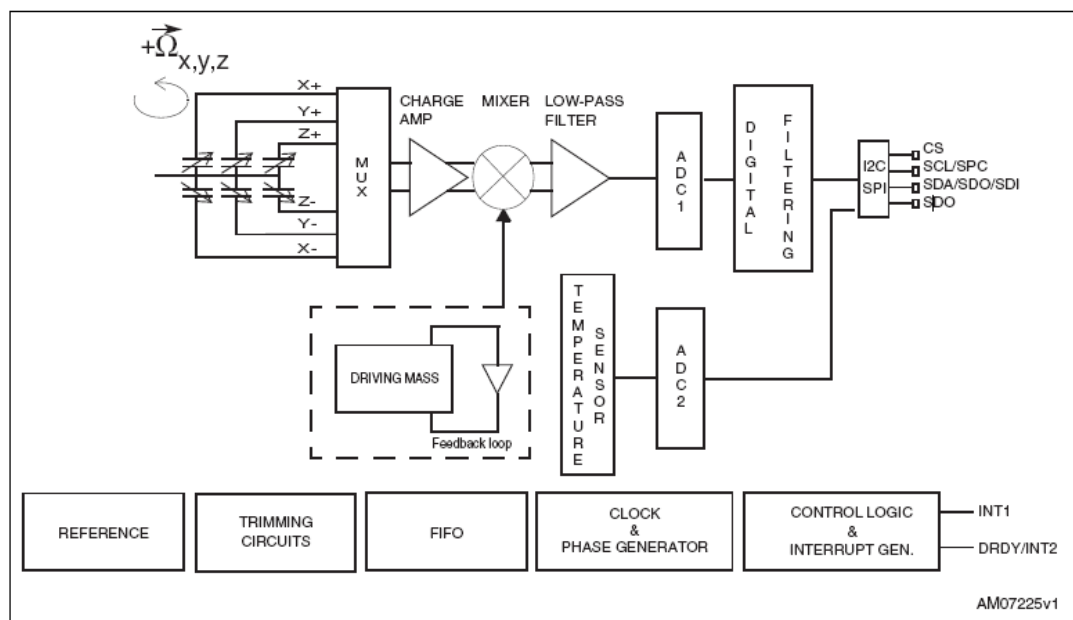
Vibraciniai giroskopai jaučia kampinį greitį, kai ant vibruojančio elemento susidaro Koriolio jėga. Dėl šios priežasties matavimo tikslumas labai priklauso nuo jutiklio medžiagos ir struktūros. Visi vibraciniai giroskopai veikia pagal koriolio efektą, tačiau pagal veikimo principą ir naudojamas medžiagas galima suskirti į 2 pagrindinius tipus: silikoniniai – talpiniai ir piezoelektriniai. Vibracinių giroskopų panaudojimo galimybės, signalų nuskaitymas ir jų interpretavimas praktiškai nepriklauso nuo tipo. Priklausomai nuo reikiamo tikslumo, reagavimo greičio ir kokybės faktoriaus yra sukurta daugybė įvairios konstrukcijos giroskopų tinkančių visais atvejais.

Tyrimui, skirtam susipažinti su CVG veikimu ir jo signalų apdorojimu, buvo pasirinktas modulis GY-50 su STMicroelectronics silikoniniu giroskopu L3G4200D (3.5.1.2 pav.). Moduluje jau yra integruoti įtampos stabilizatoriai, sąsaja skaitmeninių signalų nuskaitymui iš registų ir

mikroschema signalų demoduliacijai bei jų filtravimui. Tai talpinio veikimo giroskopas. L3G4200D blokinė diagrama pateikta 3.5.1.3 paveikslėlyje.



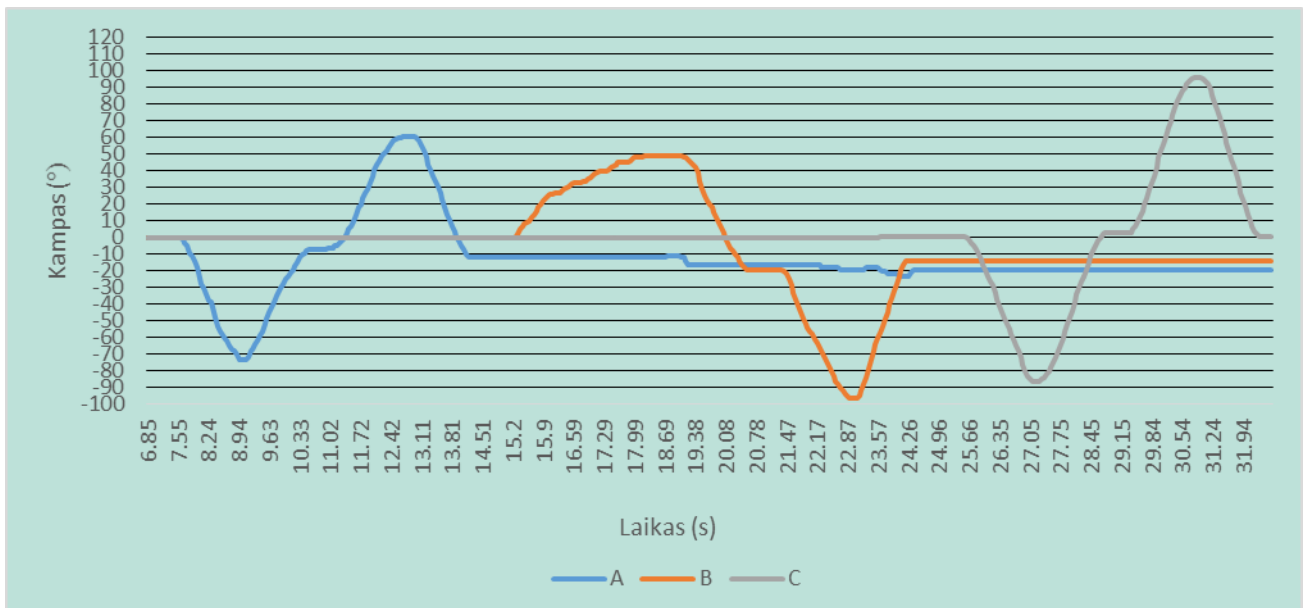
3.5.1.2 pav. GY-50 modulis.



3.5.1.3 pav. L3G4200D giroskopo blokinė diagrama.

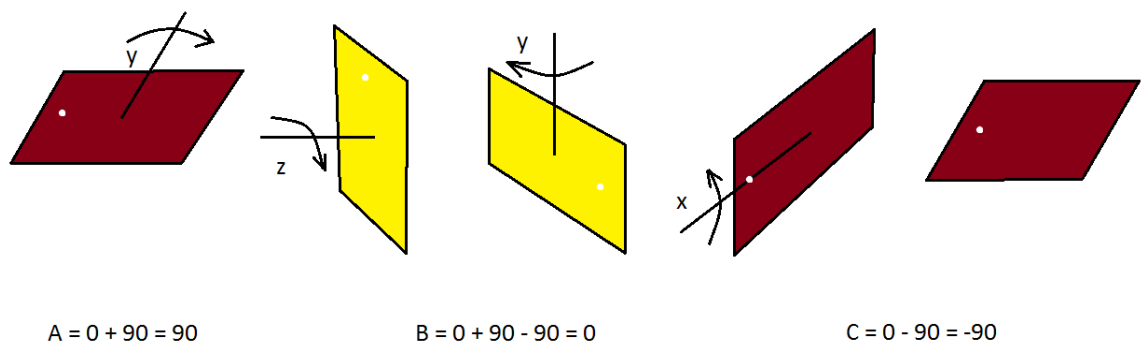
3.5.2 Tyrimas ir gauti rezultatai

Tyrimo metu, pagal parašytą programą C++ kalba (2-as priedas), buvo užprogramuotas anksčiau minėtas ATmega328P-PU procesorius. Po labai grubios kalibracijos buvo gauti rezultatai pasukant matavimo stendą visomis kryptimis apie 90° (grafikas pateiktas 3.5.2.1 paveikslėlyje).



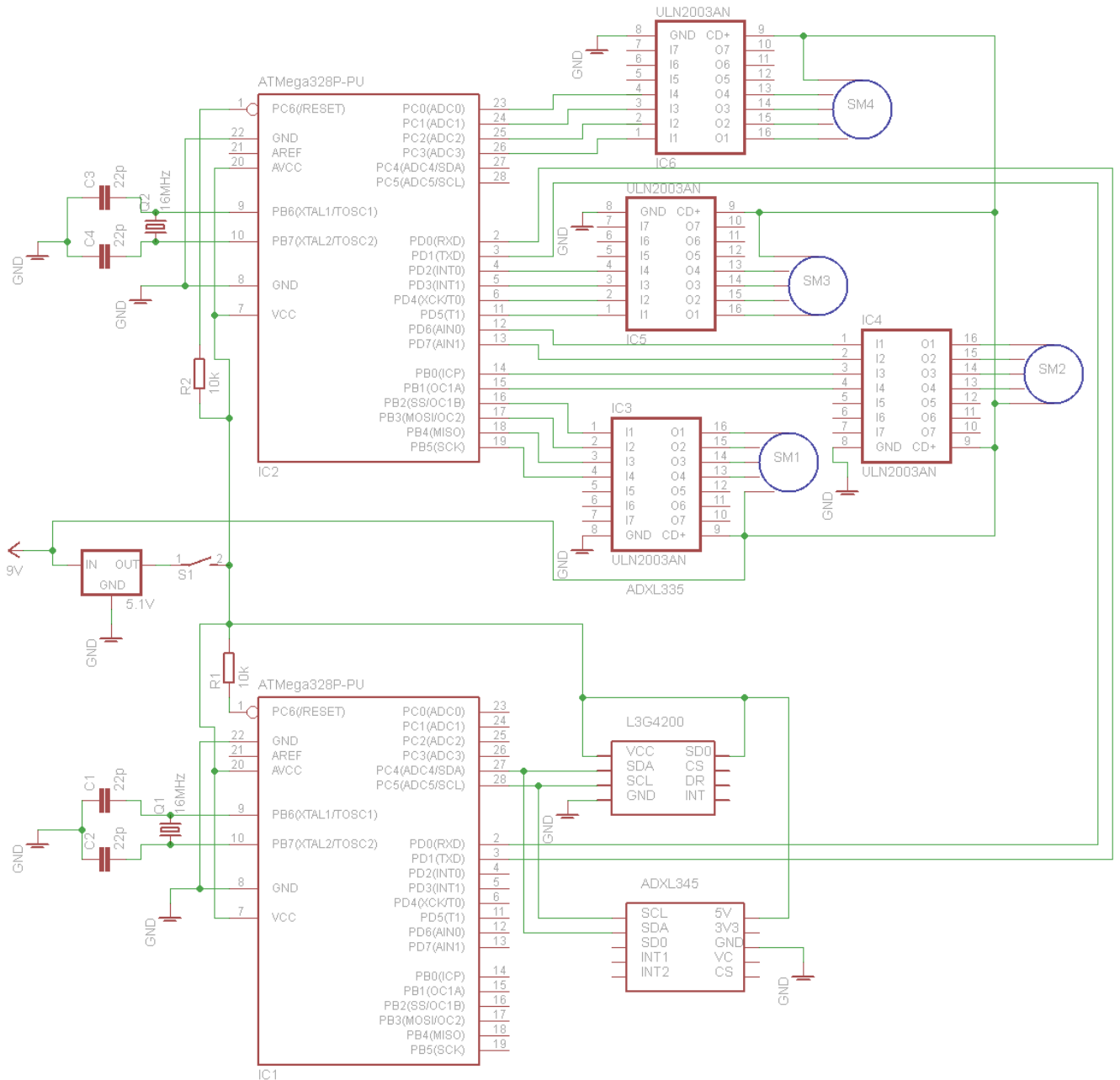
3.5.2.1 pav. Giroskopo bandymo duomenų grafikas.

Pagal šį grafiką negalima spręsti apie giroskopo tikslumą, tačiau jis puikiai parodo, kad su juo negali būti atlikti matavimai iki nebus užtikrintas sukimasis tik viena ašimi arba nesukonstruota papildoma orientacinė įranga. 3.5.2.2 paveikslėlyje pateiktas pavyzdys, kodėl be papildomos orientacijos (nejudančiam objektui su mažu sukimosi greičiu galima orientuotis pagal laisvo kritimo pagreičio kryptį) 4 kartus pavertus giroskopą po 90° laipsnių jis liks toje pačioje orientacijoje, bet bus apskaičiuota, kad jis yra pasivertęs 2-ose ašyse po 90°. Dėl tos pačios priežasties grafike matome, kad giroskopą pastačius į jo pradinę poziciją A ir B ašyse buvo fiksuojamas posvyris.



3.5.2.2 pav. Giroskopo duomenų neatitikimas be papildomos orientacijos.

3.6 Valdymo sistemos elektrinė schema



3.6.1 pav. Elektrinė schema.

3.6.1 paveikslėlyje pateiktoje schemoje matome valdymo sistemos suskaidymą į 2 dalis: parametrų nustatymo bei apskaičiavimo ir variklių valdymo. Abi dalys yra valdomos atskirais ATmega328P-PU mikrovaldikliais. Toks sistemos suskirstymas sugalvotas po atliktų tyrimų su jutikliais. Kadangi sistemos tikslumas labai priklauso nuo jutiklių duomenų nuskaitymo dažnio, tai šis procesas turi būti atliekamas nepertraukiamai ir didžiausiu galimu dažniu. Bandymuose didžiausias

naudotas dažnis buvo 50Hz, o laiko ataskaitoje jau buvo pastebimas vėlavimas dėl duomenų nuskaitymo. Varikliui pasukti taip pat teikiamas signalas, kurio įvykdymo greitis yra ribojamas variklių elektromechaninių charakteristikų (naudojant didelį sukimosi greitį žingsninis variklis nesukuria tinkamo sukimosi momento ir atsiranda praleisti žingniai, dėl kurių atsiranda žingsninio variklio padėties paklaidos), todėl šias operacijas geriau atlikti lygiagrečiai ir nepriklausomai viena nuo kitos.

Schemas viršuje pateiktas žingsninių variklių ir jų valdymo modulių jungimas, o apatinėje – skaitmeninių giroskopo ir akselerometro jungimas su antruoju mikrovaldikliu. Jutikliai su mikroprocesoriumi jungiami lygiagrečiai naudojant I²C komunikaciją. Pilnas programinis kodas giroskopo ir akselerometro signalų nuskaitymui bei orientacijos apskaičiavimui C++ kalba pateiktas 5-ame priede.

IŠVADOS IR SIŪLYMAI

- Padaryta šiuo metu naudojamų raketų apžvalga, nustatyti jų pagrindiniai duomenys skirti tolimesniam raketos projektavimui.
- Suskirščius raketas pagal jų tipus buvo pasirinkta projektuoti valdymo sistema skirta trumpo nuotolio viršgarsinio greičio raketoms. Projektuojamos sistemos valdymas atliekamas sparnuote.
- Naudojant SolidWorks Flow Simulation analizę buvo atlikti įvairūs bandymai, kurių metu nustatyta raketos geometrinių parametrų įtaka aerodinaminių jėgų atsiradimui ir veikimo pobūdžiui. Atsižvelgiant į analizės duomenis nuspręsta sparnuotės mechanizmą tvirtinti kuo arčiau raketos nosies. Taip pat nustatyta, kad veikiančios jėgos beveik tiesiškai priklauso nuo sparnų dydžio.
- Atsižvelgiant į kuriamos sistemos naudojimo reikalavimus ir joje naudojamus komponentus buvo sudaryta valdymo struktūrograma bei sudarytas skaičiavimo algoritmas. Stuktūrogramoje pateiktas išsamus duomenų nuskaitymo ir išvestinių dinaminių parametrų apskaičiavimas.
- Naudojant MEMS akselerometrą ir giroskopą nuskaityti visi reikalingi duomenys. Parinkti jutikliai geba nustatyti reikiamo dydžio pagreičius ir sukimosi greičius. Atlikus bandymus nustatytos jų paklaidos ir atsiradimo priežastys. Tikslių dinaminių skrydžio parametrų nustatymui reikalingas sudėtingas skaičiavimo algoritmas su didelio dažnio duomenų nuskaitymu.

LITERATŪRA

1. Arduino programatorių aprašymas. Prieiga per internetą:
<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano> (žiūrėta 2015 05 15)
2. C++ programavimo kalbos funkcijos. Prieiga per internetą:
<http://arduino.cc/en/Reference/HomePage> (žiūrėta 2015 05 20)
3. MEMS giroskopo veikimo aprašymas. Prieiga per internetą:
http://www5.epsondevice.com/en/sensing_device/gyroportal/about.html (žiūrėta 2015 04 20)
4. Įvairių artimojo nuotolio raketų duomenys ir aprašymai. Prieiga per internetą:
<http://www.x-plane.org/home/urf/aviation/text/missiles/aam.html> (žiūrėta 2015 05 15)
5. L3G4200D techninis aprašymas
6. ADXL335 techninis aprašymas
7. ADXL345 techninis aprašymas
8. BYJ28-48 techninis aprašymas
9. Aerodinamika ir skrydžių dinamika – Pranas Akulavičius, Algimantas Skurdenis (2000)
10. An Aerodynamic Analysis of a Spinning Missile with Dithering Canards - Tor A. Nygaard and Robert L. Meakin (2003)
11. Missile Guidance and Control Systems - George M. Siouris (2004)
12. Tactical and Strategic Missile Guidance - Paul Zarchan (2014)

PRIEDAI

1-as priedas. GY-61 akselerometro tyrime naudotas galutinis programos kodas.

```
//kintamuju ivedimas
int x = A1;
int y = A2;
int z = A3;
//ivedamos apskaiciuotos 10 bitu reiksmes 0 padeciai
nustatyti
int x0=356;
int y0=355;
int z0=366;
float X;
float Y;
float Z;

void setup() {

  Serial.begin(9600);
//programos sustabdymas 0 paeties nustatymui
  attachInterrupt(1, calibration, HIGH);
}
//pagrindine programa
void loop() {
//duomenu nuskaitymas
  x=analogRead(A1);
  y=analogRead(A2);
  z=analogRead(A3);
//pagreiciu apskaiciavimas pagal kalibravimo metu
nustatytas formules
  X=-(x-x0)/7.342;
  Y=-(y-y0)/7.444;

  Z=(z-z0)/7.24;
//laiko aprasymas skirtas duomenu stebejimui
  time = millis()/1000.00;
//duomenu isvedimas kompiuteryje
  Serial.print(time);
  Serial.print("\t"); Serial.print(X);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(Y);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(Z);
  Serial.println();
  delay(200);
}
//0 padeties nustatymo funkcija
void calibration(){
//analoginiu signalu reiksmiu nustatymas 0 padetyje
  x0=analogRead(A1);
  y0=analogRead(A2);
  z0=analogRead(A3)-71;
//pastoviu nuokrypiu isvedimas kompiuteryje
  Serial.print(x0);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(y0);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(z0);
  Serial.println();
  delay (100);
}
```

2-as priedas. GY-50 giroskopo tyrime naudotas galutinis programos kodas.

```
// bibliotekos ir registro adresu ivedimas
#include <Wire.h>
#define CTRL_REG1 0x20
#define CTRL_REG2 0x21
#define CTRL_REG3 0x22
#define CTRL_REG4 0x23
#define CTRL_REG5 0x24
//I2C adresas L3G4200D giroskopui
int L3G4200D_Address = 105;
//kintamuju ivedimas
int A;
int B;
int C;
int A_0=0;
int B_0=0;
int C_0=0;
int a = 0;
int b = 0;
int c = 0;
float time=0.0;

void setup(){
    Wire.begin();
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Starting up L3G4200D");
    //L3G4200 jautrumo nustatmas - 250, 500 or 2000 deg/s
    setupL3G4200D(2000);
    //programos sustabdymas sukilibravimo funkcijai atlikti
    attachInterrupt(1, calibration, HIGH);
    delay(1500);
}
//pagrindine programa
void loop(){
    getGyroValues();
    //pasisukimo kampo nuo 0 padeties apskaiciavimas
    a=A-A_0+a;
    b=B-B_0+b;
    c=C-C_0+c;
    //laiko aprasymas skirtas duomenu stebejimui
    time = millis()/1000.00;
    //duomenu isvedimas kompiuteryje
    Serial.print(time);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(a);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(b);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(c);
    Serial.println();
    delay(100);
}

//giroskopo domenu nuskaitymas is L3G4200D registro
void getGyroValues(){
    byte xMSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x29);
    byte xLSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x28);
    A = ((xMSB << 8) | xLSB)/63;
    byte yMSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x2B);
    byte yLSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x2A);
    B = ((yMSB << 8) | yLSB)/63;
    byte zMSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x2D);
    byte zLSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x2C);
    C = ((zMSB << 8) | zLSB)/63;
}
//L3G4200D nustatymu ivedimas
int setupL3G4200D(int scale){
    //jutiklio ijungimas; sukimosi apie x, y, z asis ijungimas
    writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG1,
0b00001111);
    //duomenu filtrai
    writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG2,
0b00000000);
    //signalu isvedimo nustatymai
    writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG3,
0b00001000);
    // giroskopo jautrumo nustatymas
    if(scale == 250){
        writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG4,
0b00000000);
    }else if(scale == 500){
        writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG4,
0b00010000);
    }else{
        writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG4,
0b00110000);
    }
    //duomenu filtravimas
    writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG5,
0b00000000);
}
//duomenu irasimas i registrus
void writeRegister(int deviceAddress, byte address, byte
val) {
    Wire.beginTransaction(deviceAddress);
    Wire.write(address);
    Wire.write(val);
    Wire.endTransmission();
}
//duomenu nuskaitymas is registru
int readRegister(int deviceAddress, byte address){
    int v;
    Wire.beginTransaction(deviceAddress);
    Wire.write(address); // register to read
    Wire.endTransmission();
}
```

```
Wire.requestFrom(deviceAddress, 1);
while(!Wire.available()) {
}
v = Wire.read();
return v;
}
//giroskopo 0 padeties nustatymas
void calibration(){

A_0=A;
B_0=B;
C_0=C;
a=0;
b=0;
c=0;
time=0;
delay (500);
}
```

3-ias priedas. Akselerometro tyrimo duomenys.

Procesoriaus duomenys			Apskaičiuoti duomenys						
Laikas (s)	Pagreičiai (m/s ²)		Greitis (m/s)			Poslinkis (m)			
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1684.90	0.000	0.000	9.810	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1684.95	-2.320	0.130	8.840	-0.058	0.003	-0.024	-0.001	0.000	-0.001
1685.01	-2.180	0.400	8.700	-0.193	0.019	-0.087	-0.009	0.001	-0.004
1685.06	-2.180	0.540	8.700	-0.302	0.043	-0.142	-0.021	0.002	-0.010
1685.11	-2.180	0.540	8.840	-0.411	0.070	-0.194	-0.039	0.005	-0.018
1685.16	-2.180	0.540	8.840	-0.520	0.097	-0.243	-0.062	0.009	-0.029
1685.21	-2.450	0.400	9.250	-0.636	0.120	-0.281	-0.091	0.015	-0.042
1685.27	-2.450	0.270	9.670	-0.783	0.140	-0.302	-0.134	0.022	-0.060
1685.32	-2.720	0.000	9.810	-0.912	0.147	-0.305	-0.176	0.030	-0.075
1685.37	-2.860	0.000	10.080	-1.051	0.147	-0.299	-0.225	0.037	-0.090
1685.42	-2.590	0.000	10.360	-1.188	0.147	-0.278	-0.281	0.044	-0.104
1685.47	-2.180	0.540	9.940	-1.307	0.160	-0.261	-0.344	0.052	-0.118
1685.53	-1.770	0.400	10.640	-1.425	0.189	-0.232	-0.426	0.063	-0.133
1685.58	-1.090	0.540	10.910	-1.497	0.212	-0.184	-0.499	0.073	-0.143
1685.63	-0.680	0.400	11.460	-1.541	0.236	-0.115	-0.575	0.084	-0.150
1685.68	0.140	0.670	10.910	-1.555	0.262	-0.047	-0.652	0.096	-0.154
1685.73	0.410	0.540	10.770	-1.541	0.293	0.005	-0.729	0.110	-0.156
1685.79	0.680	-0.130	11.050	-1.508	0.305	0.071	-0.821	0.128	-0.153
1685.84	1.230	-0.130	11.190	-1.461	0.298	0.136	-0.895	0.143	-0.148
1685.89	1.770	-0.130	10.770	-1.386	0.292	0.195	-0.966	0.158	-0.140
1685.94	2.320	0.000	10.770	-1.283	0.289	0.243	-1.033	0.172	-0.129
1686.00	2.590	0.400	10.080	-1.136	0.301	0.280	-1.106	0.190	-0.113
1686.05	2.590	0.130	10.220	-1.007	0.314	0.297	-1.159	0.205	-0.099
1686.10	2.720	0.540	9.810	-0.874	0.331	0.307	-1.206	0.222	-0.084
1686.15	2.860	0.810	9.530	-0.734	0.365	0.300	-1.246	0.239	-0.068
1686.20	3.000	0.940	9.390	-0.588	0.408	0.283	-1.279	0.258	-0.054
1686.26	2.860	0.940	9.120	-0.412	0.465	0.249	-1.309	0.284	-0.038
1686.31	2.450	0.940	9.120	-0.279	0.512	0.215	-1.327	0.309	-0.026
1686.36	2.180	0.670	9.390	-0.163	0.552	0.187	-1.338	0.335	-0.016
1686.41	1.910	0.810	9.390	-0.061	0.589	0.166	-1.343	0.364	-0.007
1686.46	1.910	0.670	9.810	0.034	0.626	0.156	-1.344	0.394	0.001
1686.52	2.040	0.670	10.080	0.153	0.666	0.164	-1.338	0.433	0.010
1686.57	2.180	0.400	10.080	0.258	0.693	0.177	-1.328	0.467	0.019
1686.62	2.040	0.400	9.670	0.364	0.713	0.180	-1.313	0.502	0.028
1686.67	2.040	0.270	9.940	0.466	0.730	0.180	-1.292	0.538	0.037
1686.72	2.040	0.400	9.810	0.568	0.746	0.183	-1.266	0.575	0.046
1686.78	2.180	0.130	9.940	0.694	0.762	0.187	-1.228	0.620	0.057
1686.83	2.320	0.270	9.940	0.807	0.772	0.194	-1.191	0.659	0.066
1686.88	2.040	0.270	9.810	0.916	0.786	0.197	-1.148	0.698	0.076
1686.93	1.770	0.270	9.940	1.011	0.799	0.200	-1.099	0.737	0.086
1686.98	1.630	0.130	9.810	1.096	0.809	0.204	-1.047	0.778	0.096
1687.04	1.500	0.130	10.220	1.190	0.817	0.216	-0.978	0.826	0.109
1687.09	1.230	0.000	10.640	1.258	0.820	0.247	-0.917	0.867	0.120
1687.14	0.410	-0.130	10.910	1.299	0.817	0.295	-0.853	0.908	0.134
1687.19	0.000	-0.270	10.770	1.310	0.807	0.347	-0.788	0.949	0.150
1687.25	-0.270	-0.130	11.190	1.301	0.795	0.417	-0.709	0.997	0.173
1687.30	-0.950	-0.400	11.600	1.271	0.782	0.496	-0.645	1.036	0.196
1687.35	-1.360	-0.270	11.050	1.213	0.765	0.572	-0.583	1.075	0.222
1687.40	-1.630	0.000	10.910	1.138	0.758	0.630	-0.524	1.113	0.252
1687.45	-2.040	-0.270	10.910	1.047	0.752	0.685	-0.470	1.151	0.285
1687.51	-2.320	-0.400	10.500	0.916	0.731	0.739	-0.411	1.195	0.328
1687.56	-2.450	-0.270	10.080	0.797	0.715	0.763	-0.368	1.231	0.365
1687.61	-2.450	-0.400	9.670	0.674	0.698	0.766	-0.331	1.267	0.404
1687.66	-2.450	-0.270	9.120	0.552	0.681	0.745	-0.301	1.301	0.441
1687.71	-2.720	-0.270	8.980	0.422	0.668	0.707	-0.276	1.335	0.478

1687.77	-2.860	-0.130	8.980	0.255	0.656	0.658	-0.256	1.375	0.519
1687.82	-2.720	0.130	8.840	0.116	0.656	0.613	-0.247	1.407	0.551
1687.87	-2.860	0.130	8.840	-0.024	0.662	0.564	-0.244	1.440	0.580
1687.92	-2.590	0.130	8.980	-0.160	0.669	0.519	-0.249	1.474	0.607
1687.97	-2.450	0.400	9.120	-0.286	0.682	0.481	-0.260	1.507	0.632
1688.03	-2.320	0.270	9.120	-0.429	0.702	0.440	-0.282	1.549	0.660
1688.08	-2.040	0.540	9.250	-0.538	0.722	0.409	-0.306	1.585	0.681
1688.13	-2.180	0.540	9.530	-0.644	0.749	0.388	-0.335	1.621	0.701
1688.18	-2.180	0.540	9.390	-0.753	0.776	0.370	-0.370	1.660	0.720
1688.24	-2.180	0.130	9.810	-0.884	0.796	0.357	-0.419	1.707	0.742
1688.29	-2.040	0.130	9.670	-0.989	0.803	0.354	-0.466	1.747	0.759
1688.34	-1.630	0.130	10.080	-1.081	0.809	0.357	-0.518	1.787	0.777
1688.39	-1.360	0.130	10.220	-1.156	0.816	0.374	-0.574	1.828	0.795
1688.44	-1.360	0.000	10.220	-1.224	0.819	0.395	-0.633	1.868	0.815
1688.50	-0.820	0.130	10.360	-1.289	0.823	0.423	-0.709	1.918	0.839
1688.55	-0.540	0.130	11.050	-1.323	0.830	0.468	-0.774	1.959	0.861
1688.60	0.270	0.400	10.640	-1.330	0.843	0.520	-0.840	2.001	0.886
1688.65	0.680	0.670	10.640	-1.306	0.870	0.561	-0.906	2.044	0.913
1688.71	1.230	0.540	10.360	-1.249	0.906	0.603	-0.983	2.097	0.948
1688.76	1.910	0.670	10.220	-1.170	0.936	0.627	-1.043	2.143	0.979
1688.81	2.320	0.810	10.640	-1.064	0.973	0.658	-1.099	2.191	1.011
1688.86	2.590	0.940	9.810	-0.942	1.017	0.679	-1.149	2.240	1.044
1688.91	2.720	0.940	9.940	-0.809	1.064	0.682	-1.193	2.293	1.078
1688.97	2.590	1.070	9.810	-0.650	1.124	0.686	-1.237	2.358	1.119
1689.02	2.590	0.940	10.080	-0.520	1.174	0.693	-1.266	2.416	1.154
1689.07	2.450	0.810	9.940	-0.394	1.218	0.703	-1.289	2.475	1.189
1689.12	2.320	0.810	9.940	-0.275	1.259	0.709	-1.306	2.537	1.224
1689.18	2.450	0.810	10.080	-0.132	1.307	0.721	-1.318	2.614	1.267
1689.23	2.180	0.940	9.810	-0.016	1.351	0.728	-1.322	2.681	1.303
1689.28	2.180	0.810	9.940	0.093	1.395	0.731	-1.320	2.749	1.340
1689.33	1.770	0.670	9.940	0.192	1.432	0.738	-1.313	2.820	1.376
1689.38	1.770	0.670	9.940	0.280	1.465	0.744	-1.301	2.893	1.413
1689.44	1.500	0.540	9.810	0.378	1.502	0.748	-1.281	2.982	1.458
1689.49	1.630	0.400	9.940	0.457	1.525	0.751	-1.260	3.057	1.496
1689.54	1.770	0.540	9.810	0.542	1.549	0.754	-1.235	3.134	1.533
1689.59	1.770	0.400	9.940	0.630	1.572	0.758	-1.206	3.212	1.571
1689.64	2.040	0.130	9.940	0.725	1.585	0.764	-1.172	3.291	1.609
1689.70	1.910	0.270	9.810	0.844	1.597	0.768	-1.125	3.386	1.655
1689.75	2.040	-0.130	10.080	0.943	1.601	0.775	-1.080	3.466	1.694
1689.80	1.770	0.000	9.810	1.038	1.598	0.782	-1.031	3.546	1.733
1689.85	1.630	-0.400	10.220	1.123	1.588	0.792	-0.977	3.626	1.772
1689.91	1.230	-0.130	10.220	1.209	1.572	0.816	-0.907	3.721	1.820
1689.96	1.230	0.000	10.500	1.270	1.568	0.844	-0.845	3.799	1.862
1690.01	0.820	0.000	10.500	1.321	1.568	0.878	-0.780	3.878	1.905
1690.06	0.140	0.130	10.360	1.345	1.572	0.909	-0.713	3.956	1.949
1690.11	0.000	0.130	10.360	1.349	1.578	0.937	-0.646	4.035	1.996
1690.17	-0.410	0.000	10.360	1.337	1.582	0.970	-0.565	4.130	2.053
1690.22	-0.820	-0.130	10.770	1.306	1.579	1.008	-0.499	4.209	2.102
1690.27	-1.230	0.000	10.220	1.255	1.576	1.042	-0.435	4.288	2.153
1690.32	-1.910	-0.130	10.220	1.176	1.572	1.062	-0.375	4.366	2.206
1690.37	-2.320	-0.130	9.810	1.070	1.566	1.073	-0.319	4.445	2.259
1690.43	-2.720	-0.400	9.940	0.919	1.550	1.077	-0.259	4.538	2.324
1690.48	-2.720	-0.130	9.670	0.783	1.537	1.076	-0.216	4.615	2.378
1690.53	-3.130	-0.400	9.940	0.637	1.523	1.076	-0.181	4.692	2.431
1690.58	-2.590	0.130	9.390	0.494	1.517	1.069	-0.153	4.768	2.485
1690.63	-2.590	0.130	9.390	0.364	1.523	1.048	-0.131	4.844	2.538
1690.69	-2.320	0.540	9.390	0.217	1.543	1.023	-0.114	4.936	2.600
1690.74	-2.040	0.670	9.530	0.108	1.573	1.005	-0.106	5.014	2.651
1690.79	-2.040	0.540	9.670	0.006	1.604	0.995	-0.103	5.093	2.701

4-as priedas. Kampo nustatymo paklaidų tyrimo duomenys

Tikrasis kampas	Jutiklio duomenys	Apskaičiuotas laisvojo kritimo pagreitis m/s^2	Apskaičiuotas kampas	Perskaičiuotas tikrasis kampas	Kampų skirtumas
0	1	0.0	0.2	0	-0.2
1	5	0.2	1.2	1	-0.2
2	10	0.4	2.2	2	-0.2
3	13	0.5	3.0	3	0.0
4	18	0.7	4.0	4	0.0
5	21	0.8	4.8	5	0.2
6	27	1.0	6.0	6	0.0
7	31	1.2	7.0	7	0.0
8	37	1.4	8.2	8	-0.2
9	42	1.6	9.5	9	-0.5
10	44	1.7	10.0	10	0.0
11	50	1.9	11.2	11	-0.2
12	55	2.1	12.5	12	-0.5
13	59	2.2	13.2	13	-0.2
14	63	2.4	14.2	14	-0.2
15	67	2.6	15.2	15	-0.2
16	73	2.8	16.5	16	-0.5
17	77	2.9	17.5	17	-0.5
18	80	3.1	18.2	18	-0.2
19	84	3.2	19.2	19	-0.2
20	89	3.4	20.2	20	-0.2
21	92	3.5	21.0	21	0.0
22	96	3.7	22.0	22	0.0
23	99	3.8	22.8	23	0.2
24	103	4.0	23.8	24	0.2
25	108	4.1	25.0	25	0.0
26	113	4.3	26.2	26	-0.2
27	117	4.5	27.3	27	-0.3
28	120	4.6	28.0	28	0.0
29	125	4.8	29.3	29	-0.3
30	129	4.9	30.3	30	-0.3
31	133	5.1	31.3	31	-0.3
32	138	5.3	32.5	32	-0.5
33	140	5.4	33.3	33	-0.3
34	145	5.6	34.5	34	-0.5
35	149	5.7	35.5	35	-0.5
36	150	5.8	36.0	36	0.0
37	153	5.9	36.7	37	0.3
38	158	6.0	38.0	38	0.0
39	161	6.2	39.0	39	0.0
40	166	6.3	40.3	40	-0.3
41	170	6.5	41.6	41	-0.6
42	171	6.6	42.0	42	0.0

43	176	6.7	43.3	43	-0.3
44	180	6.9	44.6	44	-0.6
45	182	7.0	45.3	45	-0.3
46	186	7.1	46.6	46	-0.6
47	189	7.3	47.7	47	-0.7
48	192	7.4	48.7	48	-0.7
49	195	7.5	49.7	49	-0.7
50	197	7.6	50.3	50	-0.3
51	200	7.7	51.4	51	-0.4
52	203	7.8	52.4	52	-0.4
53	204	7.8	53.0	53	0.0
54	207	7.9	54.0	54	0.0
55	210	8.0	55.0	55	0.0
56	211	8.1	55.6	56	0.4
57	214	8.2	56.6	57	0.4
58	216	8.3	57.6	58	0.4
59	218	8.4	58.6	59	0.4
60	222	8.5	60.0	60	0.0
61	225	8.6	61.5	61	-0.5
62	227	8.7	62.5	62	-0.5
63	229	8.8	63.5	63	-0.5
64	232	8.9	65.0	64	-1.0
65	233	8.9	65.5	65	-0.5
66	236	9.0	67.1	66	-1.1
67	238	9.1	68.2	67	-1.2
68	238	9.1	68.6	68	-0.6
69	239	9.2	69.0	69	0.0
70	242	9.3	70.7	70	-0.7
71	242	9.3	71.0	71	0.0
72	244	9.4	72.7	72	-0.7
73	246	9.4	73.8	73	-0.8
74	246	9.4	74.0	74	0.0
75	247	9.5	75.0	75	0.0
76	248	9.5	76.0	76	0.0
77	250	9.6	78.0	77	-1.0
78	252	9.7	80.4	78	-2.4
79	253	9.7	81.7	79	-2.7
80	253	9.7	81.4	80	-1.4
81	253	9.7	81.0	81	0.0
82	254	9.7	82.0	82	0.0
83	253	9.7	81.4	83	1.6
84	255	9.8	84.0	84	0.0
85	255	9.8	85.0	85	0.0
86	255	9.8	86.0	86	0.0
87	257	9.8	90.0	87	-3.0
88	256	9.8	88.0	88	0.0
89	257	9.8	90.0	89	-1.0

90	257	9.8	90.0	90	0.0
91	257	9.8	90.0	89	-1.0
92	256	9.8	88.0	88	0.0
93	256	9.8	87.0	87	0.0
94	256	9.8	90.0	86	-4.0
95	255	9.8	85.0	85	0.0
96	256	9.8	86.8	84	-2.8
97	255	9.8	85.2	83	-2.2
98	254	9.7	82.0	82	0.0
99	254	9.7	82.6	81	-1.6
100	252	9.7	80.0	80	0.0
101	252	9.7	80.2	79	-1.2
102	251	9.6	79.1	78	-1.1
103	249	9.6	77.0	77	0.0
104	249	9.6	77.0	76	-1.0
105	249	9.6	76.8	75	-1.8
106	246	9.4	74.0	74	0.0
107	246	9.4	73.8	73	-0.8
108	245	9.4	73.5	72	-1.5
109	243	9.3	71.7	71	-0.7
110	243	9.3	71.4	70	-1.4
111	241	9.2	70.3	69	-1.3
112	239	9.2	69.2	68	-1.2
113	238	9.1	68.2	67	-1.2
114	235	9.0	66.6	66	-0.6
115	233	8.9	65.5	65	-0.5
116	231	8.9	64.5	64	-0.5
117	228	8.7	63.0	63	0.0
118	226	8.7	62.0	62	0.0
119	225	8.6	61.5	61	-0.5
120	222	8.5	60.0	60	0.0
121	219	8.4	59.0	59	0.0
122	216	8.3	57.6	58	0.4
123	214	8.2	56.6	57	0.4
124	212	8.1	56.0	56	0.0
125	211	8.1	55.4	55	-0.4
126	208	8.0	54.4	54	-0.4
127	205	7.9	53.4	53	-0.4
128	204	7.8	52.7	52	-0.7
129	200	7.7	51.4	51	-0.4
130	199	7.6	51.1	50	-1.1
131	195	7.5	49.7	49	-0.7
132	190	7.3	48.0	48	0.0
133	188	7.2	47.3	47	-0.3
134	185	7.1	46.3	46	-0.3
135	181	6.9	45.0	45	0.0
136	179	6.9	44.3	44	-0.3

137	177	6.8	43.6	43	-0.6
138	171	6.6	42.0	42	0.0
139	169	6.5	41.3	41	-0.3
140	167	6.4	40.6	40	-0.6
141	162	6.2	39.3	39	-0.3
142	160	6.1	38.6	38	-0.6
143	156	6.0	37.6	37	-0.6
144	152	5.8	36.6	36	-0.6
145	149	5.7	35.6	35	-0.6
146	144	5.5	34.3	34	-0.3
147	140	5.4	33.3	33	-0.3
148	137	5.2	32.3	32	-0.3
149	132	5.1	31.0	31	0.0
150	128	4.9	30.0	30	0.0
151	126	4.8	29.5	29	-0.5
152	121	4.6	28.3	28	-0.3
153	117	4.5	27.3	27	-0.3
154	113	4.3	26.3	26	-0.3
155	109	4.2	25.3	25	-0.3
156	104	4.0	24.0	24	0.0
157	101	3.9	23.2	23	-0.2
158	97	3.7	22.2	22	-0.2
159	93	3.6	21.2	21	-0.2
160	90	3.4	20.5	20	-0.5
161	84	3.2	19.2	19	-0.2
162	82	3.1	18.7	18	-0.7
163	77	2.9	17.5	17	-0.5
164	71	2.7	16.0	16	0.0
165	67	2.6	15.2	15	-0.2
166	63	2.4	14.2	14	-0.2
167	58	2.2	13.0	13	0.0
168	54	2.1	12.2	12	-0.2
169	51	1.9	11.5	11	-0.5
170	44	1.7	10.0	10	0.0
171	41	1.6	9.2	9	-0.2
172	38	1.4	8.5	8	-0.5
173	32	1.2	7.2	7	-0.2
174	29	1.1	6.5	6	-0.5
175	24	0.9	5.5	5	-0.5
176	20	0.8	4.5	4	-0.5
177	15	0.6	3.5	3	-0.5
178	10	0.4	2.2	2	-0.2
179	5	0.2	1.2	1	-0.2
180	1	0.0	0.2	0	-0.2
181	-4	-0.2	-1.0	-1	0.0
182	-9	-0.3	-2.0	-2	0.0
183	-13	-0.5	-3.0	-3	0.0

184	-19	-0.7	-4.2	-4	0.2
185	-23	-0.9	-5.2	-5	0.2
186	-28	-1.1	-6.2	-6	0.2
187	-31	-1.2	-7.0	-7	0.0
188	-36	-1.4	-8.0	-8	0.0
189	-39	-1.5	-8.8	-9	-0.2
190	-43	-1.7	-9.8	-10	-0.2
191	-48	-1.8	-10.8	-11	-0.2
192	-51	-2.0	-11.5	-12	-0.5
193	-57	-2.2	-12.8	-13	-0.2
194	-59	-2.3	-13.3	-14	-0.7
195	-64	-2.5	-14.5	-15	-0.5
196	-71	-2.7	-16.0	-16	0.0
197	-74	-2.8	-16.8	-17	-0.2
198	-78	-3.0	-17.8	-18	-0.2
199	-83	-3.2	-19.0	-19	0.0
200	-87	-3.3	-19.8	-20	-0.2
201	-90	-3.4	-20.5	-21	-0.5
202	-96	-3.7	-22.0	-22	0.0
203	-99	-3.8	-22.8	-23	-0.2
204	-102	-3.9	-23.5	-24	-0.5
205	-107	-4.1	-24.7	-25	-0.3
206	-110	-4.2	-25.5	-26	-0.5
207	-114	-4.4	-26.5	-27	-0.5
208	-118	-4.5	-27.5	-28	-0.5
209	-122	-4.7	-28.5	-29	-0.5
210	-127	-4.9	-29.7	-30	-0.3
211	-131	-5.0	-30.7	-31	-0.3
212	-135	-5.2	-31.7	-32	-0.3
213	-139	-5.3	-33.0	-33	0.0
214	-143	-5.5	-34.0	-34	0.0
215	-145	-5.5	-34.5	-35	-0.5
216	-149	-5.7	-35.7	-36	-0.3
217	-153	-5.9	-36.7	-37	-0.3
218	-157	-6.0	-37.7	-38	-0.3
219	-160	-6.1	-38.7	-39	-0.3
220	-165	-6.3	-40.0	-40	0.0
221	-167	-6.4	-40.7	-41	-0.3
222	-170	-6.5	-41.7	-42	-0.3
223	-174	-6.7	-42.7	-43	-0.3
224	-176	-6.7	-43.4	-44	-0.6
225	-180	-6.9	-44.7	-45	-0.3
226	-181	-6.9	-45.0	-46	-1.0
227	-185	-7.1	-46.3	-47	-0.7
228	-190	-7.3	-48.0	-48	0.0
229	-192	-7.4	-48.7	-49	-0.3
230	-195	-7.5	-49.6	-50	-0.4

231	-199	-7.6	-51.0	-51	0.0
232	-201	-7.7	-51.6	-52	-0.4
233	-202	-7.8	-52.3	-53	-0.7
234	-207	-7.9	-54.0	-54	0.0
235	-209	-8.0	-54.6	-55	-0.4
236	-210	-8.1	-55.2	-56	-0.8
237	-214	-8.2	-56.6	-57	-0.4
238	-216	-8.3	-57.6	-58	-0.4
239	-218	-8.4	-58.6	-59	-0.4
240	-220	-8.4	-59.1	-60	-0.9
241	-222	-8.5	-60.1	-61	-0.9
242	-225	-8.6	-61.5	-62	-0.5
243	-227	-8.7	-62.5	-63	-0.5
244	-229	-8.8	-63.5	-64	-0.5
245	-232	-8.9	-65.0	-65	0.0
246	-234	-9.0	-66.0	-66	0.0
247	-234	-9.0	-65.9	-67	-1.1
248	-236	-9.1	-67.4	-68	-0.6
249	-238	-9.1	-68.4	-69	-0.6
250	-240	-9.2	-69.4	-70	-0.6
251	-241	-9.2	-70.3	-71	-0.7
252	-243	-9.3	-72.0	-72	0.0
253	-244	-9.3	-72.2	-73	-0.8
254	-245	-9.4	-73.2	-74	-0.8
255	-246	-9.4	-74.2	-75	-0.8
256	-246	-9.4	-74.3	-76	-1.7
257	-248	-9.5	-76.0	-77	-1.0
258	-248	-9.5	-76.0	-78	-2.0
259	-249	-9.6	-76.9	-79	-2.1
260	-251	-9.6	-78.8	-80	-1.2
261	-252	-9.7	-79.7	-81	-1.3
262	-254	-9.7	-82.0	-82	0.0
263	-254	-9.7	-83.0	-83	0.0
264	-256	-9.8	-86.8	-84	2.8
265	-255	-9.8	-85.0	-85	0.0
266	-255	-9.8	-86.0	-86	0.0
267	-255	-9.8	-84.1	-87	-2.9
268	-256	-9.8	-88.0	-88	0.0
269	-255	-9.8	-84.8	-89	-4.2
270	-255	-9.8	-84.9	-90	-5.1
271	-255	-9.8	-84.8	-89	-4.2
272	-255	-9.8	-84.6	-88	-3.4
273	-254	-9.7	-82.2	-87	-4.8
274	-254	-9.7	-83.6	-86	-2.4
275	-254	-9.7	-82.9	-85	-2.1
276	-254	-9.7	-82.2	-84	-1.8
277	-254	-9.7	-83.0	-83	0.0

278	-254	-9.7	-82.0	-82	0.0
279	-254	-9.7	-82.6	-81	1.6
280	-253	-9.7	-81.4	-80	1.4
281	-251	-9.6	-79.0	-79	0.0
282	-249	-9.6	-77.0	-78	-1.0
283	-248	-9.5	-76.0	-77	-1.0
284	-248	-9.5	-76.0	-76	0.0
285	-246	-9.4	-74.2	-75	-0.8
286	-245	-9.4	-73.2	-74	-0.8
287	-244	-9.3	-72.3	-73	-0.7
288	-241	-9.3	-70.6	-72	-1.4
289	-241	-9.2	-70.3	-71	-0.7
290	-240	-9.2	-69.4	-70	-0.6
291	-237	-9.1	-67.8	-69	-1.2
292	-237	-9.1	-68.0	-68	0.0
293	-235	-9.0	-66.4	-67	-0.6
294	-233	-8.9	-65.5	-66	-0.5
295	-232	-8.9	-65.0	-65	0.0
296	-229	-8.8	-63.5	-64	-0.5
297	-226	-8.7	-62.0	-63	-1.0
298	-226	-8.7	-62.0	-62	0.0
299	-223	-8.5	-60.6	-61	-0.4
300	-220	-8.4	-59.1	-60	-0.9
301	-218	-8.4	-58.6	-59	-0.4
302	-215	-8.2	-57.2	-58	-0.8
303	-213	-8.2	-56.2	-57	-0.8
304	-210	-8.1	-55.2	-56	-0.8
305	-208	-8.0	-54.2	-55	-0.8
306	-206	-7.9	-53.6	-54	-0.4
307	-203	-7.8	-52.6	-53	-0.4
308	-201	-7.7	-51.6	-52	-0.4
309	-199	-7.6	-51.0	-51	0.0
310	-196	-7.5	-50.0	-50	0.0
311	-191	-7.3	-48.3	-49	-0.7
312	-189	-7.3	-47.7	-48	-0.3
313	-186	-7.1	-46.7	-47	-0.3
314	-183	-7.0	-45.7	-46	-0.3
315	-180	-6.9	-44.7	-45	-0.3
316	-178	-6.8	-44.0	-44	0.0
317	-174	-6.7	-42.7	-43	-0.3
318	-170	-6.5	-41.7	-42	-0.3
319	-167	-6.4	-40.7	-41	-0.3
320	-163	-6.2	-39.4	-40	-0.6
321	-160	-6.1	-38.7	-39	-0.3
322	-156	-6.0	-37.4	-38	-0.6
323	-152	-5.8	-36.5	-37	-0.5
324	-151	-5.8	-36.0	-36	0.0

325	-146	-5.6	-34.7	-35	-0.3
326	-142	-5.4	-33.7	-34	-0.3
327	-139	-5.3	-33.0	-33	0.0
328	-135	-5.2	-31.7	-32	-0.3
329	-130	-5.0	-30.5	-31	-0.5
330	-128	-4.9	-30.0	-30	0.0
331	-123	-4.7	-28.8	-29	-0.2
332	-118	-4.5	-27.5	-28	-0.5
333	-115	-4.4	-26.8	-27	-0.2
334	-110	-4.2	-25.5	-26	-0.5
335	-106	-4.1	-24.5	-25	-0.5
336	-102	-3.9	-23.5	-24	-0.5
337	-98	-3.8	-22.5	-23	-0.5
338	-95	-3.6	-21.8	-22	-0.2
339	-91	-3.5	-20.8	-21	-0.2
340	-87	-3.3	-19.8	-20	-0.2
341	-83	-3.2	-19.0	-19	0.0
342	-79	-3.0	-18.0	-18	0.0
343	-75	-2.9	-17.0	-17	0.0
344	-72	-2.7	-16.2	-16	0.2
345	-67	-2.6	-15.2	-15	0.2
346	-63	-2.4	-14.2	-14	0.2
347	-58	-2.2	-13.0	-13	0.0
348	-53	-2.0	-12.0	-12	0.0
349	-48	-1.8	-10.8	-11	-0.2
350	-43	-1.7	-9.8	-10	-0.2
351	-39	-1.5	-8.8	-9	-0.2
352	-34	-1.3	-7.6	-8	-0.4
353	-30	-1.2	-6.8	-7	-0.2
354	-25	-1.0	-5.6	-6	-0.4
355	-20	-0.8	-4.6	-5	-0.4
356	-18	-0.7	-4.0	-4	0.0
357	-12	-0.5	-2.8	-3	-0.2
358	-8	-0.3	-1.8	-2	-0.2
359	-5	-0.2	-1.0	-1	0.0
360	1	0.0	0.2	0	-0.2

5-as priedas. Pilnas programinis kodas jutiklių nustatymui ir dinaminių parametų apskaičiavimui.

```
// bibliotekos ir registro adresu ivedimas
#include <Wire.h>

//I2C adresas L3G4200D giroskopui
int L3G4200D_Address = 105;
#define CTRL_REG1 0x20
#define CTRL_REG2 0x21
#define CTRL_REG3 0x22
#define CTRL_REG4 0x23
#define CTRL_REG5 0x24

#define ADXL345_Address (0x53) // Device address as specified in data sheet
byte _buff[6];
char POWER_CTL = 0x2D; //Power Control Register
char DATA_FORMAT = 0x31;
char DATA_X0 = 0x32; //X-Axis Data 0
char DATA_X1 = 0x33; //X-Axis Data 1
char DATA_Y0 = 0x34; //Y-Axis Data 0
char DATA_Y1 = 0x35; //Y-Axis Data 1
char DATA_Z0 = 0x36; //Z-Axis Data 0
char DATA_Z1 = 0x37; //Z-Axis Data 1

//kintamuju ivedimas
int aa=0;
int bb=0;
int cc=0;
int a0=0;
int b0=0;
int c0=0;
float a=0.0;
float b=0.0;
float c=0.0;
int dreif_a=8;
int dreif_b=6;
int dreif_c=-17;
float x=0.00;
float y=0.00;
float z=0.00;
int _x=0;
int _y=0;
int _z=0;
float time=0.0;
float time0=0.0;
float t=0.0;
int freq = 5;
//const float PI;
const float g=9.81;
float mod=10;

void setup(){

  Wire.begin(ADXL345_Address);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("ADXL345 setup");
  //Put the ADXL345 into +/- 4G range by writing the value 0x01 to the DATA_FORMAT register.
  writeTo(DATA_FORMAT, 0x1101);
  //Put the ADXL345 into Measurement Mode by writing 0x08 to the POWER_CTL register.
  writeTo(POWER_CTL, 0x08);

  delay(10);
```

```

Wire.begin(L3G4200D_Address);
Serial.println("L3G4200D setup");
setupL3G4200D();

delay(50);

uint8_t howManyBytesToRead = 6;
readFrom( DATA0, howManyBytesToRead, _buff); //read the acceleration data from the ADXL345
// each axis reading comes in 10 bit resolution, ie 2 bytes. Least Significant Byte first!!
// thus we are converting both bytes in to one int
int _x = (((int)_buff[1]) << 8) | _buff[0];
int _y = (((int)_buff[3]) << 8) | _buff[2];
int _z = (((int)_buff[5]) << 8) | _buff[4];
_x=_x-12;
_z=_z-6;

b=90.0-acos(_x/128.0)*180.0/PI;
if (_y<=0)
{
a=180.0-acos(_z/128.0/cos(b*PI/180))*180.0/PI;
}
else
{
a=180.0+acos(_z/128.0/cos(b*PI/180))*180.0/PI;
}
c=0.0;

Serial.print(time);
Serial.print(" ");
Serial.print(_x);
Serial.print(" ");
Serial.print(_y);
Serial.print(" ");
Serial.print(_z);
Serial.print(" ");
Serial.print(a);
Serial.print(" ");
Serial.print(b);
Serial.print(" ");
Serial.println(c);

delay(1000);
}
//pagrindine programa
void loop(){

//laiko aprasymas skirtas duomeniu stebejimui
time0=time;
time = micros()/1000.000;
t=(time-time0);
getGyroValues();
getAccValues();
float x=_x/128.0*g;
float y=_y/128.0*g;
float z=_z/128.0*g;
//pasisukimo kampo nuo 0 padeties apskaiciavimas
a=a+aa/14.3*t/1000.0;
b=b-bb/14.3*t/1000.0;
c=c+cc/14.3*t/1000.0;
//veikiamu pagreiciu nustatymas

```

```

//duomenų išvedimas kompiuteryje
Serial.print(time);
Serial.print("\t");
Serial.print(_x);
Serial.print("\t");
Serial.print(_y);
Serial.print("\t");
Serial.print(_z);
Serial.print("\t");
Serial.print(a);
Serial.print("\t");
Serial.print(b);
Serial.print("\t");
Serial.print(c);
Serial.println();
delay(1000/freq);
}
//giroskopo domenu nuskaitymas is L3G4200D registro
void getGyroValues(){
  Wire.begin(L3G4200D_Address);
  byte xMSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x29);
  byte xLSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x28);
  aa = ((xMSB << 8) | xLSB)+dreif_a;
  byte yMSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x2B);
  byte yLSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x2A);
  bb = ((yMSB << 8) | yLSB)+dreif_b;
  byte zMSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x2D);
  byte zLSB = readRegister(L3G4200D_Address, 0x2C);
  cc = ((zMSB << 8) | zLSB)+dreif_c;
}

void getAccValues() {

Wire.begin(ADXL345_Address);
uint8_t howManyBytesToRead = 6;
readFrom( DATA_X0, howManyBytesToRead, _buff); //read the acceleration data from the ADXL345
// each axis reading comes in 10 bit resolution, ie 2 bytes. Least Significant Byte first!!
// thus we are converting both bytes in to one int
int _x = (((int)_buff[1]) << 8) | _buff[0];
int _y = (((int)_buff[3]) << 8) | _buff[2];
int _z = (((int)_buff[5]) << 8) | _buff[4];
_x=_x-12;
_z=_z-6;
}
//L3G4200D nustatymų išvedimas
int setupL3G4200D(){
  //jutiklio įjungimas; sukimosi apie x, y, z ašis įjungimas
  writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG1, 0b00001111);
  //duomenų filtrai
  writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG2, 0b00000000);
  //signalų išvedimo nustatymai
  writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG3, 0b00001000);
  //giroskopo jautrumo nustatymas (galima panaikinti if jei nekeičiamas)
  writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG4, 0b00110000);
  mod=1;
  //duomenų filtravimas
  writeRegister(L3G4200D_Address, CTRL_REG5, 0b00000000);
}
//duomenų įrašymas į registrus
void writeRegister(int deviceAddress, byte address, byte val) {
  Wire.beginTransmission(deviceAddress);

```

```

Wire.write(address);
Wire.write(val);
Wire.endTransmission();
}
//duomenu nuskaitymas is registru
int readRegister(int deviceAddress, byte address){

int v;
Wire.beginTransmission(deviceAddress);
Wire.write(address); // register to read
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(deviceAddress, 1);
while(!Wire.available() {
}
v = Wire.read();
return v;
}

void writeTo(byte address, byte val) {
Wire.beginTransmission(ADXL345_Address); // start transmission to device
Wire.write(address); // send register address
Wire.write(val); // send value to write
Wire.endTransmission(); // end transmission
}
// Reads num bytes starting from address register on device in to _buff array
void readFrom(byte address, int num, byte _buff[]) {
Wire.beginTransmission(ADXL345_Address); // start transmission to device
Wire.write(address); // sends address to read from
Wire.endTransmission(); // end transmission
Wire.beginTransmission(ADXL345_Address); // start transmission to device
Wire.requestFrom(ADXL345_Address, num); // request 6 bytes from device
int i = 0;
while(Wire.available()) // device may send less than requested (abnormal)
{
_buff[i] = Wire.read(); // receive a byte
i++;
}
Wire.endTransmission(); // end transmission
}

```