



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Eldar Šabanovič

**OBJEKTŲ ORIENTACIJOS ERDVĖJE NUSTATYMO METODŲ
TYRIMAS**

**INVESTIGATION OF THE METHODS FOR ESTIMATION OF OBJECTS
ORIENTATION IN SPACE**

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003

Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

Vilnius, 2015

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)
prof. habil. dr. R. Martavičius
2013 m. _____ mėn.
____ d.

Eldar Šabanovič

**OBJEKTŲ ORIENTACIJOS ERDVĖJE NUSTATYMO METODŲ
TYRIMAS**
**INVESTIGATION OF THE METHODS FOR ESTIMATION OF OBJECTS
ORIENTATION IN SPACE**

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis
Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003
Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

Vadovas

dr. Raimondas Pomarnacki

(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)

Konsultantė

dr. Aušra Žemienė

(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)

(parašas)

(data)

2015-05-28

(parašas)

(data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Technologijos mokslų sritis
Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo kryptis
Elektronikos inžinerijos studijų kryptis
Elektronikos studijų programa, valst. kodas 621H61003
Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

prof. habil. dr. R. Martavičius

2015 m. 03 mėn. 27 d.

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO
UŽDUOTIS

Studentui

Eldar ŠABANOVIČ

Baigiamojo darbo tema: Objektų orientacijos erdvėje nustatymo metodų tyrimas

Investigation Of The Methods For Estimation Of Objects Orientation
In Space

Patvirtinta 2013 m. 10 mėn. 30 d. dekanų potvarkiu Nr. 393 el

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2015 m. 06 mėn. 4 d.

Darbo tikslas – palyginti objektų orientacijos nustatymo metodus įgyvendinus juos mikrovaldiklyje.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti metodų taikomų objektų orientacijai nustatyti, analitinę apžvalgą.
2. Įgyvendinti trijų orientacijos nustatymo metodų algoritmus mikrovaldiklyje.
3. Atlikti orientacijos nustatymo algoritmų tikslumo ir greitaveikos lyginamąją analizę.

Aiškinamojo rašto turinys

1. Įvadas
 - 1.1. Darbo aktualumas ir tikslas
 - 1.2. Darbo uždaviniai
 - 1.3. Naudoti tyrimo ir analizės metodai
 - 1.4. Darbo naujumas ir praktinė nauda
 - 1.5. Darbo struktūra
2. Analitinė literatūros apžvalga
3. Orientacijos nustatymo algoritmų sudarymas
4. Orientacijos nustatymo algoritmų įgyvendinimas ir patikra

5. Tyrimo rezultatų analizė

6. Apibendrinimas. Išvados

Literatūra

Priedai

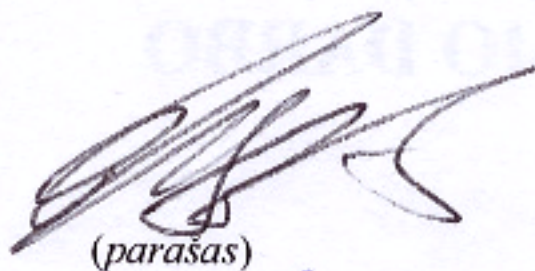
A priedas. Pažyma apie XVIII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje baigiamojo darbo tema skaitytą pranešimą.

B priedas. Pranešimo XVIII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga.

C priedas. Sukurtos programos ir programų išeities kodas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantas:

Vadovas

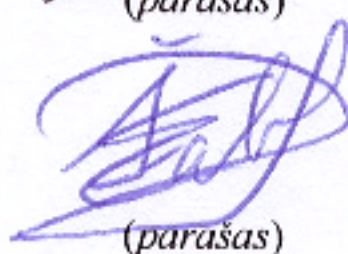


(parašas)

(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)

dr. R. Rimanauskis
(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau



(parašas)

2015 m. 05 mėn. 04 d.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų,
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Eldar Šabanovič, 20092907

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Elektronikos inžinerija, EKSfm-13

(Studijų programa, akademinė grupė)

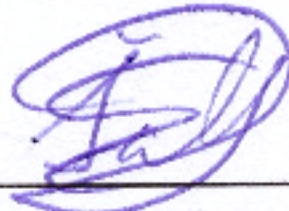
**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽINGUMO DEKLARACIJA**

2015 m. birželio 4 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Objektų orientacijos erdvėje nustatymo metodų tyrimas“ patvirtintas 2013 m. spalio 30 d. dekanų potvarkiu Nr. 393el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: dr. Aušra Žemienė. Mano darbo vadovas dr. Raimondas Pomarnacki.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Eldar Šabanovič

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektroninių sistemų katedra

ISBN
Egz. sk.
Data-.....-..... ISSN

Antrosios pakopos studijų **Elektronikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas

Objektų orientacijos erdvėje nustatymo metodų tyrimas

Autorius

Eldar Šabanovič

Vadovas

dr. Raimondas Pomarnacki

Kalba: lietuvių

Anotacija

Objektų orientacijos nustatymo metodų tyrimas. Magistro baigiamasis darbas elektronikos inžinerijos laipsniui. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius, 2015, 66 p. teksto be priedų, 43 iliustr., 4 lent., 29 bibl.

Magistro baigiamojo darbo tikslas – palyginti objektų orientacijos nustatymo metodus, įgyvendinus juos mikrovaldiklyje. Mikrovaldiklyje yra įgyvendinti trys orientacijos nustatymo iš orientacijos jutiklių duomenų algoritmai: Kalmano filtro, išplėstinio Kalmano filtro ir komplementariojo filtro. Atlikta orientacijos nustatymo algoritmų tikslumo ir greitaveikos patikra, pagal kurios rezultatus metodai palyginti. Orientacijos tikslumo patikrai atlikti naudojami trimis ašimis judantys stendai.

Prasminiai žodžiai: Kalmano filtras, komplementarusis filtras, objekto orientacijos nustatymas, įterptinė sistema.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Electronic Systems

ISBN
Copies No.
Date-.....-..... ISSN

Master Degree Studies **Electronics Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Investigation of the Methods for Estimation of Objects Orientation in Space**

Author **Eldar Šabanovič**

Academic supervisor **Dr Raimondas Pomarnacki**

**Thesis
language:** Lithuanian

Annotation

Investigation of the Methods for Estimation of Objects Orientation in Space. Master Thesis for Electronics Engineering degree. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius, 2013, 66 p., 43 figures, 4 tables, 29 references.

The main goal of this Master Thesis is to do a comparison of the methods for estimation of objects orientation by implementing in microcontroller. There were implemented three attitude estimation algorithms: Kalman filter, Extended Kalman filter, complementary filter. Algorithms accuracy and execution time tested and compared. Accuracy was tested using three axis orientation workbenches.

Keywords: Kalman filter, complementary filter, attitude determination, embedded system.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	11
SANTRUMPOS	13
IVADAS	15
1. ANALITINĖ LITERATŪROS APŽVALGA	19
1.1. Objekto orientacijos matavimas ir aprašymas	19
1.1.1. Atskaitos sistemos	19
1.1.2. Jutikliai	20
1.1.3. Orientacijos aprašymo būdai	24
1.2. Objekto orientacijos erdvėje nustatymas	28
1.3. Absoliučiosios ir santykinės orientacijos duomenų susiejimas	29
1.3.1. Kalmano filtrai	29
1.3.2. Komplementarusis filtras	31
1.4. Tiriamųjų metodų ir bandymų įrangos atranka	32
1.5. Skyriaus išvados	33
2. ORIENTACIJOS NUSTATYMO ALGORITMŲ SUDARYMAS	35
2.1. Orientacijos nustatymas akcelerometru ir magnetometru	35
2.2. Orientacijos nustatymas giroroskopu	37
2.3. Kalmano filtras	38
2.4. Išplėstinis Kalmano filtras	42
2.5. Komplementarusis filtras su proporciniu-integruojančiu valdymu	43
2.6. Skyriaus išvados	44
3. ORIENTACIJOS NUSTATYMO ALGORITMŲ ĮGYVENDINIMAS IR PATIKRA	45
3.1. Įterptinė sistema bandymams atlikti	45
3.2. Magnetometro kalibravimas	46
3.3. Giroskopo matavimų temperatūrinio slinkio kompensavimas	47
3.4. Orientacijos nustatymo algoritmų patikra	53
3.4.1. Bandymų stendas	53
3.4.2. Tikslumo tyrimo sekos sudarymas	55
3.4.3. Objekto orientacijos atvaizdavimo programinė įranga	57
3.4.4. Orientacijos nustatymo algoritmų greیتaveikos patikra	59
3.5. Skyriaus išvados	59
4. TYRIMO REZULTATŲ ANALIZĖ	61
4.1. Pirminio jutiklių duomenų apdorojimo ir filtravimo rezultatai	61
4.2. Giroskopo temperatūrinės slinkties kompensavimo rezultatai	65
4.3. Kalmano filtro tikslumo rezultatai	67
4.4. Išplėstinio Kalmano filtro tikslumo rezultatai	68
4.5. Komplementariojo filtro tikslumo rezultatai	69
4.6. Orientacijos nustatymo algoritmų palyginimas	71
4.7. Skyriaus išvados	72
APIBENDRINIMAS. IŠVADOS	73
LITERATŪROS SĄRAŠAS	77
SUMMARY	79
PRIEDAI	81
A. Pažyma apie XVIII Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje darbo tema skaitytą pranešimą	81

B. Pranešimo XVIII Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga (pateikta kompaktiniame diske)	81
C. Programų išeities kodas (pateiktas kompaktiniame diske).....	81
D. Plakatai (pateikti kompaktiniame diske)	81

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Vektoriaus sukimas Eulerio kampu (Markley, Crassidis 2014 : 41).....	24
1.2 pav. Įprastas Kalmano filtro taikymas (Pileckas 2011).....	30
1.3 pav. Komplementarusis filtras (Kim 2010).....	31
2.2 pav. Komplementarusis filtras su proporcinė integruojančia giroskopo klaidos korekcija (Kim 2010).....	43
3.1 pav. Magnetometro jautrumas pagal X ir Y ašis	47
3.2 pav. Duomenų rinkimo programos vartotojo sąsaja.....	48
3.3 pav. Eksperimento įranga.....	49
3.4 pav. Temperatūros kitimas pagal matavimo numerį	49
3.5 pav. Neuronų tinklo mokymo algoritmo blokinė schema	50
3.6 pav. Sudaryto neuronų tinklo schema	51
3.7 pav. Daugiasluoksnių perceptrono mokymo atgalinio skleidimo metodu schema	52
3.8 pav. Pirmasis trijų ašių stendas	53
3.9 pav. Stendo valdymo ir elektrinės dalies struktūrinė schema	54
3.10 pav. Antrasis trijų ašių stendas	55
3.11 pav. Stendo judėjimas pagal X ašį.....	56
3.12 pav. Stendo judėjimas pagal Y ašį.....	56
3.13 pav. Stendo judėjimas pagal Z ašį.....	56
3.14 pav. Objekto orientacijos atvaizdavimo programa <i>LabVIEW</i> aplinkoje	57
3.15 pav. Objekto orientacijos atvaizdavimo programos <i>LabVIEW</i> aplinkoje schema	58
4.1 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal X ašį apskaičiuotas iš nefiltruotų matavimo duomenų.....	61
4.2 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal Y ašį apskaičiuotas iš nefiltruotų matavimo duomenų.....	61
4.3 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal Z ašį apskaičiuotas iš nefiltruotų matavimo duomenų.....	62
4.4 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal X ašį apskaičiuotas iš filtruotų matavimo duomenų	62
4.5 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal Y ašį apskaičiuotas iš filtruotų matavimo duomenų.....	62
4.6 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal Z ašį apskaičiuotas iš nefiltruotų matavimo duomenų.....	63
4.7 pav. Magnetometro ir stendo nuokrypis pagal Z ašį	63
4.8 pav. Giroskopo nuokrypis pagal X ašį.....	64
4.9 pav. Giroskopo nuokrypis pagal Y ašį.....	64
4.10 pav. Giroskopo nuokrypis pagal Z ašį	64
4.11 pav. X ašies išmatuotos vertės ir aproksimacija	65
4.12 pav. Y ašies išmatuotos vertės ir aproksimacija	65
4.13 pav. Z ašies išmatuotos vertės ir aproksimacija	66
4.14 pav. Nuokrypis pagal X ašį apskaičiuotas taikant Kalmano filtrą.....	67
4.15 pav. Nuokrypis pagal Y ašį apskaičiuotas taikant Kalmano filtrą.....	67
4.16 pav. Nuokrypis pagal Z ašį apskaičiuotas taikant Kalmano filtrą.....	67
4.17 pav. Nuokrypis pagal X ašį apskaičiuotas taikant išplėstinį Kalmano filtrą	68
4.18 pav. Nuokrypis pagal Y ašį apskaičiuotas taikant išplėstinį Kalmano filtrą.....	69
4.19 pav. Nuokrypis pagal Z ašį apskaičiuotas taikant išplėstinį Kalmano filtrą.....	69
4.20 pav. Nuokrypis pagal X ašį apskaičiuotas taikant komplementarųjį filtrą	70
4.21 pav. Nuokrypis pagal Y ašį apskaičiuotas taikant komplementarųjį filtrą	70
4.22 pav. Nuokrypis pagal Z ašį apskaičiuotas taikant komplementarųjį filtrą	70
4.23 pav. Algoritmų vykdymo laikas	72

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Jutiklių tinkamumas orientacijos nustatymo sritims	23
3.1 lentelė. Signalų apdorojimo bibliotekos funkcijos darbui su matricomis	46
4.1 lentelė. Sukauptas orientacijos neapibrėžtumas	66
4.2 lentelė. Orientacijos nustatymo algoritmų tikslumo palyginimas	71

SANTRUMPOS

I ² C (angl. <i>inter-integrated circuit</i>)	–	nuosekioji duomenų perdavimo sąsaja
UART (angl. <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>)	–	universalusis asinchroninis imtuvas-siųstuvas
MEMS (angl. <i>Micro Electro Mechanical Systems</i>)	–	mikrometrų eilės dydžio elektrinės ir mechaninės sistemos
USB (angl. <i>universal serial bus</i>)	–	universalioji magistralė
TRIAD (angl. <i>TRIaxial Attitude Determination</i>)	–	trijų ašių orientacijos nustatymo metodas
ASK	–	analoginis-skaitmeninis keitiklis

ĮVADAS

Darbo aktualumas ir tikslas

Orientacijos nustatymo metodai – tai taikomosios matematikos metodai ir algoritmai, kurie naudojami objekto orientacijai erdvėje apskaičiuoti pagal jutiklių pateikiamus duomenis. Šiuos metodus pradėta tobulinti XX a. 6 dešimtmetyje, kai JAV rengiant pilotuojamų erdvėlaivių programą *Apollo*, skirtą Mėnuliui tirti, prireikė navigacijos sistemos. Tuo metu orientacija kosmose buvo nustatoma pagal žvaigždžių išsidėstymą. Kai erdvėlaivis juda dideliu greičiu ir sukasi aplink savo masės centrą, astronautui sunku operatyviai nustatyti orientaciją. Dėl to skrydžiui į Mėnulį reikėjo orientacijos nustatymo metodo, kuriuo galima būtų sparčiau ir tiksliau nustatyti erdvėlaivio orientaciją. Skrydžio valdymo kompiuteryje buvo pritaikytas orientacijos nustatymo algoritmas, apdorojantis inercinių jutiklių matavimo duomenis. Skrydžio aplink Mėnulį metu tokia sistema veikė tinkamai. Taip įrodyta, kad tokios sistemos yra galimos ir naudingos.

Orientacijos nustatymo metodai taikomi skirtingų rūšių jutiklių teikiamiems duomenims apdoroti ir susieti. Akcelerometras, giroskopas, magnetometras yra naudojamų jutiklių pavyzdžiai. Šie jutikliai gaminami skirtingų tipų, pvz., buitiniai, industriniai, aviaciniai ir kariniai. Kariniai ir komerciniai orientacijos nustatymo metodai yra gerai išplėtoti, tačiau jų veikimą užtikrina itin tikslūs kariniai ir komerciniai jutikliai, kurie smulkiajam verslui, o ypač individualiam naudojimui ir pritaikymui smulkiems objektams yra per brangūs, per dideli, vartoja per daug energijos. XX a. viduryje prasidėjusi puslaidininkių revoliucija leido stipriai sumažinti navigacijos sistemų dydį ir vartojamą galią, padidinti tikslumą ir sumažinti kainą. Nuo 8 dešimtmečio jutikliams gaminti naudojama mikrometrų eilės dydžio elektrinių ir mechaninių sistemų (angl. *Micro-Electro-Mechanical Systems*, toliau – MEMS) integravimo viename luste technologija. Šiuo metu daugelis buitinių ir industrinių jutiklių yra MEMS tipo. Palyginti su kariniais ir aviaciniais jutikliais, buitiniai ir industriniai MEMS jutikliai turi prastesnius matavimo tikslumo, dažnio bei triukšmo lygio parametrus. Tačiau taikant orientacijos nustatymo algoritmus, jutiklių tikslumas padidinamas, o triukšmo lygis sumažinamas (Chao *et al.* 2010).

Augant visuotiniam susidomėjimui bepiločiais orlaiviais bei tobulėjant kosmoso technologijoms, individualūs kūrėjai, privačios kompanijos ir valstybės skiria daug lėšų orientacijos nustatymo metodų, veikiančių su MEMS jutikliais, tobulinimui; šiuo metu tai yra aktuali tema. Kuriant orientacijos nustatymo įrenginius, paremtus matematiniais orientacijos nustatymo metodais, susiduriama su tikslumo didinimo ir skaičiavimo resursų mažinimo problemomis, o išsirinkti konkretų metodą, neatlikus bandymų, neįmanoma. Todėl šio magistro baigiamojo **darbo tikslas** – palyginti objektų orientacijos nustatymo metodus, įgyvendinus juos mikrovaldiklyje.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti, buvo suformuoti šie uždaviniai:

1. Atlikti metodų, taikomų objektų orientacijai nustatyti, analitinę apžvalgą.
2. Įgyvendinti trijų orientacijos nustatymo metodų algoritmus mikrovaldiklyje.
3. Atlikti orientacijos nustatymo algoritmų tikslumo ir greitaveikos lyginamąją analizę.

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Darbo metu įterptinėje sistemoje realizuoti šie orientacijos nustatymo metodai: Kalmano filtras, išplėstinis Kalmano filtras, komplementarusis filtras. Tyrimas grindžiamas literatūros analizės, eksperimentinės analizės, matematinės statistinės analizės, lyginamosios analizės, loginės indukcijos metodais. Tyrimo metu pritaikyta mikrovaldiklių programavimo C kalba, nuosekliosios duomenų perdavimo sąsajos (angl. *Inter-Integrated Circuit*, toliau I²C) bei universaliojo asinchroninio imtuvo-siųstuvo (angl. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, toliau UART) taikymo žinios.

Mikrovaldiklio programos, kuriomis realizuojami tiriamųjų metodų algoritmai ir stendo valdymas, sukurtos naudojant kompanijos *IAR Systems* programavimo aplinką *IAR Embedded Workbench* (toliau – įterptinių sistemų programavimo aplinka). Programos, skirtos giroskopo kampinio greičio nulinio taško temperatūrinės slinkties charakteristikai matuoti bei objekto orientacijos duomenims atvaizduoti, sudarytos naudojant *National Instruments LabVIEW* virtualiųjų instrumentų kūrimo aplinką.

Tyrimo metu naudota įranga:

- demonstracinė plokštė STM32F4-DISCOVERY (gamintojas *STMicroelectronics*);
- demonstracinė plokštė NUCLEO-F401RE (gamintojas *STMicroelectronics*);
- 3 žingsninio variklio valdiklio plokštės X-NUCLEO-IHM01A1 (gamintojas *STMicroelectronics*);
- jutiklių mikroschema MPU-9150 su 3 ašių akcelerometru, magnetometru ir giroskopu (gamintojas *Invensense*);
- stalinė reguliuojamos temperatūros ir drėgnio kamera SH-241 (gamintojas *ESPEC*);
- stendas, pasukamas trimis koordinačių sistemos ašimis;
- kompiuteris su keliomis USB jungtimis ir USB-UART keitiklis FTDI232.

Orientacijos nustatymo algoritmų tikslumui tirti MPU-9150 pritvirtinta prie stendo. Bandymų metu įrašoma orientacija, gauta iš žingsninių variklių valdiklių ir iš STM32F4-DISCOVERY mikrovaldiklyje įdiegtų orientacijos nustatymo algoritmų. Stendo valdymo programa realizuota NUCLEO-F401RE plokštės mikrovaldiklyje, ji valdoma per UART. Stendo žingsninių variklių valdymo galios dalis sudaryta iš trijų L298N mikroschemų, kurios vėliau pakeistos X-NUCLEO-

IHM01A plokštėmis. Stendo valdymas, faktinės ir nustatytos orientacijos įrašymas atliekamas *LabVIEW* aplinkoje sudarytu virtualiuoju instrumentu.

Greitaveikos bandymai atlikti įterptinių sistemų programavimo aplinkoje. STM32F4-DISCOVERY plokštės mikrovaldiklyje derinimo režimu paleidžiami orientacijos nustatymo algoritmai ir fiksuojamas laikas, per kurį atliekamas algoritmas. Matavimo metu algoritmas vykdomas žinomą kartų skaičių, iš jo padalinamas visas laikas. Taip padidinamas greitaveikos matavimo tikslumas.

Tyrimo rezultatų analizei taikyta *MathWorks MATLAB* programa. Gauti rezultatai yra pateikiami grafikuose ir lentelėse.

Darbo naujumas ir praktinė nauda

Patirtis, sukaupia atliekant šį darbą gali būti naudojama vykdant tolesnius tyrimus orientacijos ir pozicijos nustatymo srityse, o šis aiškinamasis raštas – mokymo procese nagrinėjant orientacijos nustatymo metodus. Literatūroje apie tiriamuosius metodus pateikiama nemažai teorinės medžiagos, tačiau juos įgyvendinant įterptinėse sistemose susiduriama su praktinėmis problemomis. Iš jų pagrindinės – orientacijos nustatymo algoritmų pritaikymas konkrečiai sistemai, jutiklių atskaitos sistemų nesutapimai, dėl riboto skaičiavimų tikslumo atsirandančios skaičiavimo klaidos. Atliekant šį tyrimą buvo išspręstos problemos, su kuriomis susiduriama, realizuojant orientacijos nustatymo metodus.

Šis magistro baigiamasis darbas yra taikomojo pobūdžio: jo metu realizuoti orientacijos nustatymo metodai gali būti naudojami bepiločių orlaivių, mažųjų palydovų orientacijos nustatymo ir valdymo sistemose. Be to, nagrinėtieji orientacijos nustatymo metodai gali būti taikomi buityje, pvz., įrenginių valdymo judesiais pultuose, automobilių kryptinio stabilumo ir vaizdo kamerų stabilizavimo sistemose. Šio tyrimo metu įgyta patirtis jau naudojama kuriant palydovo LituanicaSat-2 palydovo orientacijos nustatymo ir valdymo sistemą. Tyrimo praktinę naudą didina ir tai, kad tyrimo metu sukurtoji stendo valdymo programa orientacijos nustatymo metodų tikslumui tirti buvo pritaikyta su šiuo tyrimu nesusijusio laboratorinio šviesos monochromatoriaus žingsninio variklio valdymui.

Objektų orientacijos nustatymo metodų tyrimo rezultatai pristatyti XVIII Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“. Pažyma apie konferencijoje skaitytą pranešimą pateikta A priede, o pranešimo medžiaga pateikta B priede.

Darbo struktūra

Šis darbas yra suskirstytas į šešis pagrindinius skyrius. Įvade yra aprašytas darbo aktualumas ir tikslas, įvardijamos užduotys, skirtos darbo tikslui pasiekti. Taip pat įvade pateikiami naudoti tyrimo ir analizės metodai, pagrindžiamas darbo naujumas ir praktinė nauda, aprašoma darbo struktūra.

Pirmajame skyriuje pateiktas įvadas, apžvelgiantis orientacijos nustatymo problematiką, atlikta analitinė literatūros apžvalga. Pirmojoje skyriaus dalyje aprašomi jutikliai, naudojami orientacijai nustatyti, apibūdinami orientacijos aprašymo būdai, orientacijos atskaitos sistemos. Antrojoje dalyje, remiantis literatūros šaltiniais, aptariami objektų orientacijos erdvėje nustatymo metodai, analizuojami jų pranašumai ir trūkumai, pateikiama autoriaus nuomonė bei darbe tiriamų orientacijos nustatymo metodų atranka.

Antrasis skyrius skirtas tiriamųjų orientacijos nustatymo metodų algoritmų aprašymui. Čia aprašyti jutiklių duomenų susiejimui naudojami Kalmano filtras, išplėstinis Kalmano filtras, komplementarusis filtras. Skyriuje pateikiamas išsamus algoritmų aprašymas.

Trečiajame skyriuje aprašoma algoritmų patikros aparatinė ir programinė įranga. Pateikiamas tyrimo metu naudotos įterptinės sistemos mikrovaldiklio ir jutiklių aprašymas, jutiklių kalibravimo procesas ir duomenų, gautų iš jutiklių, pirminis apdorojimas. Taip pat šiame skyriuje aprašomos programos, sukurtos tyrimui atlikti, ir tyrimui naudota įranga.

Ketvirtajame skyriuje aprašyti orientacijos nustatymo algoritmų tyrimo rezultatai. Atliekama matematinė analizė ir metodų tikslumo palyginimas. Antrojoje skyriaus dalyje pateikiami ir lyginami metodų greitaveikos bandymų rezultatai.

Paskutiniajame darbo skyriuje pateikiamos darbą apibendrinančios išvados.

Prieduose pateikiama pažyma apie konferencijoje skaitytą pranešimą baigiamojo darbo tema bei pranešimo medžiaga. Taip pat su darbu pateikiamas kompaktinis su aiškinamojo rašto elektronine versija. Taip pat kompaktiniame diske pateikiama:

- įterptinės sistemos orientacijos nustatymo algoritmų išeities kodas;
- stendo valdymo įterptinės sistemos programos išeities kodas;
- *LabVIEW* aplinkoje sukurti virtualieji instrumentai;
- bandymų rezultatų analizei ir atvaizdavimui skirtas *MATLAB* kodas.

1. ANALITINĖ LITERATŪROS APŽVALGA

Orientacijai nustatyti naudojamos sistemos yra sudarytos iš jutiklių, matavimų apdorojimo įrenginio ir programinės įrangos, kuri apdoroja jutiklių duomenis, nustato orientaciją ir siunčia rezultatą į orientacijos stebėjimo sistemą. Jutikliai matuoja parametrus, kuriuose yra informacijos apie objekto orientaciją, tačiau jutikliai tiesiogiai nenustato orientacijos, todėl būtina naudoti jutiklių duomenų sujungimo (angl. *sensor fusion*) metodus. Matavimų apdorojimo įrenginys – tai skaičiavimus atliekantis įtaisas, kuriame realizuoti orientacijos nustatymo metodai. Orientacijos nustatymo metodai gali būti skirti jutiklių duomenims apdoroti, filtruoti; absoliučiajai orientacijai nustatyti sujungiant jutiklių duomenis; absoliučiosios ir santykinės orientacijos skaičiavimo rezultatų sujungimui, siekiant sumažinti triukšmą ir padidinti tikslumą. Šiame skyriuje remiantis literatūros šaltiniais apibūdinti jutikliai, naudojami orientacijai nustatyti, atskaitos sistemos ir orientacijos aprašymo būdai. Taip pat analizuoti šaltiniuose aprašytieji objekto orientacijos nustatymo metodai. Atlikus analitinę literatūros apžvalgą pasirinkti tyrimo metodai ir bandymų įranga.

1.1. Objekto orientacijos matavimas ir aprašymas

Matuojant orientaciją, visų pirma, svarbu žinoti, kurios atskaitos sistemos atžvilgiu vyksta matavimas. Taip pat svarbu pasirinkti orientacijos matavimo jutiklius, suprasti jų veikimą, pranašumus ir trūkumus. Galiausiai, reikia žinoti, kokie būdai naudojami išmatuotai ir apskaičiuotai orientacijai užrašyti, kokia jų esmė, kaip vienu būdu išreikštą orientaciją pakeisti į kitą ir kokiems tikslams naudojami konkretūs orientacijos užrašymo būdai. Šis poskyris skirtas atskaitos sistemoms, jutikliams bei orientacijos aprašymo būdams analizuoti.

1.1.1. Atskaitos sistemos

Orientacijai nustatyti būtinas atskaitos taškas ir atskaitos sistema. Remiantis straipsniu (Chao *et al.* 2010), orientacijai ir vietai aprašyti naudojamos šios atskaitos sistemos:

- Objekto atskaitos sistema. Šios atskaitos sistemos nuliniu tašku laikomas objekto masės centras, o ašys nukreiptos į priekį, į dešinę ir į apačią. Jei jutiklio ašys ir objekto atskaitos sistemos ašys nesutampa, reikia transformuoti jutiklių matavimų duomenis iš jutiklio atskaitos sistemos į objekto atskaitos sistemą, pasukant tiek, kiek jutiklio atskaitos sistema yra pasukta objekto atskaitos sistemos atžvilgiu. Jutiklio atskaitos sistema – tai atskaitos sistema, kurios ašys sutampa su trimis jutiklio ašimis. Tokio tipo jutikliai turi statmenai vienas kitam išdėstytus jautriuosius elementus.
- Inercinė atskaitos sistema. Tai atskaitos sistema, turinti centrą Žemės paviršiuje, o jos ašys nukreiptos į šiaurę, į rytus ir į Žemės centrą. Objektui keičiant orientaciją, objekto atskaitos

sistemos ašys sukasi kartu su objektu, o objektui nejudant, inercinės atskaitos sistemos ašys lieka nukreiptos tomis pačiomis kryptimis. Inercinės atskaitos sistemos ašys yra susietos su Žemės šiaurės poliumi ir centru, todėl jos ašys Žemės centre fiksuotoje atskaitos sistemoje keičia kryptį, priklausomai nuo objekto vietos šioje atskaitos sistemoje.

- Žemės centre fiksuota atskaitos sistema. Atskaitos sistemos pradžios tašku yra laikomas Žemės centras, Z ašis eina per šiaurės polių, X ašis eina per pusiaują ties nuliniu dienovidiniu, o Y ašis eina iš centro per pusiaują 90 laipsnių kampu X ašiai.

Nustatant objekto orientaciją, svarbiausios objekto atskaitos ir inercinės atskaitos sistemos. Objekto orientacija randama nustatant orientacijos matricą, kuri pasuka žinomus inercinėje atskaitos sistemoje vektorius taip, kad jie sutaptų su tais pačiais vektoriais, išmatuotais objekto atskaitos sistemoje. Jutikliai, naudojami vektoriams išmatuoti, aprašyti sekančiame skyriuje. Orientacijos aprašymas orientacijos matrica pateiktas 1.1.3 skyrelyje.

1.1.2. Jutikliai

Orientacijai nustatyti naudojami absoliučiosios ir santykinės orientacijos jutikliai (Kroaker 2011). Naudojant absoliučiosios orientacijos jutiklius galima nustatyti orientaciją tam tikroje atskaitos sistemoje, o santykinės – orientacijos pokytį jutiklio atskaitos sistemoje. Absoliučiosios orientacijos jutiklių pavyzdžiais gali būti akcelerometras, posvyrio kampo jutiklis, magnetometras, Saulės krypties jutiklis, horizonto pokrypio jutiklis, žvaigždžių sekiklis. Santykinės orientacijos jutiklių pavyzdžiai – giroskopas, vaizdo posūkio jutiklis. Absoliučiosios orientacijos jutikliu galima nustatyti orientaciją pagal vieną arba dvi iš trijų trimatės atskaitos sistemos ašių. Jutiklių matavimai išreiškiami jutiklio atskaitos sistemoje. Orientacija pagal tris trimatės atskaitos sistemos ašis nustatoma sujungiant dviejų jutiklių, matuojančių orientaciją pagal skirtingas atskaitos sistemos ašis, duomenis. Santykinės orientacijos jutikliai gali matuoti orientacijos pokytį pagal tris trimatės atskaitos sistemos ašis. Jutikliai, matuojantys aplinkos parametrus, pvz., pagreičio vektorių matuojantis akcelerometras, dažniausiai sudaryti iš trijų jutiklių, po vieną kiekvienai trimatės atskaitos sistemos ašiai. Jei jutiklis reikalauja tiesioginio matavimo, tai didesnio apžvalgos kampo užtikrinimui naudojama daugiau jutiklių. Jutikliai yra pirminių duomenų apie objekto orientaciją šaltinis. Skyrelyje aptarti dažniausiai naudojami jutikliai, kurie gali būti talpinami pačiame objekte, kurių matavimai gali būti apdorojami įterptinėje sistemoje. Šis tyrimas neapima jutiklių ir orientacijos nustatymo metodu, kurie reikalauja išorinės infrastruktūros, tokios patalpoje sumontuotos vaizdo kameros ir didelio našumo vaizdą apdorojančios darbo stotys orientacijos ir padėties sekimui.

Akcelerometras matuoja pagreičio vektoriaus projekcijas į jutiklio atskaitos sistemos ašis. Šiuolaikiniai MEMS akcelerometrai – tai paprastos struktūros mechanizmai, sumontuoti lusto viduje. Pavyzdžiui, jutiklio mechaninę dalį gali sudaryti svertas su etaloniniu svareliu, o svyravimo slopinimą

atlieka liekamosios dujos lusto viduje. Dėl išorinių pagreičių poveikio svarelis pasislenka iš savo pradinės padėties. Svarelį poslinkis gali būti nustatomas matuojant elektrinę talpą tarp fiksuotų svertų ir svertų, prikabinėtų prie svarelį. Kitas būdas – integruoti pjezorezistorius į spyruoklės deformacijai matuoti. Aukšto jautrumo jutiklių veikimas paremtas elektronų tuneliavimo efektu (Cruz *et al.* 2004). Dabar gaminami skaitmeniniai akcelerometrai, skirti matuoti mažas ir dideles pagreičių vertes. Mažos pagreičių vertės neviršija keliolikos laisvojo kritimo pagreičių dydžio, o didelės – viršija laisvojo kritimo pagreitį daugiau nei šimtą kartų. Orientacijai nustatyti naudojami mažesnių verčių pagreičius matuojantys jutikliai. Būdingi akcelerometro parametrai yra šie: analoginis-skaitmeninis keitiklis (toliau ASK) skilčių skaičius, jautrumas, energijos suvartojimas, mechaninis atsparumas, matavimo diapazonas, nulinio taško postūmis, triukšmo charakteristika. Kai objektas nejuda arba juda pastoviu greičiu ir ta pačia kryptimi, jutiklis matuoja tik Žemės laisvojo kritimo pagreičio projekcijas į jutiklio atskaitos sistemos ašis, iš kurių gali būti randamas jutiklio atskaitos sistemos pokrypis šio pagreičio atžvilgiu. Šis pokrypis atitinka jutiklio pokrypį inercinės atskaitos sistemos atžvilgiu, nes laisvojo kritimo pagreitis visada sutampa su šios atskaitos sistemos Z ašies kryptimi. Iš akcelerometro duomenų gali būti nustatomas pokrypis pagal dvi iš trijų trimatės erdvės ašių. Kai jutiklio neveikia laisvojo kritimo pagreitis, jis gali būti naudojamas tik santykinei orientacijai nustatyti. Žinant tikslų jutiklio atstumą nuo masės centro galima apskaičiuoti kosminio aparato sukimosi greitį pagal jutiklio išmatuotą išcentrinį pagreitį (Kroaker 2011; Woodford 2009; *Accelerometer* 2015).

Posvyrio kampo jutiklis tiesiogiai matuoja objekto pokrypį gravitacijos veikimo krypties atžvilgiu. Toks jutiklis gali būti sudarytas iš elektrolito ir kelių elektrodų, patalpintų uždarame inde. Kintant posvyrio kampui, elektrolitas netolygiai padengia elektrodus, dėl to tarp jų kinta elektrinė varža ir, ją matuojant, galima sužinoti, koku kampu pasvyręs jutiklis (Pheifer, Powel 2000). Šis jutiklis negali būti naudojamas, kai objektas juda su pagreičiu arba kai jo neveikia gravitacija.

Magnetometras matuoja magnetinę indukciją. Magnetometrai būna skaliariniai ir vektoriniai. Skaliariniai magnetometrai išmatuoja absoliutųjį magnetinio lauko stiprį, bet ne jo kryptį. Vektoriniai magnetometrai gali išmatuoti magnetinio lauko stiprį trimis jutiklio atskaitos sistemos ašimis. Nustatant orientaciją svarbi magnetinio lauko kryptis, todėl naudojami būtent vektoriniai magnetometrai. Šie magnetometrai turi tris ortogonaliai išdėstytus jautriuosius elementus, iš kurių matavimų galima nustatyti magnetinio lauko vektoriaus kryptį (Jain 2012). Skaitmeninio magnetometro mikroschemoje integruoti kelių ašių jautrieji elementai ir ASK su sąsaja. Pagrindinės magnetometro charakteristikos yra matuojamas magnetinio lauko indukcijos diapazonas, ASK skilčių skaičius, vartojama energija, maksimalus nuskaitymo dažnis (*MPU-9150...* 2013). Palydovo orbitoje aplink Žemę išmatavus magnetinio lauko indukcijos vektorius, nustatomas jutiklio pokrypis pagal dvi inercinės atskaitos sistemos ašis. Žemės paviršiuje magnetometru galima nustatyti posūkio kampą

inercinės atskaitos sistemos ašiai, nukreiptai Žemės centro kryptimi. Nustatant orientaciją magnetometru, būtina žinoti magnetinio lauko indukcijos vektorių inercinės atskaitos sistemos atžvilgiu toje vietoje, kurioje vyksta matavimas (Mengden 2012: 6–8). Šis vektorius vadinamas atskaitos vektoriumi ir yra gaunamas iš Žemės magnetinio lauko modelio arba magnetinio lauko ties paviršiumi žemėlapiu. Magnetometras negali būti naudojamas aukštose orbitose, nes magnetinis laukas per silpnas. Magnetometrą būtina kalibruoti, turi būti derinamas magnetometro jautrumas ir nulinio taško postūmis, kompensuojamas išorinių veiksnių poveikis matuojamam magnetiniam laukui (Ozyagcilar 2013). Naudojant magnetometrą orientacijai nustatyti reikia atsižvelgti į Žemės magnetiniam laukui būdingas anomalijas ir magnetinių polių nesutapimą su geografiniais (Magnetometers 2015). Naudojant magnetometrą Žemėje kaip kompasą, būtina kompensuoti magnetometro pasvyrimą (Bingaman 2014).

Saulės krypties jutiklis matuoja jutiklį pasiekiančių spindulių kampą pagal vieną arba dvi jutiklio atskaitos sistemos ašis. Jutiklio jautrusis elementas yra patalpintas korpuse su nedidele kiauryme, pleištu arba lęšiu. Tai padaryta, tam, kad jutiklį pasiektų tik tiesiogiai į jutiklį krentantys spinduliai, o likusioji jutiklio dalis liktų neapšviesta. Šie jutikliai gali būti skaitmeniniai, kai šviesa, krintanti per pleišną, apšviečia kelis jautriuosius elementus, kurie pridengti šviesai nelaidžia plokšte su smulkiomis dvejetainį kodą atitinkančiomis kiaurymėmis. Taip pat gali būti analoginiai jutikliai, sudaryti iš šviesai jautraus elemento, kuris turi penkis kontaktus: vieną katodą ir keturis anodus, kurių elektros srovės stipris priklauso nuo jutiklio vietos, į kurią pro kiaurymę ar lęšį patenka spindulys. Šie jutikliai užtikrina didesnę raišką nei skaitmeniniai, daugiau informacijos apie šiuos jutiklius ir jų naudojimą orientacijai nustatyti pateikta darbe (Mengden 2012: 17–32).

Horizonto jutikliai – tai vaizdo ar šviesos jutikliai, kurie nustato ribą tarp Žemės ir dangaus arba tarp Žemės paviršiaus ir tuščios kosmoso erdvės. Nustačius horizonto liniją apskaičiuojamas jutiklio pokrypis jos atžvilgiu; turint du statmenus vienas kitam ir Žemės paviršiui jutiklius, randamas pokrypis pagal dvi ašis vektoriaus, statmeno Žemės paviršiui ir nukreipto į Žemės centrą, atžvilgiu (Stengel 2008).

Žvaigždžių sekiklis – tai įtaisas, nustatantis orientaciją pagal žvaigždės padėtį vaizdo jutiklio gautame vaizde šio vaizdo centro atžvilgiu. Orientacija pagal tris koordinačių sistemos ašis nustatoma lyginant dviem statmenais žvaigždžių jutikliais išmatuotą žvaigždžių padėtį su astronominiu modeliu arba ieškant žvaigždės kataloge. Žvaigždės atpažinimas gali užtrukti ilgiau nei minutę (Kroaker 2011). Šie jutikliai užtikrina aukštą orientacijos tikslumo lygį, tačiau, dėl lėto veikimo, naudojami tik palydovuose, kurie lėtai sukasi arba nesisuka (Stengel 2008).

Giroskopas – tai įtaisas arba jutiklis, matuojantis objekto kampinį greitį objekto atskaitos sistemoje. Šiuo metu yra naudojami skirtingi giroskopai, pradedant įprastais giroskopais, sudarytais iš besisukančių skridinių, MEMS giroskopais ir baigiant itin tiksliais optinio pluošto lazeriniais

giroskopais. Įprasto mechaninio giroskopo veikimas pagrįstas besisukančio kūno savybe išlaikyti pastovų kampinį momentą. Kadangi giroskopo atskaitos sistema nesusieta su jokia išorine atskaitos sistema, juo galima išmatuoti tik kampo pokytį (Mengden 2012). Skaitmeniniai giroskopai, naudojami nedideliuose prietaisuose, paremti MEMS technologija. Tokie giroskopai matuoja Koriolio jėgos poveikį per jos sukeltą poslinkį, dėl kurio kinta elektrinė talpa tarp matavimo elementų. Šią funkciją atlieka suderinimo šakės – du nuolat priešingomis kryptimis virpantys svareliai. Kai giroskopas sukasi, Koriolio jėga veikia svarelius priešingomis kryptimis, dėl to proporcingai kampiniam greičiui keičiasi elektrinė talpa tarp svarelių. Elektrinės talpos skirtumas keičiamas į įtampą, kurią padavus į ASK gaunamas skaitmeninis kodas. Svarelių sinchroniškas judėjimas užtikrina mažą jautrumą linijiniams pagreičiams (*Introduction to MEMS gyroscopes 2010*). Pagrindiniai MEMS giroskopo parametrai: ASK skilčių skaičius, jautrumas, energijos suvartojimas, atsparumas vibracijai, veikimo diapazonas, temperatūrinės charakteristikos, triukšmo tankio charakteristika. MEMS giroskopams būdinga temperatūrinė matuojamojo kampinio greičio slinktis, dėl kurios, integruojant kampinio greičio duomenis, kaupiama klaida. Šis trūkumas nebūdingas optinio pluošto lazeriniams giroskopams, kurie naudojami karinėje technikoje, tačiau jie yra šimtus kartų brangesni už MEMS giroskopus. Siekiant sumažinti MEMS giroskopų matavimo klaidą, atsirandančią dėl temperatūrinės slinkties, būtina ją kompensuoti (Shiau *et al.* 2013).

Vaizdo posūkio arba poslinkio jutiklis – tai įrenginys, sudarytas iš vaizdo kameros ir skaičiavimo įrenginio, kuriame veikia vaizdo atpažinimo algoritmai, kurie atpažįsta vaizdo požymius ir pagal juos nustato, kiek pasislinko arba pasisuko objektas vaizdo atžvilgiu. Kitaip nei žvaigždžių sekikliai, šie jutikliai neturi atpažinti žvaigždžių, šiuo atveju svarbu ne konkrečios žvaigždės, bet žvaigždžių pozicijos vaizde kitimas (Fasano *et al.* 2013). Atsižvelgiant į tai, kad naudojami vaizdo apdorojimo algoritmai, šio orientacijos nustatymo būdo naudoti mažose objektuose nepavyktų dėl to, kad jam reikia didesnių skaičiavimo resursų.

1.1 lentelė. Jutiklių tinkamumas orientacijos nustatymo sritims

Jutiklis	Orientacijos nustatymas		
	Orbitoje aplink Žemę	Žemės paviršiuje	
		Lauke	Pastatų viduje
Akcelerometras	Netinka	Tinka	Tinka
Pokrypio jutiklis	Netinka	Tinka	Tinka
Magnetometras	Tinka (žemoje orbitoje)	Tinka (išskyrus ties Žemės poliais)	Tinka (išskyrus ties Žemės poliais)
Horizonto jutiklis	Tinka	Tinka	Netinka
Žvaigždžių sekiklis	Tinka	Netinka	Netinka
Giroskopas	Tinka	Tinka	Tinka
Vaizdo posūkio jutiklis	Tinka	Tinka	Tinka

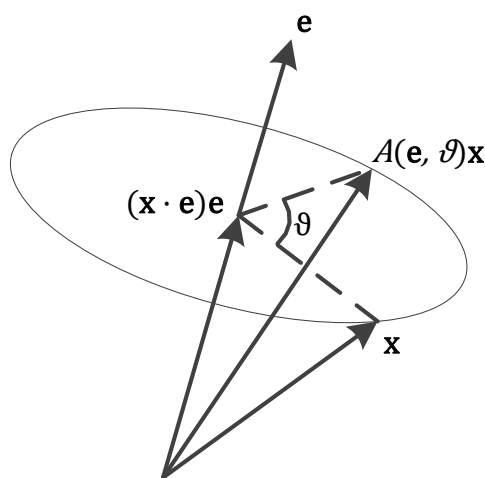
Dalis jutiklių gali būti naudojami tik tam tikroje srityje, todėl, atsižvelgiant į jutiklių veikimo principą, sudaryta 1.1 lentelė. Akcelerometras ir pokrypio jutiklis negali būti taikomas orbitoje aplink Žemę, dėl to, kad jutiklį veikianti gravitacija yra per maža. Magnetometras gali būti taikomas žemoje orbitoje, kur Žemės magnetinis laukas pakankamai stiprus. Taip pat magnetometras gali būti taikomas Žemės paviršiuje. Tačiau, artėjant prie magnetinių polių, Žemės magnetinio lauko indukcijos linijos užlinksta Žemės paviršiaus link, todėl nustatyti objekto kryptį pagal ašį, nukreiptą į Žemės centrą, artėjant prie Žemės magnetinių polių, tampa vis sunkiau, o ties magnetiniais poliais neįmanoma. Tam tikri horizonto jutiklių tipai gali būti naudojami Žemėje arba orbitoje aplink ją.

Žvaigždžių sekikliai gali būti naudojami tik kosmose, nes reikalingas pastovus žvaigždžių matomumas. Girokopas gali būti naudojamas tiek Žemėje, tiek ir orbitoje aplink ją, nes matuoja orientacijos pokytį buvusios padėties atžvilgiu. Vaizdo posūkio jutiklis gali būti naudojamas visur, kur galima nustatyti vaizdo požymius. Svarbu, kad naudojami jutikliai būtų tinkamai sulygiuoti vienas kito atžvilgiu, o jų duomenys prieš apdorojimą būtų transformuojami iš jutiklio atskaitos sistemos į bendrą objekto atskaitos sistemą.

1.1.3. Orientacijos aprašymo būdai

Nustatant objekto orientaciją, svarbu kaip ji išreiškiama. Ją galima aprašyti orientacijos matrica. Šiame skyrelyje, remiantis knyga (Markley, Crassidis 2014 : 40–58), aprašytos orientacijos matricos ir jų parametrizavimas Eulerio kampais ir ašimi, kvaternionu ir Eulerio kampų seka.

Remiantis Eulerio teorema, viena iš svarbiausių, padėtį aprašančių, ortogonalinių 3×3 dydžio matricių savybių yra tai, kad jos sukimas visada atliekamas apie fiksuotą ašį. Eulerio teorema teigia, kad lygiagrečiai sukimo ašiai egzistuoja vienetinis vektorius $\mathbf{e}$, kuris abiejuose atskaitos sistemose sutampa. 1.1 paveiksle pavaizduotas vektoriaus $\mathbf{x}$ sukimas Eulerio kampu ϑ apie vienetinį vektorių $\mathbf{e}$. Sukimo rezultatas – gautas vektorius, pasuktas per orientacijos matricę A .



1.1 pav. Vektoriaus sukimas Eulerio kampu (Markley, Crassidis 2014 : 41)

1.1 paveiksle matyti, kad orientacijos matricą A parametrizuoja vienetinis vektorius $\mathbf{e}$ ir kampas ϑ , šie parametrai vadinami Eulerio ašimi ir Eulerio kampu. A su šiais parametrais užrašoma taip:

$$A(\mathbf{e}, \vartheta) = \begin{bmatrix} c + (1-c)e_1^2 & (1-c)e_1e_2 + se_3 & (1-c)e_1e_3 + se_2 \\ (1-c)e_2e_1 - se_3 & c + (1-c)e_2^2 & (1-c)e_2e_3 + se_1 \\ (1-c)e_3e_1 + se_2 & (1-c)e_3e_2 - se_1 & c + (1-c)e_3^2 \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

čia $A(\mathbf{e}, \vartheta)$ – orientacijos matrica, $\mathbf{e}$ – Eulerio vektorius (e_1, e_2, e_3) , ϑ – Eulerio kampas, $c \equiv \cos \vartheta$, $s \equiv \sin \vartheta$.

Vektoriaus sukimas, naudojant (1.1) formulėje pateiktą orientacijos matricą, atliekamas pagal (1.2) formulę:

$$A_{GF}(\mathbf{e}, \vartheta)\mathbf{x}_F = \mathbf{x}_G, \quad (1.2)$$

čia $A_{GF}(\mathbf{e}, \vartheta)$ – orientacijos matrica, $\mathbf{x}_F$ – vektorius padėtyje F , $\mathbf{x}_G$ – vektorius padėtyje G .

Iš (1.1) formulės matyti, kad orientacijos matrica $A(\mathbf{e}, \vartheta)$ yra periodinė neriboto sukimo kampo funkcija, kurios periodas 2π . Šiai funkcijai galioja (1.3a), (1.3b), (1.3c) tapatybės:

$$A(\mathbf{e}, \vartheta) = A(-\mathbf{e}, -\vartheta), \quad (1.3a)$$

$$A^{-1}(\mathbf{e}, \vartheta) = A^T(\mathbf{e}, \vartheta) = A(-\mathbf{e}, \vartheta) = A(\mathbf{e}, -\vartheta), \quad (1.3b)$$

$$A(\mathbf{e}, \pi) = A(-\mathbf{e}, \vartheta) = 2\mathbf{e}\mathbf{e}^T. \quad (1.3c)$$

Sukimo ašis ir kampas, atitinkantys matricą A , gaunami naudojant (1.4) ir (1.5) formules:

$$\vartheta = \cos^{-1} \left(\frac{\text{tr}A(\mathbf{e}, \vartheta) - 1}{2} \right), \quad (1.4)$$

čia $\text{tr}A(\mathbf{e}, \vartheta)$ – matricos pagrindinės įstrižainės elementų suma, ϑ – sukimo kampas,

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2 \sin \vartheta} \begin{bmatrix} A_{23}(\mathbf{e}, \vartheta) - A_{32}(\mathbf{e}, \vartheta) \\ A_{31}(\mathbf{e}, \vartheta) - A_{13}(\mathbf{e}, \vartheta) \\ A_{12}(\mathbf{e}, \vartheta) - A_{21}(\mathbf{e}, \vartheta) \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

čia $\mathbf{e}$ – sukimo ašis.

Literatūros šaltiniuose dažniau sutinkamas orientacijos matricų parametrizavimas Eulerio kampais ir kvaternionu. Eulerio kampai – tai trys kampai, aprašantys trijų sukimų apie objekto atskaitos ašis seką, kurią pakeitus pasikeičia ir kampų dydžiai. Kvaternioną sudaro 4 parametrai, trys iš jų aprašo sukimo ašies, aplink kurią atliktas sukimas, padėtį atskaitos sistemoje, o ketvirtasis – skaliarinis dydis, aprašantis sukimo kampą. Šaltiniuose skaliarinis dydis dažnai būna pirmuoju arba ketvirtuoju kvaterniono elementu, todėl prieš užrašant veiksmus dažniausiai nurodama kvaterniono elementų prasmė.

Kvaternionu parametrizuota orientacijos matrica gaunama, pakeičiant (1.1) formulėje $\sin \vartheta = 2 \sin(\vartheta/2) \cos(\vartheta/2)$ ir $\cos \vartheta = \cos^2(\vartheta/2) - \sin^2(\vartheta/2)$ ir (1.6) formule apibrėžiant kvaternioną.

$$\mathbf{q}(\mathbf{e}, \vartheta) = \begin{bmatrix} \mathbf{e} \sin(\vartheta/2) \\ \cos \vartheta/2 \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

Atlikus šiuos veiksmus, gaunama (1.7) formulėje pateikta orientacijos matrica, kurios parametras kvaternionas:

$$A(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_1q_2 + q_3q_4) & 2(q_1q_2 + q_3q_4) \\ 2(q_2q_1 - q_3q_4) & -q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_2q_3 + q_1q_4) \\ 2(q_3q_1 + q_2q_4) & 2(q_3q_2 - q_1q_4) & -q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 \end{bmatrix}, \quad (1.7)$$

čia $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3, q_4)$.

(1.7) formulėje matyti, kad naudojant kvaternioną yra išvengiama trigonometrinių veiksmų, tai yra naudinga savybė atliekant skaičiavimus įterptinėje sistemoje. Palyginus su orientacijos matrica, turinčia 9 elementus, kvaternionas yra patogesnis orientacijos užrašymui ir skaičiavimams atlikti, nes turi tik 4 elementus. Orientaciją aprašo vienetinis kvaternionas, todėl po kiekvienos operacijos būtina normalizuoti kvaterniono elementus.

(1.8) formulėje matyti, kad vektorių sukimas kvaternionu $\mathbf{q}$ atitinka vektorių sukimą matrica $A(\mathbf{q})$:

$$\mathbf{q} \otimes \mathbf{x} \otimes \mathbf{q}^* = \begin{bmatrix} A(\mathbf{q})\mathbf{x} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1.8)$$

čia $\mathbf{q}$ – kvaternionas, $\mathbf{q}^*$ – jungtinis kvaternionas, tai kvaternionas $\mathbf{q}$ su priešingo ženklo vienetiniu vektoriumi, $\mathbf{x}$ – vektorius.

Turint orientacijos matricą, kvaternionas gali būti randamas pagal vieną iš (1.9a), (1.9b), (1.9c), (1.9d) vektorių:

$$\begin{bmatrix} 1 + 2A_{11} - \text{tr}A \\ A_{12} + A_{21} \\ A_{13} + A_{31} \\ A_{23} - A_{32} \end{bmatrix} = 4q_1\mathbf{q}, \quad (1.9a)$$

$$\begin{bmatrix} A_{21} + A_{12} \\ 1 + 2A_{22} - \text{tr}A \\ A_{23} + A_{13} \\ A_{31} - A_{13} \end{bmatrix} = 4q_2\mathbf{q}, \quad (1.9b)$$

$$\begin{bmatrix} A_{31} + A_{13} \\ A_{32} + A_{23} \\ 1 + 2A_{33} - \text{tr}A \\ A_{12} - A_{21} \end{bmatrix} = 4q_3\mathbf{q}, \quad (1.9c)$$

$$\begin{bmatrix} A_{23} + A_{32} \\ A_{31} + A_{13} \\ A_{12} - A_{21} \\ 1 + \text{tr}A \end{bmatrix} = 4q_4 \mathbf{q}. \quad (1.9d)$$

Siekiant sumažinti skaičiavimų klaidą, skaičiuojant kvaternioną, reiktų rinktis tą vektorių, kurio dešinėje lygties pusėje didžiausia $|q_i|$ reikšmė.

Eulerio kampų seka sukimas iš pradinės būsenos I į galutinę būseną F išreiškiamas, kaip trijų sukimų rezultatas. Pirmasis sukimas atliekamas iš pradinės būsenos I į tarpinę būseną H , antrasis sukimas – iš H į tarpinę būseną G ir galiausiai – iš G į galutinę būseną F . Visa transformacija užrašoma (1.10) formule:

$$A_{FI}(\mathbf{e}_\phi, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\psi; \phi, \theta, \psi) = A_{FG}(\mathbf{e}_\psi, \psi) A_{GH}(\mathbf{e}_\theta, \theta) A_{HI}(\mathbf{e}_\phi, \phi), \quad (1.10)$$

čia $\mathbf{e}_\phi, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\psi$ – sukimo ašys, ϕ, θ, ψ – sukimo kampai, A_{ij} – orientacijos matrica sukimui iš j padėties į padėtį i .

Naudojant klasikinę Eulerio kampų išraišką, sukimo ašys parenkamos iš (1.11) rinkinio:

$$\mathbf{e}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{e}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{e}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.11)$$

Orientacijos funkcija, kai naudojama klasikinė Eulerio kampų išraiška, užrašoma (1.12) formule:

$$A_{ijk}(\phi, \theta, \psi) = A(\mathbf{e}_k, \psi) A(\mathbf{e}_j, \theta) A(\mathbf{e}_i, \phi), \quad (1.12)$$

čia ijk – sukimo seka.

Atmetus sekas, kurios netenkina sąlygų $i \neq j$ ir $j \neq k$, lieka šešios simetrinės sekos: 1–2–1, 1–3–1, 2–3–2, 2–1–2, 3–1–3 ir 3–2–3 ir šešios asimetrinės sekos: 1–2–3, 1–3–2, 2–3–1, 2–1–3, 3–1–2 ir 3–2–1. Orientacijos matrica, atitinkanti vieną seką, skiriasi nuo kitą seką atitinkančios A matricos. Sekos indeksai i, j, k gali būti užrašomi ašių raidėmis. 1 sukimo ašis atitinka koordinačių sistemos X ašį, 2 – Y ašį, 3 – Z ašį, todėl seką 3–2–1 galima užrašyti ZYX . (1.13) formulėje pateikta 3–2–1 sukimo seką atitinkanti orientacijos matrica, parametrizuota Eulerio kampais:

$$\begin{aligned} A_{321}(\phi, \theta, \psi) &= A(\mathbf{e}_1, \psi) A(\mathbf{e}_2, \theta) A(\mathbf{e}_3, \phi) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\psi & s\psi \\ 0 & -s\psi & c\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & s\theta \\ 0 & -s\theta & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\theta c\phi & c\theta s\phi & -s\theta \\ -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi & c\psi c\phi & s\psi c\theta \\ s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & c\psi c\theta \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1.13)$$

čia $c\vartheta \equiv \cos \vartheta$, $s\vartheta \equiv \sin \vartheta$.

Iš (1.13) formule pateiktos orientacijos matricos galima išreikšti Eulerio kampus, naudojant (1.14), (1.15), (1.16) formules:

$$\theta = \sin^{-1}(-[A_{321}]_{13}), \quad (1.14)$$

$$\phi = \text{atan2}(\sigma'[A_{321}]_{12}, \sigma'[A_{321}]_{11}), \quad (1.15)$$

$$\psi = \text{atan2}(\sigma'[A_{321}]_{23}, \sigma'[A_{321}]_{33}), \quad (1.16)$$

čia σ' yra ± 1 priklausomai, nuo $\cos \theta$ ženklo.

Asimetrinėms Eulerio kampų sekoms būdingas ašių blokavimas (angl. *Gimbal lock*). Kadangi sukimas vyksta nustatyta seka, sekančio sukimo metu sukimo ašys yra pasuktos prieš tai atlikto sukimo kampu. Blokavimas vyksta, kai antrojo sekos sukimo metu objektas pasukamas 90 laipsnių kampu, tokiu atveju 3 ašis ir 1 ašis atsiduria vienoje plokštumoje, dėl to objekto sukimas apie vieną iš koordinatinių sistemos ašių tampa neįmanomas.

Didžiausiais Eulerio kampų sekų naudojimo privalumas yra aiškus užrašymas, kas yra naudinga analizuojant orientacijos informaciją. Palyginti su šiuo užrašymo būdu, kvaternionai yra neaiškūs, nors ir vienareikšmiškai aprašo orientaciją. Dėl to dažnai orientacija skaičiuojama, naudojant kvaternionus, o atvaizduojama, verčiant kvaternionus Eulerio kampų sekomis. Eulerio kampų vertimas kvaternionais ir atvirkščiai yra atliekamas per orientacijos matricą. Daugiau informacijos apie Eulerio kampus, kvaternionus ir orientacijos matricas pateikiama (Markley, Crassidis 2014 : 40–58; Kim 2013: 11–44). Kvaternionai plačiai aprašyti knygoje (Kuipers 2002).

1.2. Objekto orientacijos erdvėje nustatymas

Nustatant objekto orientaciją erdvėje dažniausiai naudojami du vektoriai. Šie vektoriai gali būti vienetiniai vektoriai, nukreipti į kokį nors atskaitos tašką, arba aplinkos vektoriai – magnetinės indukcijos, laisvojo kritimo pagreičio. Trijų ašių orientacijos nustatymo metodas (angl. *TRIaxial Attitude Determination*, toliau TRIAD) yra seniausias algoritmas, skirtas nustatyti objektų orientaciją turint du vektorius. Šis algoritmas leidžia nustatyti orientacijos matricą turint du išmatuotus vektorius objekto atskaitos sistemoje ir tų vektorių atitikmenis inercinėje atskaitos sistemoje. Tuo atveju, kai vektoriai inercinėje arba objekto atskaitos sistemoje yra lygiagretūs, iš jų nepakanka informacijos objekto orientacijai nustatyti (Markley 1998).

Orientacijai nustatyti taip pat naudojami metodai, sprendžiantys Vahbos (Wahba 1965) suformuluotą problemą. Vahba klausia, kaip turint du rinkinius, sudarytus iš n matavimo reikšmių, kai $n \geq 2$, rasti orientacijos matricą M , kuria pasukus pirmąjį rinkinį būtų gauta mažiausia kvadratinė klaida tarp sukimo rezultato ir antrojo rinkinio reikšmių. Orientacijos matrica turėtų būti ortogonalinė matrica, kurios determinantas lygus $+1$. Nustatant orientaciją, M yra mažiausių kvadratų algoritmo rezultatas, atitinkantis orientacijos matricą, pasukančią inercinės atskaitos sistemos vektorius į objekto

atskaitos sistemą taip, kad pasukto vektoriaus elementų ir išmatuoto vektoriaus elementų kvadratinė klaida būtų mažiausia. Tokie metodai vadinami optimaliais orientacijos nustatymo metodais. Tokio metodo pavyzdžiu galėtų būti QUEST algoritmas (Markley 1998).

Santykinė objekto padėtis gali būti nustatoma, integruojant giroskopo arba vaizdo poslinkio jutiklio išmatuotą objekto kampinį greitį. Tokiu būdu nustatoma objekto orientacija pirminės padėties, buvusios matavimo pradžioje, atžvilgiu. Tikslesniems orientacijos duomenims gauti gali būti susiejami absoliučiosios ir santykinės orientacijos duomenys, tam skirti metodai aprašyti sekančiame skyriuje.

1.3. Absoliučiosios ir santykinės orientacijos duomenų susiejimas

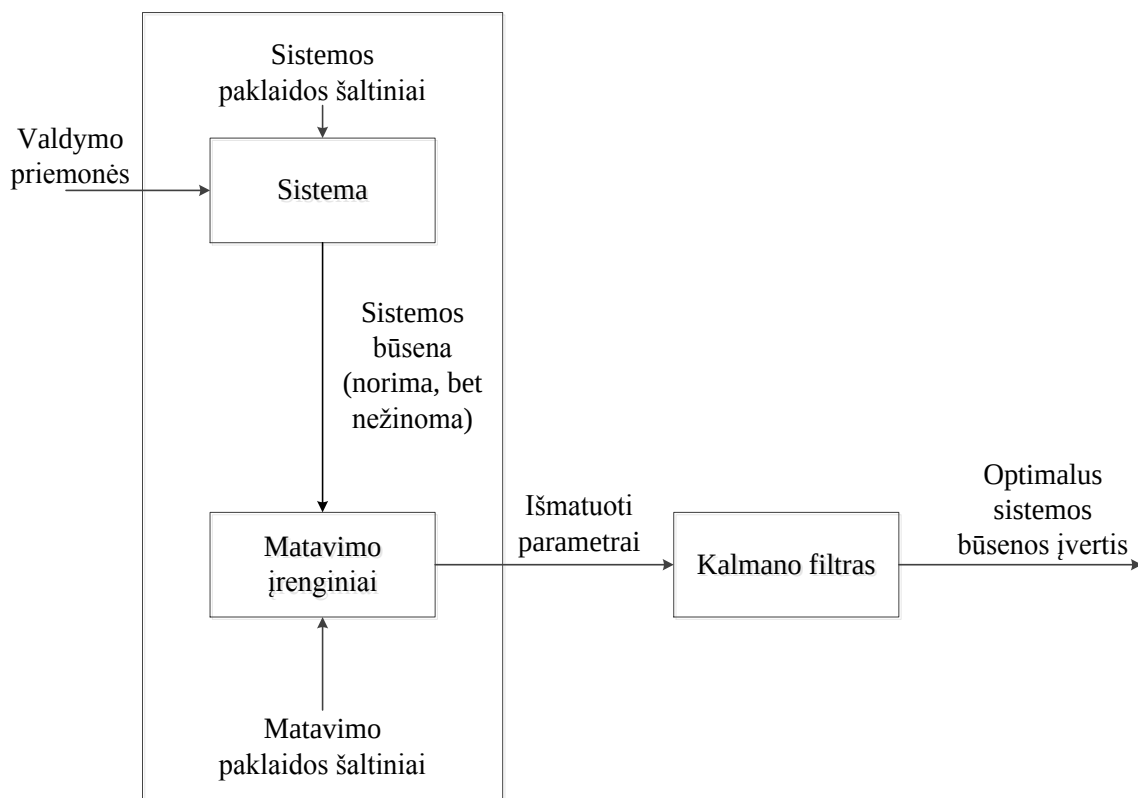
Absoliučioji orientacija gali būti nustatoma tiksliai taikant įvairius absoliučiosios orientacijos jutiklių duomenis, naudojant žemo dažnio ir kitokius filtrus triukšmams slopinti. Tokie filtrai mainais į mažesnę triukšmo lygį vėlina signalą, dėl to nustatomos objekto orientacijos tikslumas, didėjant orientacijos kitimo spartai, mažėja. Šiai problemai spręsti dažnai taikomi Kalmano filtras ir komplementarusis filtras. Šie algoritmai, jų taikymas giroskopo ir akcelerometro duomenims susieti aprašyti šiame poskyryje.

1.3.1. Kalmano filtrai

Kalmano filtras yra matematinių lygčių sistema, skirta nustatyti labiausiai tikėtiną proceso būseną. Būsena nustatoma, remiantis diskrečių matavimų duomenimis ir dinaminiu sistemos modeliu. Algoritmas užtikrina mažiausią ieškomos vertės nuokrypį nuo realiosios vertės (AHRS... 2014). Filtras palaiko praeities, dabarties ir netgi ateities būsenų apskaičiavimą, kai modeliuojama sistema nėra tiksliai apibrėžta (Chao *et al.* 2010). Filtro taikymo schema pateikta 1.2 paveiksle.

Kalmano filtras iš eilės matavimo duomenų, surinktų per tam tikrą laiką, leidžia nustatyti nežinomųjų kintamųjų įverčius, kurie būna tikslesni nei pavieniai matavimų duomenys, kuriems būdingas triukšmas ir matavimo netikslumai. Šis algoritmas veikia rekursyviai su triukšmingais duomenų srautais, nustatant sistemos būsenos įvertį, minimizuojant vidutinę kvadratinę klaidą (Kalman *filter* 2014). Algoritmas įvertina matavimo ir proceso triukšmus, šių triukšmų kovariaciją, remiasi sistemą aprašančiu tiesiniu modeliu, patikslina prognozuojamą vertę išmatuotąja verte, atsižvelgiant į matavimo ir prognozės kovariacijos matricas.

1.2 paveiksle pavaizduota tipinė situacija, kurioje gali būti naudingas Kalmano filtras. Sistema yra valdoma tam tikrų valdymo signalų, o matavimo įrenginiai pateikia susijusių parametrų vertes. Skaičiuojant naudojamos žinios apie sistemos įėjimo, išėjimo signalus ir visi turimi sistemos parametrai (Pileckas 2011).



1.2 pav. Įprastas Kalmano filtro taikymas (Pileckas 2011)

Kalmano filtrą sudaro du žingsniai – spėjimo ir atnaujinimo. Spėjimo žingsnio metu Kalmano filtras randa dabartinės būsenos įverčius kartu su jų neapibrėžtumo vertėmis. Atnaujinimo žingsnio metu anksčiau rastieji būsenos įverčiai yra perskaičiuojami. Perskaičiuoti ir išmatuoti būsenos įverčiai sudedami, naudojant svorio koeficientus. Didesnis svorio koeficientas suteikiamas išmatuotiems arba apskaičiuotiems įverčiams, priklausomai nuo jų patikimumo, kuris atvirkščiai proporcingas apskaičiuotai orientacijos klaidai. Kadangi Kalmano filtras patikimumą nustato iš klaidos kovariacijos, reikia, kad triukšmo pasiskirstymas atitiktų Gauso skirstinį.

Kalmano filtro rekursyvumas nulemia filtro praktinio įgyvendinimo prieinamumą. Šis algoritmas nereikalauja saugoti informaciją apie praeities būsenas, todėl gali veikti realiuoju laiku (*Kalman filter* 2014). Skaičiuojant naudojami momentiniai matavimo duomenys ir prieš tai nustatyta būsena bei neapibrėžtumo matrica. Palyginti su juo, Vinerio filtras, kuris operuoja visais duomenimis kiekvieno skaičiavimo metu, negali būti įgyvendintas realiojo laiko sistemose (Welch, Bishop 2006).

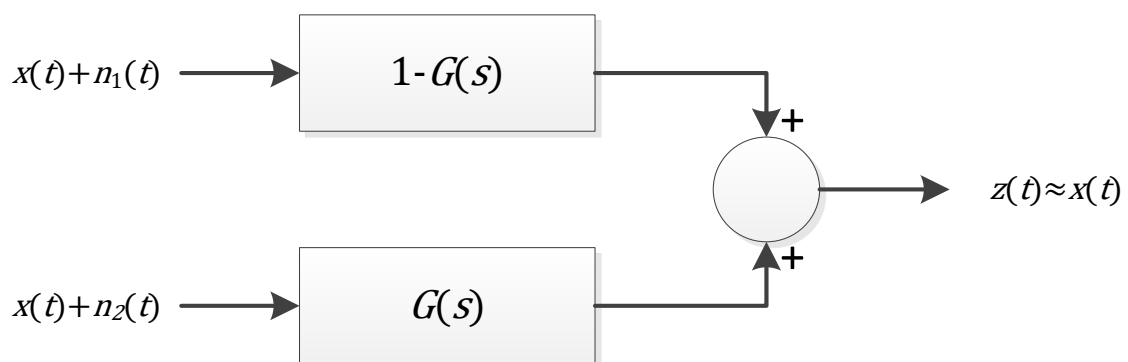
Paprasčiausia Kalmano filtro versija yra tiesinis Kalmano filtras, kuris paprastai vadinamas Kalmano filtru. Šis filtras skirtas veikti su tiesinėmis sistemomis, arba su sistemomis, kurios pakeičiamos iš netiesinių į tiesines. Plačiai taikomas išplėstinis Kalmano filtras, šis filtras skirtas dirbti su netiesinėmis sistemomis, kurios ištiesinamos pagal numatomą vidurkį ir kovariaciją. Gerai apibrėžtų pereinamųjų modelių atveju, išplėstinis Kalmano filtras laikomas tinkamiausiu netiesinei būsenai nustatyti. Yra tolydinio ir diskretaus laiko išplėstinio Kalmano filtro variantai (*Extended*

Kalman... 2014). Išplėstinis Kalmano filtras gali būti naudojamas tiek kvaterniono parametrų, tiek Eulerio kampams nustatyti (Welch, Bishop 2006).

Kalmano filtras buvo sukurtas tiesinėms sistemoms, todėl negali būti naudojamas netiesinėms sistemoms, jei jų neįmanoma ištiesinti. Tačiau daugelis sistemų yra iš prigimties netiesinės ir jų ištiesinimas yra neįmanomas, dėl to filtro taikymas yra ribotas. Šiai problemai išspręsti naudojamas išplėstinis Kalmano filtras, kuriame gali būti naudojamas netiesinis sistemos modelis. Įdiegus netiesinį sistemos modelį, atsirado Kalmano filtro divergavimo tikimybė. Divergavimo problema išspręsta netiesinio Kalmano filtro (angl. *Unscented Kalman filter*) algoritme. Taikant šį algoritmą, imami keli atsitiktiniai taškai šalia matuojamosios vertės, iš jų apskaičiuojamas vidurkis ir kovariacija, tada atliekama nepriklausomoji transformacija (angl. *Unscented Transform*) ir vėl randamas vidurkis ir kovariacija. Netiesinis Kalmano filtras yra naudingas, kai procesas, kurio būsenos nustatomos, kinta itin netiesiškai. Palyginti su išplėstiniu Kalmano filtru, šis filtras tiksliau nustato vidurkį ir kovariaciją ir leidžia išvengti Jacobo matricių skaičiavimo, kuris tam tikrais atvejais gali būti sudėtingas (Kalman filter 2014).

1.3.2. Komplementarusis filtras

Komplementarusis filtras yra alternatyva aprašytiems Kalmano filtrams. Paprasčiausiu atveju jis susieja dviejų jutiklių matavimų duomenis, pritaikius vienam žemo dažnio filtrą, o kitam – aukšto dažnio filtrą, rezultatas gaunamas sudėjus rezultatus. Tarkime, kad du jutikliai matuoja orientaciją $x(t)$, tačiau kiekvienas turi savąjį triukšmą $n_1(t)$, $n_2(t)$. Pirmojo jutiklio triukšmas $n_1(t)$ yra aukšto dažnio, o antro triukšmas $n_2(t)$ yra žemo dažnio. Atsižvelgiant į triukšmo pasiskirstymą dažnių srityje, pirmajam taikomas žemo dažnio filtras, o antrajam – aukšto dažnio filtras. Filtrų dažninės charakteristikos $G_1(s)$ ir $G_2(s)$ turėtų sudaryti visą dažnių spektrą. Kadangi $G_1(s) + G_2(s) = 1$, tai $G_2(s) = 1 - G_1(s)$, taigi gaunamas 1.3 paveiksle pavaizduotas komplementarusis filtras (Kim 2010).



1.3 pav. Komplementarusis filtras (Kim 2010)

1.3 paveiksle pavaizduoto filtro dažninė charakteristika išreiškiama (1.17) formule, kurioje parametras s yra dažnis (Kim 2010):

$$\begin{aligned} Z(s) &= \{1 - G(s)\} \times \{X(s) + N_1(s)\} + G(s) \times \{X(s) + N_2(s)\} \\ &= \{1 - G(s)\}X(s) + \{1 - G(s)\}N_1(s) + G(s)X(s) + G(s)N_2(s) \\ &= X(s) + \{1 - G(s)\}N_1(s) + G(s)N_2(s). \end{aligned} \quad (1.17)$$

Jei filtrų dažninės charakteristikos $G(s)$ ir $1 - G(s)$ parenkamos taip, kad naudingas signalas $X(s)$ praeitų, o triukšmas $N(s)$ nepraeitų, sudėjus filtruotus signalus gausime rezultatą $Z(s)$, artimą tikrajai vertei $X(s)$.

Palyginus su Kalmano filtru, nesudėtingas komplementarusis filtras leidžia išvengti didelių paklaidų, be to, jis tinka net tada, kai triukšmai neatitinka Gauso skirstinio. Svorio koeficientai, kuriais nustatoma skirtingų jutiklių duomenų įtaka galutiniam rezultatui, gali būti keičiami įvertinant klaidą, kuri gaunama skaičiavimo rezultate. Tokio filtro pavyzdys – komplementarusis filtras su proporcinio-integruojančiu valdymu (Kim 2011).

1.4. Tiriamųjų metodų ir bandymų įrangos atranka

Pasirenkant jutiklius tyrimui, remtasi jutiklių tinkamumu dirbti Žemės paviršiuje lauke ir pastato viduje taip pat jų įgyvendinimo praktiškumu ir jutiklių integracijos lygiu. Tyrimui pasirinktas akcelerometro, magnetometro ir giroskopo derinys, nes šie jutikliai gali būti integruojami viename luste ir naudojami orientacijai Žemės paviršiuje nustatyti.

Jutiklių matavimai išreiškiami jutiklio atskaitos sistemoje. Šiame darbe taikoma prielaida, kad jutiklio ir objekto atskaitos sistemos sutampa, todėl iš jutiklių gauti duomenys nebus transformuojami į objekto atskaitos sistemą.

Orientacijai aprašyti ir skaičiuoti bus naudojami Eulerio kampai ir kvaternionai, nes tai dažniausiai naudojamas orientacijos aprašymo būdas.

Pasirinkta ištirti tiesinio Kalmano filtro, išplėstinio Kalmano filtro ir komplementariojo filtro metodų tikslumą, nes šių metodų algoritmai plačiai taikomi ir gerai aprašyti. Šiais algoritmais bus sujungiami giroskopo ir akcelerometro duomenys.

Magnetometro ir akcelerometro duomenys negalės būti susiejami, naudojant apžvelgtuose šaltiniuose nagrinėtuosius metodus absoliučiajai objektų orientacijai nustatyti, nes Lietuvos teritorijoje yra per mažas kampas tarp magnetinio lauko vektoriaus ir laisvojo kritimo pagreičio vektoriaus. Atliekant paruošiamuosius darbus metodams tirti, buvo nustatyta, kad Gauso-Niutono iteraciniu metodu negalima tiksliai nustatyti orientacijos. Tačiau objekto kryptį šiaurės poliaus atžvilgiu apytiksliai pavyko nustatyti atlikus magnetometro pokrypio kompensavimą.

1.5. Skyriaus išvados

Šiame skyriuje apžvelgti objekto orientacijos matavimo ir aprašymo būdai. Taip pat šiame skyriuje buvo apžvelgti absoliučiosios padėties nustatymo metodai bei absoliučiosios ir santykinės padėties susiejimo metodai, atrinkti tiriami metodai ir bandymų įranga. Nustatyta, kad:

- Objekto orientaciją nustatant dažniausiai naudojama objekto ir inercinė atskaitos sistemos, kadangi skirtumas tarp šių dviejų sistemų ir yra vadinamas orientacija.
- Orientacijai Žemės paviršiuje matuoti tinkamiausi jutikliai yra magnetometras, akcelerometras ir giroskopas, nes jie, pagaminti pagal MEMS technologiją, gali būti integruoti vienoje mikroschemoje, užtikrina mažesnes energijos sąnaudas ir užima nedaug vietos. Be to šie jutikliai gali būti naudojami tiek lauke tiek ir patalpų viduje, jie gali būti sumontuoti objekto viduje.
- Orientacija trumpai gali būti aprašoma Eulerio kampų sekomis arba kvaternionais. Kvaternionai vienareikšmiškai aprašo padėtį, tačiau užrašomi žmogui tiesiogiai nesuvokiama forma. Eulerio kampų sekoms būdingas ašių blokavimas, tačiau jomis gali būti aiškiau užrašoma orientacija. Eulerio kampų seką sudaro 3 elementai, kvaternionus 4 elementai, o orientacijos matricą 9 elementai, todėl efektyviau naudoti Eulerio kampus arba kvaternionus. Dažniau skaičiavimams naudojami kvaternionai, nes Eulerio kampų sekoms būdingas ašių blokavimas.
- Objekto absoliučiajai orientacijai nustatyti reikia išmatuoti bent du ortogonalius vektorius objekto atskaitos sistemoje ir žinoti šių vektorių vertes inercinėje atskaitos sistemoje tam, kad iš jų galima būtų nustatyti orientaciją taikant TRIAD arba optimalios orientacijos matricos paieškos metodus, tokius kaip QUEST.
- Absoliučiosios ir santykinės padėties susiejimo metodai leidžia tiksliau nustatyti orientaciją nesukeldami papildomo vėlinimo. Kalmano filtras ir komplementarusis filtras dažnai naudojami nagrinėtuose šaltiniuose.
- Tyrimui atlikti pasirinkti jutikliai yra magnetometras, akcelerometras, giroskopas. Bus tiriami Kalmano filtras, išplėstinis Kalmano filtras ir komplementarusis filtras su proporcinio-integruojančiu valdymu. Ruošiantis tyrimui nustatyta, kad galima susieti akcelerometro ir giroskopo duomenis, o magnetometro duomenys yra nepatikimi, dėl to, kad Lietuvos teritorijoje Žemės magnetinio lauko indukcijos vektorius nėra ortogonalus laisvojo kritimo pagreičio vektoriui.

2. ORIENTACIJOS NUSTATYMO ALGORITMŲ SUDARYMAS

Šiame skyriuje pateikiami orientacijos nustatymo būdai nuo paprasčiausio orientacijos nustatymo tiesiogiai iš absoliučiosios ir santykinės padėties jutiklių iki tiriamųjų orientacijos nustatymo metodų, kurie susieja absoliučiosios ir santykinės orientacijos duomenis. Šiame skyriuje aprašoma orientacijos nustatymo būdų esmė, pateikiamos ir analizuojamos jų formulės. Pirmojoje skyriaus dalyje parodoma, kaip gali būti randama orientacija iš akcelerometro, magnetometro arba giroskopo duomenų. Antrojoje dalyje, aprašyta, kaip gali būti taikomas Kalmano filtras, išplėstinis Kalmano filtras ir komplementarusis filtras su proporcinio-integruojančiu valdymu akcelerometro ir giroskopo duomenims susieti.

2.1. Orientacijos nustatymas akcelerometru ir magnetometru

Akcelerometras matuoja pagreičio vektoriaus projekcijas į jutiklio atskaitos sistemos ašis. Gaunami duomenys turi laisvojo kritimo pagreičio dedamąją. Akcelerometrą veikiančias jėgas aprašo (2.1) formulė (Kim 2010).

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & w & -v \\ -w & 0 & u \\ v & -u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta\sin\phi \\ -\cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

čia a_x, a_y, a_z – pagrečiai, veikiantis akcelerometro ašis; $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ – linijinių greičių, atitinkančių akcelerometro ašis, pokytis arba linijinis pagreitis; u, w, v – greičiai pagal akcelerometro ašis, p, q, r – kampiniai pagrečiai apie akcelerometro ašis, g – laisvojo kritimo pagreičio konstanta, θ – posūkio aplink Y ašį kampas, ϕ – posūkio aplink X ašį kampas.

(2.1) formulės kairėje pusėje pirmasis narys atitinka linijinio pagreičio vektorius, kuris gali būti naudingas objekto greičiui nustatyti ir pozicijai apskaičiuoti, kai kiti du nariai yra žinomi. Antrasis narys atitinka įcentrinį arba išcentrinį pagreitį, apskaičiuojamą iš žinomų linijinių greičių ir objekto kampinių greičių. Trečiasis narys yra Žemės laisvojo kritimo pagreitis, kuris veikia visus objektus Žemės paviršiuje. Iš šios lygties matyti, kad laisvojo kritimo pagreičio pasiskirstymas pagal akcelerometro ašis priklauso nuo pasisukimo aplink X ir Y ašis kampų ϕ ir θ . Dėl to, žinant laisvojo kritimo pagreičio vektorius, galima rasti objekto orientaciją horizonto atžvilgiu – nustatyti nuolydžio (angl. *pitch*) pagal X ašį ir pasukimo (angl. *roll*) pagal Y ašį kampus, kai objektas stacionarus.

Orientacijai iš (2.1) formulės nustatyti daroma prielaida, kad objektas yra stacionarus, taigi objekto neveikia linijiniai, išcentriniai ar įcentriniai pagrečiai. Nagrinėjama formulė supaprastinama iki (2.2) formulės (Kim 2010). Iš jos galima išsivesti formules kampams ϕ ir θ apskaičiuoti iš akcelerometro gaunamų duomenų.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta\sin\phi \\ -\cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Kadangi akcelerometras matuoja pagreičius, normalizuotus pagal laisvojo kritimo pagreitį, formulėje galima nepaisyti g konstantos, realizuojant programą, apdorojančią iš jutiklio gautus duomenis. Iš (2.2) formulės išvedamos ϕ ir θ apskaičiavimo formulės (2.3) ir (2.4) (Kim 2010):

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{-a_y}{g\cos\theta} \right), \quad (2.3)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{a_x}{g} \right). \quad (2.4)$$

Nustatyti krypties (angl. *heading* arba *yaw*) ψ kampą iš akcelerometro duomenų negalima, nes laisvojo kritimo pagreitis inercinėje atskaitos sistemoje sutampa su Z ašies kryptimi. Taip pat iš (2.3) ir (2.4) formulių matyti, kad kampai nustatomi nuo -90 iki 90 laipsnių. Šios problemos galima dalinai išvengti, ϕ apskaičiuojant pagal (2.5) formulę. Pagal šią formulę nustatomi kampai nuo -180 iki 180 laipsnių aplink X ašį. Sukimui pagal Y ašį pakanka arkusino, tačiau nenustatant judėjimo krypties kampo ψ sudėtinga apibrėžti atvejus, kai pasisukimas pagal Y ašį viršija 90 laipsnių.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{a_z} \right). \quad (2.5)$$

Magnetometro duomenų apdorojimas nedaug skiriasi nuo akcelerometro. Iš vieno vektoriaus galima nustatyti vertikaliąją objekto orientaciją – posūkį aplink dvi iš trijų inercinės atskaitos sistemos ašių. Magnetometrui esant lygiagrečioje Žemės paviršiui plokštumoje, šiaurės kryptį galima rasti pagal (2.6) formulę – iš arktangento, apskaičiuoto iš magnetinės indukcijos vektoriaus projekcijų į X ir Y ašis santykio.

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{m_y}{m_x} \right). \quad (2.6)$$

(2.6) formulė neleidžia nustatyti tikslios krypties esant magnetometro pakrypimui horizonto atžvilgiu. Be to, tiksliam rezultatui gauti, magnetometrą būtina kalibruoti. Taip pat reikia atsižvelgti į tai, kad Žemės geometriniis ir magnetiniais poliai nesutampa, o magnetinės linijas iškreipia lokalios magnetinės anomalijos. Magnetometru nustatant orientaciją, būtina žinoti magnetinės indukcijos vektoriaus kryptį toje vietoje, kur vykdomas matavimas. Tam yra naudojami Žemės magnetinio lauko orientacijos geografinio šiaurės poliaus atžvilgiu korekcijos žemėlapiai. Anomalių poveikiui sumažinti naudojami algoritmai, nustatantys pašalinių laukų poveikį magnetometrui.

Pagrindinis akcelerometro privalumas – galimybė nustatyti absoliučiąją horizontalią orientaciją. Tačiau akcelerometras turi būti stacionarus, jis leidžia rasti tik du iš trijų orientaciją aprašančių kampų. Orientacijai trimatėje atskaitos sistemoje rasti, reikėtų susieti akcelerometro ir magnetometro duomenis. Šių dviejų jutiklių duomenų kombinacija leistų nustatyti absoliučiąją orientaciją.

2.2. Orientacijos nustatymas giroskopu

Giroskopas matuoja sukimosi aplink X, Y, Z ašis kampinius greičius objekto atskaitos sistemoje. Dėl to reikia perskaičiuoti išmatuotuosius kampinius greičius p, q, r į objekto padėtį inercinėje atskaitos sistemoje aprašančių Eulerio kampų ϕ, θ, ψ kitimo greitį, naudojant (2.7) formulėje pateiktą orientacijos matricą, susiejančią objekto ir inercinę atskaitos sistemas (Kim 2010):

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Santykinė objekto orientacija pradinės padėties atžvilgiu gaunama integruojant Eulerio kampų kitimą. Tai atliekama naudojant (2.8) formulę, prie anksčiau gautos Eulerio kampų vektoriaus vertės pridedant Eulerio kampų kitimo greitį, padaugintą iš matavimo periodo dt :

$$\begin{bmatrix} \phi_k \\ \theta_k \\ \psi_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{k-1} \\ \theta_{k-1} \\ \psi_{k-1} \end{bmatrix} + dt \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Naudojant (2.9) ir (2.10) formules, galima integruoti kvaterniono kitimo vektorius, gaunant vienareikšmiškai aprašantį objekto orientaciją kvaternioną (Kim 2013):

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_4 & -q_3 & q_2 & q_1 \\ q_3 & q_4 & -q_1 & q_2 \\ -q_2 & q_1 & q_4 & q_3 \\ -q_1 & -q_2 & -q_3 & q_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} q_{1k} \\ q_{2k} \\ q_{3k} \\ q_{4k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{1k-1} \\ q_{2k-1} \\ q_{3k-1} \\ q_{4k-1} \end{bmatrix} + 0,5dt \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Kvaternionai orientacijos informaciją saugo žmogui tiesiogiai nesuprantama forma, todėl, kai rezultatas atvaizduojamas skaitiniu pavidalu, kvaternionai verčiami į Eulerio kampų sekas. Tai atliekama taikant (2.14), (2.15), (2.16) formules, išvestas iš kvaternionais (2.12) ir Eulerio kampų sekomis (2.13) parametrizuotų orientacijos matricų, aprašančių tą pačią orientaciją (2.11) (Kim 2013):

$$C^B_I(\phi, \theta, \psi) = C^B_I(q_1, q_2, q_3, q_4), \quad (2.11)$$

$$C^B_I(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \cos\theta \sin\psi & -\sin\theta \\ -\cos\phi \sin\psi + \sin\phi \sin\theta \cos\psi & \cos\phi \cos\psi + \sin\phi \sin\theta \sin\psi & \sin\phi \cos\theta \\ \sin\phi \sin\psi + \cos\phi \sin\theta \cos\psi & -\sin\phi \cos\psi + \cos\phi \sin\theta \sin\psi & \cos\phi \sin\theta \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

$$C_{\bar{1}}^B(q_1, q_2, q_3, q_4) = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1q_2 + q_3q_4) & 2(q_1q_3 - q_2q_4) \\ 2(q_1q_2 - q_3q_4) & 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_2q_3 + q_1q_4) \\ 2(q_1q_3 + q_2q_4) & 2(q_2q_3 - q_1q_4) & 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{C_{23}}{C_{33}} = \tan^{-1} \frac{2(q_2q_3 + q_1q_4)}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)}, \quad (2.14)$$

$$\theta = \sin^{-1}(-C_{13}) = \sin^{-1}(2(q_2q_4 - q_1q_3)), \quad (2.15)$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{C_{12}}{C_{11}} = \tan^{-1} \frac{2(q_1q_2 + q_3q_4)}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)}. \quad (2.16)$$

Taikant kvaternionus svarbu užtikrinti, kad kvaternionų kvadratų sumą N_q būtų lygi 1. Ši sąlyga aprašoma (2.17) formule. Jei suma N_q nėra lygi 1, reikėtų normalizuoti kvaternionų reikšmes pagal (2.18) formulę (Kim 2013).

$$N_q = q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 = 1, \quad (2.17)$$

$$q \equiv \frac{q}{\sqrt{N_q}}. \quad (2.18)$$

Giroskopui būdinga tai, kad kampinis pagreitis, jutikliui nesisukant, nėra lygus nuliui, tai vadinama nulinio matavimo postūmiu. Dėl postūmio atsirandanti klaida integruojant kaupiama, todėl, praėjus ilgesniam laikui, pagal giroskopą nustatyta orientacija tampa nepatikima. Kita vertus, giroskopas leidžia pakankamai tiksliai nustatyti orientacijos pokytį pradinės padėties atžvilgiu per nedidelį laiko tarpą. Nulinių matavimų postūmį galima sumažinti kompensuojant matavimų temperatūrinę slinktį. Kalibravimo metu sudaromos korekcijos lentelės arba funkcijos trims giroskopo ašims.

Palyginus su akcelerometru, giroskopas gali nustatyti orientaciją trimis ašimis, o ne dviem, be to, linijiniai pagreičiai ir vibracija turi mažą įtaką matuojamam kampiniam greičiui. Pagrindinis trūkumas, palyginus su akcelerometru, yra tai, kad integruojant kaupiama klaida ir nustatoma ne absoliučioji, o santykinė padėtis. Klaidą sumažinti galima susiejant giroskopo ir akcelerometro duomenis, tokiu atveju akcelerometro duomenys gali būti naudojami orientacijai, randamai iš giroskopo matavimų, patikslinti ir pradinei reikšmei užduoti. Sekančiame skyriuje nagrinėjamas Kalmano filtro, išplėstinio Kalmano filtro ir komplementariojo filtro su proporciniu-integruojančiu valdymu taikymas akcelerometro ir giroskopo duomenims susieti.

2.3. Kalmano filtras

Kalmano filtras įvertina matavimo ir proceso triukšmus, šių triukšmų kovariaciją, remiasi sistemą aprašančiu tiesiniu modeliu. Šis algoritmas patikslina prognozuojamą vertę išmatuotąja verte, atsižvelgiant į matavimo ir prognozės kovariacijos matricas. Algoritmas turi vieną įėjimo ir vieną išėjimo vektorių. Ši algoritmą sudaro tokie žingsniai (Kim 2010):

- būsenos (2.19) ir klaidos kovariacijos (2.20) prognozavimas:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + w_k, \quad (2.19)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q; \quad (2.20)$$

- Kalmano stiprinimo matricos apskaičiavimas (2.21):

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}; \quad (2.21)$$

- nustatytos reikšmės apskaičiavimas (2.22):

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^- + v_k); \quad (2.22)$$

- klaidos kovariacijos apskaičiavimas (2.23):

$$P_k = P_k^- - K_k H P_k^-; \quad (2.23)$$

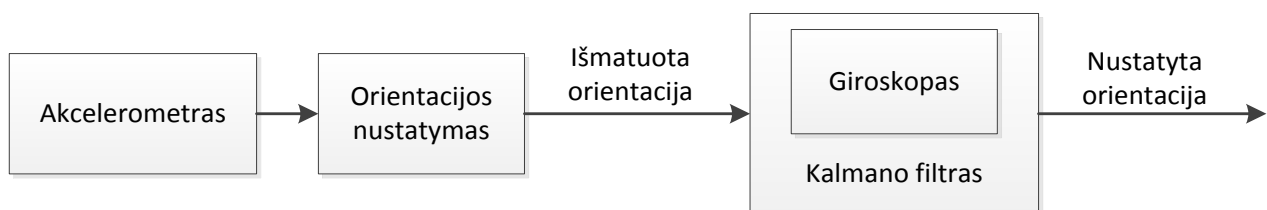
Šio algoritmo kintamuosius galima suskirstyti į kelias grupes:

- įėjimo kintamasis: z_k – vektorius, aprašantis išmatuotą orientaciją;
- išėjimo kintamasis: $\hat{x}_k$ – vektorius, aprašantis algoritmo ciklo metu nustatytą orientaciją;
- sistemą aprašantys kintamieji: A – proceso atnaujinimo dėsnį aprašanti matrica; H – matrica aprašanti, kurie prognozės kintamieji daro įtaką galutiniam skaičiavimui; Q – proceso triukšmo w_k kovariacija; R – matavimo triukšmo v_k kovariacija; K_k – Kalmano stiprinimo matrica, nuo kurios priklauso, kokį svorio koeficientą turi išmatuota vertė lyginant su prognozuotąja verte;
- einamieji arba vidiniai kintamieji: $\hat{x}_k^-$ – prognozuojamoji išėjimo vertė, P_k^- – prognozuojamoji kovariacija, P_k – patikslinta kovariacija.

Šiame algoritme w_k ir v_k skirti parodyti, kur yra triukšmas, tačiau įgyvendinant jie nenaudojami. Triukšmą įvertina kovariacijos matricos. k – tai diskretinio matavimo atskaitos eilės numeris.

Pertvarkius (2.22) formulę į (2.24) formulę, galima pastebėti, kad ši išraiška turi didelį panašumą į žemo dažnio filtro išraišką, kuri pateikta (2.25) formule. Pagrindinis skirtumas tas, kad žemo dažnio filtro išraiškoje svorio koeficientas α yra pastovus, o Kalmano filtro išraiškoje K_k kinta priklausomai nuo prognozuojamosios ir išmatuotosios verčių patikimumo (Kim 2010).

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^- + v_k) = (I - K_k H)\hat{x}_k^- + K_k z_k, \quad (2.24)$$



2.1 pav. Kalmano filtro blokinė schema (Kim 2010)

$$\bar{x}_k = \alpha \bar{x}_{k-1} + (1 - \alpha) x_k. \quad (2.25)$$

Sudarant Kalmano filtrą orientacijai iš giroskopo ir akcelerometro nustatyti, svarbiausia sudaryti tinkamą sistemos modelį. Modelio blokinė schema pateikta 2.1 paveiksle.

Orientacijos prognozės skaičiavimo formulėje A matrica priklausys nuo giroskopo išmatuotų kampinių greičių. Į įėjimą paduodama iš akcelerometro matavimų apskaičiuota orientacija. Kadangi orientacija nustatoma tik dviem ašims, tai ir Kalmano filtro išėjimo vektoriuje tikslios bus tik dvi ašys; trečioji ašis reikalinga skaičiuojant.

Pasirinkta, kad būseną bus aprašoma kvaternionu (2.26) (Kim 2010). Kvaternionas pasirinktas dėl to, kad iš (2.6) formulės nesudėtinga išreikšti kvaternionus taip, kaip parodyta (2.27) formulėje, tačiau iš (2.2) formulės kampų išreikšti ne tik nepavyks, bet dar ir pritrūksime kampo ψ .

$$x = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{Bmatrix}. \quad (2.26)$$

(2.7) formulę aprašo, kaip giroskopo matuojamas kampinis greitis susijęs su kvaternionų kitimu, (2.27) formulėje ši išraiška perrašyta taip, kad kvaternionai būtų kaip įėjimo parametras, kuris keičiamas pagal kampinį greitį (Kim 2010):

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{Bmatrix}. \quad (2.27)$$

Šią išraišką perrašome diskrečia forma, pateikta (2.28) formulėje (Kim 2010):

$$\begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{Bmatrix}_{k+1} = \left(I + \Delta t \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{Bmatrix}_k. \quad (2.28)$$

Šioje išraiškoje sistemos modelio A matrica išreikšta (2.29) formule (Kim 2010):

$$A = I + \Delta t \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Įprastai Kalmano filtro sistemos modelio A matrica nekinta, tačiau šiuo atveju jos reikšmės priklauso nuo giroskopo išmatuotų kampinių greičių p, q, r .

Kalmano filtro įėjimo parametras – iš akcelerometro nustatyta orientacija, tačiau ji nustatoma Eulerio kampais ir ją reikia konvertuoti į kvaternioną, tam naudojama (2.30) formulė. Šioje formulėje ϕ, θ, ψ yra kampai, gauti iš akcelerometro matavimų, randami pagal (2.3) ir (2.4). ψ kampas prilyginamas 0, nes iš akcelerometro matavimų jo neįmanoma nustatyti, šiam kampui nustatyti reikėtų taikyti magnetometrą. Nors (2.30) formulėje yra tik 2 kampai, tačiau vis tiek gaunamas

kvaternionas, sudarytas iš keturių reikšmių. Gautas kvaternionas atitinka Kalmano filtro įėjimo parametą z_k (Kim 2010).

$$\begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \end{Bmatrix}. \quad (2.30)$$

Taigi matuojamos 4 kvaterniono reikšmės, todėl H matrica, kuri nurodo, kurie būsenos vektoriaus parametrai yra matuojami, bus vienetinė matrica (Kim 2010):

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Toliau nustatomos triukšmo kovariacijos matricos Q ir R . Q matricai didėjant, didėja prognozavimo kovariacija P_k^- (2.19 formulė). Jei P_k^- didėja, tai iš (2.21) formulės matyti, kad Kalmano stiprinimas K_k mažėja. Mažėjant Kalmano stiprinimui filtras tampa mažiau jautrus matavimo vertėms ir daugiau remiasi prognozuojamąja verte $\hat{x}_k^-$, kuri apskaičiuojama pagal (2.19) formulę. Didinant R matricos vertes, mažėja prognozės įtaka galutinėje formulėje, nes mažėja Kalmano stiprinimas K . Q ir R vertės gali būti randamos iš matuojamo proceso statistikos ir jutiklių charakteristikų, tačiau egzistuoja nenumatytos triukšmo dedamosios, todėl dažniausiai tenka Q ir R nustatyti derinimo ir tikrinimo būdu. Mūsų modeliui nustatysime tokias Q ir R vertes (Kim 2010):

$$Q = \begin{bmatrix} 0,0001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,001 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

Esant tokioms Q ir R vertėms filtras labiau remiasi prognozuojama pagal giroskopo matavimus būseną nei iš akcelerometro nustatyta orientacija. R yra parinkta gana didelė tam, kad filtras nereaguotų į akcelerometro aukšto dažnio triukšmus, atsirandančius dėl vibracijų (Kim 2010).

Kalmano filtras veikia uždaru ciklu, tačiau net ir taip veikiant reikalingos pradinės kintamųjų vertės. Turime prieš paleisdami filtrą nustatyti pradinis būsenos ir klaidos kovariacijos dydžius $\hat{x}_0^-$ ir P_0^- (Kim 2010):

$$\hat{x}_0^- = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad P_0^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Filtras gali būti naudojamas, kai aprašytas sistemos modelis ir pradinės vertės. Siekiant aiškiau atvaizduoti orientaciją, gautas rezultatas gali būti keičiamas į Eulerio kampų seką pagal (2.14), (2.15), (2.16) formules.

2.4. Išplėstinis Kalmano filtras

Išplėstiniame Kalmano filtre naudojamas netiesinis sistemos modelis, aprašomas (2.31) ir (2.32) formulėmis. Palyginus jas su atitinkamomis Kalmano filtro (2.19) ir (2.22) formulėmis matyti, kad tiesinės matricų lygtys Ax_k , Hx_k pakeistos netiesinėmis funkcijomis $f(x_k)$ ir $h(x_k)$ (Kim 2010):

$$\hat{x}_k^- = f(x_k) + w_k, \quad (2.31)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - h(\hat{x}_k^-) + v_k). \quad (2.32)$$

Iš tikrųjų tai yra vieninteliai pakeitimai algoritme. Tačiau reikia atkreipti dėmesį, kad dabar A ir H matricos nėra aprašomos, šias matricas gausime ištiesinę nelineinį modelį pagal (2.33) ir (2.34) formules (Kim 2010).

$$A \equiv \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k^-}, \quad (2.33)$$

$$H \equiv \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k^-}. \quad (2.34)$$

Taikant išplėstinį Kalmano filtrą nebelieka problemos su Eulerio kampų netiesiškumu aprašant sistemos būseną, nes A dabar nustatoma iš netiesinės funkcijos. Taigi būseną galima aprašyti (2.35) formule (Kim 2010):

$$x = \begin{Bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{Bmatrix} \quad (2.35)$$

Sistemos modeliui naudojama anksčiau aprašytoji (2.6) formulė:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \frac{\sin\phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + w = \\ &= \begin{bmatrix} p + q \sin\phi \tan\theta + r \cos\phi \tan\theta \\ q \cos\phi - r \sin\phi \\ q \sin\phi / \cos\theta + r \cos\phi / \cos\theta \end{bmatrix} = f(x) + w, \end{aligned} \quad (2.36)$$

iš čia randama, kam lygi $f(x)$.

Matavimo modeliui sudaryti nustatoma matrica H , o ne Jakobi matrica $h(x)$, nes modelis yra tiesinis. Kadangi vienas iš kampų iš akcelerometro duomenų nerandamas, matavimo modelio matrica sumažėja iki 2×3 dydžio (2.37) (Kim 2010):

$$z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{Bmatrix} + v = Hx + v. \quad (2.37)$$

Igyvendinant išplėstinį Kalmano filtrą, reikia rasti Jakobi matricą A , pateiktą (2.38) formulėje pagal (2.39) formulę (Kim 2010).

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \phi} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta} & \frac{\partial f_1}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \phi} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta} & \frac{\partial f_2}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \phi} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta} & \frac{\partial f_3}{\partial \psi} \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

$$A = I + \Delta t \begin{bmatrix} q \cos \phi \tan \theta - r \sin \phi \tan \theta & q \sin \phi (\sec \theta)^2 - r \cos \phi (\sec \theta)^2 & 0 \\ -q \sin \phi - r \cos(\phi) & 0 & 0 \\ q \cos \phi \sec \theta - r \sin \phi \sec \theta & q \sin \phi \sec \theta \tan \theta - r \cos \phi \sec \theta \tan \theta & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

2.5. Komplementarusis filtras su proporciniu-integruojančiu valdymu

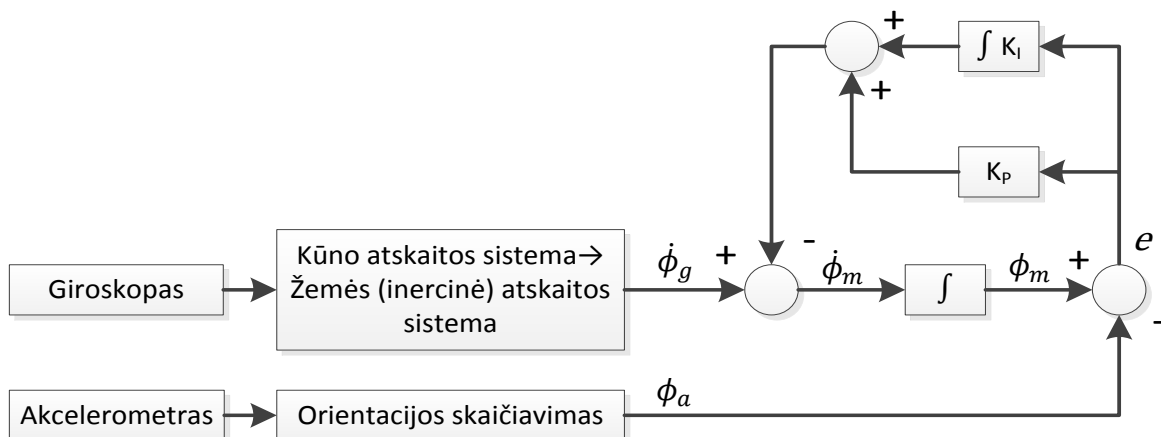
Giroskopas tinka matuoti orientacijos pokytį trumpą laiko periodą, o akcelerometras – absoliučiosios pozicijos stebėjimui ilgesnį laikotarpį. Taigi šie jutikliai gali būti laikomi papildančiais vienas kito matavimo duomenis. Sistema, sudaryta iš dviejų tokių jutiklių, yra tinkama komplementariajam filtrui taikyti. Kitaip negu Kalmano filtras, komplementarusis gali dirbti su atskiromis ašimis. Tai žymiai supaprastina filtro realizavimą ir leidžia naudoti mažesnius skaičiavimo bei atminties resursus. Komplementarusis filtras su proporciine, integruojančia klaidos korekcija parodytas filtro blokinėje schemoje, pateiktoje 2.2 paveiksle (Kim 2010).

Visų pirma yra apskaičiuojama orientacija pagal akcelerometrą, taikant (2.3) ir (2.4) formules. Nustatoma klaida tarp orientacijos kampų, gautų iš akcelerometro ir giroskopo (2.39) (Kim 2010):

$$e = \phi_m - \phi_a. \quad (2.39)$$

Tada proporcinis-integruojantis (K_P , K_I) valdiklis naudojamas giroskopo matuojamo kampinio greičio korekcijai. Taip gaunama pakoreguota $\dot{\phi}_m$ reikšmė, kuri toliau yra integruojama ir gaunama orientacija ϕ_m (2.40) (Kim 2010).

$$\phi_m = \int \dot{\phi}_m = \int \{ \dot{\phi}_g - (K_P + \int K_I) e \} = \int \{ \dot{\phi}_g - (K_P + \int K_I) (\phi_m - \phi_a) \} \quad (2.40)$$



2.2 pav. Komplementarusis filtras su proporciine integruojančia giroskopo klaidos korekcija (Kim 2010)

Suradęs klaidą e proporcinis-integruojantis valdiklis transformuoja klaidą į dydį, skirtą koreguoti kampinį pagreitį, gaunamą iš giroskopo. 2.2 paveiksle matyti, kad algoritmas turi atgalinį ryšį, kuris pagal praeito ciklo klaidą koreguoja naujo ciklo metu išmatuotą kampinį pagreitį (Kim 2010).

Proporcioninio integruojančio valdiklio perdavimo funkcija gauta įvykdžius 2.1 *Matlab* programos kodą (Kim 2010):

2.1 programos kodas

```
dt = 0.01;
Ki = 0.1^2;
Kp = sqrt(2)*0.1;
num = [Kp Ki];
den = [1 0];
[numd dend] = c2dm(num, den, dt, 'tustin')
```

Įvykdžius 2.1 programos kodą, gaunama proporcinio-integruojančio valdiklio perdavimo funkcija diskrečiuoju pavidalu ((2.41) formulė) (Kim 2010):

$$y_{k+1} = y_k + 0,1415u_{k+1} - 0,1414u_{k+1}. \quad (2.41)$$

(2.41) formulė yra pagrindinė komplementariojo filtro algoritmo formulė, nuo kurios priklauso filtro veikimas.

2.6. Skyriaus išvados

Šiame skyriuje pateikti orientacijos nustatymo metodai ir sudaryti algoritmai padėčiai nustatyti naudojant magnetometrą, akcelerometrą, giroskopą ir susiejant akcelerometro ir giroskopo duomenis. Sprendžiant iš sudarytų algoritmų sudėtingumo, patys paprasčiausi yra tiesioginio orientacijos nustatymo iš jutiklių duomenų algoritmai, tačiau nei vienas iš jutiklių neleidžia vienareikšmiškai nustatyti orientaciją erdvėje. Sudėtingesni yra absoliučiosios ir santykinės orientacijos susiejimo metodai. Iš jų sudėtingiausias yra išplėstinis Kalmano filtras, o paprasčiausias komplementarusis filtras. Šie algoritmai gali būti įgyvendinami įterptinėje sistemoje. Sekančiame skyriuje aptarti šiame skyriuje aprašytų algoritmų įgyvendinimo ir patikros ypatumai.

3. ORIENTACIJOS NUSTATYMO ALGORITMŲ ĮGYVENDINIMAS IR PATIKRA

Šiame skyriuje aprašoma įterptinė sistema ir algoritmams įgyvendinti naudotos priemonės. Skyriuje aprašytas giroskopo matavimų temperatūrinės slinkties kompensavimas funkcija, kuri aproksimuota neuronu tinklu. Taip pat skyriuje aprašytas magnetometro kalibravimo procesas. Paskutinis skyrius skirtas patikros aparatinei ir programinei įrangai aprašyti.

3.1. Įterptinė sistema bandymams atlikti

Bandymams atlikti naudota demonstracinė plokštė STM32F4-DISCOVERY. Prie šios plokštės prijungta MPU-9150 jutiklių mikroschema. Duomenys iš jutiklio nuskaitomi per I²C. Realizuojant Kalmano filtrus, prireikė atlikti veiksmus su matricomis. Skirtingai nei *Matlab* aplinkoje, C programavimo kalboje nėra standartinių funkcijų, skirtų veiksmams su matricomis atlikti. Realizuojant filtrų kodą STM32F4 šeimos mikrovaldiklyje, veiksmams su matricomis naudota ARM signalų apdorojimo biblioteka, skirta operacijoms su matricomis. Šioje bibliotekoje aprašyta 3.1 programos kode pateikta slankiojo kablelio matricos struktūra:

3.1 programos kodas

```
typedef struct
{
    uint16_t numRows;      /**< matricos eilučių skaičius.    */
    uint16_t numCols;      /**< matricos stulpelių skaičius. */
    float32_t *pData;      /**< nuoroda į matricos reikšmių masyvą. */
} arm_matrix_instance_f32;
```

Darbai su matricomis naudotos bibliotekos funkcijos aprašytos 3.1 lentelėje (*STM32F407VG* 2014). Visas sudarytos programos kodas pateiktas baigiamojo darbo C priede.

Orientacijai matuoti naudotas jutiklis MPU-9150. Jutiklyje yra integruoti trijų ašių akcelerometras, giroskopas ir magnetometras. Ryšys su jutikliu realizuotas I²C sąsaja 400 kHz dažniu. MPU-9150 sukonfigūruotas taip, kad nuskaitytų vidinio magnetometro duomenis per savo atminties buferį ir leistų juos skaityti kartu su akcelerometro, giroskopo ir vidinio termometro duomenimis.

Duomenims iš įterptinės sistemos į kompiuterį perduoti sudarytas paprastas protokolas. Atėjus laikui nuskaityti orientaciją, kompiuteris siunčia 0x00 baitą. Įterptinės sistemos mikrovaldiklis, gavęs 0x00 baitą, kai tik atsiranda laisvas nuo skaičiavimų laikas, paruošia paketą siuntimui ir aktyvuoja tiesioginio atminties valdymo įrenginį, skirtą perduoti duomenų paketą nenaudojant branduolio. Toks sprendimas sutaupo procesoriaus resursus skaičiavimams. Kompiuteryje veikia programa, kuri nustatytu periodu nuskaityti orientacijos duomenis iš įterptinės sistemos. 3.4.3 skyrelyje aprašyta *LabVIEW* aplinkoje sudaryta programa, skirta duomenims nuskaityti ir atvaizduoti.

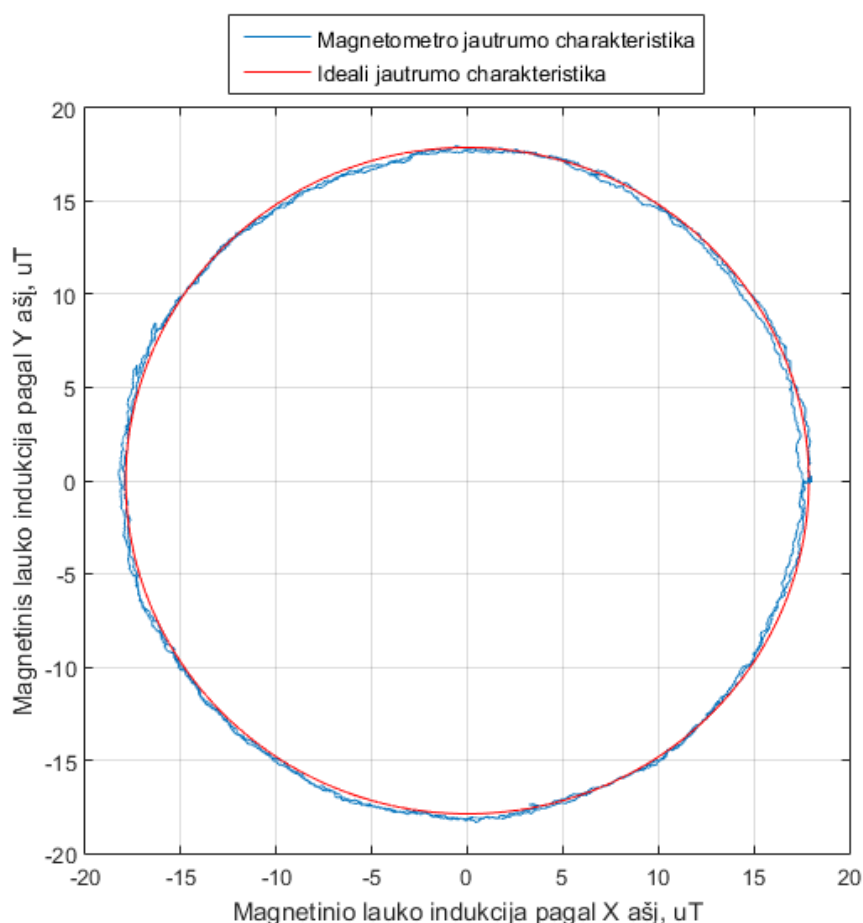
3.1 lentelė. Signalų apdorojimo bibliotekos funkcijos darbui su matricomis

Funkcija	Aprašymas
<code>void arm_mat_init_f32(arm_matrix_instance_f32 * S, uint16_t nRows, uint16_t nColumns, float32_t * pData)</code>	funkcija, skirta S adresu saugomos matricos struktūrai priskirti matmenis <i>nRows</i> ir <i>nColumns</i> bei nuorodą <i>pData</i> į reikšmių masyvą.
<code>void arm_status arm_mat_mult_f32(const arm_matrix_instance_f32 * pSrcA, const arm_matrix_instance_f32 * pSrcB, arm_matrix_instance_f32 * pDst)</code>	funkcija, skirta sudauginti dvi matricas saugomas adresais <i>pSrcA</i> ir <i>pSrcB</i> bei gautą matricą išsaugoti nurodytu adresu <i>pDst</i>
<code>void arm_status arm_mat_trans_f32(const arm_matrix_instance_f32 * pSrc, arm_matrix_instance_f32 * pDst)</code>	funkcija, skirta transponuoti matricą saugomą adresu <i>pSrc</i> ir gautą rezultatą išsaugoti adresu <i>pDst</i>
<code>void arm_status arm_mat_add_f32(const arm_matrix_instance_f32 * pSrcA, const arm_matrix_instance_f32 * pSrcB, arm_matrix_instance_f32 * pDst)</code>	funkcija, skirta sudėti dvi matricas saugomas adresais <i>pSrcA</i> ir <i>pSrcB</i> bei gautą matricą išsaugoti nurodytu adresu <i>pDst</i>
<code>void arm_status arm_mat_inverse_f32(const arm_matrix_instance_f32 * src, arm_matrix_instance_f32 * dst)</code>	funkcija, skirta skaičiuoti matricos saugomos adresu <i>pSrc</i> inversiją bei gautą matricą išsaugoti adresu <i>pDst</i>
<code>void arm_status arm_mat_sub_f32(const arm_matrix_instance_f32 * pSrcA, const arm_matrix_instance_f32 * pSrcB, arm_matrix_instance_f32 * pDst)</code>	funkcija, skirta iš matricos saugomos adresu <i>pSrcA</i> atimti matricą saugomą <i>pSrcB</i> bei gautą matricą išsaugoti adresu <i>pDst</i>

Mikrovaldiklis skaičiuoja laiką nuo paleidimo ir iš jutiklių nuskaitytu duomenis kas 10 ms. Šį laiką galima sumažinti iki 1 ms, nes jutiklio MPU-9150 maksimalus matavimo dažnis yra 1000 Hz. Metodams tirti jutiklio duomenys buvo nuskaityti 100 Hz dažniu.

3.2. Magnetometro kalibravimas

Orientacijai iš magnetometro nustatyti būtina atlikti magnetometro kalibravimą. Šio kalibravimo metu turi būti nustatomi du parametrai: matuojamų verčių mastelis ir postūmis nulinės vertės atžvilgiu. Šie parametrai nustatyti apytiksliai, atrinkus iš magnetometro matavimų maksimalias ir minimalias kiekvienos magnetometro ašies reikšmes. Matavimai atliekami sukant magnetometrą įvairiomis ašimis erdvėje, kurioje nėra magnetinio lauko šaltinių ar magnetinį lauką iškreipiančių objektų. Jei nėra svarbu gauti absoliutinę magnetinės indukcijos vertę, mastelio koeficientai parenkami taip, kad kiekvienos ašies matavimų diapazonas būtų tokie patys; jei svarbu, kiekvienos ašies matavimų diapazonai turėtų būti parenkami taip, kad suminės magnetinės indukcijos vertė atitiktų tą, kuri nurodoma magnetinių laukų žemėlapyje toje vietoje, kurioje vykdomas matavimas. Postūmio parametras parenkamas taip, kad diapazono centre atsidurtų 0 reikšmė, šis parametras gali būti tiek teigiamas, tiek neigiamas. Kalibravimo tikslumą galima patikrinti pritvirtinus magnetometrą prie stendo lygiagrečiai Žemės paviršiui ir sukant jį vieną ar daugiau kartų apie Z ašį. Iš gautų matavimo rezultatų galima sudaryti 3.1 paveiksle parodytą X-Y grafiką.



3.1 pav. Magnetometro jautrumas pagal X ir Y ašis

3.1 paveiksle raudonas apskritimas žymi idealiąją magnetometro X , Y ašių jautrumo charakteristiką, o mėlynas lankas – išmatuotąją magnetometro jautrumo charakteristiką. Galima daryti išvadą, kad magnetometras sukalibruotas teisingai, nes išmatuotoji charakteristika artima idealiajai. Kuo artimesnė išmatuotoji ir idealioji jautrumo charakteristikos, tuo tiksliau bus nustatoma orientacija. Jei mėlynas apskritimas būtų pasislinkęs pagal X ar Y ašį, reiktų keisti kalibravimo postūmio parametą; jei apskritimas būtų elipsės formos ir labiau išstętas palei vieną iš ašių, reiktų keisti kalibravimo mastelio parametą. Šiuo atveju magnetometrą pavyko sukalibruoti ir galima naudoti orientacijai nustatyti.

3.3. Giroskopo matavimų temperatūrinio slinkio kompensavimas

Eksperimentiniams duomenims kaupti sudarytas virtualusis instrumentas *LabVIEW* aplinkoje. Šio instrumento vartotojo sąsaja parodyta 3.2 paveiksle. Duomenims rinkti naudojamas užklausų siuntimas per UART ir atsakymo analizavimas bei vertimas į formą, atitinkančią reikšmės prieš užkodavimą. Gautos reikšmės yra įrašomos į failą, atskiriant jas kableliais. Kiekvienas gautų duomenų rinkinys išsaugomas atskira eilute.

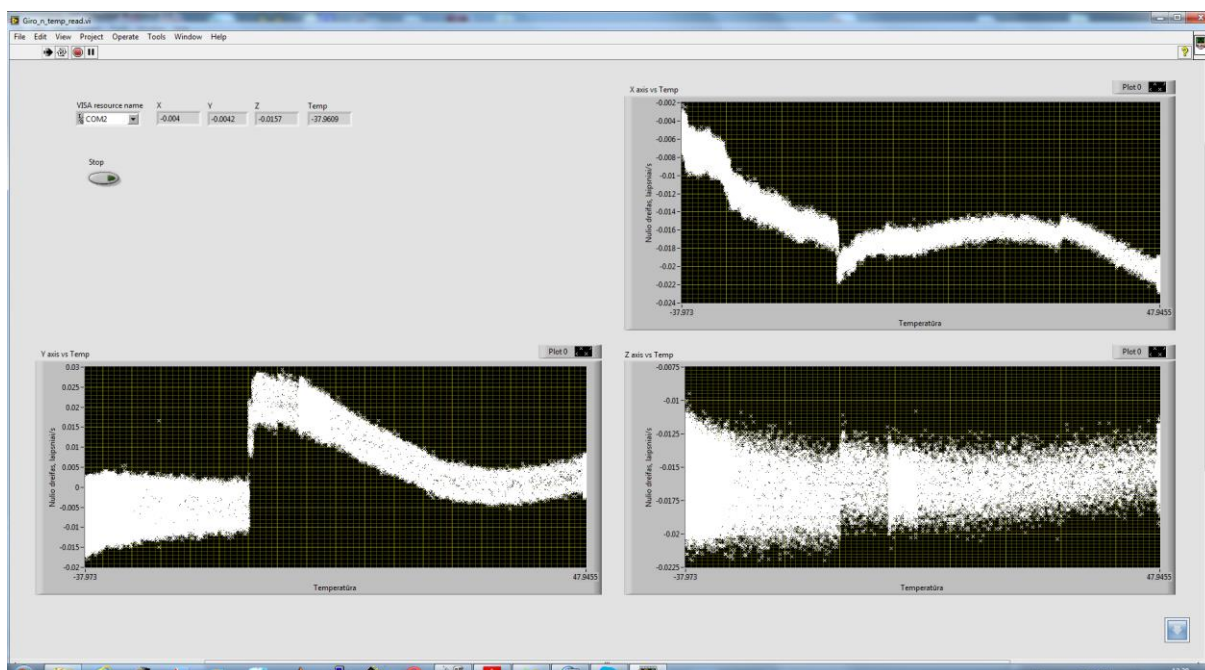
Programos vartotojo sąsajoje yra nuosekliosios jungties pasirinkimo elementas, grąžintų reikšmių indikatoriai ir duomenų rinkimo ciklo stabdymo mygtukas. Surinktiems duomenims pavaizduoti naudojami trys grafikų braižymo elementai. Paleidžiant programą yra atidaromas dialogo langas, kuris klausia, kur saugoti renkamus duomenis. Nurodžius saugojimo vietą, duomenys pradeda kaupti.

Eksperimentas paremtas straipsnyje (Shiau *et al.* 2013) aprašomu temperatūriniu kompensavimu, naudojant neuronų tinklą. Šio eksperimento metu naudotos tokios priemonės:

- kompiuteris su USB jungtimi ir duomenų rinkimo programa, aprašyta šiame darbe;
- STM32F4-DISCOVERY demonstracinė plokštė;
- USB-UART keitiklis FTDI232;
- plokštė su MPU-9150 mikroschema, kurioje integruoti girokopai trims erdvės ašims ir temperatūros jutiklis;
- stalinė temperatūros ir drėgnio kamera ESPEC SH-241.

Jutiklis MPU-9150 prijungiamas prie STM32F4-DISCOVERY maketo laidais ir patalpinamas ESPEC temperatūros ir drėgnio kameroje, kuri parodyta 3.3 paveiksle. Prie kompiuterio USB jungties prijungiamas FTDI232 USB-UART keitiklis, o prie jo nuosekliosios jungties prijungiama STM32F4-DISCOVERY plokštė. Sujungus visą schemą nustatoma minimali temperatūra temperatūros ir drėgnio kameroje ESPEC.

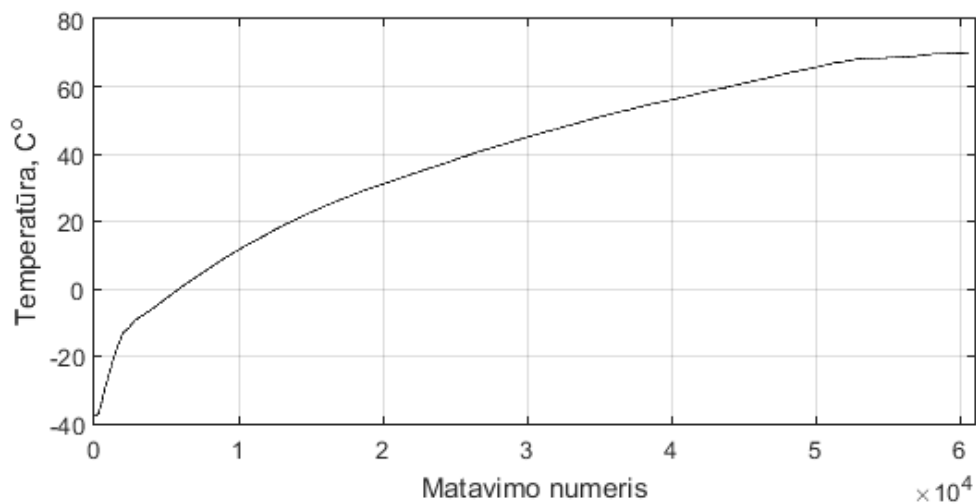
Eksperimento metu laukiama, kol kameroje pasiekama žemiausia $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūra, tada pradeda šildyti iki $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pasirinktos ribos atitinka kameros efektyvaus šildymo ir šaldymo temperatūras, nors jos yra mažesnės nei leidžiamos MPU-9150.



3.2 pav. Duomenų rinkimo programos vartotojo sąsaja



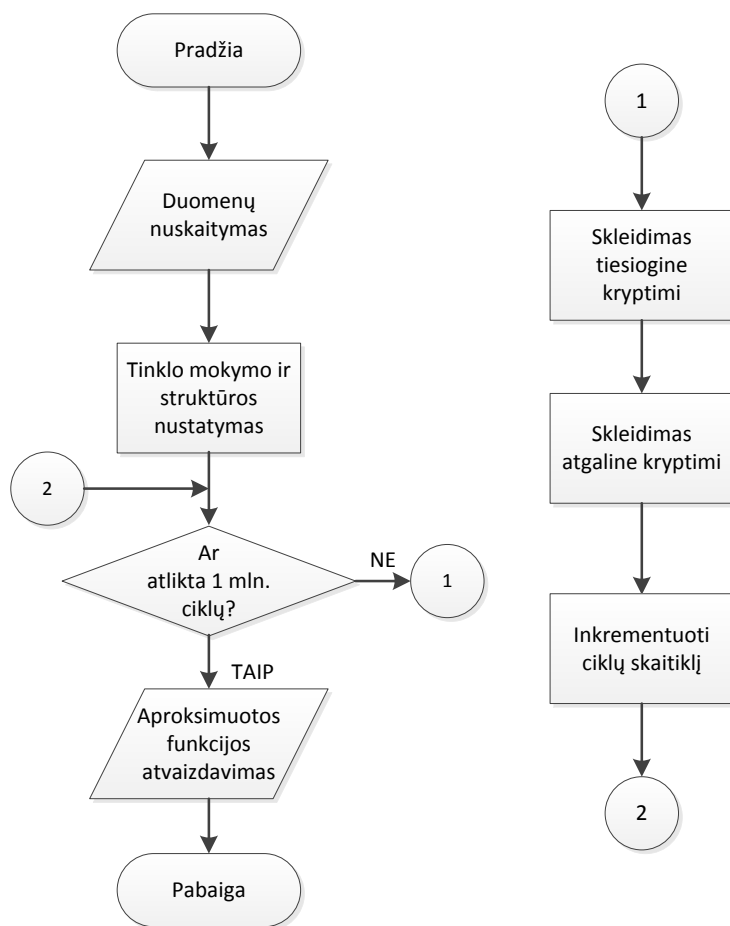
3.3 pav. Eksperimento įranga



3.4 pav. Temperatūros kitimas pagal matavimo numerį

Pradėjus šildyti, paleidžiama duomenų rinkimo programa. Surenkami duomenys išsaugomi kableliais atskirtų reikšmių faile. Pasiekus 70 °C temperatūrą, programoje spaudžiamas sustabdymo mygtukas. Temperatūros kitimo kreivė parodyta 3.4 paveiksle. Kai duomenys surinkti, kamera atšaldoma iki kambario temperatūros ir plokštė su MPU-9150 mikroschema išimama iš kameros, taip išvengiama staigių temperatūros pokyčių, kurie kenkia tiek kamerai, tiek jutikliui. Bandymo metu matavimai buvo kartoti kelis kartus, įsitikinta, kad giroskopo temperatūrinės charakteristikos atsikartoja, kaip parašyta straipsnyje (Shiau *et al.* 2013). Pirmųjų bandymų metu pastebėta, kad jutiklio temperatūrai mažėjant, o ne didėjant jo temperatūrinėje charakteristikoje atsiranda trūkių (3.2 pav.), tačiau pakartojus bandymą trūkių nebebuvo.

Iš viso bandymo metu sukaupta 60660 įrašų eilučių sudarytų iš temperatūros ir trijų kampinių greičių. Surinkti duomenys toliau yra apdorojami pagal 3.5 paveiksle parodytą algoritmą, skirtą daugiasluoksnio perceptrono tinklo mokymui *Matlab* aplinkoje.

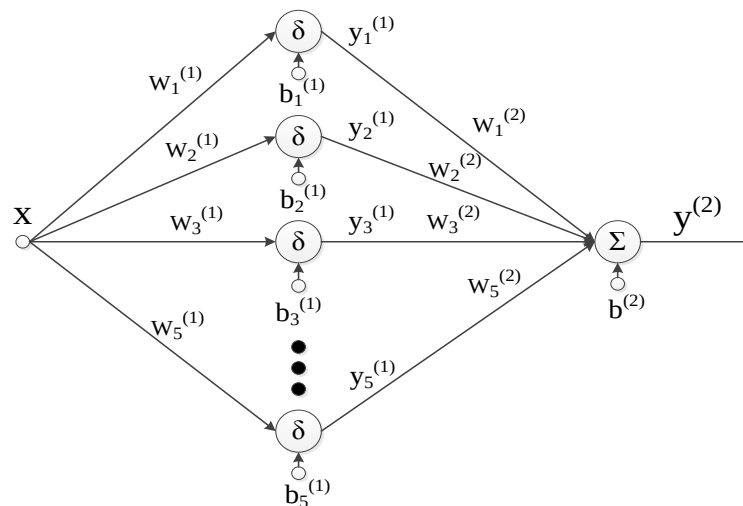


3.5 pav. Neuronų tinklo mokymo algoritmo blokinė schema

Skaitmeniniai MEMS giroskopai turi įvairių paklaidos šaltinių. Triukšmą galima išskaidyti į dinaminį ir statinį (Shiau *et al.* 2013). Dinaminis triukšmas – tai vibracijos ir šilumos triukšmas. Statinis triukšmas – tai matavimo poslinkis. Šis poslinkis priklauso nuo temperatūros, todėl negalima parinkti vienos vertės visam veikimo diapazonui. Kiekvienas giroskopas, net ir esantis tame pačiame korpuse, turi unikalią matavimų temperatūrinės slinkties charakteristiką.

Duomenims aproksimuoti ir modeliuoti daugiasluoksniu perceptronų tinklu sudarytas programinis kodas *Matlab* aplinkoje (3.2 programos kodas). Tinklo ryšio koeficientams parinkti naudotas atgalinio skleidimo algoritmas (angl. *Backpropagation*). Sudarytas daugiasluoksnis perceptronas su 5 neuronais paslėptajame sluoksnyje, pavaizduotas 3.5 paveiksle. Kiekvienos giroskopo ašies matavimų temperatūrinei slinkčiai kompensuoti naudotas atskiras tinklas su skirtingais statumo ir mokymo žingsnio parametrais. Ryšio koeficientų parinkimo algoritmas gali būti vykdomas skirtingą skaičių ciklų, kuo šių ciklų daugiau, tuo tikslesnio rezultato galima tikėtis. Kodo vykdymo rezultatas – neuronų tinklo ryšio svorio koeficientai. Remiantis gautais koeficientais įterptinėje sistemoje sudarytos funkcijos giroskopo ašių temperatūrinei slinkčiai kompensuoti.

Neuronų tinklo sudarymo algoritmo blokinė schema pateikta 3.6 paveiksle. Remiantis šiuo paveikslu aptartas mokymo algoritmas.



3.6 pav. Sudaryto neuronų tinklo schema

Algoritmo pradžioje atliekamas duomenų nuskaitymas iš failo ir skirtingus duomenis atitinkančių stulpelių atskyrimas. X ašį atitinka pirmas, Y – antras, Z – trečias, temperatūrą – ketvirtas stulpeliai.

Nustatant mokymo procesą ir tinklo struktūrą, nurodomas aktyvacijos funkcijos statusas $a = 0,1$ ir mokymo žingsnis $\mu = 0,05$ bei perceptronų skaičius paslėptajame sluoksnyje $MLP_sk = 5$. Ryšio svorių masyvas užpildomas atsitiktiniais skaičiais, taip kiekvieną kartą pradedama nuo skirtingų koeficientų tarp 0 ir 1. Koeficientai gaunami naudojant `rand()` funkciją su parametru 1. Taip kelis kartus paleidę kodą galime įsitikinti, ar tinklas nepateko į lokalų minimumą. Toliau pradedamas mokymo ciklas iš milijono iteracijų.

Tikslesniems rezultatams gauti bei kreivės tiesioginio atkartojimo išvengti, naudojama atsitiktinių skaičių parinkimo funkcija `random()`, skirta diskretiems skaičiams su vienodu tikimybės pasiskirstymu generuoti. Šios funkcijos sugeneruotas skaičius nurodo, kurią iš eilučių naudoti mokymui, taip garantuojama, kad eilutės nebus apdorojamos iš eilės.

Kol neatliktas milijonas iteracijų, vyksta tinklo mokymas, sudarytas iš dviejų dalių: tiesioginio ir atgalinio skleidimo. Tiesioginio skleidimo metu kiekvieno pirmojo sluoksnio įėjimų suma $v_i^{(1)}(j)$ randama pagal (3.1) formulę. Pirmojo sluoksnio perceptrono i išėjimas randamas pagal formulę (3.2), tai – sigmoidinė aktyvavimo funkcija. Radus pirmojo sluoksnio išėjimus, skaičiuojama antrojo (paskutiniojo) sluoksnio išėjimo vertė pagal (3.3) formulę.

$$v_i^{(1)}(j) = x(j)w_i^{(1)} + b_i^{(1)}, \quad (3.1)$$

$$y_i^{(1)}(j) = \left(1 + e^{-av_i^{(1)}(j)}\right)^{-1}, \quad (3.2)$$

$$y^{(2)}(j) = \sum_{i=1}^{12} (y_i^{(1)}(j) w_i^{(2)} + b^{(2)}), \quad (3.3)$$

čia j – atskaitos numeris, kuris atsitiktinai parenkamas iš 20 pasirinktų funkcijos kreivės atskaitų; i – neurono numeris paslėptajame sluoksnyje; $v_i^{(1)}(j)$ – pirmojo sluoksnio i -tojo neurono svertinė įėjimo suma su poslinkiu b atskaitai j ; $y_i^{(1)}(j)$ – pirmojo sluoksnio i -tojo neurono išėjimo vertė po aktyvacijos funkcijos atskaitai j ; $y^{(2)}(j)$ – antrojo (paskutiniojo) sluoksnio išėjimo vertė, kuri kartu yra daugiasluoksnio perceptrono išėjimo vertė.

Toliau apskaičiuojama momentinė klaida j -ajai atskaitai:

$$e(j) = (T(j) - y^{(2)}(j)). \quad (3.4)$$

Pradedamas daugiasluoksnio perceptrono tinklo ryšių svorio koeficientų atnaujinimas atgalinio sklaidimo (angl. *Backpropagation*) metodu. Atnaujinimo proceso schema pavaizduota 3.7 paveiksle. Visu pirma, apskaičiuojamas svorio koeficientų lokalusis gradientas pagal (3.5) formulę:

$$\delta^{(2)} = e(j)\sigma'(v^{(2)}) = e(j); \quad (3.5)$$

Atnaujiname paskutiniojo sluoksnio svorio koeficientus pagal (3.6) ir (3.7) formules:

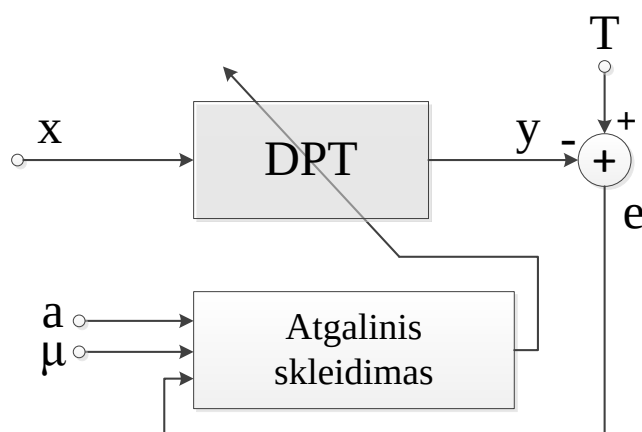
$$b^{(2)} = b^{(2)} + \mu\delta^{(2)}, \quad (3.6)$$

$$w_i^{(2)} = w_i^{(2)} + \mu y_i^{(1)}(j)\delta^{(2)}. \quad (3.7)$$

Toliau atliekamas paslėptąjo sluoksnio ryšių svorio koeficientų atnaujinimas. Kiekvienam ryšio koeficientui apskaičiuojama pasvertųjų įėjimo reikšmių išvestinė pagal (3.8) formulę. Tada pagal (3.9) formulę skaičiuojamas lokalusis gradientas. Po to atliekamas paslėptąjo sluoksnio ryšių svorių atnaujinimas pagal (3.10) ir (3.11) formules:

$$\sigma'(v_i^{(1)}(j)) = \left(1 + e^{-av_i^{(1)}(j)}\right)^{-1} \left(1 - \left(1 + e^{-av_i^{(1)}(j)}\right)^{-1}\right), \quad (3.8)$$

$$\delta_i^{(1)} = \delta^{(2)} w_i^{(2)} \sigma'(v_i^{(1)}(j)), \quad (3.9)$$



3.7 pav. Daugiasluoksnio perceptrono mokymo atgalinio sklaidimo metodu schema

$$w_i^{(1)} = w_i^{(1)} + \mu \delta^{(1)} x(j), \quad (3.10)$$

$$b_i^{(1)} = b_i^{(1)} + \mu \delta_i^{(1)}. \quad (3.11)$$

Kai mokymo ciklas atliekamas milijoną kartų, mokymas baigiamas. Baigus mokymo procesą, paskaičiuojamas atsakas tiesiogine kryptimi visiems matavimo taškams, naudojant (3.2), (3.3), (3.4) formules. Taip gaunamos aproksimuotos funkcijos reikšmės, kurio palyginamos su matavimo duomenimis 4.2 poskyryje.

3.4. Orientacijos nustatymo algoritmų patikra

Šiame poskyryje aprašyta algoritmų patikrai naudota aparatinė ir programinė įranga. Čia aprašyti standai naudoti orientacijos nustatymo algoritmų tikslumo patikrai, bandymo metu naudota patikrinimo seka. Taip pat skyriuje aprašytos tikslumo patikrai sukurtos programos ir greیتaveikos patikros būdas. Aptariamas orientacijos atvaizdavimui sukurtas *LabVIEW* virtualusis instrumentas.

3.4.1. Bandymų standas

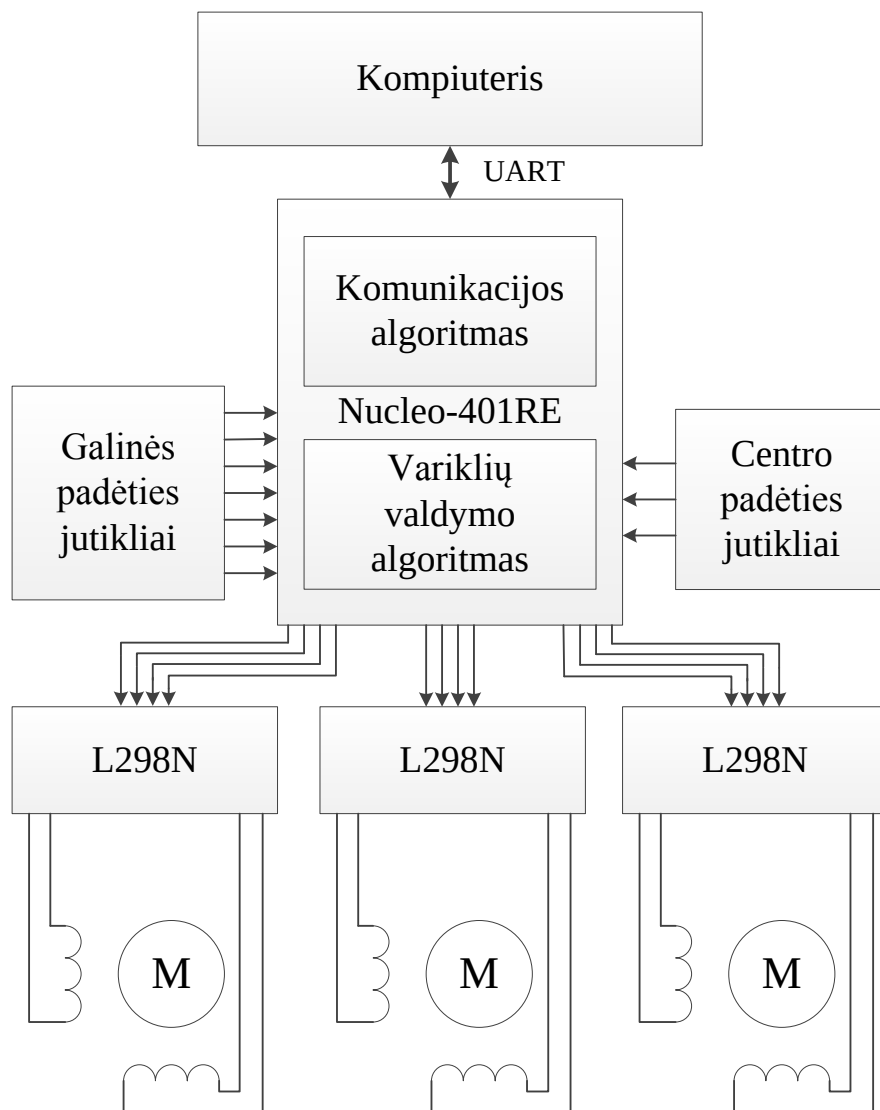
Orientacijos nustatymo metodų patikrinimui naudojamas 3.8 paveiksle parodytas trijų ašių standas, kuriame jutiklis yra pritvirtintas prie stendo slankiojo paviršiaus. Stendas juda nustatytais kampais, naudojant *Vexta* žingsninius variklius su reduktoriais.



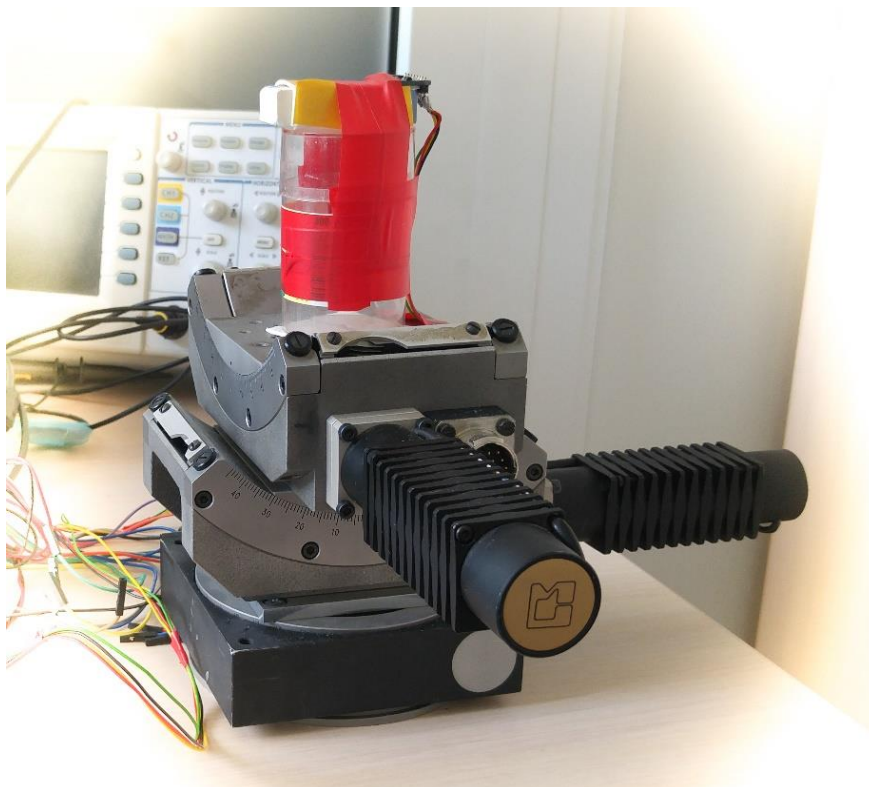
3.8 pav. Pirmasis trijų ašių standas

Kiekvienos stendo ašies padėties pakeitimui vienu laipsniu reikia atlikti skirtingą žingsninių variklių žingsnių kiekį: pagal X ašį reikia 290 žingsnių, pagal Y – 380, pagal Z – 240. Stendas turi ribotą judėjimo diapazoną: X ašiai maksimalus nuokrypis nuo centrinės padėties yra $\pm 3,5$ laipsnio, Y ašiai ± 4 laipsniai, Z ašiai ± 5 laipsniai. Plačiau stendą yra aprašęs A. Talutis (Talutis 2009). Atliekant orientacijos nustatymo algoritmų tikslumo tyrimą naudota kita valdymo elektronika ir galios dalis, sudaryta nauja variklių valdymo programa.

Stendo žingsninių variklių valdymui parašyta programa demonstracinei plokštei NUCLEO-F401RE su mikrovaldikliu, turinčiu *ARM Cortex-M4* mikroprocesorių. Naudojami žingsniniai varikliai reikalauja 0,5–2 A maitinimo srovių, todėl mikrovaldiklio valdymo signalams stiprinti naudota variklių valdymo mikroschema L298N. Kiekvienam varikliui valdyti naudojamos keturios signalinės linijos. Taip pat prie mikrovaldiklio prijungti stende integruoti galinės padėties ir centro padėties jutikliai, tiek veikiantys įprasto jungiklio, tiek veikiantys Holo efekto pagrindu. Sudarytos sistemos schema pateikiama 3.9 paveiksle.



3.9 pav. Stendo valdymo ir elektrinės dalies struktūrinė schema



3.10 pav. Antrasis trijų ašių stendas

Bandomoji plokštė turi integruotą USB-UART keitiklį, todėl prie kompiuterio yra prijungta USB jungtimi, tačiau programiniame lygmenyje naudojama UART. Sudaryta komandų sistema, leidžianti nurodyti variklio judėjimo kryptį, žingsnių skaičių, sustabdyti variklį, gauti informaciją apie stendo ribas nustatančių jutiklių būvį bei nueitų žingsnių skaičių, apie variklio būvį. Kompiuteryje sudaryta variklių valdymo ir padėties nuskaitymo programinė seka.

Atliekant vėlesnius tyrimus, L298N mikroschemos buvo pakeistos X-NUCLEO-IHM01A1 žingsninio variklio valdymo plokštėmis. Orientacijos nustatymas pagal magnetometrą tirtas naudojant kitą stendą (3.10 pav.), kurį vienu laipsniu pasukti apie bet kurią iš ašių reikia atlikti 1000 žingsnių. Maksimalus pasukimo diapazonas pagal Z ašį nėra ribojamas, o pagal X ir Y yra $\pm 45^\circ$. Toks stendas naudotas, nes orientacija, nustatyta iš magnetometro duomenų, svyruoja daugiau nei leidžia matuoti pirmojo stendo judėjimo diapazonas.

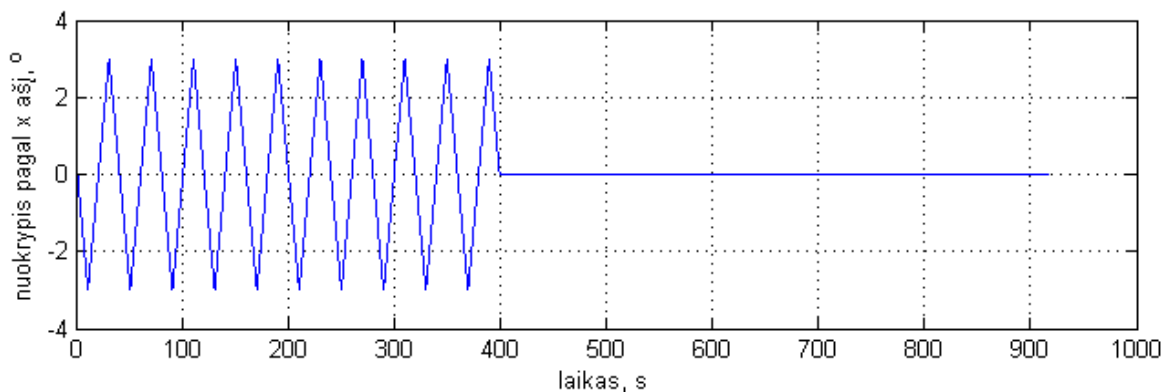
3.4.2. Tikslumo tyrimo sekos sudarymas

Stendo judėjimo seka aprašyta *LabVIEW* aplinkoje. 3.11, 3.12, 3.13 paveiksluose pateikta įvykdytoji stendo judėjimo seka ir gautosios judėjimo trajektorijos pagal tris ašis. Paveiksluose pavaizduotos kreivės sudarytos pagal stendo padėties duomenis, kurie buvo nuskaitymi kas 50 ms. Pradžioje keičiamas stendo nuokrypis pagal X ašį, po 5 periodų pradedama keisti nuokrypį pagal Y ašį. 5 periodus stende vyksta judėjimas X ir Y ašimis tuo pačiu metu, po to dar 5 periodus judama tik Y ašimi. Pabaigoje vyksta nuokrypio keitimas pagal Z ašį. Orientacijos nustatymo metodų veikimo

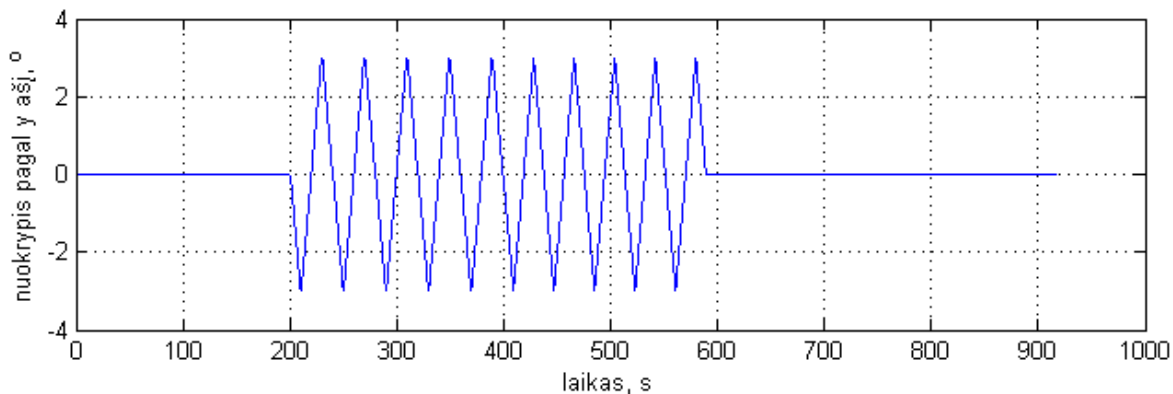
išbandymui, esant pokrypiui iškarto pagal dvi ašis, stendo X ašis judinama kartu su Y ašimi. Stendo judesių amplitudė parinkta atsižvelgiant į 3.4.1 skyrelyje aprašytas stendo nuokrypio ribas.

Lygiagrečiai su variklio valdymu kompiuteryje veikia matavimo duomenų nuskaitymo seka, analogiška 3.4.3 skyrelyje aptartai programai, tačiau vienu metu nuskaityma net 6 skirtingais orientacijos nustatymo metodais gauti Eulerio kampų sekų rinkiniai.

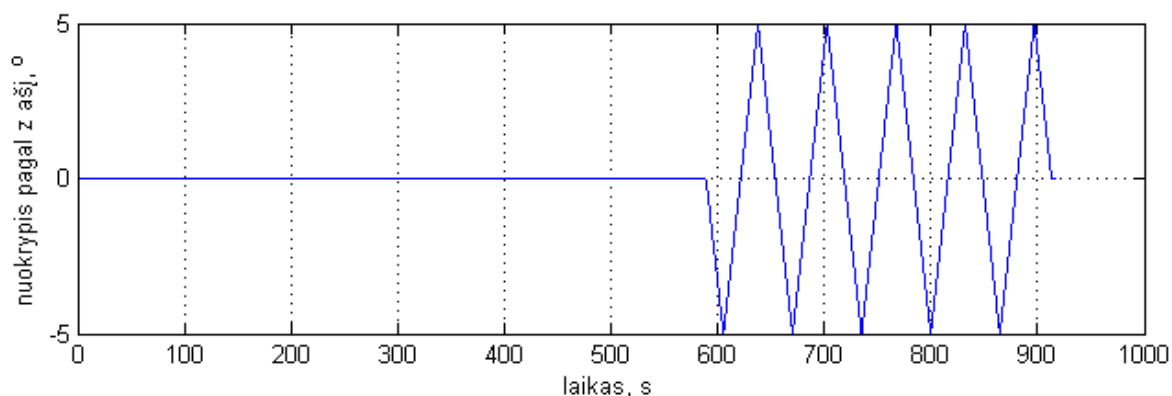
Surinkti duomenys išsaugomi į kableliais atskirtų skaičių formato failą. Vieno įrašo eilutę sudaro matavimo laikas, padėties pagal trijų ašių motorų valdymo seka, orientacijos kampų rinkiniai, gauti taikant komplementarųjį filtrą, išplėstinį Kalmano filtrą, Kalmano filtrą, giroskopo integravimą kvaternionu, skaičiuojant kampą tarp dviejų vektorių iš filtruotų akcelerometro pagreičio matavimų ir nefiltruotų akcelerometro pagreičio matavimų. Po to gauti duomenys apdorojami *Matlab* aplinkoje, o gauti rezultatai aprašomi 4 skyriuje.



3.11 pav. Stendo judėjimas pagal X ašį.



3.12 pav. Stendo judėjimas pagal Y ašį.



3.13 pav. Stendo judėjimas pagal Z ašį.

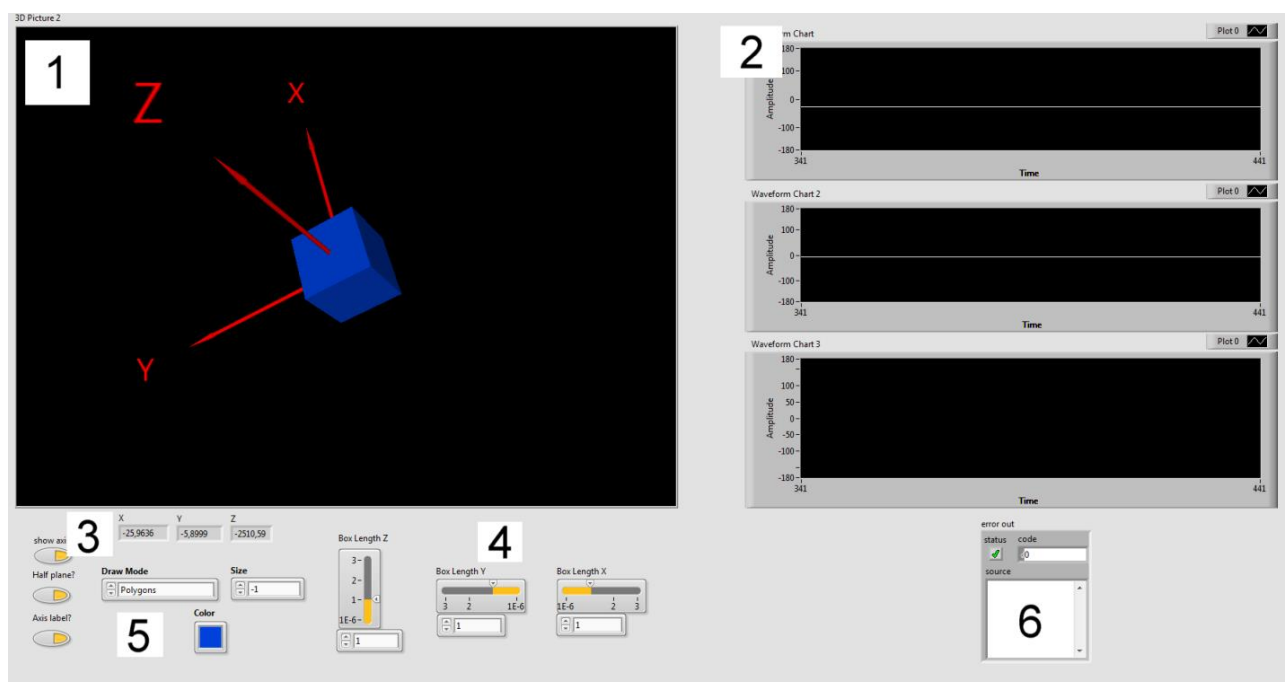
Dirbant su stendu pastebėta, kad vykstant judėjimui X ašimi stendas stipriau vibruoja negu judant Y ir Z ašimis. Ši vibracija nors ir turi neigiamos įtakos akcelerometro matavimų tikslumui, leidžia geriau patikrinti metodų atsparumą vibracijai. Algoritmų tyrimo rezultatai pateikti 4 skyriuje.

Tiriant magnetometrą buvo naudojamas rankinis stendo valdymas kompiuterinėje programoje, todėl ši seka netaikyta. Magnetometro tyrimui stendas buvo pasukimas 720° kampu pagal Z ašį. Matavimai nuskaityti ir saugomi panašiai, kaip anksčiau aprašyta.

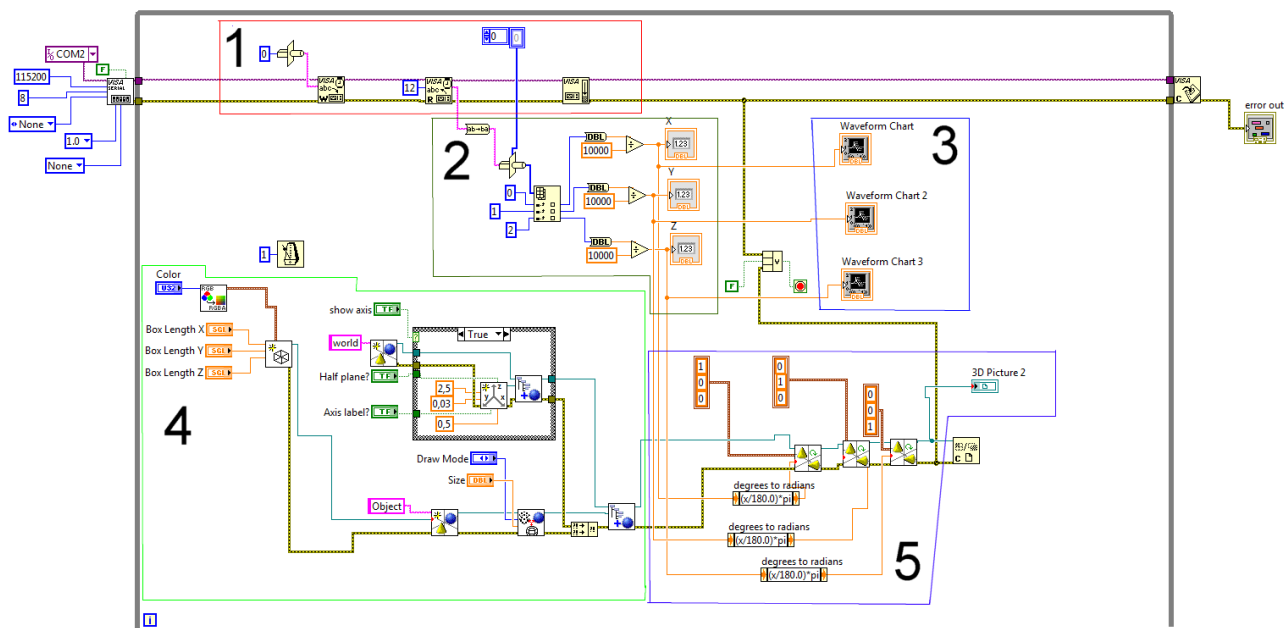
3.4.3. Objekto orientacijos atvaizdavimo programinė įranga

Objekto orientacijos atvaizdavimo programa sudaryta *LabVIEW* aplinkoje. Tai grafinio programavimo aplinka, sujungianti duomenų apdorojimo, komunikacijos ir atvaizdavimo galimybes bei leidžianti kurti patogius virtualius instrumentus. 3.14 paveiksle pavaizduota virtualiojo instrumento sąsaja. Šioje sąsajoje skaičiais pažymėti šie elementai:

1. Trimatės grafikos laukas. Šiame lauke pavaizduotas kubo formos kūnas su kubo koordinatinių sistemos ašimis.
2. Trijų ašių posūkio kampo kitimą vaizduojantys grafikai, kuriuose nauji matavimai perslenka senus, pavaizduojami paskutinės sekundės matavimai (100 reikšmių).
3. Skaitiniai indikatoriai, rodantys pokrypį kampus pagal Žemės koordinatinių sistemą.
4. Trimačio objekto matmenų nustatymo valdikliai.
5. Trimačio objekto formos, spalvos nustatymo ir koordinatinių ašių įjungimo/išjungimo valdikliai.
6. Ryšio su mikrovaldikliu klaidos išvedimo langas.



3.14 pav. Objekto orientacijos atvaizdavimo programa *LabVIEW* aplinkoje



3.15 pav. Objekto orientacijos atvaizdavimo programos *LabVIEW* aplinkoje schema

Ši programa yra sudaryta grafine programavimo kalba, 3.15 paveiksle pavaizduota šios programos grafinė schema, padalinta į penkias sritis. Paleidžiant programą, inicijuojama nuoseklioji sąsaja, tada įeinama į pagrindinį programos ciklą. Ciklo pradžioje programa siunčia 0x00 užklauso baitą mikrovaldikliui; tada laukia 12 baitų atsakymo iš mikrovaldiklio; gavus atsakymą, paketas dekoduojamas, o perdavimo eilė išvaloma. Prieš siunčiant į kompiuterį, slankiojo kabelio skaičiai įterptinėje sistemoje padauginami iš 10000 ir paverčiami 32 skilčių sveikaisiais skaičiais su ženklu. Taip užtikrinama, kad visada bus perduodami 4 skaičiai po kabelio. Dekodavimo metu išskiriamos 3 sveikųjų skaičiaus vertės, kurios yra konvertuojamos į slankiojo kabelio skaičius ir padalinamos iš 10000, taip atstatoma iš mikrovaldiklio perduota reikšmė, išlaikant mažiausiai 4 skaičių po kabelio tikslumą. Gautos reikšmės toliau siunčiamos į 3 sritį, skirtą duomenis atvaizduoti grafikais.

Objekto orientacijos pavaizdavimui trimatėje erdvėje naudojamas 4 srityje parodytas kodas. Juo sudaromas trimatis objektas, kuriam priskiriami atvaizdavimo parametrai, pridedamos objekto atskaitos sistemos ašys. Po to sukurtas trimatis objektas perduodamas į 5 sritį, kurioje jis pasukamas pagal X, Y ir Z ašis kampais, kurie nuskaityti iš mikrovaldiklio. Kiekvieno duomenų nuskaitymo ir atvaizdavimo ciklo metu objektas sukamas nuo pradinės padėties. Ciklo vykdymo periodas gali būti nuo 1 ms iki 1 s ir daugiau.

Skyriuje aprašytos programos pagrindu sudarytos visos metodų tikslumo patikrai naudotos programos. Ši programa patobulinta, taip, kad įrašytų nuskaitytus duomenis į kabeliais atskirtų reikšmių failą, taip pat pridėta stendo valdymo ir pozicijos nuskaitymo funkcijos. Analogiška programa sudaryta orientacijos nustatymo iš magnetometro duomenų tikslumui tirti. Sudarytos programos pateikiamos C priede.

3.4.4. Orientacijos nustatymo algoritmų greitimeikos patikra

Orientacijos nustatymo metodų greitimeikos patikra atlikta naudojant mikrovaldiklio programos derinimo režimą įterptinių sistemų programavimo aplinkoje. Mikrovaldiklis turi laikmatį, skaičiuojantį laiką, praėjusį nuo programos paleidimo. Laikas nuo paleidimo matuojamas milisekundėmis, todėl sudėtinga tiksliai išmatuoti orientacijos nustatymo algoritmo vieno ciklo trukmę. Tikslus algoritmo vykdymo laikas gali būti išmatuojamas atliekant algoritmą daugybę kartų ir padalinus visą vykdymo laiką iš vykdymo ciklų skaičiaus. Mikrovaldiklio kodas, kuriuo realizuoti orientacijos nustatymo algoritmai, yra papildomas algoritmo vykdymo laiką fiksuojančiu kodu; programavimo aplinkoje sustabdžius derinimo režimu veikiančią mikrovaldiklio programą, galima nuskaityti jos vykdymo laiką ir apskaičiuoti vieno ciklo trukmę. Tokie matavimai turi būti atliekami pavieniams algoritmams tam, kad kiti skaičiavimai nedarytų įtakos greitimeikos matavimo rezultatams. Jutiklių nuskaitymas yra lėtas, todėl matuojant greitimeiką jutikliai nenuskaitomi. Gauti rezultatai pateikiami 4 skyriuje.

3.5. Skyriaus išvados

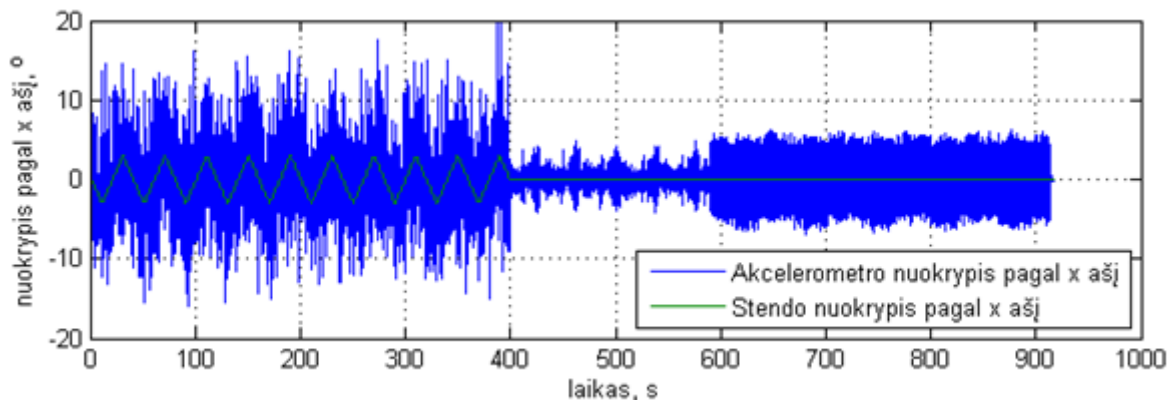
Šiame skyriuje aptarta tyrimui naudota įterptinė sistema ir darbui su matricomis naudota ARM signalų apdorojimo biblioteka. Taip pat aprašytas giroskopo matavimų temperatūrinės slinkties kompensavimas naudojant neuronų tinklus. Paskutiniame skyriaus poskyryje aptarti orientacijos nustatymo algoritmų tikslumo patikrai naudoti standai. Visi algoritmai, išskyrus šiaurės krypties nustatymą magnetometru, tirti pirmuoju stendu, kurio parinktas judėjimo diapazonas $\pm 3^\circ$. Sudaryta tam tikra stendo judėjimo seka, aprašytas bandymo duomenų nuskaitymo ir saugojimo būdas. Magnetometrui tirti panaudotas kitas stendas, kurio judėjimas Z ašimi nėra ribojamas. Taip pat paskutiniame poskyryje yra aprašoma programa, skirta objekto orientacijai atvaizduoti, ir orientacijos nustatymo algoritmų greitimeikos patikra.

4. TYRIMO REZULTATŲ ANALIZĖ

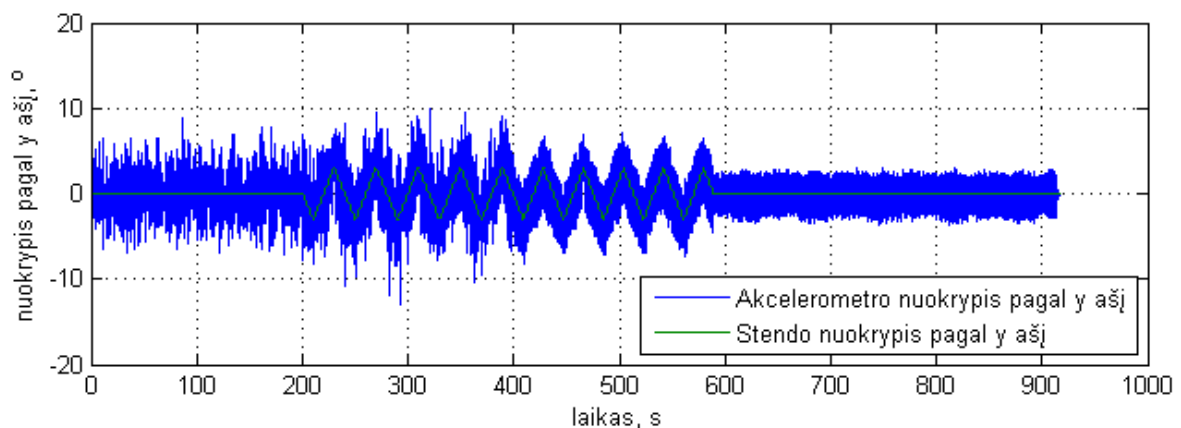
Šiame skyriuje pateikiami pirminio jutiklių duomenų apdorojimo ir filtravimo rezultatai, nustatant orientaciją tiesiogiai iš jutiklių duomenų. Taip pat pateikiami rezultatai, gauti taikant orientacijos nustatymo algoritmus, susiejančius akcelerometro ir giroskopopo duomenis. Iš eksperimento metu išmatuotų verčių *Matlab* aplinkoje sudaryti grafikai. Pateikiami rezultatai yra išsamiai aptariami, o skyriaus pabaigoje atliekama orientacijos nustatymo metodų tikslumo ir greitaveikos lyginamoji analizė.

4.1. Pirminio jutiklių duomenų apdorojimo ir filtravimo rezultatai

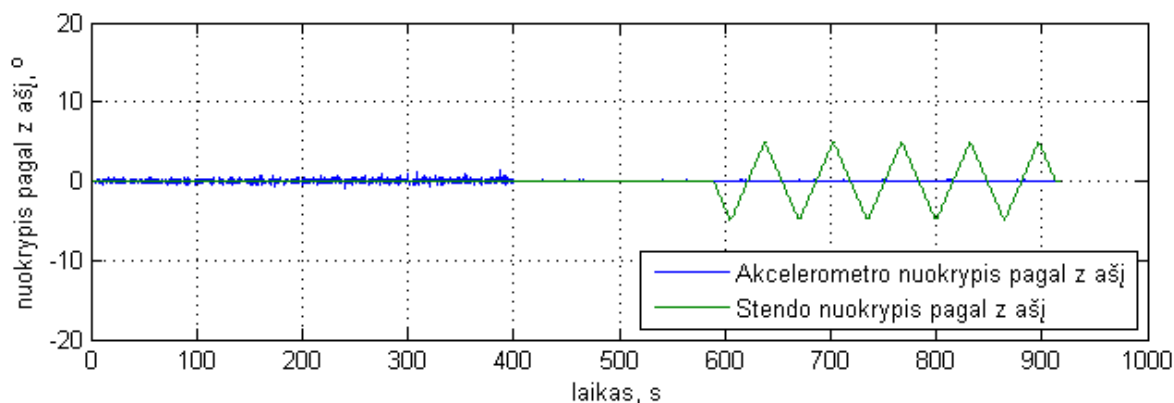
4.1, 4.2, 4.3 paveiksluose pateikti grafikai, atitinkantys orientaciją, apskaičiuotą iš nefiltruotų akcelerometro duomenų. Kaip matyti, duomenys turi daug triukšmo. Šis triukšmas atsiranda dėl stendo žingsninių variklių sukeltos vibracijos. Stendui judant *X* ašimi sukeliamos didelės vibracijos. Triukšmo amplitudė didesnė nei matuojamasis judesys. Judant pagal ašis *X* ir *Y*, maksimalus apskaičiuotas pokrypis siekia 20 laipsnių, kai reali judėjimo amplitudė yra 3 laipsniai. Kadangi, judant *Y* ir *Z* ašimis, vibracijos mažiau, tai judėjimo pagal *Y* ašį metu galima geriau matyti orientacijos kitimo pobūdį. Judant pagal *Z* ašį iš akcelerometro duomenų neįmanoma apskaičiuoti orientacijos, nes sukimo ašis sutampa su laisvojo kritimo pagreičio vektoriaus kryptimi.



4.1 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal *X* ašį apskaičiuotas iš nefiltruotų matavimo duomenų

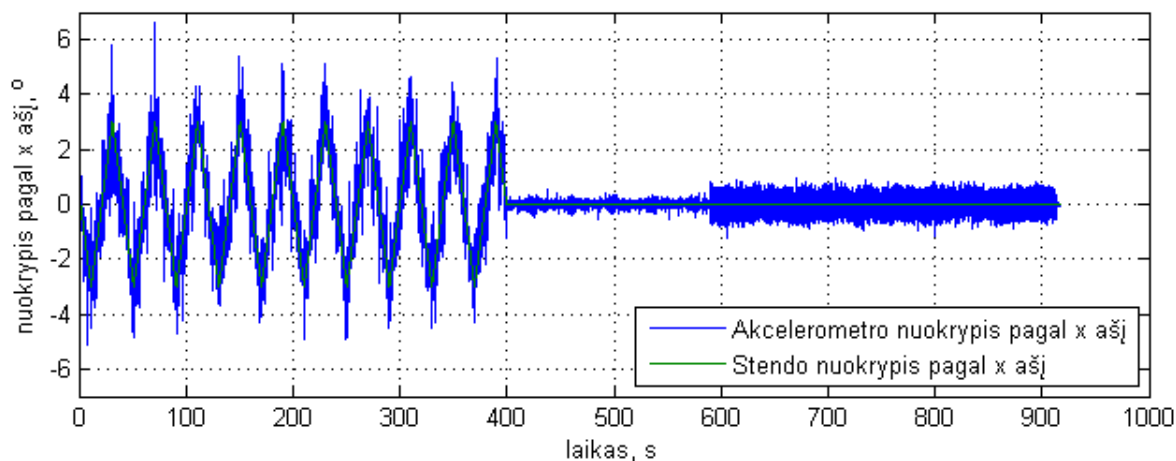


4.2 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal *Y* ašį apskaičiuotas iš nefiltruotų matavimo duomenų

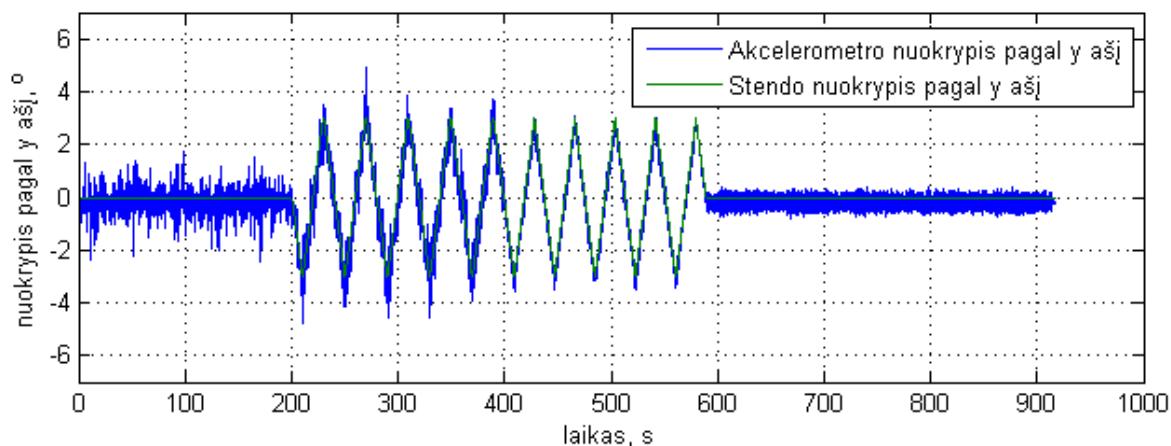


4.3 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal Z ašį apskaičiuotas iš nefiltruotų matavimo duomenų

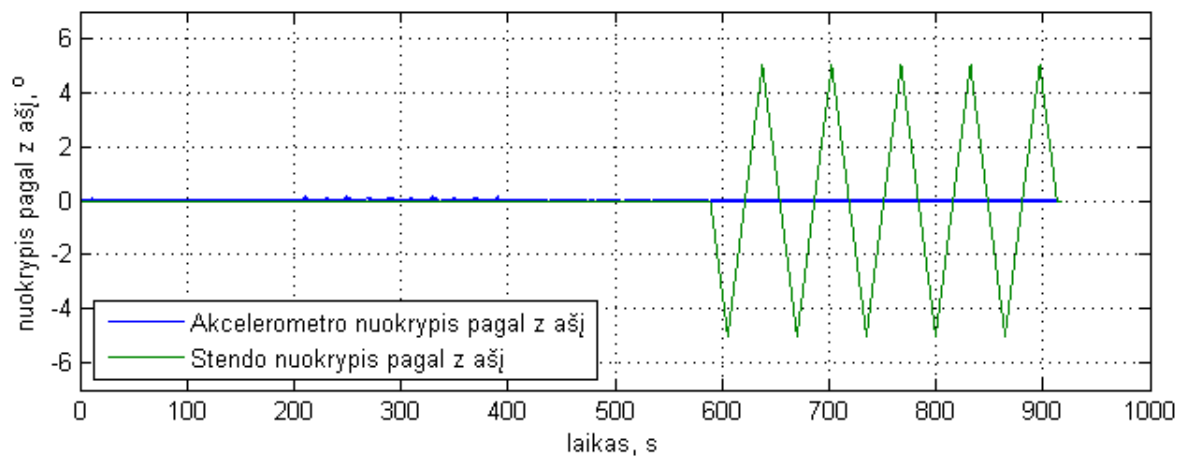
Tiksliau orientaciją pavyko nustatyti iš filtruotų akcelerometro duomenų; gautos orientacijos kitimo kreivės pateikiamos 4.4, 4.5, 4.6 paveiksluose. Iš jų matyti, kad judėjimas pagal X ašį vis dar pasižymi didele vibracija, tačiau judant tik pagal Y ir Z ašis, orientacijos kreivėse triukšmo lygis žymiai sumažėja. Toks rezultatas pasiektas skaičiuojant dešimties matavimų vidurkį.



4.4 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal X ašį apskaičiuotas iš filtruotų matavimo duomenų



4.5 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal Y ašį apskaičiuotas iš filtruotų matavimo duomenų



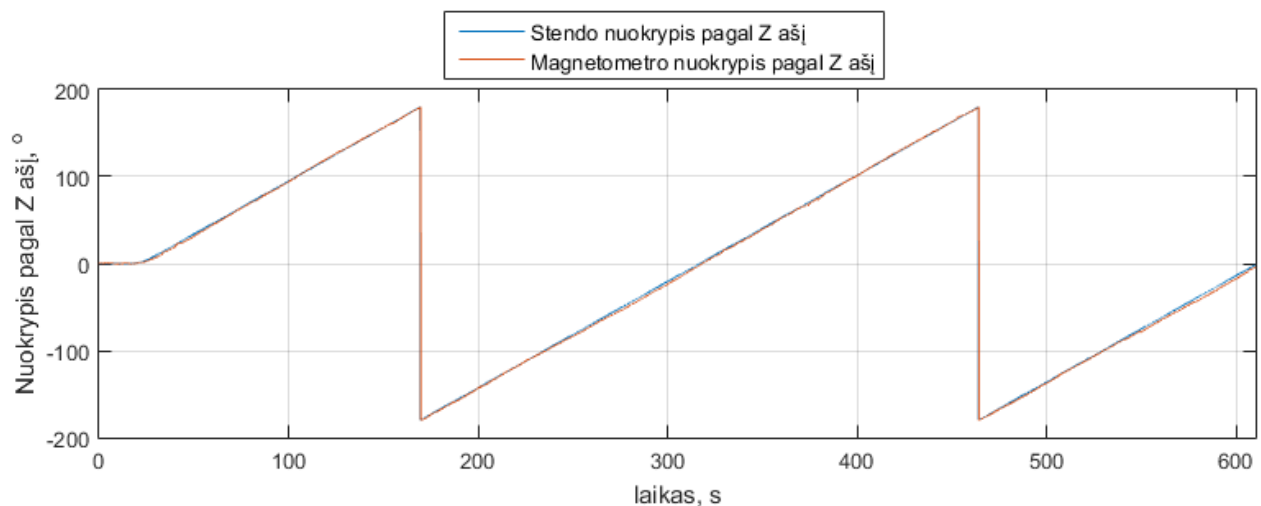
4.6 pav. Akcelerometro nuokrypis pagal Z ašį apskaičiuotas iš nefiltruotų matavimo duomenų

Iš 4.5 paveikslo galima pastebėti, kad dėl akcelerometro paklaidos ir triukšmo judant pagal Y ašį, matuojama amplitudė neigiama judėjimo kryptimi yra 0,5 laipsnio didesnė nei stendo judėjimo amplitudė. Taip yra dėl to, kad akcelerometras galėjo būti netiesiai sumontuotas arba pasireiškė akcelerometro matavimo netiesiškumas.

4.6 paveiksle matyti, kad Z ašis nereaguoja į jokių sukimus. Taip ir turėtų būti, kadangi algoritme nurodyta naudoti 0 reikšmę.

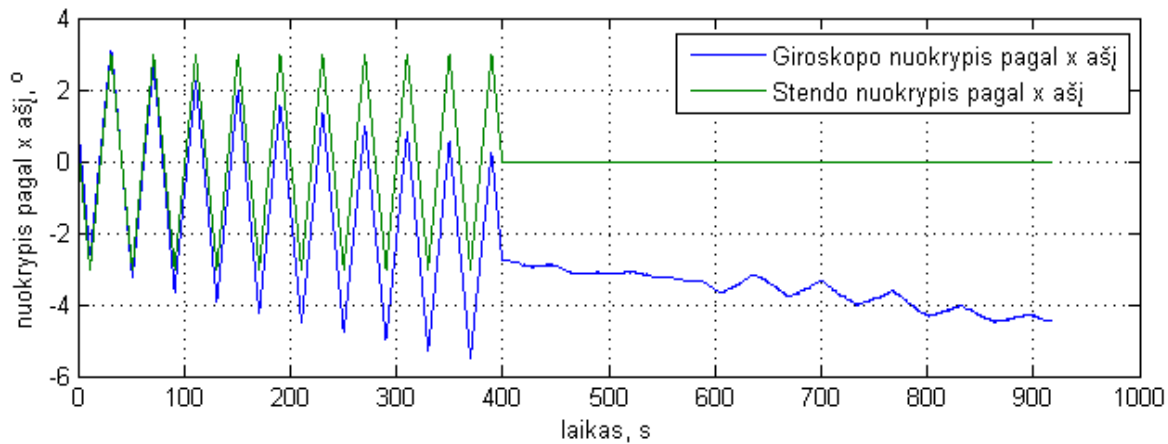
Iš gautų rezultatų galima spręsti, kad naudoti nefiltruojamų pagreičio matavimų orientacijos nustatymui negalima, nes visa vibracija, kuri nesusijusi su sukimu, yra įskaičiuojama į orientaciją. Akcelerometro matavimo duomenys gali būti priartinami prie gaunamų esant stacionariai būsenai, nufiltruojant vibraciją žemo dažnio filtru, tokiu, kaip slenkančio lango vidurkio skaičiavimas.

4.10 paveiksle pateiktas orientacijos nustatymo magnetometru pagal inercinės sistemos Z ašį rezultatas. Grafike raudona kreivė atitinka nuokrypį pagal Z ašį, kuris nustatytas iš magnetometro duomenų, o mėlyna linija atitinka tikrąją stendo padėtį apskaičiuotą pagal stendo žingsninių variklių atliktą žingsnių skaičių. Stendas bandymo metu du kartus apsukuko apie Z ašį, todėl matome du šuolius nuo 180 iki -180 laipsnių.

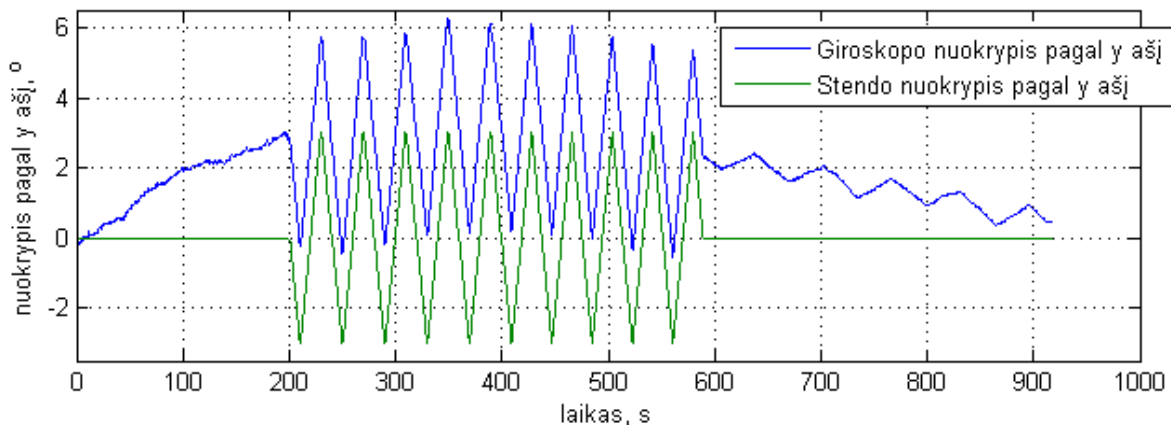


4.7 pav. Magnetometro ir stendo nuokrypis pagal Z ašį

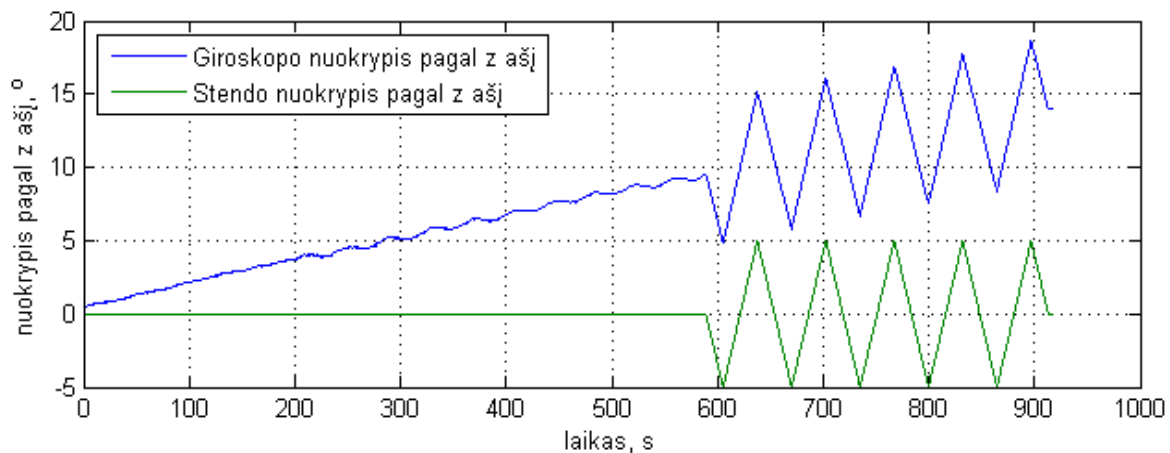
Orientacijos pokytis tiksliausiai nustatomas matuojant kampinį greitį giroroskopu ir integruojant giroskopo matavimo duomenis. Integravimo rezultatai pateikiami 4.8, 4.9 ir 4.10 paveiksluose. Šiuose paveiksluose matyti, kad orientacijos kitimas nustatomas tiksliai, be pašalinių triukšmų, tačiau orientacija su laiku slenka, tai matyti visų ašių grafikuose. Pagal X ašį per 15 minučių orientacija pasislenka per 4,5 laipsnio ir poslinkis yra pastovus; pagal Y ašį poslinkis iš pradžių auga, o po kurio laiko pradeda mažėti. Pagal Z ašį poslinkis nuolat auga.



4.8 pav. Giroskopo nuokrypis pagal X ašį



4.9 pav. Giroskopo nuokrypis pagal Y ašį



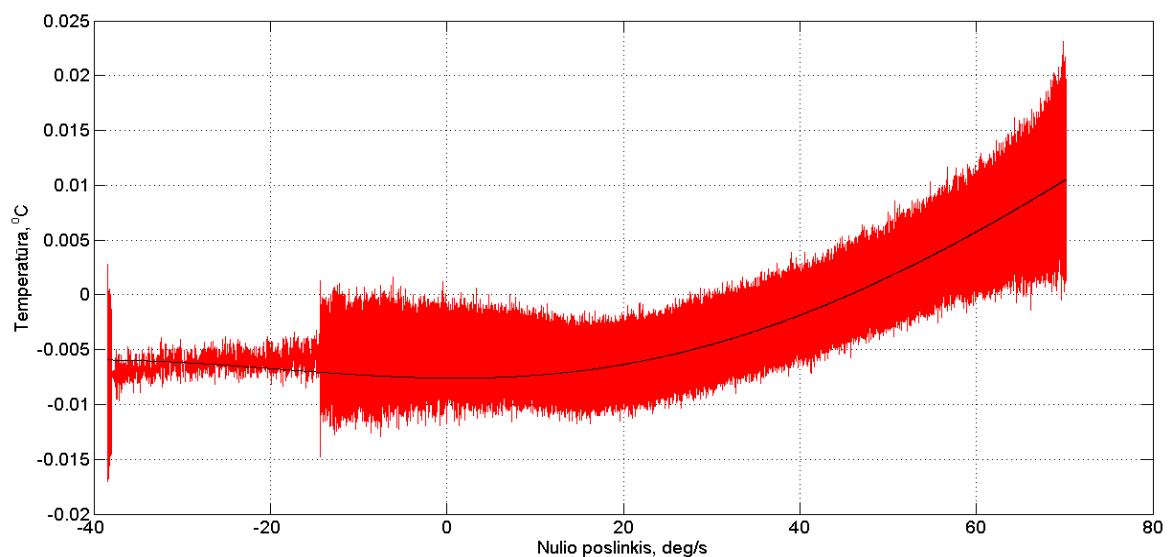
4.10 pav. Giroskopo nuokrypis pagal Z ašį

Kaip matyti 4.10 paveikslo, giroskopas, kitaip nei akcelerometras, leidžia nustatyti posūkio aplink Z ašį kampą, tačiau dėl giroskopui būdingos matavimų temperatūrinės slinkties integruojant sukaupiama klaida. Sekančiame skyriuje aprašyti rezultatai, gauti atlikus temperatūrinės slinkties kompensavimą.

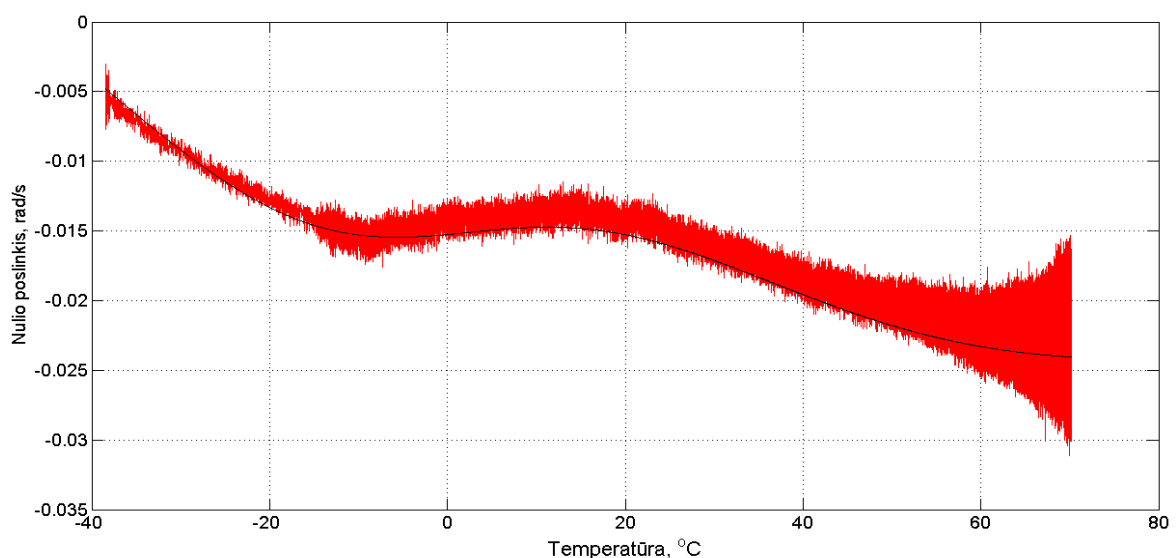
4.2. Giroskopo temperatūrinės slinkties kompensavimo rezultatai

Surinkti duomenys bei neuronų tinklu aproksimuotos giroskopo matavimų temperatūrinės slinkties priklausomybės X, Y, Z ašims pavaizduotos 4.11, 4.12, 4.13 paveiksluose.

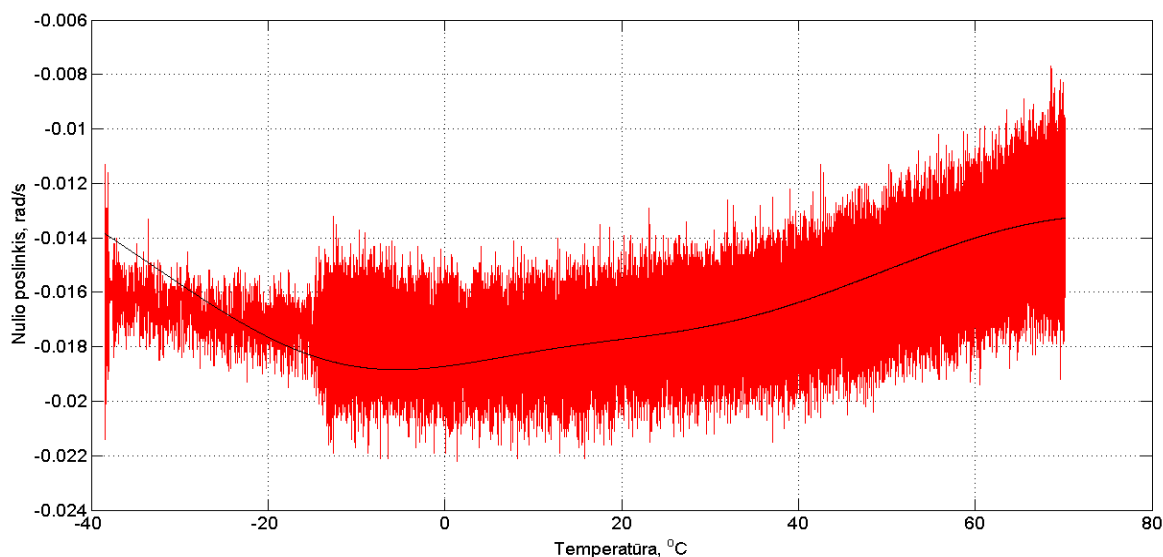
Sprendžiant iš gautų priklausomybių, skirtingų ašių charakteristikos yra unikalios, todėl kiekvieną girokopą būtina kalibruoti atskirai. Neuronų tinklo mokymo metu gauti ryšių svorių koeficientai yra įrašomi į mikrovaldiklio programą, skirtą orientacijai nustatyti, šios programos kodas kartu su koeficientais pateikiamas C priede.



4.11 pav. X ašies išmatuotos vertės ir aproksimacija



4.12 pav. Y ašies išmatuotos vertės ir aproksimacija



4.13 pav. Z ašies išmatuotos vertės ir aproksimacija

Sudarius neuronų tinklus įterptinėje sistemoje, atliktas orientacijos nustatymo patikrinimas, matuojant paklaidą, sukaupiamą per 4 minutes. Eksperimento metu gautos klaidos pateikiamos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelėje pateikiamas neapibrėžtumas, sukaupiamas per 4 minutes, taikant ir netaikant giroskopo matavimų temperatūrinės slinkties kompensavimą. Sprendžiant iš gautų rezultatų, galima teigti, kad paklaidos kaupimas sumažinamas iki dviejų kartų. Su kompensavimu neapibrėžtumas viršija 90 laipsnių po dvigubai didesnio laiko tarpo negu be kompensavimo. Iš 4.11, 4.12 ir 4.13 paveikslų matyti, kad aproksimuota neuronų tinklu funkcija ne visame diapazone atitinka temperatūrinės slinkties kitimą. Paklaidos dydis priklauso nuo aproksimacijos tikslumo, esant tam tikrai temperatūrai. Siekiant tiksliau kompensuoti matavimų temperatūrinę slinktį, reikia tiksliau aproksimuoti, naudojant daugiau neuronų, arba naudoti kompensavimo lenteles vietoje kompensavimo funkcijos.

4.1 lentelė. Sukauptas orientacijos neapibrėžtumas

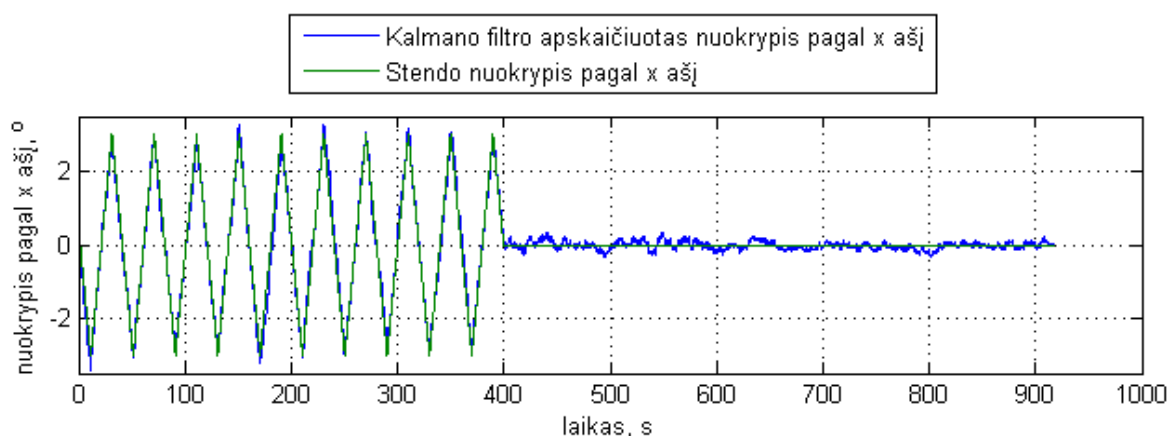
Laikas, minutės		1	2	3	4
Orientacijos neapibrėžtumas be kompensavimo, laipsniais	X ašis	29°	>90°	-	-
	Y ašis	50°	>90°	-	-
	Z ašis	55°	>90°	-	-
Orientacijos neapibrėžtumas su kompensavimu, laipsniais	X ašis	-7°	-18°	-45°	>90°
	Y ašis	-24°	-47°	-67°	>90°
	Z ašis	2°	9°	32°	>90°

Pasiektus giroskopo matavimų temperatūrinės slinkties kompensavimo rezultatus galima vertinti teigiamai, nes dvigubai sumažinus paklaidos kaupimo greitį, galima efektyviau naudoti giroskopo duomenis.

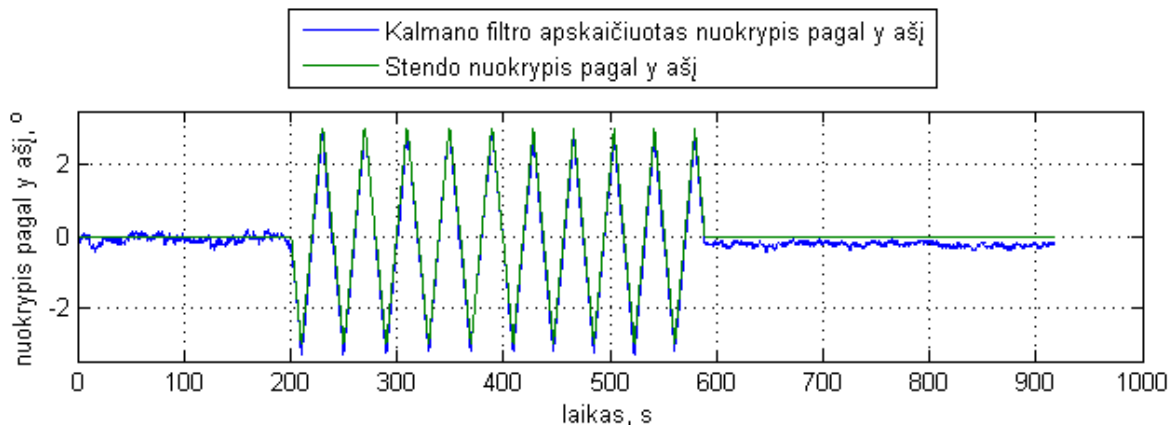
4.3. Kalmano filtro tikslumo rezultatai

Taikant Kalmano filtrą gautos orientacijos kitimo kreivės pateiktos 4.14, 4.15 ir 4.16 paveiksluose. Iš čia matyti, kad Kalmano filtras, naudotas patikrinimo metu, tinkamai nustato judėjimą pagal X ir Y ašis, tačiau Z ašies orientacija nustatoma neteisingai.

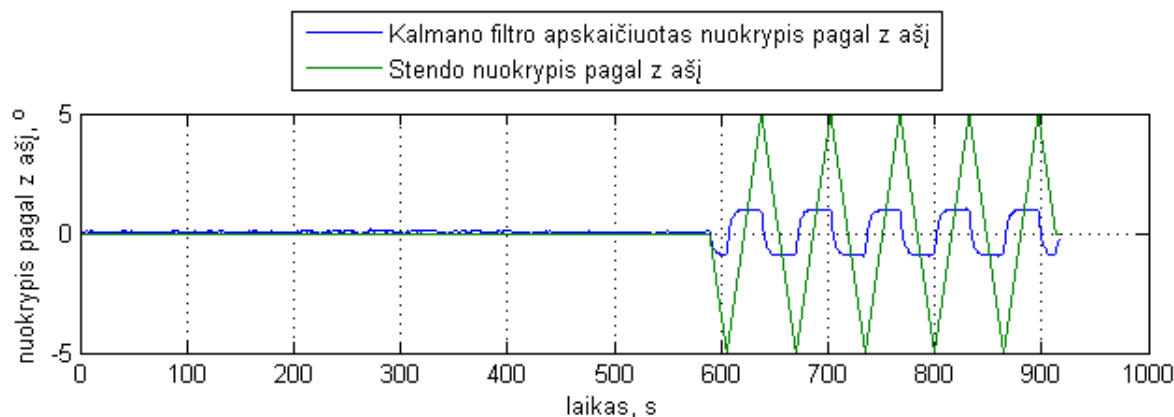
4.15 paveiksle matyti, kad dalį laiko Y ašies orientacija yra žemiau 0, tai parodo, kad jutiklis nebuvo pakankamai tiesiai prikabinamas, tačiau net ir šiuo atveju klaida yra santykinai nedidelė, nes nuokrypis yra iki $-0,4$ laipsnio; dėl to, stendui judant Y ašimi, nustatomas pokrypis į vieną pusę yra apie $0,4$ laipsnio mažesnis, o į kitą pusę per tiek pat didesnis.



4.14 pav. Nuokrypis pagal X ašį apskaičiuotas taikant Kalmano filtrą



4.15 pav. Nuokrypis pagal Y ašį apskaičiuotas taikant Kalmano filtrą



4.16 pav. Nuokrypis pagal Z ašį apskaičiuotas taikant Kalmano filtrą

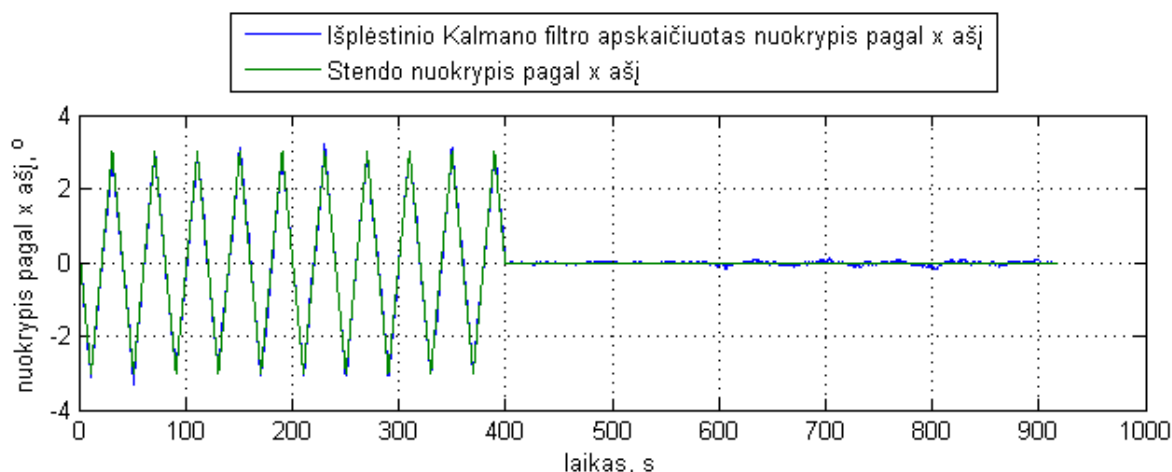
4.16 paveiksle matyti, kad Z ašies orientacija nustatoma neteisingai, dėl to, kad susiejami dviejų ašių akcelerometro ir trijų ašių giroskopo duomenys, taigi ašys X ir Y turi po porą matavimų, Z ašies akcelerometro matavimas visada atitinka 0, todėl nėra tinkamai papildomi giroskopo matavimai. Ši problema sprendžiama matuojant nuokrypį nuo šiaurės poliaus MPU-9150 integruotu magnetometru. Tačiau reiktų prieš tai atlikti kalibravimą, kad šalia esantis metalinis stendas netrukdytų nustatyti šiaurės poliaus krypties pagal Žemės magnetinio lauko indukcijos vektorių.

Iš gautų rezultatų galima spręsti, kad Kalmano filtrą pritaikius akcelerometro ir giroskopo duomenims apdoroti, galima tiksliai nustatyti objekto orientaciją erdvėje, o giroskopui būdingas poslinkis yra panaikinamas. Dėl Kalmano filtro veikimo realiu laiku ir filtravimo nuspėjamosios vertės atžvilgiu nėra įvedamas joks vėlinimas, tai leidžia naudoti filtrą realaus laiko sistemose, kur vėliniams yra svarbus parametras.

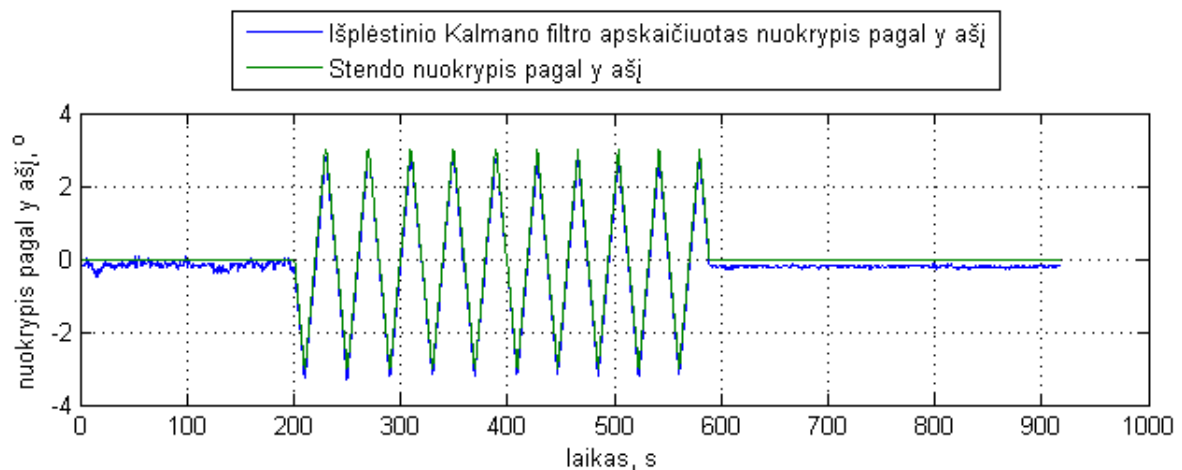
4.4. Išplėstinio Kalmano filtro tikslumo rezultatai

Taikant išplėstinį Kalmano filtrą gauti tikslesni rezultatai, jie pateikiami 4.17, 4.18, 4.19 paveiksluose. Palyginus su tiesiniu Kalmano filtru, yra atliekama mažiau skaičiavimų, dėl naudojamo netiesinio sistemos modelio, kuriame būseną aprašoma trimis kampais. Kalmano filtre būseną aprašoma kvaternionu, dėl to atliekami veiksmai su 4×4 dydžio matricomis vietoje 3×3 . Be to, Eulerio kampų sekų naudojimas leidžia iš anksto atmesti Z ašies filtravimą, kai nenaudojamas magnetometras. Atitinkamai orientacija pagal Z ašį visada bus lygi 0.

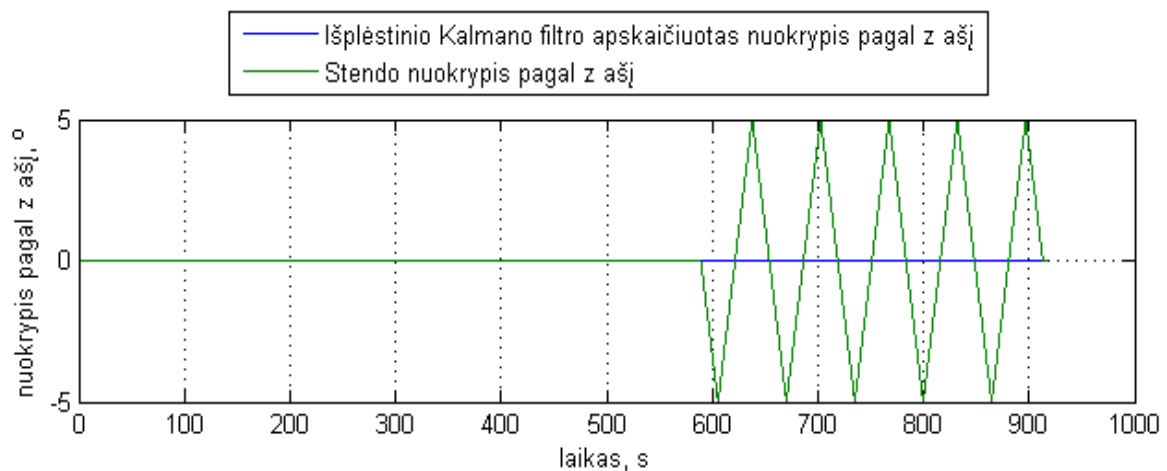
Palyginus 4.17 ir 4.18 paveiksluose pateiktus rezultatus su Kalmano filtro rezultatais matyti, kad išplėstinis Kalmano filtras užtikrina mažesnį triukšmo lygį. Tai susiję su pasirinktais sistemos triukšmo parametrais, o taip pat ir su mažesniu veiksmų kiekiu, nes atliekant veiksmus ir saugant rezultatus slenkančio kabelio formatu 32 bitų ARM mikrovaldiklyje, atsiranda paklaidos, kurios dauginant mažus skaičius iš didelių, greitai auga.



4.17 pav. Nuokrypis pagal X ašį apskaičiuotas taikant išplėstinį Kalmano filtrą



4.18 pav. Nuokrypis pagal Y ašį apskaičiuotas taikant išplėstinį Kalmano filtrą



4.19 pav. Nuokrypis pagal Z ašį apskaičiuotas taikant išplėstinį Kalmano filtrą

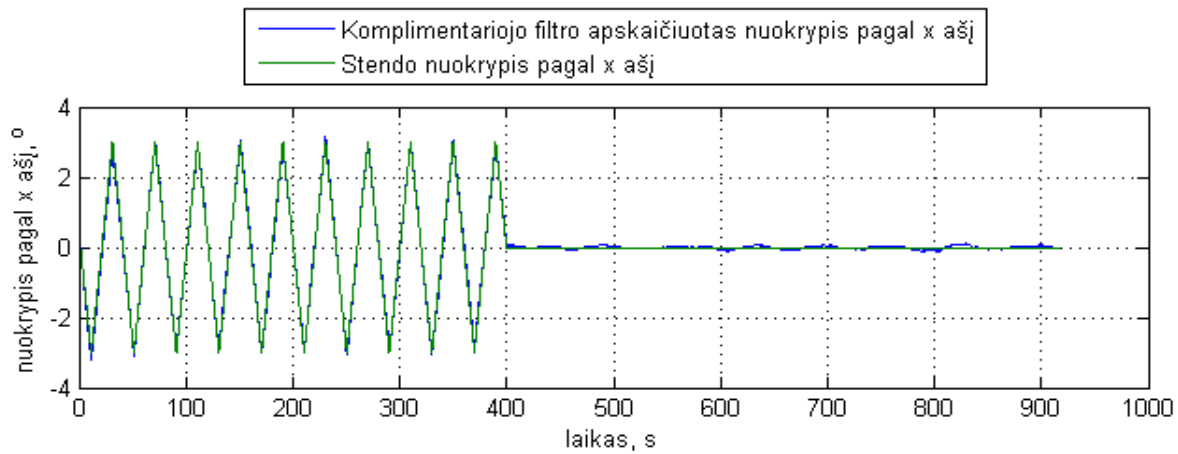
4.18 paveiksle pateikiama Y ašies kreivė dar kartą parodo, kad jutiklis galėjo būti orientuotas neteisingai. Tai gali būti dėl pačios jutiklių mikroschemos defekto arba dėl to, kad nepavyko tiksliau sulygiuoti jutiklio mikroschemos ir stendo.

Gauti rezultatai parodo, kad išplėstinis Kalmano filtras, kaip ir tiesinis Kalmano filtras, tinka orientacijos nustatymo iš akcelerometro ir giroskopo duomenų užduočiai spręsti.

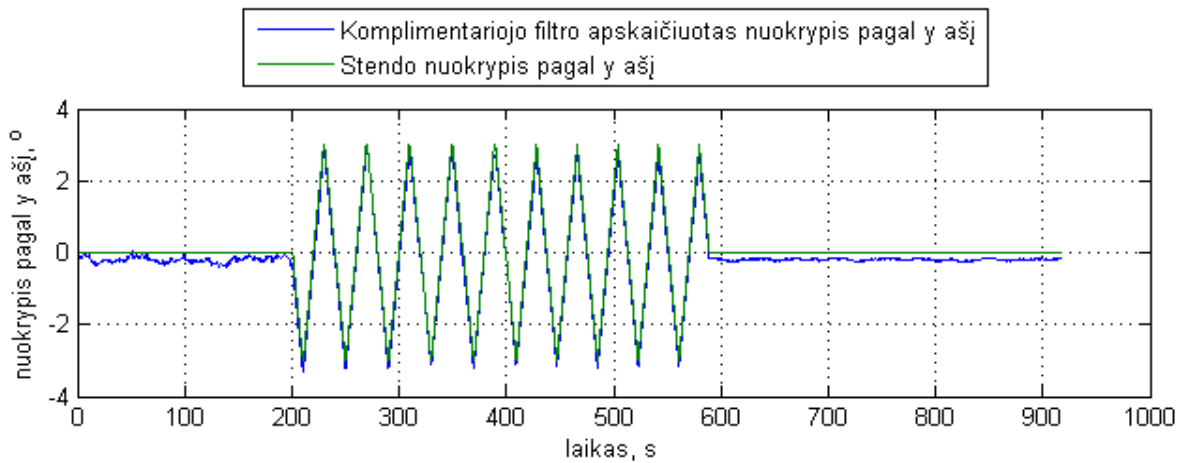
4.5. Komplementariojo filtro tikslumo rezultatai

Komplementarusis filtras stipriai skiriasi nuo Kalmano filtro, čia atliekami visai kitokie veiksmai. Sprendimo požiūriu, filtras yra paprastesnis ir nereikalaujantis daugybės veiksmų su matricomis. Šio filtro rezultatai pateikti 4.20, 4.21, 4.22 paveiksluose.

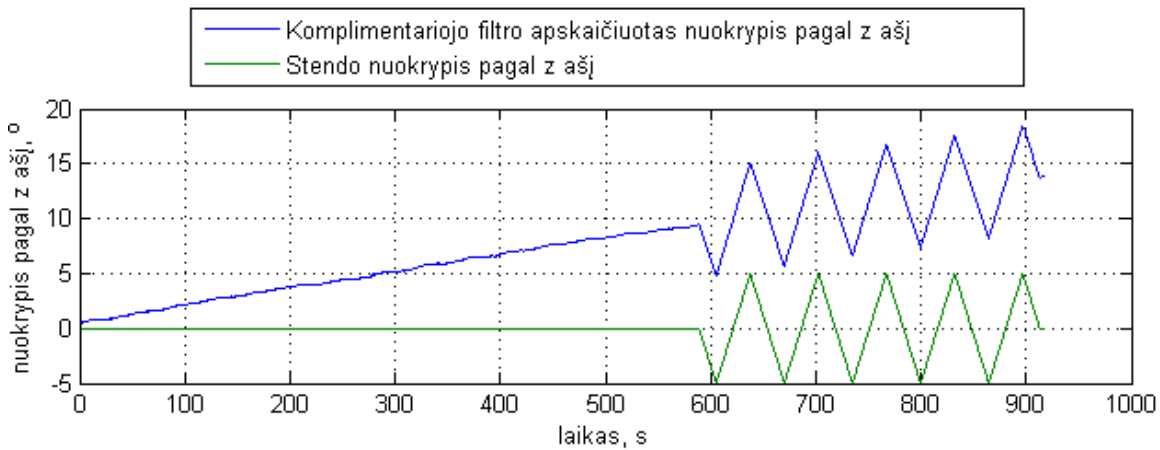
Gauti rezultatai panašūs į Kalmano filtro, tačiau orientacija pagal X ir Y ašis nustatoma tiksliau. Orientacija pagal Z ašį yra nustatoma, tačiau tam naudojami tik giroskopo matavimų duomenys, dėl to 4.22, 4.10 paveiksluose parodytos kreivės nesiskiria.



4.20 pav. Nuokrypis pagal X ašį apskaičiuotas taikant komplementarųjį filtrą



4.21 pav. Nuokrypis pagal Y ašį apskaičiuotas taikant komplementarųjį filtrą



4.22 pav. Nuokrypis pagal Z ašį apskaičiuotas taikant komplementarųjį filtrą

Iš gautų rezultatų galima daryti išvadą, kad konkrečiu atveju, kai akcelerometrui būdingas aukšto dažnio triukšmas, o giroskopui – žemo dažnio triukšmas, komplementarusis filtras yra paprastesnis ir efektyvesnis būdas orientacijai nustatyti nei Kalmano filtras, nors pastarusis yra universalesnis. Gauti patikslintą orientaciją pagal Z ašį galima naudojant magnetometrą absoliučiajai kryptčiai šiaurės poliaus atžvilgiu nustatyti.

4.6. Orientacijos nustatymo algoritmų palyginimas

Aptarus skirtingų orientacijos nustatymo metodų rezultatus, galima palyginti juos pagal tikslumą. Apskaičiuotos maksimalios absoliučiosios klaidos ir vidutinės kvadratinės klaidos pateikiamos 4.2 lentelėje.

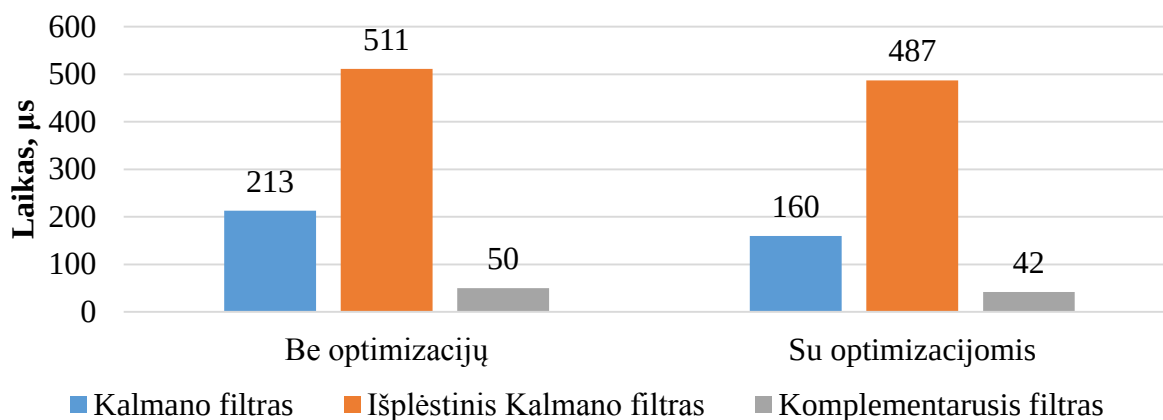
4.2 lentelė. Orientacijos nustatymo algoritmų tikslumo palyginimas

Metodas	Maksimali absoliučioji klaida, lyginant su stendo padėtimi			Vidutinė kvadratinė klaida, lyginant su stendo padėtimi		
	X ašis	Y ašis	Z ašis	X ašis	Y ašis	Z ašis
Nefiltruoti akcelerometro duomenys	17,483	11,202	–	9,991	4,155	–
Filtruoti akcelerometro duomenys	4,004	2,427	–	0,207	0,117	–
Filtruoti magnetometro duomenys	–	–	4,527	–	–	2,965
Giroskopo duomenys	4,487	3,337	14	8,54	5,13	71,566
Kalmano filtras	0,732	0,565	4,41	0,0266	0,0503	2,687
Išplėstinis Kalmano filtras	0,358	0,471	5,02	0,0066	0,0405	2,951
Komplementarusis filtras	0,262	0,42	13,804	0,0054	0,0405	70,496

Iš 4.2 lentelėje pateikiamų duomenų matyti, kad tiksliausias yra komplementariojo filtro algoritmas, tačiau pakankamai tikslus ir išplėstinis Kalmano filtras. Trijose viršutinėse eilutėse parodytas tikslumas, kuris gautas nenaudojant absoliučiosios ir santykinės padėties susiejimo metodų, o trijose apatinėse parodyti tikslumo rezultatai, gauti naudojant šiuos metodus.

Remiantis lentelėje pateiktomis tikslumo vertėmis, galima teigti, kad iš pirmųjų keturių orientacijos nustatymo būdų, orientacija pakankamai tiksliai nustatoma tik iš filtruotų akcelerometro ir magnetometro duomenų. Akcelerometru orientacija nustatoma pagal inercinės sistemos X ir Y ašis, o magnetometru nustatoma tik pagal Z ašį. Pakankamai tiksliai nustatyti orientaciją iš giroskopo ir akcelerometro nefiltruotų duomenų neįmanoma, nes vidutinė klaida viršija stendo judėjimo amplitudę, kuri lygi $\pm 3^\circ$. Iš magnetometro gauti duomenys matuojant 720° posūkį aplink Z ašį, todėl gaunama paklaida yra santykinai nedidelė, tačiau tiksliai nustatyti orientaciją naudojant magnetometrą nepavyktų.

Trijose apatinėse eilutėse maksimali absoliučioji klaida pagal X ir Y ašis siekia mažiau nei 1 laipsnį, o vidutinė kvadratinė klaida yra mažesnė nei viena dešimtoji. Z ašies rezultatai yra blogi, nes sujungiant akcelerometro ir giroskopo matavimų duomenis, trūksta informacijos apie absoliučiąją padėtį pagal Z ašį. Kalmano filtras beveik nereaguoja, o išplėstinis Kalmano filtras visiškai



4.23 pav. Algoritmų vykdymo laikas

nereaguoja į giroskopo matuojamą posūkį pagal Z ašį. Komplementarusis filtras perduoda giroskopu išmatuotą santykinę orientaciją Z ašies atžvilgiu, tačiau viso bandymo metu kaupiama klaida. Palyginus šiuos rezultatus su filtruotais akcelerometro matavimų rezultatais matyti, kad taikant duomenų susiejimo metodus vidutinė kvadratinė klaida sumažinama apie 10 kartų.

Derinant Kalmano filtrų modelį ir triukšmus aprašančias matricas arba komplementariajam filtrui parenkant kitokią perdavimo funkciją galėtų būti gauti geresni rezultatai, tačiau šių parametų parinkimas vertas atlikti atskyrą tyrimą.

4.23 paveiksle pateikti algoritmų greitaveikos rezultatai. Buvo išmatuotas algoritmų vykdymo laikas, kai įjungtos ir kai išjungtos įterptinių sistemų programavimo aplinkos kompiliatoriaus optimizacijos. Iš gautų rezultatų matyti, kad greičiausiai veikia komplementarusis filtras. Lėčiausiai veikia išplėstinis Kalmano filtras dėl didesnio veiksmų su matricomis skaičiaus, papildomai atliekami veiksmas sudarant Jacobi matricas. Kalmano filtras veikia greičiau, nes atliekama mažiau skaičiavimų. Kompiliatoriaus optimizacijų naudojimas greitaveiką pagerina iki 25 procentų.

4.7. Skyriaus išvados

Šiame skyriuje pateikti orientacijos nustatymo algoritmų patikros rezultatai. Remiantis pateiktais rezultatais atlikta lyginamoji analizė. Palyginus metodus galima daryti šias išvadas:

- Orientacija negali būti nustatoma iš nefiltruotų akcelerometro, magnetometro duomenų;
- Giroskopo sukaupiama klaida gali būti sumažinama kompensuojant matavimų temperatūrinę slinktį, kompensuojant kompensavimo funkciją arba lentele.
- Tiksliausiai iš giroskopo ir akcelerometro duomenų orientaciją nustato komplementarusis filtras, nedaug atsilieka išplėstinis Kalmano filtras;
- Greičiausiai vykdomas komplementarusis filtras, jo vykdymo laikas yra 4 kartus mažesnis nei Kalmano filtro ir 10 kartų mažesnis nei išplėstinio Kalmano filtro.
- Komplementarusis filtras geriausiai tinka žemo našumo integruotosioms sistemoms.
- Kompiliatoriaus optimizacijų naudojimas algoritmų greitaveiką pagerina iki 25 procentų.

APIBENDRINIMAS. IŠVADOS

Šio baigiamojo darbo tikslas buvo palyginti objektų orientacijos nustatymo metodus, įgyvendinus juos mikrovaldiklyje. Siekiant tikslo, pirmiausiai buvo atlikta metodų, taikomų objektų orientacijai nustatyti, analitinė apžvalga.

Išanalizuotos šaltiniuose naudojamos atskaitos sistemos ir jutikliai. Nustatyta, kad objekto orientacijai nustatyti dažniausiai naudojamos objekto ir inercinė atskaitos sistemos, orientacijai matuoti naudojami absoliučiosios ir santykinės orientacijos jutikliai, iš jų Žemės paviršiuje orientacijai matuoti tinkamiausias jutiklių derinys yra akcelerometras, magnetometras ir giroskopas. Šie jutikliai, pagaminti pagal MEMS technologiją, vartoja nedaug elektros energijos ir yra nedideli.

Išsiaiškinta, kad objekto orientacija erdvėje aprašoma orientacijos matrica, kuria žinomi inercinės atskaitos sistemos vektoriai pasukami į objekto atskaitos sistemą taip, kad jų kryptys sutaptų. Tokios matricos parametrais gali būti Eulerio kampai ir Eulerio ašis, Eulerio kampų seka ir kvaternionai. Nagrinėtuose šaltiniuose padėtis dažniausiai aprašoma kvaternionais ir Eulerio kampų seka. Orientacijos matrica orientacija aprašoma 9 elementais ir reikalauja trigonometrinių operacijų, o kvaternionai aprašo orientaciją 4 elementais bei nereikalauja trigonometrinių operacijų. Šios kvaternionų savybės leidžia pasiekti didesnę skaičiavimo efektyvumą. Vienintelis kvaternionų trūkumas yra tiesiogiai nesuprantama orientacijos išraiška, dėl to orientacija dažniausiai užrašoma Eulerio kampų sekomis. Tiesiogiai Eulerio kampų sekas naudoti skaičiavimams negalima dėl galimo ašių blokavimo, kai antrasis sekos kampas siekia $\pm 90^\circ$.

Iš apžvelgtų šaltinių pastebėta, kad juose padėties nustatymas dažniausiai dalinamas į absoliučiosios ir santykinės nustatymą. Nustatant absoliučiąją padėtį būtina turėti bent du išmatuotus vektorius objekto atskaitos sistemoje ir du juos atitinkančius atraminius vektorius inercinėje atskaitos sistemoje. TRIAD – pats seniausias metodas, sujungiantis dviejų stebėjimų informaciją. Kiti metodai grindžiami orientacijos matricos, kuri užtikrina mažiausią kvadratinę klaidą pasukus žinomus vektorius iš inercinės atskaitos sistemos į objekto atskaitos sistemą, paieška. Santykinė padėtis nustatoma integruojant giroskopo arba vaizdo poslinkio jutiklių išmatuotą objekto kampinį greitį.

Išnagrinėjus absoliučiosios orientacijos nustatymo metodus, padaryta išvada, kad Lietuvos teritorijoje neįmanoma susieti akcelerometro ir magnetometro duomenų, nes inercinėje atskaitos sistemoje šie nėra ortogonalūs, be to, kampas tarp jų yra per mažas, kad galima būtų taikyti optimaliąją orientacijos matricą nustatančius metodus. Paruošiamųjų darbų metu išbandžius Gauso-Niutono iteracinį metodą, pastebėta, kad orientacija nustatoma neteisingai.

Tikslesni objekto orientacijos duomenys gaunami susiejant absoliučiąją ir santykinę orientaciją. Šiuo tikslu gali būti naudojami įvairūs duomenų susiejimo metodai. Šaltiniuose dažniausiai naudojami Kalmano ir komplementarieji filtrai.

Pasirinkta naudoti MEMS jutiklius – akcelerometrą, magnetometrą ir giroskopą, ir tirti tris orientacijos nustatymo metodus, skirtus sujungti absoliučiosios ir santykinės orientacijos duomenis: tiesinį Kalmano filtrą, išplėstinį Kalmano filtrą ir komplementarųjį filtrą su proporcinio-integruojančiu valdymu. Šių metodų algoritams įgyvendinti pasirinktas mikrovaldiklis su *ARM Cortex-M4* branduoliu, slankiojo kablelio skaičiavimų įtaisu ir specialiai signalų apdorojimui skirtu instrukcijų rinkiniu. Šis mikrovaldiklis užtikrina pakankamą našumo lygį ir leidžia efektyviai apdoroti slankiojo kablelio duomenis bei atlikti matricų algebros veiksmus. Metodų tikslumui tirti nuspręsta naudoti standą, kurio padėtis keičiama valdant žingsninius variklius, nes pagal atliktą žingsnių kiekį galima apskaičiuoti stendo orientaciją.

Antra, įgyvendinant orientacijos nustatymo metodus buvo sudaryti tiesiogiai iš jutiklių duomenų orientaciją nustatantys algoritmai ir trys orientacijos nustatymo algoritmai, sujungiantys absoliučiosios ir santykinės orientacijos duomenis: tiesinis Kalmano filtras, išplėstinis Kalmano filtras ir komplementarusis filtras su proporcinio-integruojančiu valdymu. Sudaryti algoritmai naudoja tuos pačius pradinis jutiklių matavimo duomenis. Pradiniams duomenims gauti naudojama jutiklių mikroschema MPU-9150. Iš jos gauti akcelerometro ir giroskopo duomenys apdorojami ir nustatoma absoliučioji bei santykinė orientacija.

Išmatuotos giroskopo trijų ašių nulinio taško temperatūrinės slinkties charakteristikos. Pagal šias charakteristikas sudarytos kompensavimo funkcijos. Funkcijos sudarytos daugiasluoksnių neuronų tinklų pagrindu. Neuronų tinklo ryšio koeficientai buvo parenkami taikant atgalinio skleidimo metodą *Matlab* aplinkoje. Įterptinėje sistemoje realizavus kompensavimo funkcijas, giroskopo duomenų integravimo metu sukaupiama klaida sumažėjo iki 2 kartų. Tikėtina, kad vietoje kompensavimo funkcijų naudojant kalibravimo lenteles, galima būtų pasiekti analogiškus arba geresnius rezultatus.

Įgyvendinant Kalmano filtrų algoritmus, buvo sudarytos proceso dėsnio, sistemos būsenos kitimo dėsnio, svorio koeficientų, proceso triukšmo ir matavimo triukšmo matricos. Objekto orientaciją tiesinio Kalmano filtro algoritme aprašo Eulerio kampų seka, išplėstiniame Kalmano filtre – kvaternionas.

Įgyvendinant komplementarųjį filtrą su proporcinio-integruojančiu valdymu, sudaryta filtro perdavimo funkcija su pasirinktais proporcinio-integruojančio valdiklio parametrais.

Rašant išeities kodą mikrovaldikliui naudotos signalų apdorojimo instrukcijomis pagrįstos bibliotekos, skirtos matricų algebros skaičiavimams atlikti. Šios bibliotekos yra standartinės *ARM* bibliotekos, todėl buvo sutaupyta daug laiko, įgyvendinant orientacijos algoritmuose naudojamus skaičiavimus su matricomis. Visų objekto orientacijos nustatymo metodų rezultatai po apdorojimo yra pateikiami Eulerio sekomis. Mikrovaldiklis jutiklių duomenis nuskaito ir apdoroja 100 kartų per sekundę, o kompiuteris iš mikrovaldiklio duomenis nuskaito 10 kartų per sekundę, taip sumažinamas duomenų srautas.

Prieš atliekant orientacijos nustatymą magnetometru sėkmingai atliktas magnetometro kalibravimas. Kalibravimo metu turi būti parinkti du parametrai: mastelio koeficientas ir nulinio taško postūmis. Pradinis kalibravimas gali būti atliktas fiksuojant maksimalias ir minimalias matavimo duomenų vertes. Kalibravimo tikslumui patikrinti gali būti naudojamas dvimatis X ir Y ašių duomenų grafikas, toks, kaip gautas 3.1 paveiksle.

Algoritmų tikslumui tirti naudoti du standai. Šiems stendams valdyti pasirinkta NUCLEO-F401RE demonstracinė plokštė. Šios plokštės mikrovaldiklyje realizuotas stendo žingsninių variklių valdymo algoritmas ir sąsaja su kompiuteriu per UART. Pirmojo stendo valdymui, mikrovaldiklio žingsninių variklių valdymo signalams stiprinti naudota variklių valdymo mikroschema L298N. Antrajam stendui naudotos žingsninių variklių valdiklio plokštės X-NUCLEO-IHM01A1. Stendui valdyti ir orientacijos duomenims įrašyti kompiuteriu, sudarytas virtualusis instrumentas *LabVIEW* aplinkoje.

Sudaryta bandymu metu naudojama stendo judesių seka. Šią seką sudaro 3 etapai: stendo judėjimas X ašimi, stendo judėjimas X ir Y ašimis, tuo pačiu metu ir judėjimas Z ašimi. Stendo judėjimo amplitudė pagal X , Y , Z ašis sudaro $\pm 3^\circ$ nuo pradinės padėties. Magnetometro patikrai naudotas sukimas 720° apie inercinės sistemos Z ašį. Bandymo metu surinkti duomenys analizuoti *Matlab* aplinkoje: apskaičiuota absoliučioji klaida ir vidutinė kvadratinė klaida.

Atliekant orientacijos nustatymo algoritmų tikslumo lyginamąją analizę, buvo palyginta realizuotų orientacijos nustatymo algoritmų maksimali absoliučioji klaida ir vidutinė kvadratinė klaida. Lyginti tik X ir Y ašių rezultatai, nes susiejant akcelerometro ir giroskopo matavimų duomenis, trūksta informacijos apie Z ašies padėtį. 4 skyriuje Z ašies rezultatai pateikiami siekiant parodyti, kaip skirtingi algoritmai susidoroja su informacijos apie absoliučiosios orientacijos pagal Z ašį trūkumu. Orientacija pagal Z ašį buvo nustatoma pagal magnetometro duomenis. Pagal 4.2 lentelėje pateiktus tikslumo tyrimo rezultatus galima daryti išvadas, kad tirtieji absoliučiąją ir santykinę orientaciją susiejantys algoritmai užtikrino mažesnę klaidą nei gaunama, orientaciją apskaičiuojant iš akcelerometro, magnetometro ar giroskopo duomenų. Tiksliausiai orientacija nustatyta komplementariuoju filtru, kuris užtikrino mažiausią vidutinę kvadratinę klaidą $0,0054$ X ašiai ir $0,0405$ Y ašiai bei mažiausią maksimalią absoliučiąją klaidą, kuri blogiausiu atveju siekė $0,4707^\circ$. Išplėstinio Kalmano filtro rezultatas šiek tiek prastesnis. Parinkus kitokius filtro parametrus būtų gauti kiti rezultatai, tačiau nebūtinai geresni. Geriausių filtro parametrų parinkimas galėtų būti atskiro tyrimo tema.

Ištyrus nagrinėtų orientacijos nustatymo metodų algoritmų greitaveiką nustatyta, kad greičiausiai veikia komplementarusis filtras. Šio filtro algoritmas su kompiliatoriaus optimizacijomis įvykdomas per $42 \mu s$. Kalmano filtro algoritmas tomis pačiomis sąlygomis įvykdomas per $160 \mu s$, o išplėstinis Kalmano filtras – per $487 \mu s$. Remiantis šiais rezultatais galima teigti, kad greičiausiai veikia

komplementarusis filtras, tačiau visų metodų greitaveika pasirinktoje įterptinėje sistemoje su *ARM Cortex-M4* branduoliu, veikiančiu 168 MHz taktiniu dažniu, yra pakankama vykdyti nagrinėtus algoritmus daugiau nei tūkstantį kartų per sekundę. Komplementarusis filtras geriausiai tinka žemo našumo integruotosioms sistemoms.

Atliktos visos darbo tikslą pasiekti suformuluotos užduotys, orientacijos nustatymo metodai įgyvendinti mikrovaldiklyje ir palyginti, todėl galima teigti, kad darbo tikslas pasiektas. Šio darbo metu gauti rezultatai gali būti naudojami pasirenkant absoliučiosios ir santykinės orientacijos susiejimo metodus. Darbo metu sudaryti ir įterptinėje sistemoje realizuoti algoritmai gali būti taikomi orientacijai nustatyti pagal *X* ir *Y* ašis, susiejant akcelerometro ir giroskopo duomenis. Šis darbas gali būti pagrindu atliekant tolesnius tyrimus, kurių tikslu būtų objektų orientacijos nustatymo tikslumo didinimas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Accelerometer [interaktyvus]. 2015. Wikipedia. [žiūrėta 2015 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer>>.

AHRS Attitude Heading Reference System [interaktyvus]. 2014. Xsens [žiūrėta 2014 m. sausio 9 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.xsens.com/en/company-pages/company/ahrs-attitude-heading-reference-system>>.

Binagaman, A. N. 2010. *Tilt-Compensated Magnetic Field Sensor* [interaktyvus]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University [žiūrėta 2015 m. gegužės 26 d.]. Prieiga per internetą: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05272010-122009/unrestricted/Bingaman_AB_T_2010.pdf>

Cruz, s. C, Lee, k. P., Ponnnavolu, D. 2004. *Tunneling Accelerometers* [interaktyvus]. Chicago: Northwestern University [žiūrėta 2015 m. gegužės 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://clifton.mech.northwestern.edu/~me381/project/done/Accelerometer.pdf>>

Chao, H., et al. 2010. A Comparative Evaluation of Low-Cost IMUs for Unmanned Autonomous Systems, in *2010 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. University of Utah, Salt Lake City, UT, USA, Sept. 5-7, 2010* [interaktyvus]. IEEE, 211–216 [žiūrėta 2014 m. sausio 9 d.]. Prieiga per internetą: <<http://mechatronics.ece.usu.edu/yqchen/paper/10/A%20Comparative%20Evaluation%20of%20Low-Cost%20IMUs%20for%20Unmanned%20Autonomous%20Systems.pdf>>.

Extended Kalman filter [interaktyvus]. 2014. Wikipedia [žiūrėta 2014 m. sausio 9 d.]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Extended_Kalman_filter>.

Fasano, G. et al. 2013. Satellite Angular Velocity Estimation Based on Star Images and Optical Flow Techniques, in *MDPI Sensors 2013* [interaktyvus]. 13(10), 12771–12793 [žiūrėta 2015 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/10/12771/htm>>.

Introduction to MEMS gyroscopes [interaktyvus]. 2010. SolidStateTechnology [žiūrėta 2014 m. gegužės 23 d.]. Prieiga per internetą: <<http://electroi.com/blog/2010/11/introduction-to-mems-gyroscopes>>.

Jain, P. 2012. *Magnetometer : AR114* [interaktyvus]. EngineersGarage [žiūrėta 2015 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.engineersgarage.com/articles/magnetometer?page=1>>.

Kalman filter [interaktyvus]. 2014. Wikipedia [žiūrėta 2014 m. sausio 9 d.]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter>.

Kim, P. 2011. *Kalman Filter for Beginners: with MATLAB Examples*. Translated by Chae, G. H. 1-oji vertimo laida. Lexington. 233 p. ISBN: 978-1463648350.

Kim, P. 2013. *Rigid Body Dynamics for Beginners: Euler angles & Quartertions*. Translated by Huh, L. 1-oji vertimo laida. Lexington. 172 p. ISBN: 978-1493598205.

Kroeker, E. 2011. *Attitude Determination and Control: ENG491CU1* [interaktyvus]. Illinois: University of Illinois [žiūrėta 2015 m. gegužės 17 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.agi.com/resources/educational-alliance-program/curriculum_exercises_labs/University%20of%20Illinois/Attitude_Determination_and_Control.pdf>.

Kuipers, J. B. 2002. *Quaternions and Rotation Sequences : A Primer with Applications to Orbits, Aerospace, and Virtual Reality*. 5-oji laida. Princeton: Princeton University Press. 371 p. ISBN: 978-0-691-10298-6.

Magnetometer [interaktyvus]. 2015. Wikipedia. [žiūrėta 2015 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetometer>>.

- Markley, F. L. 1998. *Attitude determination using two vector measurements* [interaktyvus]. Greenbelt: NASA's Goddard Space Flight Center [žiūrėta 2015 m. gegužės 26 d.]. Prieiga per internetą: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19990052720.pdf>>.
- Markley, F. L., Crassidis, J. L. 2014. *Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control*. Space Technology Library. New York: Springer. ISBN 979-1-4939-0801-1.
- Mengden, D. 2012. *Development and Integration of a Sun Sensor for Pico-Satellite MOVE* [interaktyvus]. Munchen: Technische Universität München [žiūrėta 2015 m. gegužės 17 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.schuelerkonferenz.edu.tum.de/fileadmin/w00brm/www/Seminararbeiten_2012/mengden_dominik_2012.pdf>.
- MPU-9150 : Product Specification Revision 4.3 [interaktyvus]. 2012. InvenSense [žiūrėta 2015 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-9150_DataSheet_V4%203.pdf>
- Ozyagcilar, T. 2013. *Calibrating an eCompass in the Presence of Hard and Soft-Iron Interference: Application Note* [interaktyvus]. Freescale Semiconductor [žiūrėta 2015 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4246.pdf>.
- Pileckas, E. 2011. *Aviaciniai skrydžio valdymo prietaisai ir sistemos* : mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2011. 308 p..
- Pheifer, D., Powell, W. B. 2000. *Position/Presense/Proximity: The Electronic Tilt Sensor* [interaktyvus]. Maynard: True North Technologies LLC [žiūrėta 2015 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.sensormag.com/sensors/position-presence-proximity/the-electrolytic-tilt-sensor-1063>>
- Shiau, J. K.; Huang C. X.; Chang, M. Y. 2012. Noise Characteristics of MEMS Gyro's Null Drift and Temperature Compensation, *Journal of Applied Science and Engineering* 15(3): 239–246 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2015 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/15-3/04-AE10102.pdf>>.
- Stengel, R. 2008. *Spacecraft Sensors and Actuators: Space System Design*, MAE 342 [interaktyvus]. Princeton: Princeton University, [žiūrėta 2015 m. gegužės 17 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.princeton.edu/~stengel/MAE342Lecture13.pdf>>.
- STM32F407VG [interaktyvus]. 2014. STMicroelectronics [žiūrėta 2014 m. birželio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.st.com/web/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1577/LN11/PF252140?s_searchtype=partnumber#>
- Talutis, A. 2009. *Giroskopo parametrų patikros stendo sudarymas ir tyrimas* : magistro baigiamasis darbas. Vilnius: VGTU.
- Wahba, G. 1965. A Least Squares Estimate of Satellite Attitude, *SIAM Review* [interaktyvus], 7(3): 409 [žiūrėta 2015 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1007077>>
- Welch, G., Bishop, G. 2006. *An Introduction to the Kalman Filter* [interaktyvus]. Carolina: University of North Carolina [žiūrėta 2013 m. gruodžio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf>.
- Woodford, C. 2009. *Accelerometers* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2015 m. gegužės 17 d.] Prieiga per internetą: <<http://www.explainthatstuff.com/accelerometers.html>>.

SUMMARY

In this Master Thesis, the methods for estimation of objects orientation in space are investigated. These methods are becoming more and more popular these days, as drones and nanosats are available for commercial and personal use. There are lots of methods for estimation of objects orientation, and theory well outlined, but it is difficult to select best method for use in embedded system without knowledge about accuracy and execution speed. Therefore, accuracy and execution speed, of three implemented methods for object orientation in space, are compared.

Attitude reference frames, orientation sensors, orientation expressions are important topics in objects orientation estimation. It is possible to estimate absolute and relative orientation of objects using MEMS accelerometer, magnetometer and gyroscope. These sensors are tiny and low-power. Also, there are noise and errors in MEMS sensors measurements. Accuracy of orientation estimation can be improved by using data fusion and digital filtering algorithms, such as: Kalman filter, Extended Kalman filter, complementary filter. These methods were compared to orientation estimation from sensors data directly.

Attitude determination algorithms were implemented in embedded system. ARM DSP libraries were used for algorithms implementation. Magnetometer calibration and gyroscope temperature drift compensation was carried out. Three axis orientation workbenches were used for accuracy testing. NUCLEO-F401RE demo board was used for workbench stepper motor control, NUCLEO-F401RE and L298N was used to drive motors. LabVIEW virtual instruments were created for investigation data retrieval from embedded system and data storage in personal computer. MATLAB scripts were created for investigation and data processing.

Experiment results show, that the accuracy of orientation estimated directly from sensor data is poor, therefore it is recommended to use data fusion algorithms. From data fusion and filtering algorithms analysis, it is seen, that complementary filter gives most accurate orientation data. Accuracy of results, given by Extended Kalman filter are slightly worse comparing with complementary filter. Shortest execution time was achieved by using complementary filter. This filter was executed 4 times faster in comparison with Kalman filter and 10 times faster – with Extended Kalman filter. It can be noted, that complementary filter is best solution to implement in low-power embedded systems.

PRIEDAI

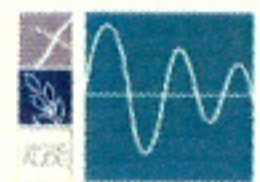
A. Pažyma apie XVIII Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje darbo tema skaitytą pranešimą

Pažyma pateikta sekančiame puslapyje.

B. Pranešimo XVIII Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga (pateikta kompaktiniame diske)

C. Programų išeities kodas (pateiktas kompaktiniame diske)

D. Plakatai (pateikti kompaktiniame diske)



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

XVIII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“

ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Eldar Šabanovič

*Sistemų inžinerijos ir kompiuterių technologijų (T120),
Signalų technologijų (T121), Aukštų dažnių technologijų
(T191) jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą*

**OBJEKTŲ ORIENTACIJOS ERDVĖJE
NUSTATYMO METODŲ TYRIMAS**

Mokslo komiteto pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas

dr. Darius Plonis

2015 m. kovo 20 d.
Vilnius