

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Elektronikos fakultetas

Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra

Mindaugas Macijauskas

ELEKTROMECHANINIŲ JUTIKLIŲ DUOMENŲ KOREKCIJOS IR TAIKYMO TYRIMAS

RESEARCH OF ELECTROMECHANICAL SENSORS DATA CORRECTION AND APPLICATION

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Kompiuterių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX051

Kompiuterių technologijų specializacija

Vilnius, 2020

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Algirdas Baškys

(Vardas, pavardė)

2020-06-05

(Data)

Mindaugas Macijauskas

ELEKTROMECHANINIŲ JUTIKLIŲ DUOMENŲ KOREKCIJOS IR TAIKYMO TYRIMAS

Research of electromechanical sensors data correction and application

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis
Kompiuterių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX051
Kompiuterių technologijų specializacija

Vadovas

doc. dr. Andrius Katkevičius		2020-06-05
(Pedagoginis vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)

MB darbas peržiūrėtas lietuvių kalbos konsultantės dr. Andželikos Gaidienės:
Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros administratorė Jolanta Saudargaitė

Lietuvių kalbos konsultantas

(Pedagoginis vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)

Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJOS KATEDRA

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Kompiuterių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX051

Kompiuterių technologijos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas
_____
(Parašas)
prof. dr. A. Baškys
(Vardas, pavardė)
2020 m. _____ mėn. ___ d.
(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS
..2019-11-18.....Nr. .....
Vilnius

Studentui Mindaugui Macijauskui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Elektromechaninių jutiklių duomenų korekcijos ir taikymo tyrimas

Research of electromechanical sensors data correction and application

patvirtinta 2019 m. 11 mėn 18 d. dekano potvarkiu Nr. 236 el.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2020 m. 6 mėn. 05 d.

Darbo tikslas – atlikti metodų analizę, kuri leistų gauti tikslesnius akselerometro, giroskopo ir magnetometro duomenis, siekiant pagerinti objekto orientaciją erdvėje.

Darbo uždaviniai

1. Identifikuoti jutiklių trūkumus ir pateikti sprendimus, kaip juos spręsti.
2. Praktiškai pritaikyti metodus ir algoritmus.
3. Įvertinti metodų vykdymo spartą įterptinėje sistemoje.
4. Įgyvendinti objekto navigavimo sistemą pastate.

Aiškinamojo rašto turinys

Įvadas

Darbo aktualumas ir tikslas

Darbo uždaviniai

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Darbo naujumas ir praktinė nauda

Darbo struktūra

1. Analitinė literatūros apžvalga
2. Tyrimų teorinis pagrindimas
3. Tyrimų praktinis pagrindimas

Išvados

Literatūra

Priedai

A priedas. Žingsniamačiu pagrįstos navigavimo sistemos programos algoritmas.

B priedas. Pažyma apie XXIII Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje darbo tema skaitytą pranešimą.

C. Pranešimo XXIII Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga

Vadovas ..... doc. dr. Andrius Katkevičius
(Paraša) (Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau
……..
(Parašas)
……Mindaugas Macijauskas…..
(Vardas, pavardė)
……..…....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra

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

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

Pavadinimas	**Elektromechaninių jutiklių duomenų korekcijos ir taikymo tyrimas**
Autorius	**Mindaugas Macijauskas**
Vadovas	**Andrius Katkevičius**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Elektromechaninių jutiklių duomenų korekcijos ir taikymo tyrimas. Magistro baigiamasis darbas skirtas kompiuterių inžinerijos laipsniui. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius, 2020, 48 p. teksto be priedų 32 iliustr., 1 lentelė, 37 bibl.

Magistro baigiamojo darbo tikslas — identifikuoti problemas, kylančias iš akselerometro, giroskopo ir magnetometro fizinių trūkumų. Tiriamajame darbe apžvelgsime komplenariojo, išplėstojo Kalmano ir Madgwick'o filtrų veikimą. Panaudodami išplėstąjį Kalmano ir Madgwick'o filtrą realizavome žingsniamačiu pagrįstą navigavimo sistemą ir pateikėme sprendimą, kaip galima gerinti GNSS koordinatės tikslumą.

Prasminiai žodžiai: Kalmano filtras, Madgwick'o filtras, akselerometras, giroskopas, magnetometras, navigacinė sistema pastate.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Computer Science and Communications Technologies

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

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

Title	**Research of Electromechnical Sensors Data Correction and Applications**
Author	**Mindaugas Macijauskas**
Academic supervisor	**Andrius Katkevičius**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

Research of electromechanical sensors data correction and application. Master Thesis for Computer Engineering degree. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius, 2020, 48 p., 32 figures, 1 table, 37 references.

Main goal of this thesis is identify physical problems of accelerometer, gyroscope and magnetometer. It this thesis we are going to review complementary, extended Kalman and Madgwick filters. Using Kalman and Madgwick filters we are going to implement navigation system based on pedometer and going to provide solution which allows to improve GNSS accuracy of coordinates.

Keywords: Kalman filter, Madgwick filter, accelerometer, gyroscope, magnetometer, indoor tracking.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mindaugas Macijauskas, 20133297
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)
Elektronikos fakultetas
(Fakultetas)
Kompiuterių inžinerija, KTfm-18
(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2020 m. gegužės 23 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Elektromechaninių jutiklių duomenų korekcijos ir taikymo tyrimas“ patvirtintas 2019 m. lapkričio 18 d. dekano potvarkiu Nr. 236el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: docentas daktaras Andrius Katkevičius. Mano darbo vadovas docentas daktaras Andrius Katkevičius.

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



(Parašas)

Mindaugas Macijauskas
(Vardas ir pavardė)

Turinys

Žymenys ir santrumpos **9**

Įvadas **10**

1. Analitinė literatūros apžvalga **12**
1.1. Jutiklių analizė 12
1.2. Komplenarusis filtras ir jutiklių duomenų analizė 13
1.3. Kalmano filtras 15
1.4. Diskretusis Kalmano filtras 16
1.5. Išplėstasis Kalmano filtras 18
1.6. Madgwick'o algoritmas 20
1.7. Pažangi navigavimo sistema ORIENTUS 23
1.8. Avarijų detektavimas 24

2. Tyrimų teorinis pagrindimas **25**
2.1. Jutiklių trūkumų problematikos įvardijimas 25
2.1.1. Akselerometras 25
2.1.2. Giroskopas 26
2.1.3. Magnetometras 28
2.2. Testavimo sistemos projektavimas 29
2.3. Sistemos aparatinė struktūrinė schema 29
2.4. Sistemos programinė aparatinė struktūrinė schema 30
2.5. Objekto pozicionavimo stendo kūrimas 31
2.6. Skyriaus apibendrinimas 33

3. Tyrimų praktinis pagrindimas **34**
3.1. Jutiklių duomenų korekcijos tyrimas 34
3.2. Kalmano filtro implementacija 38
3.3. Filtrų veikimo spartos palyginimas 41
3.4. Jutiklių duomenų korekcijos rekomendacijų pateikimas 42
3.5. Skyriaus apibendrinimas 49

Išvados **50**

Priedai **56**
A priedas. Žingsniamačiu pagrįstos navigavimo sistemos programos algoritmas . . 56
B priedas. Pažyma apie XXIII Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje darbo tema skaitytą pranešimą 56

Paveikslų ir lentelių sąrašas

1.1 pav. Oilerio kampai . . . 13
1.2 pav. Jutiklių duomenų sujungimas . . . 14
1.3 pav. Diskretusis Kalmano filtro algoritmas . . . 17
1.4 pav. Išplėstojo Kalmano filtro algoritmas . . . 19
1.5 pav. Madgwick'o filtro blokinė schema . . . 20
1.6 pav. Madgwick'o filtro palyginimas su Kalmano filtru [11] . . . 21
1.7 pav. Giroskopo dreifo kompensacijos palyginimas [11] . . . 22
1.8 pav. ORIENTUS orientacijos sistema . . . 23
1.9 pav. Akselerometro ašių išdėstymas įrenginyje . . . 24
2.1 pav. Akselerometro triukšmai x ir y ašyse . . . 25
2.2 pav. Giroskopo struktūra . . . 26
2.3 pav. Gimbalo užsirakinimo grafikas . . . 27
2.4 pav. Nekalibruoto giroskopo duomenų palyginimas su magnetometru . . . 27
2.5 pav. Nekalibruoto magnetometro duomenys . . . 28
2.6 pav. Sistemos blokinė schema . . . 30
2.7 pav. Programinės aparatinės įrangos blokinė schema . . . 31
2.8 pav. Objekto pozicionavimo stendas . . . 32
2.9 pav. Programinė įranga, skirta objekto padėties vizualizacijai trimatėje erdvėje . . . 33
3.1 pav. Komplenariojo filtro duomenų palyginimas . . . 35
3.2 pav. Filtrų palyginimas objektui esant statinėje pozicijoje . . . 35
3.3 pav. Filtrų palyginimas pavertus objektą 90 laipsniu kampu ir grąžinus į pradinę padėtį . . . 36
3.4 pav. Ašių duomenys objektui esant statinėje būsenoje . . . 37
3.5 pav. Ašių duomenų svyravimų palyginimas . . . 38
3.6 pav. Filtrų veikimo spartos palyginimas įterptinėje sistemoje . . . 42
3.7 pav. Žingsnių detektavimas fiksuojant rankos judesius . . . 43
3.8 pav. Žingsnių detektavimas nuo čiurnos . . . 44
3.9 pav. Žingsnių detektavimas nuo čiurnos naudojant Madgwick'o filtrą . . . 44
3.10 pav. Žingsnių detektavimas nuo čiurnos naudojant Kalmano filtrą . . . 45
3.11 pav. Žingsniamačiu pagrįstos navigacijos objekto lokalizacijos grafikas . . . 46
3.12 pav. Objekto padėties nuokrypio ilgis nuo prognozuojamos koordinatės . . . 47
3.13 pav. Asmeninis sekiklis . . . 48
3.14 pav. Maršruto grafikas . . . 48
1 lentelė. Nekalibruotų magnetometro duomenų išskyrimas . . . 29

Žymenys ir santrumpos

ACNS (angl. *Automatic Crash Notification System*)	Automatinė avarijų pranešimo sistema
AHRS (angl. *Attitude and heading reference system*)	Pozicijos ir krypties atskaitos sistema
DKF (angl. *Discrete Kalman Filter*)	Diskretusis Kalmano filtras
EKF (angl. *Extended Kalman Filter*)	Išplėstasis Kalmano filtras
I2C (angl. *Inter-Integrated Circuit*	Dviejų linijų sąsaja, įterptinėje sistemoje
IMU (angl. *Inertial measurement unit*)	Inercinė matavimo sistema
MARG (angl. *Magnetic, Angular Rate and Gravity*)	Sistema, sudaryta iš magnetometro, giroskopo ir akselerometro
MEMS (angl. *Electromechanical system*)	Elektromechaninė matavimo sistema
ODR (angl. *Output data rate*)	Duomenų išvesties sparta
PDR (angl. *Pedestrian Dead Reckoning*)	Objekto padėties nustatymas naudojant IMU jutiklius
UKF (angl. *Unscented Kalman Filter*)	Netiesinis Kalmano filtras

Įvadas

Magistro baigiamajame darbe nagrinėjami duomenų apdorojimo metodai ir algoritmai, leidžiantys koreguoti ir pritaikyti duomenis, gaunamus iš elektromechaninių jutiklių. Pagrindinis duomenų taikymas yra susijęs su padėties ir objekto būsenos nustatymu.

Darbo aktualumas ir tikslas

Objektų padėties ir būsenos nustatymas yra aktuali tema, kuri yra susijusi su įvairiomis sritimis, pavyzdžiui, objektų padėties nustatymas patalpose, papildytosios ir virtualiosios realybės įranga, sporto mokslo sritis ar automobilių incidentų nustatymas.

Šiems sprendimams įgyvendinti yra naudojamas devynių ašių jutiklių blokas, sudarytas iš akselerometro, giroskopo ir magnetometro. Šių jutiklių savybių pakanka, kad būtų galima atvaizduoti objekto poziciją ir judėjimo pagreitį, tačiau dirbant su jų pateikiamais duomenimis susiduriame su mechaninėmis jutiklių savybėmis. Tikslūs ir didelį diskretizacijos dažnį turintys jutikliai yra ganėtinai brangūs ir netinkami gaminiams, kurie galėtų būti realizuoti masinės produkcijos įrenginiams.

Siekdami praktiškai pritaikyti tiriamų jutiklių duomenis, pirmiausia turime išspręsti triukšmus, atsirandančius dėl jų mechaninių savybių. Tuomet turėdami devynių ašių duomenis, galime sujungti jutiklių pateikiamus, nufiltruotus duomenis ir juos atvaizduoti grafiškai, trimatėje erdvėje.

Darbo tikslas – įterptinėje sistemoje įgyvendinti sprendimus, leidžiančius kuo tiksliau apibrėžti objekto judėjimą ir padėties nustatymą, naudojant elektromechaninius jutiklius.

Darbo uždaviniai

Pagrindiniai tiriamojo darbo uždaviniai:

1. Įgyvendinti sistemą, leidžiančią analizuoti MEMS jutiklių duomenis.
2. Atlikti literatūros apžvalgą, rasti galimus sprendimo metodus, leidžiančius kuo tiksliau nustatyti objekto būseną.
3. Identifikuoti jutiklių trūkumus ir pateikti sprendimus.
4. Praktiškai pritaikyti metodus ir algoritmus.
5. Įvertinti metodų vykdymo spartą įterptinėje sistemoje.
6. Pritaikyti jutiklių duomenų analizę įgyvendinant objekto navigavimo sistemą, pagrįstą jutiklių duomenų analize.

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Suformuluotiems uždaviniams naudosime rekursinius duomenų korekcijos metodus, kurie leistų realiuoju laiku redaguoti jutiklių pateikiamus duomenis. Inercinių matavimo sistemų

tikslumui ir duomenų korekcijai tinkami naudoti Kalmano filtrai ir jų atmainos. Jutiklių duomenims sujungti bus naudojamas AHRS arba Madgwick'o algoritmas.

Darbo naujumas ir praktinė nauda

IMU jutikliai praktiškai naudojami visuose išmaniuosiuose įrenginiuose. Manipuliuojant šių jutiklių duomenimis yra sukurta daugybė mobiliųjų programėlių, leidžiančių analizuojant šiuos duomenis įgyvendinti įvairius funkcionalumus, pavyzdžiui, įvairios sportui skirtos programėlės, fiksuojančios kūno ar rankų judesius, žingsniamačiai, lenktynių žaidimai ir t. t.

Gebėdami tinkamai manipuliuoti jutiklių pateikiamais duomenimis, galime įgyvendinti PDR sprendimus, leidžiančius nustatyti objekto padėtį erdvėje nuo ataskaitos taško nenaudojant GNSS ryšio ar naudojant duomenis apie prisijungimus prie tam tikrų GSM celių.

Akselerometrų pritaikymas sporte taip pat turi dideles perspektyvas. Tobulėjant treniruočių programoms atsiranda poreikis analizuoti atletų atliekamus judesius ir tuo remiantis tobulinti judesius. M. Lukašek'as ir R. Vychodilova straipsnyje aprašė sritis, kuriose akselerometrų duomenys gali būti taikomi ir kaip jais būtent reikėtų manipuliuoti. Straipsnyje buvo kalbama apie šias sporto sritis: futbolą, kovos menus, slidinėjimą, šaudymą, bėgimą, šuolį į aukštį ir tolį, taip pat kituose straipsniuose galime rasti informacijos apie krepšinio kamuolio išmetimo technikos gerinimą.

Papildytosios ir virtualiosios realybės įrangose taip pat galime surasti IMU įrenginių pritaikymus, kuriais yra nustatomas objekto kampas ar judėjimo pagreitis.

Darbo struktūra

Baigiamasis darbas yra suskirstytas į šešis pagrindinius skyrius.

Pirmajame skyriuje apžvelgiamas baigiamojo darbo aktualumas ir darbo uždaviniai. Aprašytos pagrindinės problemos, kurios išryškėja dirbant su akselerometru, giroskopu ir magnetometru. Taip pat aprašytos sritys, kuriose gali būti pritaikytas jutiklių panaudojimas.

Antrajame skyriuje apžvelgiami jutiklių veikimo principai. Aprašyti metodai leidžiantys gerinti jutiklių tikslumą. Apžvelgiama rinkoje parduodama jutiklių sistema, kuri pasižymi dideliu tikslumu ir galėtų būti laikoma etaloninė sistema. Aprašytos sritys, kurios turi daug potencialo, kuriant sistemas, pagrįstas inercinių matavimo sistemų jutiklių panaudojimu.

Trečiajame skyriuje įvardinti teoriniai jutiklių trūkumai, kurie pagrindžiami praktiniais bandymais. Šiame skyriuje aprašyta testavimo sistemos struktūra.

Ketvirtasis skyrius skirtas metodų realizavimui ir gautų rezultatų analizei. Šiame skyriuje aprašomi gauti rezultatai ir pateikiamos praktinės rekomendacijos, siekiant realizuoti navigacijos sistemą pastate.

Penktajame skyriuje aprašomos gautos išvados, remiantis baigiamojo darbo uždaviniais.

Prieduose pateikiamas algoritmas skirtas žingsniamačiu pagrįstai navigavimo sistemai.

1. Analitinė literatūros apžvalga

Analitinę literatūros apžvalgą išskirstysime į dvi dalis – analoginių sistemų apžvalgą ir metodų, kurie būtų tinkami sprendžiant tokio pobūdžio problemas. Metodų analizės dalyje aptarsime pagrindinius inercinių matavimo jutiklių duomenų korekcijos metodus ir algoritmus, kurie leistų sujungti akselerometro, giroskopo ir magnetometro išduodamus duomenis.

Literatūros apžvalgoje reikia atsakyti į kelis mums rūpimus klausimus, kuriant sistemą gebančią nustatyti objekto padėtį erdvėje:

- Kokia turi būti inercinių matavimo sistemų pateikiamų duomenų perdavimo sparta ir kaip nuo jos priklauso sistemos tikslumas?
- Kaip sudėtingus korekcijos metodus įgyvendinti įterptinėje sistemoje?
- Kokios paklaidos?
- Ar egzistuoja universalus sprendimas pėsčiajam ir transporto priemone judančio objekto būsenos nustatymui?
- Kaip galime manipuliuoti duomenimis, siekiant įvertinti objekto būseną?

1.1. Jutiklių analizė

MEMS tipo giroskopai naudoja Coriolis pagreičio efektą, kai vibruojanti masė detektuoja kampinį sukimąsi. Giroskopas matuoja kampinį greitį, kuris yra tiesinis sukimosi greičiui. Matavimai gali būti atliekami dideliu dažniu, kuris pažangiuose jutikliuose siekia iki 1 MHz.

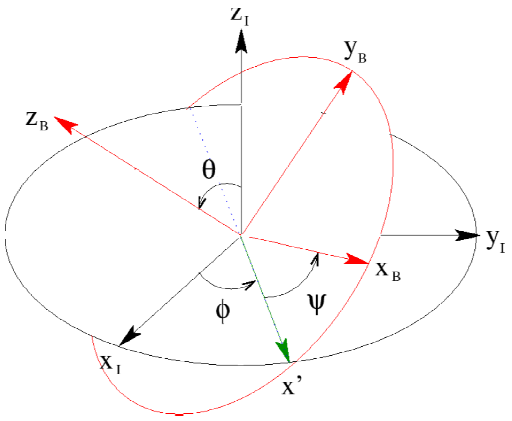
MEMS įrenginiai turi nemažai trūkumų, kurie yra susiję su mechanine sandara ir aplinkos veiksniais. Paprastai šie jutikliai turi problemų dėl tikslumo, kadangi inerciniai matavimo prietaisai iš prigimties dreifuoja.

Akselerometras gali būti suprantamas, kaip spyruoklių sistema. Ji susideda iš plokštelių, kurios yra pritvirtintos mechaninės pakabos sistemos. Judant objektui, plokštelės juda pagreičio kryptimi ir taip yra gaunamas atstumo pokytis tarp plokštelių. Tuomet yra pamatuojamas talpos skirtumas tarp plokštelių. Iš to galime susidaryti nuomonę, kad akselerometras negali matuoti linijinio pagreičio, kadangi yra paimama jėga veikianti spyruoklės masę ir išmatuojamas masės pokytis, norint apskaičiuoti akseleraciją. Gravitacijos jėga yra visada imama su akselerometro duomenimis.

Jutiklio pozicijos įvertinimo neatitikimas gali būti įvertintas iš pagreičio išskaičiuojant gravitacijos koeficientą, iš visų trijų ašių, kad galėtume apskaičiuoti linijinį pagreitį. Priešingu atveju net esant mažiems pagreičio svyravimams iš jų gausime dideles greičio verčių klaidas, tai sukels dar didesnes klaidas vertinant objekto padėtį. Tai yra viena iš pagrindinių problemų inercinėse navigacijos sistemose [1].

1.2. Komplenarusis filtras ir jutiklių duomenų analizė

Šiame poskyryje aprašysime matematinius metodus leidžiančius neapdorotus jutiklių duomenis konvertuoti į praktikoje labiau suprantamą, Oilerių kampų sistemą. Oilerio kampai nusako objekto padėtį apie vieną nejudantį tašką (žr. 1.2 pav.). Literatūroje šie kampai žymimi graikiškomis raidėmis φ (angl. *Pitch*), ϑ (angl. *Roll*), ψ (angl. *Yaw*).



1.1 pav. Oilerio kampai

Naudodami iš akselerometro jutiklio nuskaitomus duomenis galime apskaičiuoti tik φ ir ϑ reikšmes, kadangi nėra galimybės iš duomenų gauti sukimąsi apie φ, kitaip vadinamą gravitacijos ašį.

$$\varphi_a = arctan_2(f_y, f_z), \tag{1.1}$$

$$\vartheta_a = arctan(\frac{-f_x}{f_y\varphi_a + f_z\varphi_a}). \tag{1.2}$$

Dar vienas matavimo komponentų yra trijų ašių magnetometras. Šis jutiklis geba pamatuoti magnetinio lauko stiprumą trimis kryptimis. Turint akselerometro ir magnetometro duomenis galima apskaičiuoti ψ vertę šiomis formulėmis:

$$M_x = m_x cos(\varphi_a) + m_y sin(\vartheta_a) sin(\varphi_a) m_z cos(\vartheta_a) sin(\varphi_a), \tag{1.3}$$

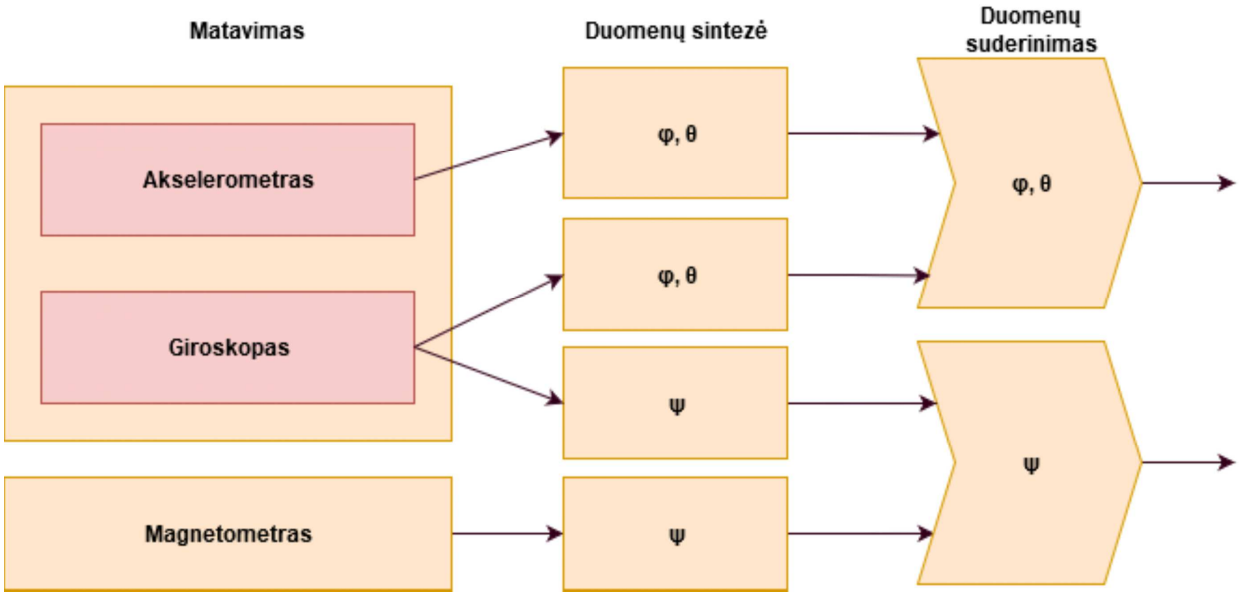
$$M_y = m_y cos(\vartheta_a) - m_z sin(\vartheta_a), \tag{1.4}$$

$$\psi_m = atan_2(-M_y, M_x)/\pi. \tag{1.5}$$

Įdomu tai, kad (1.5) formulėje yra ir akselerometro Oilerio kampų dedamosios, tačiau naudodami vien akselerometrą negalime apskaičiuoti ψ vertės. Pati problema yra fizinė. Kadangi gravitacijos ašis yra pastovi ir nukreipta į žemę, sukdami objektą apie ją negausime jokio pokyčio tarp kampų.

Giroskopas iš prigimties geba atiduoti duomenis Oilerio kampų atitiktims, todėl jokios formulės šiuo atveju nebus taikomos. Giroskopas turi dvi pagrindines problemas – tai savaiminis sukimasis ir gimbalo užsirakinimas (angl. *gimbal lock*), todėl vien jo duomenys negali būti naudojami objekto padėčiai nustatyti.

Toliau esančioje iliustracijoje pavaizduota eiga, kurią reikia atlikti, siekiant sujungti duomenis iš visų trijų jutiklių. Pirmiausia atliekamas duomenų nuskaitymas iš jutiklių ir jų perdavimas į atitinkamas funkcijas. Kitas žingsnis – atliekamas neapdorotų duomenų pavertimas į Oilerio kampus, panaudodami prieš tai minėtas formules atitinkamai kiekvienam jutikliui. Derinant duomenis atliekamas atitinkamų duomenų sujungimas. Šiuo atveju yra jungiamos akselerometro ir giroskopo φ ir ϑ reikšmės, o φ reikšmė yra gaunama iš magnetometro ir giroskopo verčių.



1.2 pav. Jutiklių duomenų sujungimas

Duomenų suderinimas gali vykti naudojant įvairius filtrus, kurie atitinkamai statiškai arba dinamiškai parenka svorio koeficientus tam tikroms vertėms. Kituose skyriuose kalbėsime apie pažangesnius metodus, pavyzdžiui įvairias Kalmano filtro atmainas, tačiau siekiant suvokti jų naudą, reikėtų pakalbėti apie paprasčiausią komplenarųjį filtrą.

Komplenarusis filtras – tai paprasčiausias metodas, siekiant sujungti dvi reikšmes į vieną. Viena iš pagrindinių taisyklių sprendžiant koeficientų svorius yra nustatyti kurie duomenys yra tikslesni trumpalaikiu ir ilgalaikiu laikotarpiu. Tai išskyrę galime sudėti atitinkamus svorio koeficientus.

Šiuo atveju giroskopo duomenys trumpesniam laikui yra tikslesni ir nėra tokie jautrūs išorinėms jėgoms. Ilgesniam naudojimui akselerometro duomenys yra tikslesni, nes neturi savaiminio dreifo ir sukimosi. Todėl idealiausias variantas, kad gerokai didesnį svorio koeficientą turėtų giroskopas, o duomenys būtų koreguojami su akselerometro duomenimis. Komplenariojo filtro išraiška atrodytų taip:

$$\varphi_g = 0.98(\varphi_g + g_x) + 0.02(\varphi_a + a_x). \tag{1.6}$$

Šiuo atveju toks filtras veikia duomenis, kaip žemų dažnių filtras. Tokiu atveju gauti duomenys būtų labiau stochastiški ir mažiau triukšmingi. Šis filtravimo ir jutiklių duomenų sujungimo metodas yra tinkamas integruoti į mažai resursų turinčias sistemas, tačiau ilgainiui neišspręs problemų dėl giroskopo dreifo ar gimbalo užsirakinimo problemos.

1.3. Kalmano filtras

Kalmano filtras – matematinių lygčių rinkinys, užtikrinantis efektyvų rekursinį skaičiavimo būdą, kuris leidžia įvertinti proceso būseną, siekiant sumažinti galimą kvadratinę paklaidą. Šis filtras yra labai našus keliais aspektais: remdamasis dabartiniais ir prieš tai buvusiais duomenimis geba prognozuoti būsimą vertę net nežinodamas, kokio pobūdžio sistema yra modeliuojama.

1960 m. R. E. Kalmanas publikavo žymųjį straipsnį, kuriame aprašė metodus, leidžiančius spręsti diskrečių duomenų linijines filtravimo problemas. Nuo to laiko tai tapo plačiai taikomu metodu, siekiant spręsti problemas navigacinėse sistemose [4].

Kalmano filtras sprendžia problemas bandydamas nustatyti sistemos būseną $x \in R^n$, nusakantį diskretųjį laiko procesą, kurį galime aprašyti skirtumine lygtimi:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}. \tag{1.7}$$

Kai norime apskaičiuoti $x \in R^n$, gauname išraišką:

$$z_k = Hx_k + v_k. \tag{1.8}$$

Atsitiktiniai kintamieji w_k ir v_k atspindi procesų ir matavimų triukšmus (atitinkamai). Šie kintamieji yra nepriklausomi vienas nuo kito:

$$p(w)\ N(0,Q), \tag{1.9}$$

$$p(v)\ N(0,R). \tag{1.10}$$

Praktikoje procesų triukšmų kovariacija Q ir matavimo triukšmų kovariacija R matrica gali keistis kiekvienu laiko momentu, tačiau Kalmano metodas teigia, kad taip nėra ir jos išlieka pastovios. N-matė matrica A skirtuminėje lygtyje (2.1.7) nusako būseną praeitu laiko momentu, kuri priklauso nuo būsenos dabartiniu laiko momentu. $m \times l$ matrica B, kurią galime nusakyti kaip $x \in R^l$ tai pasirinktinė įvestis į x būseną. Matrica $m \times l$ H formulėje (2.1.8) nusako būseną matavimams. Ir vėlgi praktikoje H reikšmės gali keistis, tačiau pagal G. Welsh'ą jos yra laikomos pastoviomis.

$$\hat{x}_{\widehat{k}} = A\hat{x}_k + K_k(z_k - H\hat{x}_{\widehat{k}}). \tag{1.11}$$

Skirtumas $z_k - H\hat{x}_{\widehat{k}}$ yra vadinamas matavimo inovacija (angl. *Measurement Innovation*) arba likučiu (angl. *Residual*). Likutis atspindi numatyto matavimo ir faktinio matavimo neatitikimą. Nulinis likutis reiškia, kad abu yra visiškai identiški ir matavimas atitinka numatytąjį.

Matrica K (2.1.11) vadinama Kalmano stiprinimo koeficientu, jis padidina arba sumažina prieš tai minėto skirtumo įtaką tolesniems skaičiavimams.

$$K_k = P_{\widehat{k}} H^T (H P_{\widehat{k}} H^T + R)^{-1} = \frac{P_{\widehat{k}} H^T}{H P_{\widehat{k}} H^T + R}. \tag{1.12}$$

Skaičiuojant Kalmano stiprinimo koeficientą matome, kad vienas iš lygties kintamųjų yra matavimo kovariacijos klaida R, kai klaida artėja prie nulio, Kalmano koeficientas išreiškiamas formule.

$$\lim_{R_k \to 0} K_k = H^{-1}. \tag{1.13}$$

Dar vienu atveju, kai klaidos kovariacija $P_{\widehat{k}}$ yra lygi nuliui, stiprinimo koeficientas padidina likutinį svorį:

$$\lim_{P_k \to 0} K_k = 0. \tag{1.14}$$

Į Kalmano stiprinimo koeficientą galime žiūrėti taip, kad kai matavimo paklaidos kovariacija $P_{\widehat{k}}$ artėja prie nulio, faktinį matavimą galime laikyti patikimesniu, o prognozuojamas matavimas tampa mažiau patikimas.

1.4. Diskretusis Kalmano filtras

Kalmano filtras apskaičiuoja procesą naudodamas grįžtamojo ryšio formą, filtras per tam tikrą laiką įvertina proceso būseną ir gauna grįžtamąjį ryšį (triukšminiais) matavimais. Kalmano lygtys gali būti klasifikuojamos į dvi grupes – tai laiko atnaujinimų lygtis (angl. *time update equations*) ir matavimų atnaujinimų lygtis (angl. *Measurements update equations*). Laiko atnaujinimo lygtys yra atsakingos už ateityje (pagal laiką) esamas būsenas ir klaidų kovariacijos įverčius, norint gauti kito žingsnio įverčius. Matavimo atnaujinimo lygtys yra atsakingos už grįžtamąjį ryšį, kitaip tariant už tai, kad norėdami gauti naują vertę, turime remtis prieš tai buvusiomis vertėmis.

Laiko atnaujinimo lygtys taip pat gali būti laikomos prognozuojančiomis lygtimis, o matavimams atnaujinti skirtos lygtis gali būti laikomos korekcinėmis lygtimis. Šiuo atveju laiko atnaujinimas prognozuoja dabartinį būsenos įvertinimą ateityje. Matavimo atnaujinimas sureguliuoja numatytą įvertinimą realiu matavimo metu.

Formulės, kuriomis galime aprašyti duomenų atnaujinimą:

$$\hat{x}_{\widehat{k}} = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}, \tag{1.15}$$

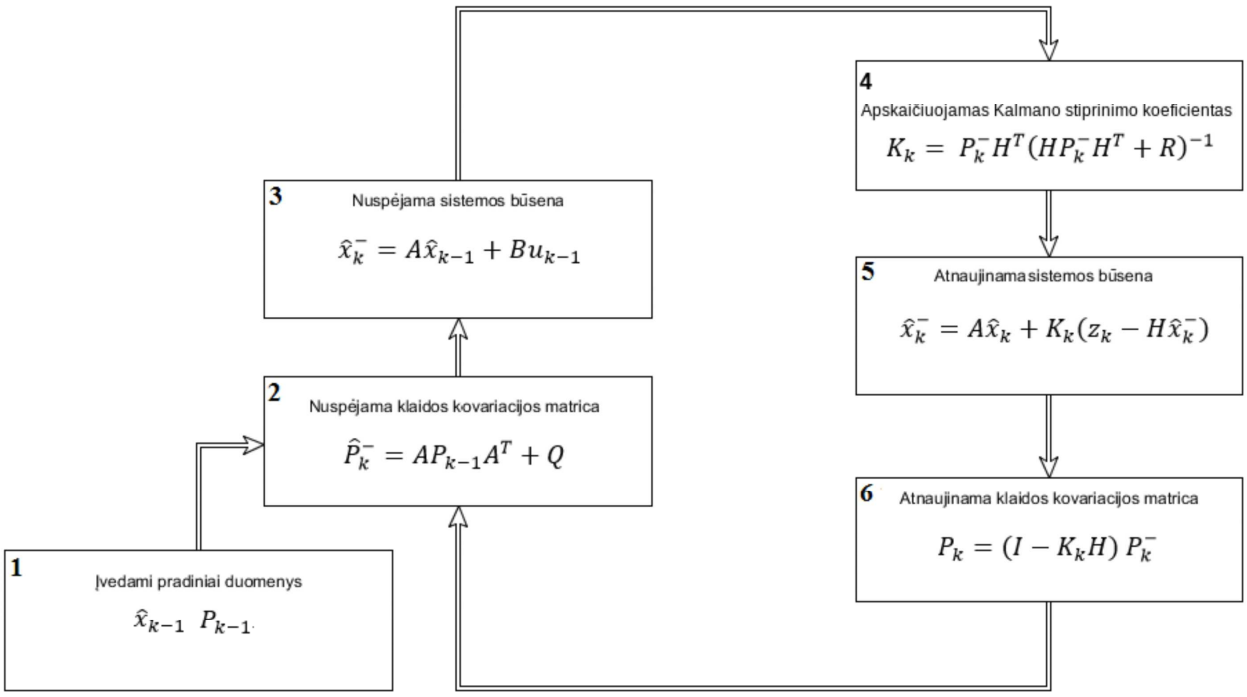
$$\hat{P}_{\widehat{k}} = AP_{k-1}A^T + Q. \tag{1.16}$$

Funkcijos, skirtos atlikti matavimų atnaujinimą:

$$K_k = P_{\widehat{k}}H^T(HP_{\widehat{k}}H^T + R)^{-1}, \tag{1.17}$$

$$\hat{x}_{\widehat{k}} = A\hat{x}_k + K_k(z_k - H\hat{x}_{\widehat{k}}), \tag{1.18}$$

$$P_k = (I - K_K H)P_{\widehat{k}}. \tag{1.19}$$



1.3 pav. Diskretusis Kalmano filtro algoritmas

Pateiktoje iliustracijoje matome (žr. 2.6 pav.) diskretaus Kalmano filtro algoritmą. Procesą padalinome į du etapus – matavimų prognozavimo ir jų atnaujinimo, taip pat etapai išskaidyti į 6 procesus:

1. Įvedami pradiniai duomenys. Norint pradėti filtravimą reikia į sistemą paduoti dvi reikšmes – sistemos būseną prieš tai buvusiame žingsnyje ir klaidos kovariaciją.
2. Pasitelkiant pradinius duomenis apskaičiuojama klaidos kovariacija.
3. Nuspėjama kita būsena, kuri bus naudojama, norint atnaujinti sistemos būseną.
4. Apskaičiuojamas Kalmano stiprinimo koeficientas.
5. Atnaujinama sistemos būsena.
6. Atnaujinama klaidos kovariacija.

Tuomet procesas yra kartojamas vėl ir vėl nuo antro etapo.

Diskretusis Kalmano filtras yra labiau skirtas tiesinėms sistemoms, tačiau gali būti ir panaudojamas, kaip aukštų dažnių filtras, skirtas nufiltruoti akselerometro dreifo sukeliamus triukšmus. Šis sprendimas gerai tinka įterptinei sistemai, kadangi neturi daug vektorinių operacijų, o testavimo rezultatai parodė, kad turi teigiamą įtaką duomenų korekcijai.

1.5. Išplėstasis Kalmano filtras

Kalmano filtras sprendžia bendrąsias problemas, kai bandoma tinkamai įvertinti valdomo proceso būseną paprasta skirtumine lygtimi. Tačiau kyla klausimas, kas nutiks, jei procesas bus nuspėtas ir įvertintas, kai procesas nėra tiesinis? Kalmano filtras, kuris yra perdarytas į tiesinį apie dabartinį vidurkį ir kovariaciją, yra vadinamas išplėstuoju Kalmano filtru (angl. *Extended Kalman Filter*).

Norėdami sistemą pertvarkyti į tiesinę funkciją, turime pritaikyti Teiloro eilutę. Sistemos būsenos vertinimas gali būti atliktas taikant dalines išvestines ir matavimo funkcijas apskaičiuojant įvertinimus. Siekiant pradėti procesą, visų pirma turi būti pertvarkytos Kalmano filtro lygtys. Taip pat turi būti atsižvelgta į prielaidą, kad proceso būsena yra vektorius ir ją lemia stochastinė netiesinė skirtuminė lygtis. Verta pažymėti, kad esminis išplėstojo Kalmano filtro trūkumas yra tas, kad skirtingų atsitiktinių dydžių pasiskirstymas arba tankis tęstiniame procese nebėra normalus po jų atitinkamų netiesinių transformacijų.

Sistemos būsenos įvertinimas atliekamas naudojant šias lygtis:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}). \tag{1.20}$$

Kai matavimai $z \in R^m$:

$$z_k = h(x_k, v_k). \tag{1.21}$$

Šioje lygtyje x_k ir v_k yra atsitiktiniai kintamieji, kurie nusako proceso ir matavimo triukšmus. Šiuo atveju netiesinė funkcija (2.1.20) turi priklausomybę nuo praeito etapo žingsnio $k-1$ su esamo etapo žingsniu [9].

Norėdami įvertinti sistemos būseną, tai galime padaryti naudodami šias lygtis:

$$x_k \approx \widetilde{x_k} + A(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + Ww_{k-1}, \tag{1.22}$$

$$z_k \approx \widetilde{z_k} + H(x_k - \hat{x}) + Vv_k. \tag{1.23}$$

Lygtis apibūdinantys kintamieji:

- x_k ir z_k yra faktinės būsenos vektoriai.
- $\widetilde{z_k}$ ir $\widetilde{z_k}$ yra apytikslės būsenos ir matavimo vektoriai.
- $\hat{x}$ yra sistemos būsena kitame žingsnyje.

- w_k ir v_k atsitiktiniai kintamieji, kurie nusako procesų ir matavimų triukšmus.
- A yra Jakobo (angl. *Jacobian*) matrica. Tai yra dalinė funkcijos išvestinės priklausomybė nuo x.

Prognazavimo lygtys:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, 0), \tag{1.24}$$

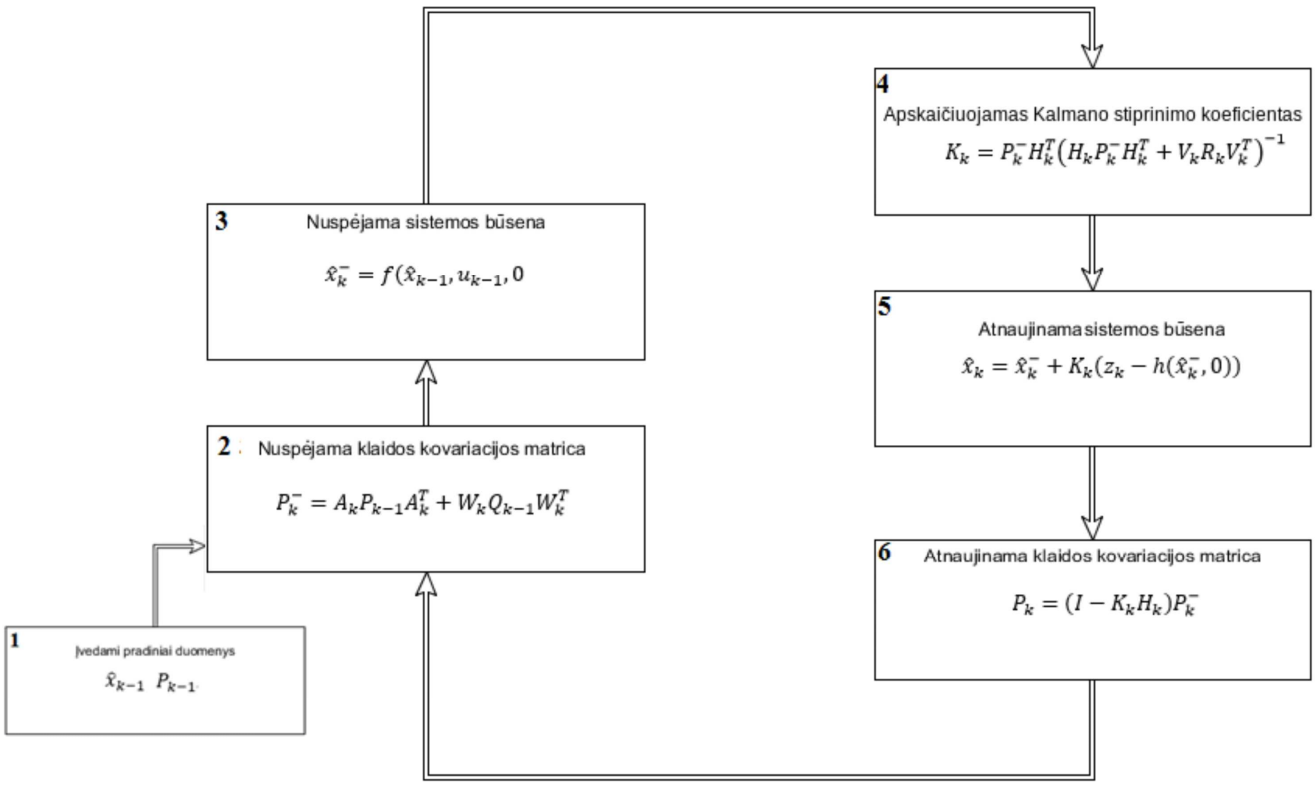
$$P_{\bar{k}} = A_k P_{k-1} A_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1}. \tag{1.25}$$

Atnaujinimo lygtys:

$$K_k = P_{\bar{k}} H_k^T (H_k P_{\bar{k}} H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1}. \tag{1.26}$$

$$\widehat{x_k} = \hat{xk} + K_k(z_k - h(\widehat{x_{\bar{k}}}, 0)), \tag{1.27}$$

$$P_k = (i - K_k H_k))P_{\bar{k}}. \tag{1.28}$$



1.4 pav. Išplėstojo Kalmano filtro algoritmas

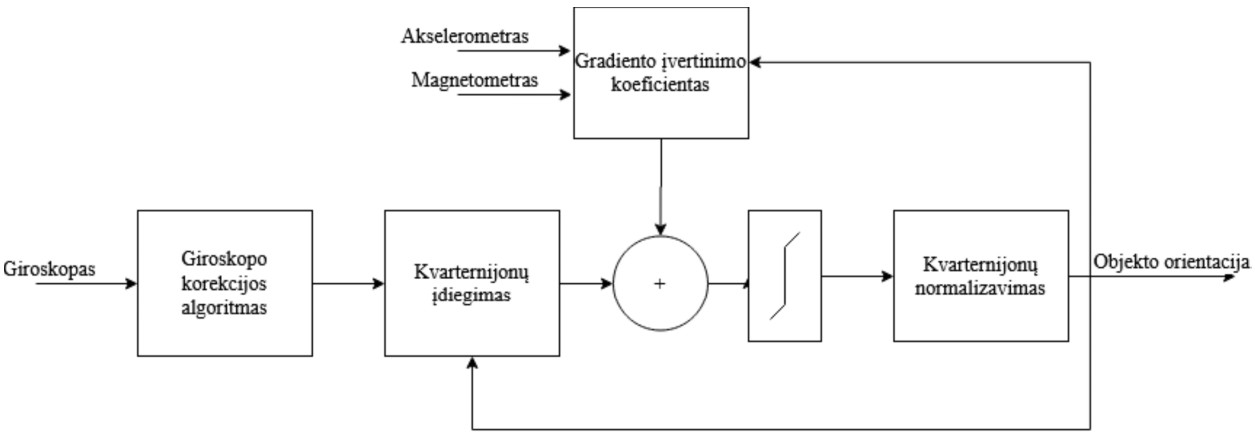
Skaičiavimo algoritmas identiškas prieš tai aprašytam diskrečiam Kalmano filtrui, tačiau pakeičiamos formulės į labiau kompleksiškas. Labai svarbi išplėstojo Kalmano filtro ypatybė – Jokobo matrica H_k, leidžianti Kalmano stiprinimo koeficientui tinkamai įvertinti matavimo komponentės vertę.

1.6. Madgwick'o algoritmas

S. Madgwick'as tiriamajame darbe aprašė naują objekto padėties aprašymo algoritmą, kuris gali būti taikomas tiek inercinėms matavimo sistemoms. Filtras naudoja kvarterionų išraišką, pritaikius ją sujungiami magnetometro ir akselerometro duomenys.

Kvarternionas – keturių dimensijų kompleksinis skaičius, kuris gali apibrėžti objekto koordinatę trijų dimensijų erdvėje [11]. Kvarternionų naudojimas išsprendžia problemas, kurias galime gauti naudodami Oilerio kampų skaičiavimo sistemą. Atliekant skaičiavimus Oilerio kampų sistemoje yra didelė tikimybė, kad artėjant matavimo žingsniui ties 90 laipsnių, įvyks reiškinys vadinamas gimbalo užsirakinimu. Todėl visuose sistemose, kuriose atliekami objekto padėties nustatymai kintančioje sistemoje yra rekomenduotina naudoti kvarternionus.

Madgwick'o algoritme įgyvendintas magnetinio lauko iškraipymo kompensavimas naudojant kvarternionų išraišką vietoje Oilerio kampų. Naudojant akselerometro ir magnetometro duomenis galima visiškai įvertinti giroskopo savaiminio sukimosi poslinkį ir pašalinti iš skaičiavimų. Toks sprendimas leistų be papildomų kalibracijų naudoti giroskopą objekto padėčiai nustatyti.



1.5 pav. Madgwick'o filtro blokinė schema

Pirmiausia yra parengiamos vertės, naudojamos giroskopo duomenų korekcijos algoritmui, kuriuo siekiama išvengti klaidų, kurias sukelia poslinkis ir dreifas, tuomet gaunamos reikšmės yra naudojamos kūno padėčiai nustatyti kvarternionų sistemoje. Tada akselerometro ir magnetometro duomenys yra sujungiami ir duomenys įvedami į gradiento įvertinimo algoritmą. Tuomet naudojant Madgwick'o algoritmo duomenis yra koreguojama giroskopo orientacija, taip yra sumažinama dreifo problema.

Giroskopo duomenų pakeitimas į kvarternionų taškus:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_1 g_x - q_2 g_y - q_3 g_z \\ q_0 g_x + q_2 g_z - q_3 g_y \\ q_0 g_y - q_1 g_z + q_3 g_x \\ q_0 g_z + q_1 g_y - q_2 g_x \end{bmatrix}. \tag{1.29}$$

Rotacijos matrica kvarternionų išraiška gali būti aprašoma:

$$R = \begin{bmatrix} 2q_1^2 - 1 + 2q_2^2 & 2(q_1 q_3 + q_1 q_4) & 2(q_2 q_4 - q_1 q_3) \\ 2(q_2 q_3 - q_1 q_4) & 2q_1^2 - 1 + 2Q_3^2 & 2(q_3 q_4 + q_1 q_2) \\ 2(q_2 q_4 + q_1 q_3) & 2(q_3 q_4 - q_1 q_2) & 2q_1^2 - 1 + 2q_4^2) \end{bmatrix}. \tag{1.30}$$

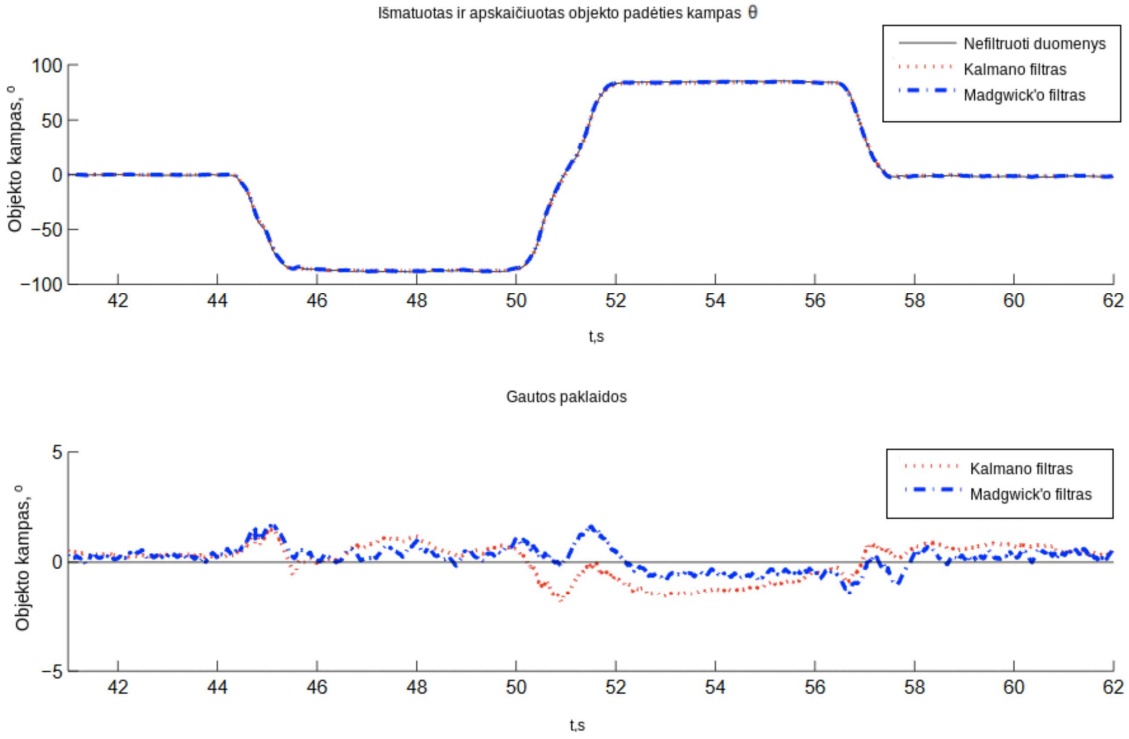
Oilerio kampų išraiškos iš kvarternionų gali būti apskaičiuojamos:

$$\phi = atan2(2q_3 q_4 - 2q_1 q_2, 2q_1^2 + 2q_4^2 - 1), \tag{1.31}$$

$$\psi = atan2(2q_2 q_3 - 2q_1 q_4, 2q_1^2 + 2q_2^2 - 1), \tag{1.32}$$

$$\theta = -sin^{-1}(2q_2 q_4 + 2q_1 q_3). \tag{1.33}$$

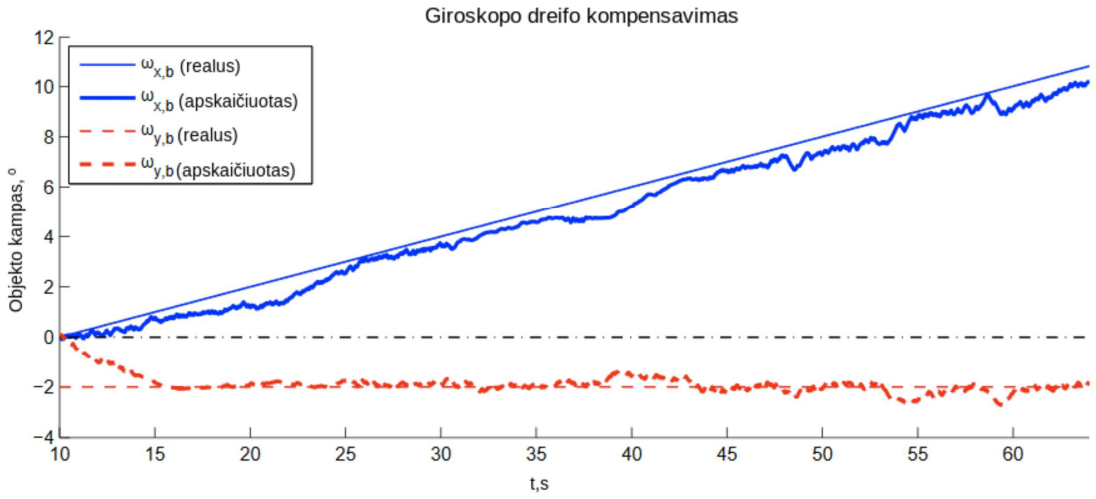
Algoritmo autorius atliko bandymus, naudodamas Kalmano filtru grįsto algoritmo ir Madgwick'o algoritmų palyginimus. Pateikėme vieną iš grafikų (žr. 1.6 pav.), kuriuose yra atvaizduotos y ašies arba *Pitch* ašies duomenų išraiška laipsniais.



1.6 pav. Madgwick'o filtro palyginimas su Kalmano filtru [11]

Iš pirminio grafiko susidaro įspūdis, kad duomenys yra nekorektiškai atvaizduoti, kadangi visų trijų duomenų grafiko išraiškos sutampa. Žemiau matome pavaizduotą grafiką, kuriame pateiktas klaidų grafikas, kuris apskaičiuojamas paimant skirtumą tarp tikėtinos gauti reikšmės ir gautos iš tam tikro filtro. Matome, kad Madgick'o filtras yra mažiau triukšmingas būnant rimties būsenoje. Iliustracijoje matome, kad atsiranda nedidelės trukmės uždelsimas, atliekant staigų kampo pakeitimą nuo -50° iki 100°. Paskutinėje grafiko atkarpoje matome, kad gaunamas didesnis poslinkis nuo x ašies nei su Kalmano filtru. Tai mums leidžia padaryti išvadas, kad filtras turi didesnį uždelsimą nei Kalmano filtras, tačiau yra labiau pastovus, esant objektui rimties būsenoje.

Pateiktoje iliustracijoje (žr. 1.7 pav.) matome, kaip veikia pažangus giroskopo dreifo kompensavimo filtras.



1.7 pav. Giroskopo dreifo kompensacijos palyginimas [11]

Esant ne kalibruotam giroskopui gaunamas savaiminis giroskopo sukimasis iš nuskaitomų duomenų, šiai problemai spręsti reikia atlikti giroskopo kalibraciją. Algoritme jau yra įdiegtas automatinis giroskopo kalibravimas. Iš pateiktų duomenų matome, kad pirmas 15 sekundžių vyksta kalibravimas ir yra gaunamas savaiminis giroskopo sukimasis, tačiau vėliau matome, kad gaunami minimalūs objekto kampo pakitimai bėgant laikui.

Tai ganėtinai optimalus filtras, neturintis ypatingai daugybės operacijų, kurios reikštų papildomas instrukcijas mažo pajėgumo sistemose. Kvarternionų naudojimas leidžia išspręsti gimbalo užsirakinimo problemą. Kvarternionų matavimo sistema dažniausiai yra naudojama, kuriant vaizdo žaidimus, kadangi taip paprasčiau galima aprašyti objekto padėtį erdvėje nei Oilerio kampais. Taip pat pažangesnis dreifo kompensacijos algoritmas leidžia sumažinti savaiminį giroskopo sukimąsi be papildomų kalibracijų.

1.7. Pažangi navigavimo sistema ORIENTUS

ORIENTUS (žr. 1.8 pav.) – tvirtas, mažų matmenų AHRS jutiklių blokas, užtikrinantis tikslų orientavimą pačiomis sudėtingiausiomis sąlygomis. Yra įdiegtas sudėtingas duomenų sintezės algoritmas, kuris derina duomenis iš temperatūros jutiklio, kalibruoto akselerometro, giroskopo ir magnetinio jutiklio, siekiant užtikrinti tikslią ir patikimą orientaciją [13].



1.8 pav. ORIENTUS orientacijos sistema

Sistema pasižymi dideliu duomenų atnaujinimo dažniu, kuris siekia iki 1000 Hz, o duomenis yra perduodami *RS232* protokolu. Tvirtas korpusas leidžia naudoti įrenginį pačiomis atšiauriausiomis sąlygomis, kadangi yra palaikomas *IP68* standartas, konstrukcija gali atlaikyti iki 2000 G sukrėtimą.

ORIENTUS sistemoje yra įdiegti labai aukštos kokybės MEMS jutikliai. Patobulintas sistemos filtras sugeba nustatyti, kada yra magnetiniai trukdžiai ir kada reikia ignoruoti duomenis, tol kol trukdžiai išnyks. Šis sprendimas leidžia išlaikyti tikslią kryptį magnetinių trukdžių metu. Sprendime pritaikytas pažangus algoritmas pagreičio kompensavimui. Tai leidžia ORIENTUS išlaikyti tikslų riedėjimo ar žingsnio pagreitį per trumpalaikius linijinius pagreičius, kurie įprastai sukelia reikšmingas klaidas. Ilgalaikiams linijiniams pagreičiams galima apjungti GNSS imtuvo duomenis su ORIENTUS duomenimis.

Šis sprendimas gali būti naudojamas:

- Robotikos srityje – ORIENTUS duomenys leidžia stabilizuoti robotų mechanines sistemas. Sistema pasižymi dideliu duomenų atnaujinimo dažniu, kuris siekia iki 1000 Hz, o tai leidžia dinamiškai ir be trukdžių valdyti nestabilias sistemas ir platformas.

- Kameros stabilizavimo sistema gali būti naudojama stabilizuoti kamerų ir fotoaparatų objektyvus, kurie leistų sklandžiai užfiksuoti objektus, judant ar fiksuojant iš transporto priemonių.

- Žmogaus judesio stebėjimui – sprendimas tinkamas sporto tyrimais užsiimančius mokslininkus, kurie gali leisti fiksuoti sąnarių judesius.

1.8. Avarijų detektavimas

Europos komisija plėtoja „eCall“ projektą, kurio metu į naujos kartos automobilius turi būti įdiegta sistema, leidžianti automatiškai nustatyti ir pranešti apie avarijas, tokios sistemos yra vadinamos ACNS. Jos turi automatiškai informuoti pagalbos centrus apie įvykusią avariją, išsiųsti SMS su avarijos koordinatėmis ir atlikti skambutį. „PildoLabs“ pateikė sprendimą, kuris leidžia detektuoti avariją, naudojant du akselerometrus [12].



1.9 pav. Akselerometro ašių išdėstymas įrenginyje

Iliustracijoje (žr. 1.9 pav.) pateiktas akselerometrų ašių išdėstymas. Vienas akselerometro X ir Y ašys yra išdėstytos statmenai ekrano, o kito pakreiptos 45 laipsnių kampu. Būtent šis išdėstymas bus svarbus, siekiant atlikti tam tikras kalibracijas ir duomenų korekcijas.

Vienas iš pirmų žingsnių, kurie yra atliekami su akselerometro duomenimis, tai charakterizuoti triukšmus. Charakterizavimas atliekamas apskaičiuojant skirtingas koreliacijas: autokoreliaciją, skersinių ašių ir kryžminių jutiklių koreliacijos koeficientus. Autokoreliacija yra signalo panašumo su savimi kaip laiko funkcijos, pritaikytos vienam iš jų, matas. Tai yra stebėjimų panašumas, kaip laiko atskyrimo tarp jų funkcija.

2. Tyrimų teorinis pagrindimas

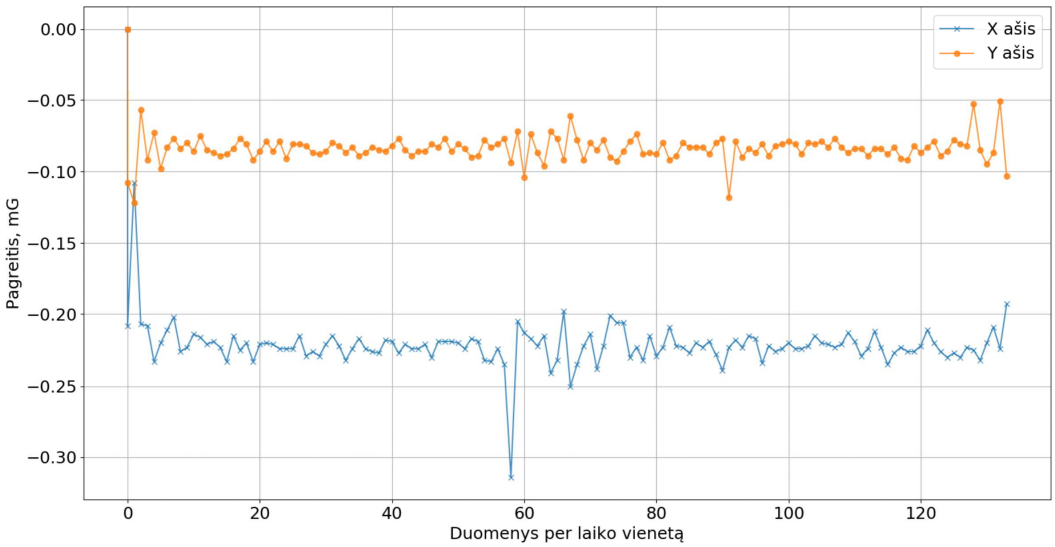
Šiame skyriuje apžvelgsime pagrindines problemas, kurios kyla, siekiant tikslingai naudotis giroskopu, akselerometru ir magnetometru. Naudodami neapdorotus duomenis grafikuose parodysime, kaip tokio pobūdžio problemas galime atpažinti, kaip jos pasireiškia. Aprašysime reikalavimus testavimo sistemai ir parinksime metodikas. Turėdami metodinę informaciją realizuosime juos realioje sistemoje.

2.1. Jutiklių trūkumų problematikos įvardijimas

Kaip ir minėjome ankstesniuose skyriuose, šio tyrimo tikslas sumažinti arba visai paslėpti fizinius inercinių matavimo jutiklių trūkumus. Prieš atlikdami tolesnius tyrimus ir duomenų korekcijų metodų analizes, turime praktiškai atkartoti literatūroje įvardintus jutiklių trūkumus. Tai mums leis lengviau suprasti, kaip galime manipuliuoti jutiklių pateikiamais duomenimis.

2.1.1. Akselerometras

Analizuodami filtrus pastebėjome, kad vienas iš pagrindinių akselerometro trūkumų – atliekant momentinius matavimus, jutiklių duomenys yra ganėtinai triukšmingi. Iš grafiko (žr. **??** pav.) matyti, kad būdamas ramybės būsenos jutiklis geba fiksuoti įvarius triukšmus. Akselerometras iš esmės netiesiogiai matuoja pagreitį per jį veikiančią jėgą. Momentines ir išorines jėgas sukelia veikiama jėga per tam tikrą laiko tarpą. Todėl akselerometras gali ganėtinai jautriai reaguoti į įvairius virpesius.

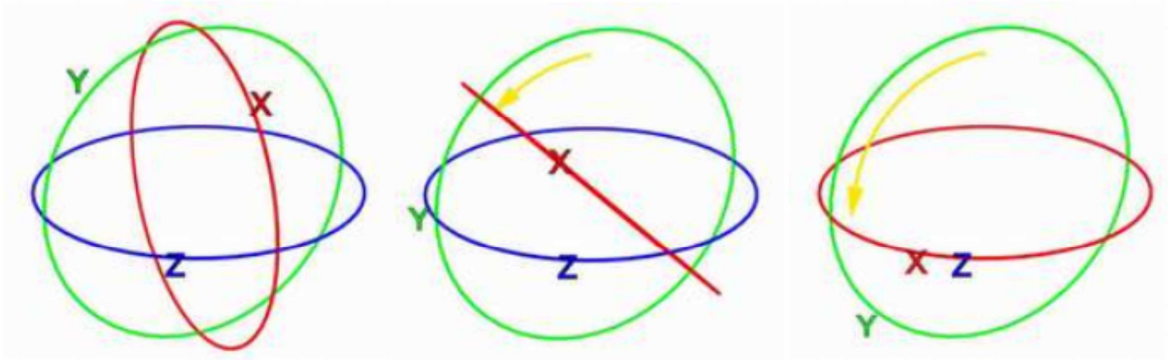


2.1 pav. Akselerometro triukšmai x ir y ašyse

Atlikome praktinį bandymą su duomenimis, nuskaitytais iš akselerometro. Iliustracijoje (žr. 2.1 pav.) matome, objektą ramybės būsenos. Galime pastebėti didelį triukšmų kiekį, atsirandantį dėl įvairių vibracijų, kurios veikia objektą iš X ir Y ašių. Grafikuose matome, kad gaunamas pagreitis svyruoja 70 mG diapazone. Tačiau teigiama šio jutiklio savybė, kad ilgainiui jo vertė objekto pozicijos atžvilgiu nekinta.

2.1.2. Giroskopas

Giroskopas geba matuoti objekto sukimosi greitį, todėl jis svarbus vertinant objekto ψ padėtį. Tačiau tai jutiklis, turintis nemažai trūkumų. Pats giroskopas (žr. 2.2 pav.) gali būti suprantamas, kaip trijų žiedų sistema.



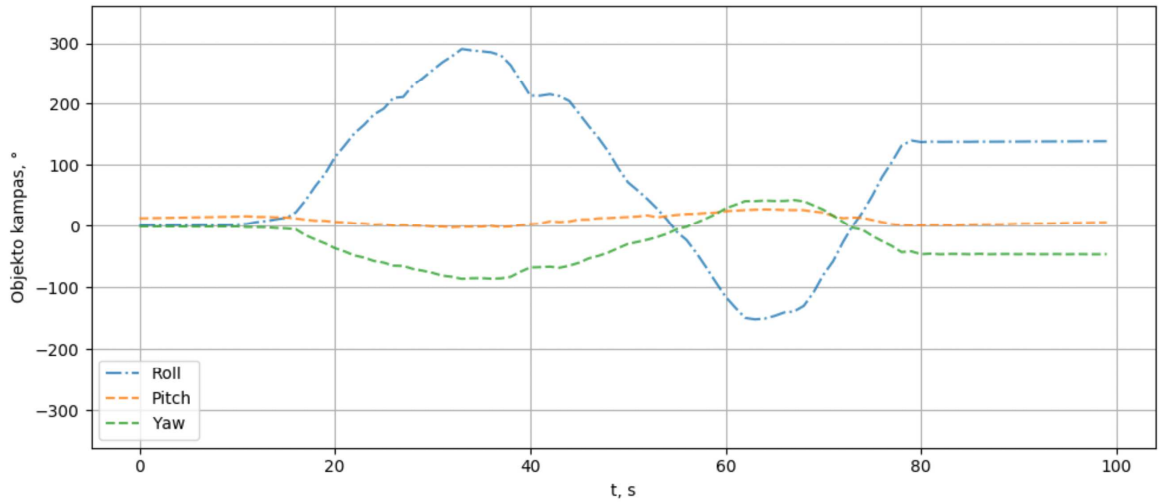
2.2 pav. Giroskopo struktūra

Kiekvienas žiedas sukasi aplink kitus du žiedus. Literatūroje galima surasti sąvoką – gimbalo užsirakinimas (angl. *Gimbal lock*). Tai reiškinys, kai du žiedai sutampa ir giroskopas negali tiksliai įvertinti, aplink kurį iš žiedų sukasi objektas. Iliustracijoje matome, kad kai Y žiedas pasisuka 90 laipsniu kampu, Z ir X ašys sutampa ir tuomet matematiškai sunku vertinti Z ir X ašių sukimąsi Oilerio kampų sistemoje.

Pateiktame grafike (žr. 2.3 pav.) užfiksavome gimbalo užsirakinimo atvejį. Bandymo metu objektas buvo sukamas aplink x ašį, o likusios ašys buvo fiksuotos. Iliustracijoje matyti, kad *Roll* ašis sparčiai keičiasi nuo 0 iki 360 laipsnių gaunamas ir *Yaw* ašies pokytis. Šis reiškinys sukeltų anomalijų atvaizduojant objekto padėtį erdvėje.

Naudojant giroskopo duomenis gaunamas savaiminis sukimasis, todėl ilgalaikėje perspektyvoje, galime gauti objekto padėties pasikeitimus jam net nejudant. Ieškant literatūros apie šį reiškinį buvo aptiktos dvi priežastys, kodėl tai vyksta. Viena iš jų, kad giroskopo dreifą sukelia dvi priežastys ir jų integracija į giroskopą, tai lėtai kintantis kintamasis, kuris sukelia nuolatinę sukimosi greičio dedamąją ir aukšto dažnio triukšmai, kurie kitaip yra vadinami kampinis atsitiktinis žingsnis (angl. *Anglular Random Walk*). Šie parametrai yra išreiškiami sukimosi laipsniais per laiko vienetą. Šiam dreifui jautriausia *Yaw* posūkio ašis.

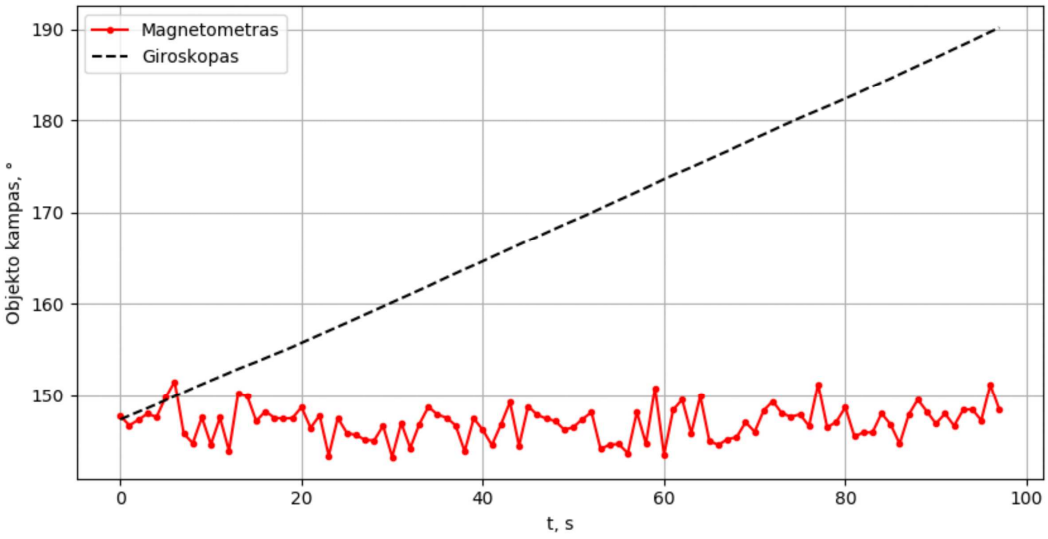
Norėdami pademonstruoti giroskopo savaiminį sukimąsi atvaizduosime *Yaw* ašį, naudojant giroskopo ir magnetometro duomenis. Iš praktikos žinome, kad šiuo atveju magneto-



2.3 pav. Gimbalo užsirakinimo grafikas

metro duomenys turėtų būti stabilesni ir tai mus leis tiksliau suprasti, kokį dreifą galime gauti per tam tikrą laiko tarpą.

Pateiktame grafike (žr. 2.4 pav.) matome magnetometro ir giroskopo duomenų išraiškas, pateiktas laipsniais. Testavimo metu objektas buvo stacionarioje pozicijoje. Giroskopo kampas buvo matuojamas nuo magnetometro atskaitos taško, kad būtų galima pateikti duomenis viename grafike. Matavimas truko kiek trumpiau nei dvi minutes.



2.4 pav. Nekalibruoto giroskopo duomenų palyginimas su magnetometru

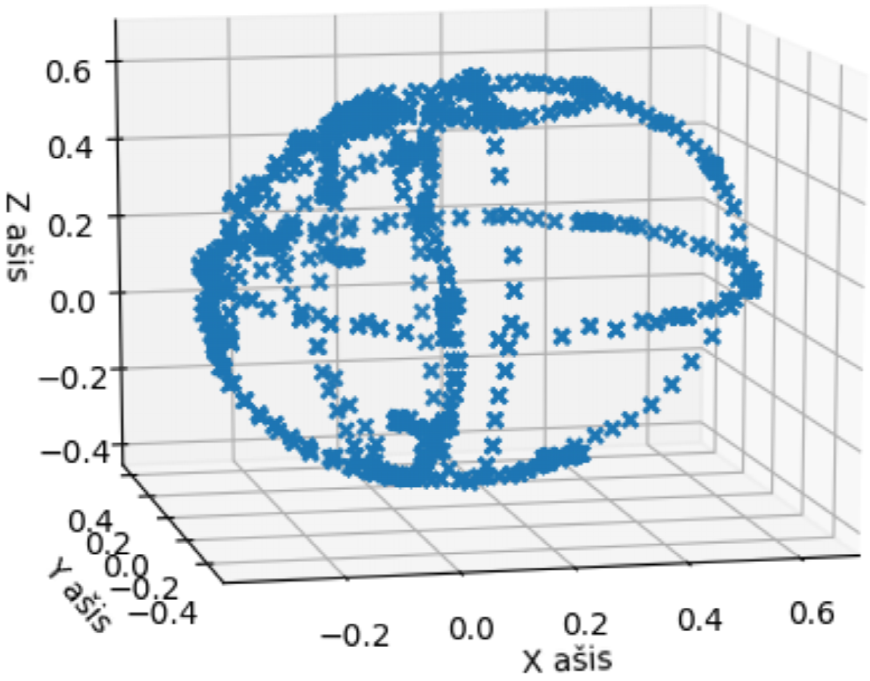
Šiuo atveju matome, kad magnetometro duomenys svyruoja nuo 145 iki 152 laipsnių. Tai gali lemti akselerometro triukšmai, kurie įeina į *Yaw* kampo skaičiavimus. Grafike išryškėja giroskopo savaiminio sukimosi problema. Gaunami nuolatiniai, nepastovūs triukšmai, kurie siekia 0,003 rad/s. Per trumpiau nei 2 minutes gavome didžiulį giroskopo pasisukimą.

2.1.3. Magnetometras

Magnetometras šiuo atveju vienas iš tiksliausių jutiklių, tačiau turi jau užprogramuotas paklaidas, kurios reikalauja papildomų kalibracijų. Kiekvienas magnetometras turi būti kalibruotas, kadangi turi tam tikrą poslinkį. Sekanti problema, kad objektas fiksuoja visus magnetinius laukus ir jo darbas gali būti sutrikdytas kalvotose vietovėse.

Objekto kryptis arba kursas yra nustatomas, naudojant žemės magnetinį lauką. Tačiau aplinkoje sąveikauja ir daugiau magnetinių laukų, kurie gali sukelti matavimo trikdžius, juos dažniausiai sukelia feromagnetinės medžiagos, esančios šalia megnetometro. Jei feromagnetinės medžiagos yra nuolatinės, jos vadinamos kieta geležimi (angl. *Hard iron*). Būtent šios medžiagos buvimas šalia megnetometro nesunkiai leidžia kompensuoti matavimus. Geležies iškraipymas visada pridedamas prie žemės magnetinio lauko, kitaip tariant, jutiklio rodmenis galima ištaisyti, pašalinant poslinkį.

Panaudodami sukurtą testavimo sistemą surinkome magnetometro jutiklio duomenis. Rinkdami duomenis judinome objektą visomis ašimis, kad galėtume iš gautų duomenų nubrėžti sferą, kuri atvaizduos objektą, supantį magnetinį lauką, ir galėsime pamatyti, į kurią pusę pasislinkusi sfera. Gauti duomenys leis skaičiuoti magnetinio lauko poslinkį, kurį sukelia aplink esančios feromagnetinės medžiagos.



2.5 pav. Nekalibruoto magnetometro duomenys

Iš grafiko (žr. 2.5 pav.) galime pastebėti, kad X ašis yra pasistūmusi į dešinę pusę, tai leidžia lengvai nustatyti, kad mūsų naudojamas magnetometras patiria iškraipymus, kurie sukeliami mūsų testavimo stende esančių metalinių detalių ar mikrovaldiklio elektrinėje

schemoje ar stende esantys komponentai.

1 lentelė. Nekalibruotų magnetometro duomenų išskyrimas

Ašis	Mažiausia	Didžiausia
X	-0,339	0,6345
Y	-0,4905	0,4335
Z	-0,381	0,6315

1 lentelėje išskyrėme duomenis įvertindami, kuriame masyve yra mažiausia ir didžiausia vertė. Matome, kad daugiau ar mažiau skiriasi skaičiaus absoliutus dydis (modulis), būtent tai ir leidžia nustatyti magnetinio iškraipymo koeficientą (poslinkį).

2.2. Testavimo sistemos projektavimas

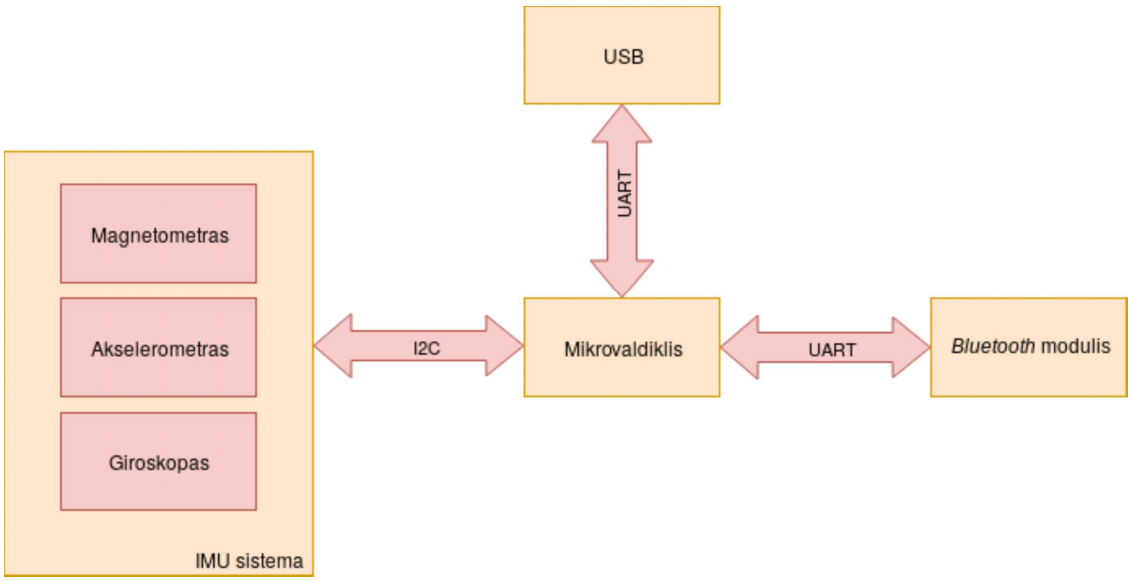
Tiriamojo darbo tikslas ne tik teoriškai, tačiau ir turint praktinius rezultatus pagrįsti metodų privalumus ir trūkumus, todėl turime suprojektuoti sistemą, leidžiančią įterptinėje sistemoje įgyvendinti ir pateikti tyrimų rezultatus.

2.3. Sistemos aparatinė struktūrinė schema

Projektuodami pirminę sistemos versiją ji bus sudaryta iš šių komponentų:

- STM32L476RG NUCLEO tiriamoji plokštė
- *Bluetooth* 2.1 modulis
- X-NUCLEO-IKS01A2 IMU tiriamoji plokštė

Šią sistemą galime atvaizduoti blokinė schema, kurioje atvaizduojamos sistemos dalys, neįvardijant konkrečių komponentų modelių.



2.6 pav. Sistemos blokinė schema

Komponentų parinkimas buvo atliekamas pagal tai, kaip patogiausiai galime įdiegti visus komponentus į sistemą. „STM32 Nucleo“ plokštė turi visus reikiamus komponentus darbui su įterptine sistema. Į išorė yra išvesti prievadai, kurie leidžia labai paprastai instaliuoti įvairius specialius jutiklių papildymus. Taip pat jau yra integruotas TLL keitiklis UART-USB, todėl užtenka inicializuoti UART sąsają ir nenaudodami papildomų komponentų galime komunikuoti su mikrovaldikliu. Vienas iš tiriamųjų plokščių privalumų yra integruotas programatorius ST-LINK, kuriuo galime lengvai modifikuoti sistemą ir atlikti derinimus.

Dėl patogios integracijos ir suderinamumo su „Nucleo“ plokšte naudosime „X-NUCLEO-IKS01A2“ plokštę, kurioje yra visi reikiami jutikliai mūsų projektuojamai tyrimo sistemai – akselerometras, giroskopas ir magnetometras, taip pat papildomai yra ir slėgio jutiklis, kuris gali būti naudojamas, jei norime fiksuoti judėjimą keičiantis plokštumos aukščiui.

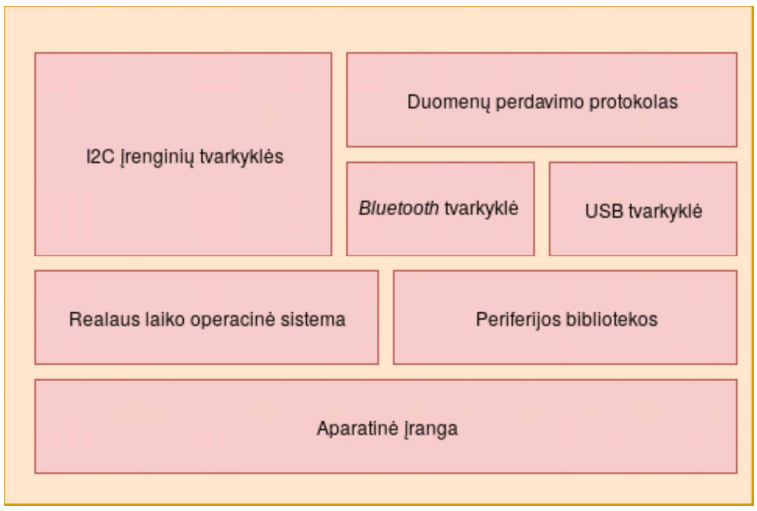
Belaidei komunikacijai bus naudojamas *Bluetooth* siųstuvas, kuris palaiko dviejų tipų komunikaciją – 2.1 ir 4.0. Tai yra paprastas siųstuvas, kuris su mikrovaldikliu gali komunikuoti per UART sąsają.

2.4. Sistemos programinė aparatinė struktūrinė schema

Šiame poskyryje trumpai apžvelgsime iš kokių komponentų susidarys sistemos schema ir aptarsime, kurias periferijos bibliotekas ir realaus laiko operacinės sistemas naudosime.

Kaip žemiausias sistemos sluoksnis yra aparatinė įranga, kurioje yra įgyvendintos tam tikros instrukcijos ir registrai, kuriuos naudojant galime valdyti įterptinę sistemą.

Kitame sluoksnyje turime du sistemos komponentus – tai realaus laiko operacinė sistema ir periferijos biblioteka. Dirbdami su įterptine sistema jaučiame būtinybę išnaudoti procesus, kuriuos galime vykdyti asinchroniškai ir taip išplėsti visus funkcionalumus, kurie bus naudojami, t. y. duomenų nuskaitymas iš kelių jutiklių, duomenų apdorojimas ir komunikacija su



2.7 pav. Programinės aparatinės įrangos blokinė schema

išoriniais įrenginiais. Periferijos biblioteka palengvina darbą su registrais ir instrukcijomis. Atlikus trumpą apžvalgą labiausiai tinkantis variantas yra *Zephyr*, tai yra lanksti realaus laiko operacinė sistema, kuri palaiko įvairių architektūrų ir gamintojų mikrovaldiklių aparatines įrangas, taip pat yra integruota HAL arba LL periferijos biblioteka. Vienas iš šios operacinės sistemos privalumų ir idėjų, kad nesvarbu, kokiai aparatinei įrangai yra rašoma programa.

Bluetooth tvarkyklė, tai paprasta programos dalis, kuri bus atsakinga už belaidę komunikaciją tarp išorinių įrenginių. USB tvarkyklė atliks tokias pačias funkcijas.

I2C įrenginių tvarkyklė bus atsakinga už jutiklių bloko duomenų nuskaitymą. *Zephyr* operacinė sistema turi tam tikrų jutiklių blokų palaikymą, todėl mums nekils jokių problemų dėl periferijos palaikymo pridėjimo.

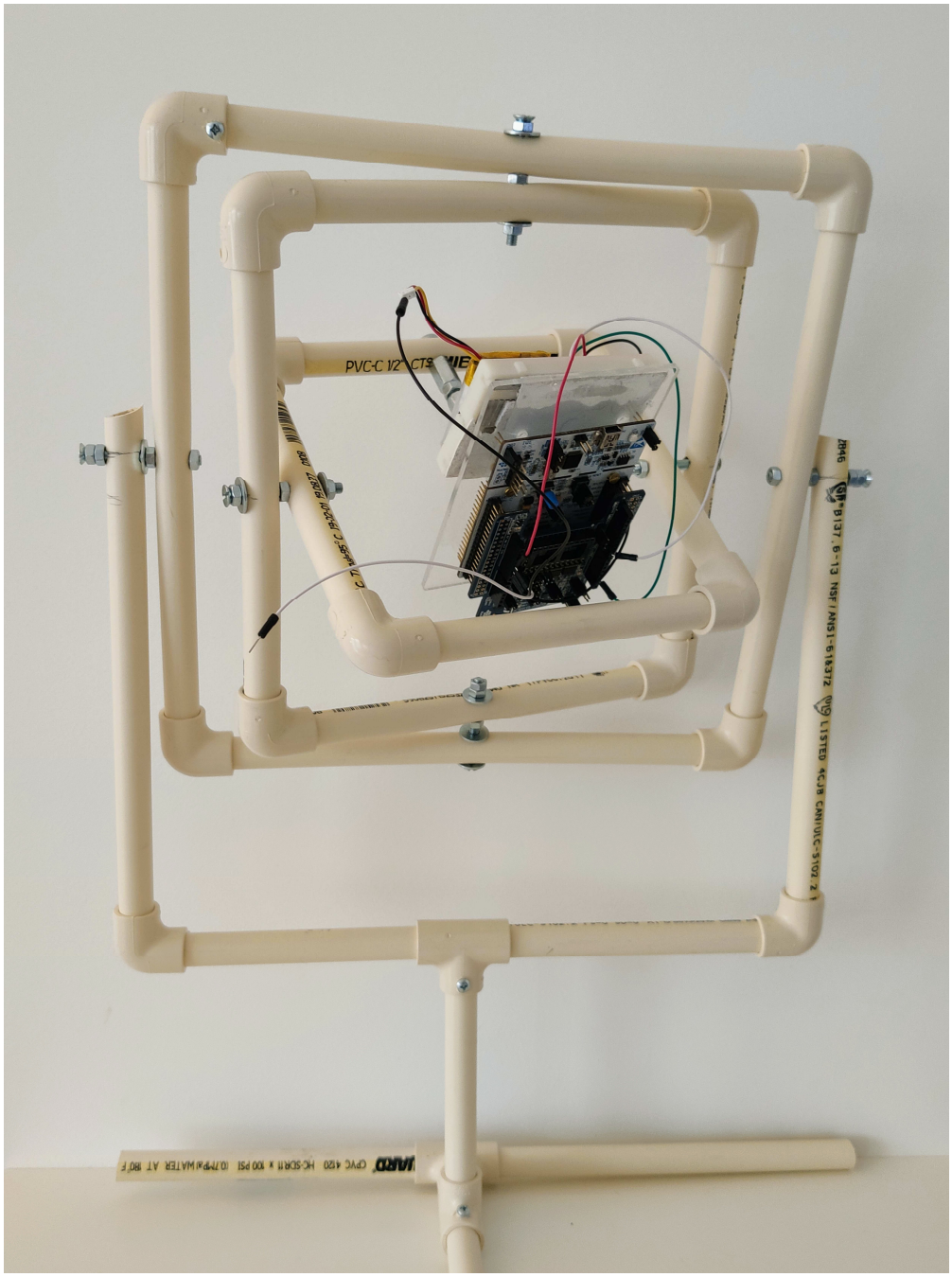
Duomenų perdavimo protokolas bus atsakingas už neperteklinį duomenų perdavimą į išorinius įrenginius ir programinę įrangą, kuri grafinėje sąsajoje išves duomenis į grafikus, kuriuos analizuodami galėsime padaryti tam tikras išvadas.

2.5. Objekto pozicionavimo stendo kūrimas

Atlikdami elementarius objekto pozicijos nustatymus pastebėjome, kad pozicionavimas erdvėje apie tam tikrą ašį yra ganėtinai sudėtingas. Todėl nusprendėme, kad reikalingas stendas, leidžiantis keisti objekto poziciją.

Gamindami stendą panaudojome plonus santechnikos vamzdelius, kurių skersmuo siekia 1,5 cm, ir atitinkamus 90 laipsnių kampus jiems sujungti. Atskiri rėmeliai buvo sujungiami M4 5 cm ilgio varžtais ir veržlėmis.

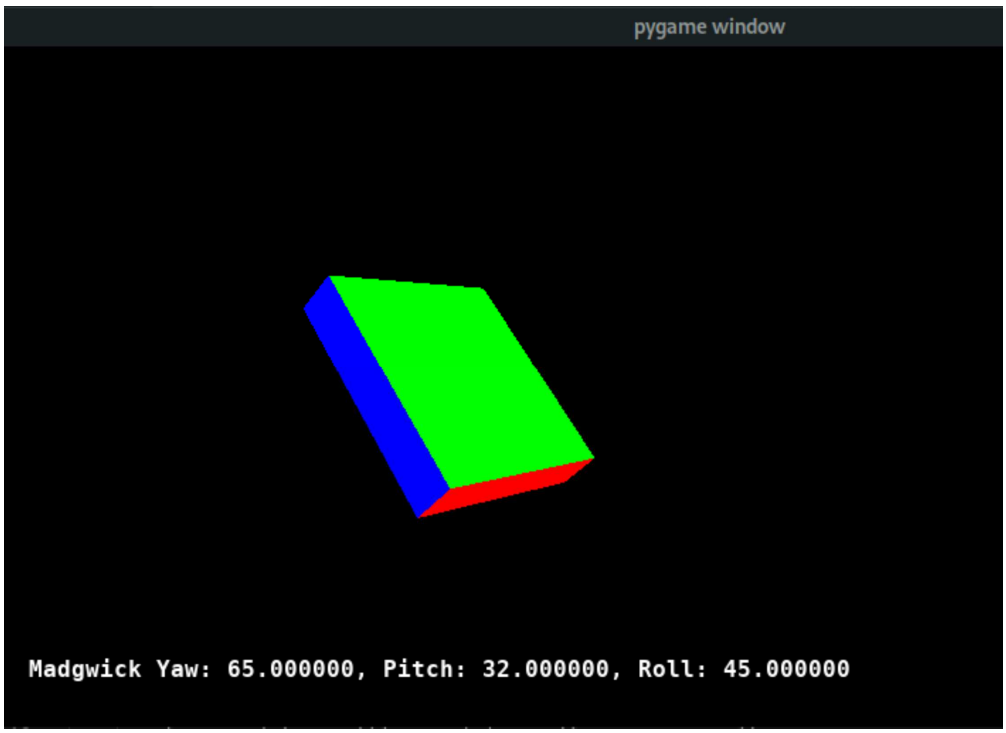
Iliustracijoje matome (žr. 2.8 pav.) surinktą objekto pozicionavimo stendą. Stendas leidžia sukinėti objektą įvairiais kampais su tam tikru jėgos pasipriešinimu, kad objektas liktų toje pačioje pozicijoje.



2.8 pav. Objekto pozicionavimo stendas

Mikrovaldiklis su jutiklių bloku yra pritvirtintas prie organinio stiklo plokštelės. Maketo plokštėje pritvirtinome *Bluetooth* siųstuvą-imtuvą, kuris leidžia belaidžiu ryšiu siųsti duomenis į programinę įrangą. Maketo plokštė yra maitinama 1800 mAh LiPo baterija.

Stende esantį objektą galime sukinėti 24 skirtingais kampais. Testavimo stendo galimybės leidžia atkartoti gimbalo užsirakinimo scenarijų. Naudodami belaidį ryšį, pastebimas duomenų atsilikimas, kadangi naudojamas senesnės kartos *Bluetooth* siųstuvas, kuris palaiko tik 115200 b/s spartą.



2.9 pav. Programinė įranga, skirta objekto padėties vizualizacijai trimatėje erdvėje

Naudodami *Python* programavimo kalbą įgyvendinome objekto padėties atvaizdavimą trimatėje erdvėje. Tai leidžia stebėti objekto padėties pasikeitimus realiuoju laiku, vertinti metodų veiksmingumą ir derinti reikalingus filtrų koeficientus.

2.6. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje apžvelgėme minėtas problemas, kurios susijusios su jutiklių mechaninėmis savybėmis ir trūkumais. Visą informaciją pateikėme grafiškai. Vizualiniam patikrinimui paruošėme programinę įrangą.

3. Tyrimų praktinis pagrindimas

Šiame skyriuje aptarsime principus, kuriais įgyvendinome jutiklių duomenų korekcijas. Pagrindiniai tyrimo rezultatai:

1. Objekto padėties nustatymo tikslumas. Reakcija į staigius pokyčius.
2. Objekto padėties tikslumas ilgalaikiuose matavimuose.
3. Metodo tinkamumas įterptinei sistemai. Jo vykdymo sparta.
4. Pritaikymas navigacinei sistemai pastato viduje.

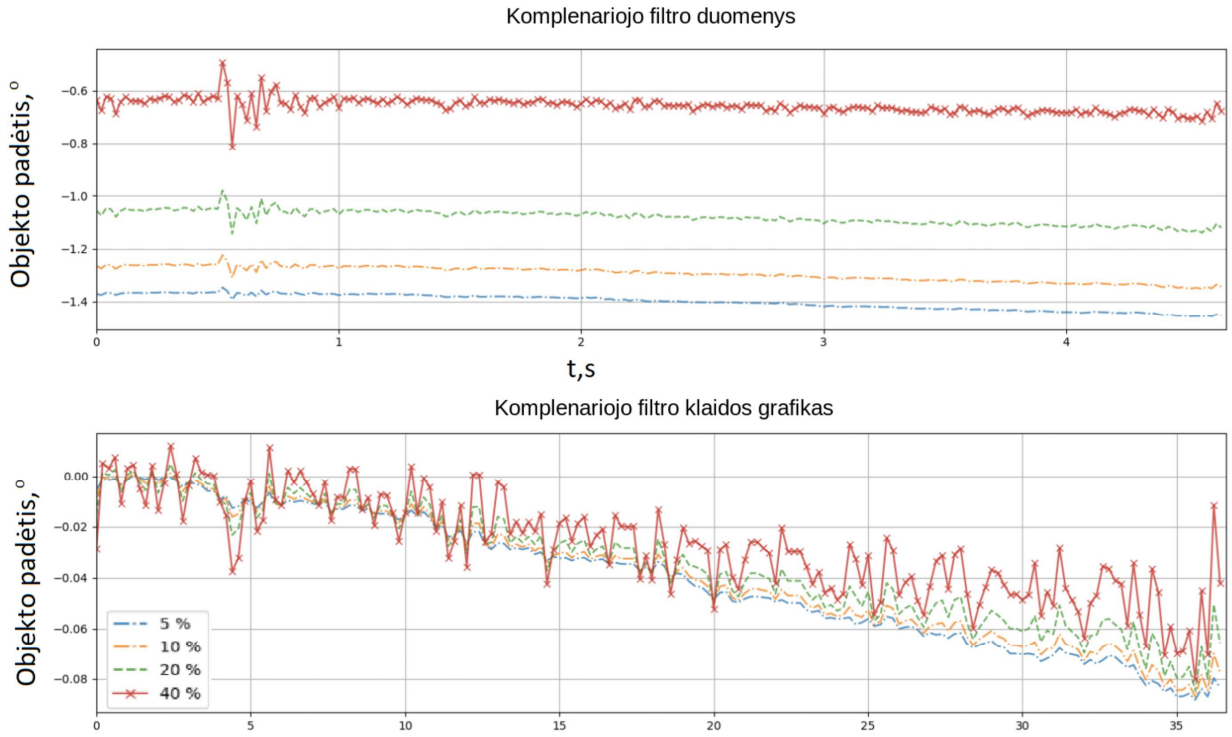
3.1. Jutiklių duomenų korekcijos tyrimas

Įterptinėje sistemoje įgyvendinome jutiklių duomenų nuskaitymą. Nustatyta duomenų išvedimo sparta siekia iki 104 Hz. Panaudodami (1.6) formulę įgyvendinome komplenarųjį filtrą, tokiu būdu sujungdami giroskopo ir akselerometro duomenis.

Bandymo metu parinksime skirtingas jutiklių įtakos vertes. Jas keisdami galėsime stebėti, kaip keičiasi iš jutiklių gaunamų duomenų objekto kampinės vertės ir pastebėti dėsningumus. Šiuo atveju bus parenkamos vertės, kai akselerometro duomenų įtaka kampinei išraiškai yra: 5 %, 10 %, 20 % ir 40 %. Svarbu paminėti, kad atliekant objekto padėties nustatymus labiau turime remtis giroskopo duomenimis, kadangi akselerometro momentinės vertės yra mažiau tikslios.

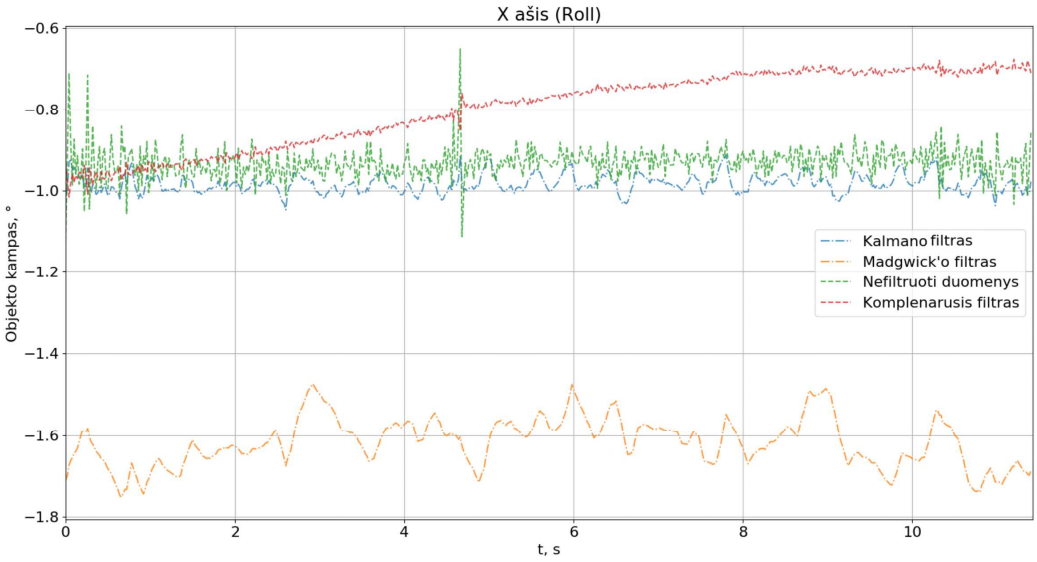
Iliustracijoje (žr. 3.1 pav.) pateikti du grafikai, kurie gauti atliekant bandymus naudodami komplenarųjį filtrą. Pirmajame grafike matome objekto padėties išraišką laikui bėgant, o kitame objekto padėties klaidos grafiką. Klaida buvo apskaičiuota įvertinant, kad objektas visą laiką buvo stacionarioje pozicijoje ir nejudėjo, todėl objekto padėties vertė turėjo nesikeisti.

Gauti rezultatai leidžia padaryti išvadas, kad kuo daugiau atlikdami matavimus remsimės akselerometro duomenimis, tuo triukšmingesnė ir nestabilesnė objekto padėties reikšmę gausime. Grafike (žr. 3.1 pav.) išryškėja ir sekanti problema, kad daugiau remdamiesi giroskopo duomenimis laikui bėgant turėsime didesnes klaidos vertes, kurias sukelia giroskopo savaiminis sukimasis.



3.1 pav. Komplenariojo filtro duomenų palyginimas

Komplenariojo filtro taikymas puikiai atspindi jutiklių trūkumus. Tai leidžia labiau suprasti, kaip pažangesni metodai pašalina trūkumus ir leidžia paprasčiau manipuliuoti duomenimis. Vėlesniuose bandymuose naudosime jutiklių duomenų santykį, kai giroskopo duomenys sudarys 90 % akselerometro likusius 10 %.

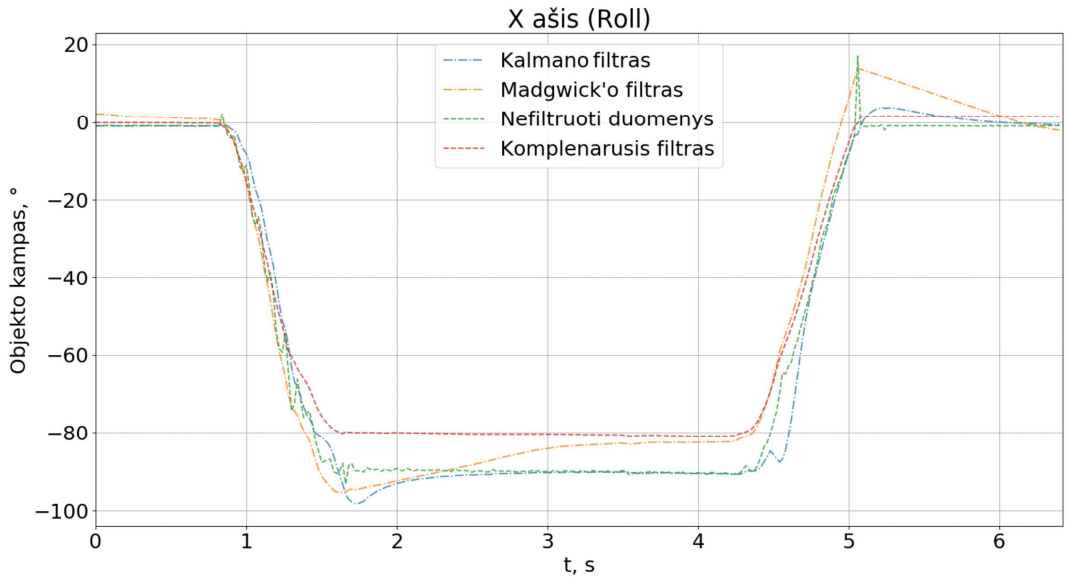


3.2 pav. Filtrų palyginimas objektui esant statinėje pozicijoje

Tyrimo sistemoje įgyvendinome du pažangesnius filtrus – Kalmano ir Madgwick'o. Pateiktoje iliustracijoje (žr. 3.2 pav.) matome objekto padėtį X ašies atžvilgiu. Grafike taip pat pateikėme nefiltruotus duomenis, gautus iš akselerometro ir komplenariojo filtro. Iš duomenų galime matyti, kad komplenarusis filtras neišsprendžia savaiminio giroskopo sukimosi problemos. Kalmano ir Madgwick'o filtrais galima spręsti šią problemą, kadangi nėra matyti didelių pokyčių objekto padėties atžvilgiu.

Atlikdami kitą bandymą norime pažiūrėti, kaip filtrai reaguoja į greitus objekto padėties pasikeitimus. Jutiklių duomenys bus apdorojami naudojant Kalmano, Madgwick'o ir komplenarųjį filtrus. Iliustracijoje (žr. 3.3 pav.) pateikti duomenys pasukus objektą 90 laipsnių kampu ir grąžinus objektą į pradinę padėtį. Gauti rezultatai leidžia įvertinti, kad abu pažangūs Kalmano ir Madgwick'o filtrai sėkmingai pasiekė -90 laipsnių ribą, geba greitai ir ganėtinai tiksliai reaguoti į pasikeitimus.

Grąžinus objektą į pradinę padėtį galime pastebėti, kad Madgwick'o filtras sureaguoja į nefiltruotų duomenų grafike gautą triukšmą ir prireikia apie vienos sekundės, kad grįžtų į pradinę objekto padėtį. Tai įvyksta dėl giroskopo duomenų kompensacijos gradiento, kuris yra skaičiuojamas, naudojant akselerometro duomenis.



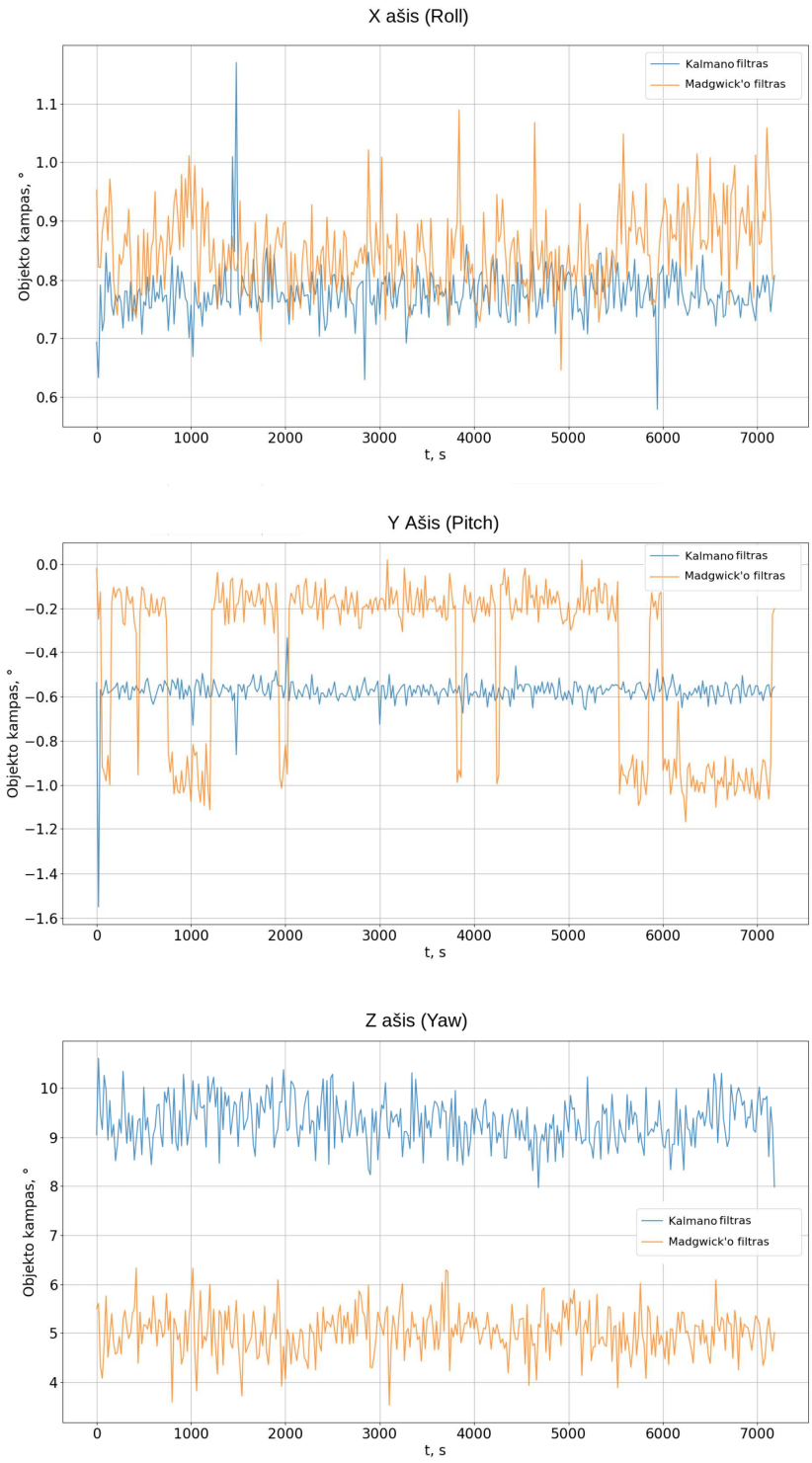
3.3 pav. Filtrų palyginimas pavertus objektą 90 laipsniu kampu ir grąžinus į pradinę padėtį

Objektui esant stacionarioje pozicijoje ir reaguojant į greitus padėties pasikeitimus, Kalmano filtras pasiekė geresnius rezultatus, kadangi gauti rezultatai yra artimesni realiems duomenims ir yra mažiau inertiškas, palyginus su kitais filtrais. Madgwick'o filtras yra žymiai pranašesnis už komplenarųjį, kadangi pasiekė 90 laipsnių vertę, tačiau yra labiau inertiškas negu Kalmano filtras.

Atlikome ilgalaikį bandymą, kurio metu siekiame nustatyti filtrų stabilumą, kai objektas ilgą laiką yra stacionarioje padėtyje. Bandymo metu žiūrėsime, kaip filtras susitvarko su sa-

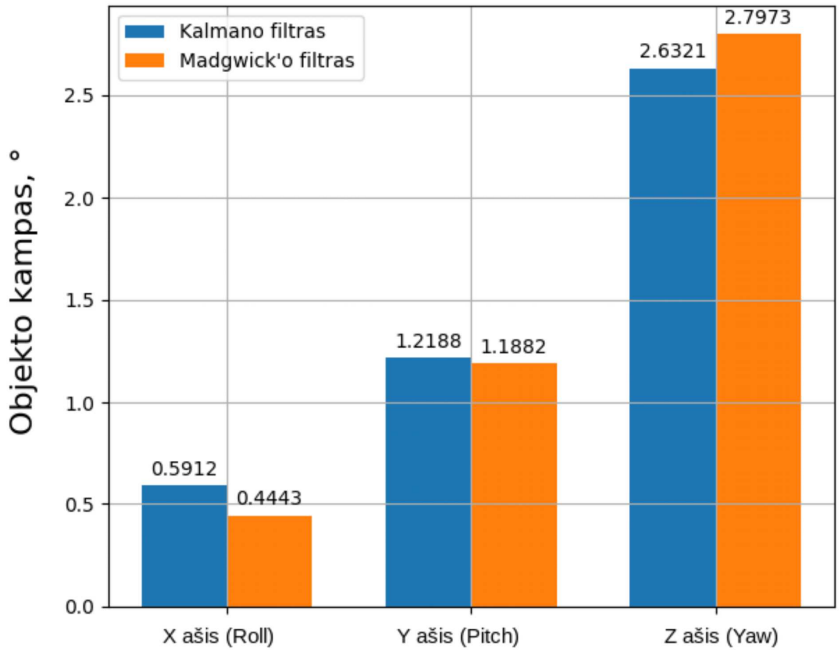
vaiminio giroskopo sukimosi problema ir triukšmais, kurie į sistemą įvedami iš akselerometro duomenų.

Atlikome du matavimus su skirtingais filtrais, vieno matavimo trukmė lygiai dvi valandos. Abiejų matavimų metu objektas buvo fiksuotoje padėtyje. Duomenys buvo atvaizduoti grafikuose (žr. 3.4 pav.), kuriuose galime pamatyti kiekvienos ašies pokyčius laike. Bandymo metu objektas buvo stabilioje padėtyje.



3.4 pav. Ašių duomenys objektui esant statinėje būsenoje

Gautus duomenis išanalizavome ir įvertinome kiekvieno algoritmo atitinkamų kampų mažiausias ir didžiausias vertes, tada paskaičiavome skaliarinį skirtumą tarp šitų verčių. Pateikti duomenys (žr. 3.5 pav.) leis lengviau suprasti, kuris filtras yra atsparesnis triukšmams ir savaiminiam sukimuisi.



3.5 pav. Ašių duomenų svyravimų palyginimas

Gauti rezultatai leidžia daryti išvadą, kad abu filtrai geba tinkamai spręsti problemas dėl giroskopo sukimosi ir jų nelabai veikia akselerometro triukšmas. Labiausiai svyruojanti ašis yra *Yaw*, kadangi jos koregavimas nėra susijęs su akselerometro duomenimis, todėl koregavimas vyksta iš giroskopo ir magnetometro duomenų.

3.2. Kalmano filtro implementacija

Šiame poskyryje nuosekliai aprašysime žingsnius, kuriuos atlikome implementuodami Kalmano filtrą įterptinėje sistemoje, kuris leidžia filtruoti triukšmus, gaunamus iš jutiklių duomenų. Remdamiesi pavyzdžiais ir straipsniais pirmajame žingsnyje turime inicializuoti skaičiavimų matricas.

Remdamiesi įvairiais literatūros šaltiniais [26, 28, 31, 37], kuriuose teigiama, kad objekto padėties matavimai turi būti įgyvendinti kvarternionų sistemoje, todėl Kalmano filtro sistemos būsenos ir kovariacijos matricos bus sudarytos iš keturių kvarternionų vektoriaus reikšmių ir sukimosi greičio.

$$X = \begin{bmatrix} X_{Q0} \\ X_{Q1} \\ X_{Q2} \\ X_{Q3} \\ X_{Wx} \\ X_{Wy} \\ X_{Wz} \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_w \end{bmatrix}. \tag{3.1}$$

Aprašome Q proceso kovariacijos triukšmų matricą. Įvedamos septynios reikšmės – tai keturios kvarternionų reikšmės ir sukimosi kampo triukšmai. Šie parametrai turi būti parenkamai priklausomai nuo jutiklių gaunamų triukšmų, esant stacionarioje pozicijoje. Įgyvendinus Kalmano filtrą, reikės parinkti vertes, leidžiančias nusakyti sistemos triukšmus.

Nustatomos sistemos pradinės vertės, kurias naudojant bus pradėtas skaičiavimas. Nustatomos pradinės kvarternionų, akselerometro, giroskopo ir magnetometro ašių vertės:

Verta paminėti, kad matricos R dimensijų išmatavimai priklauso nuo įvedamų parametrų skaičiaus. Šiuo atveju turime trylika parametrų, todėl matricos išmatavimai turi būti 13×13. Šis parametras yra aktualus, jei mes iš anksto galime žinoti objekto pradinę poziciją ir taip lemti skaičiavimus nuo tam tikros atskaitos sistemos.

Kitame žingsnyje aprašome savo matematinį sistemos modelį. Matematinį modelį sudarys trylika verčių – tai keturios kvarternionų, trys giroskopo, trys akselerometro ir trys magnetometro vertės.

$$u = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ a_x \\ a_y \\ a_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ 2q_0q_3 + 2q_1q_2 \\ q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 \\ 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ w_x \\ w_y \\ w_z \\ (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)m_N + (2q_0q_3 + 2q_1q_2)m_U \\ (-2q_0q_3 + 2q_1q_2)m_N + (q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2)m_U \\ (2q_0q_2 + 2q_1q_3)m_N + (-2q_0q_1 + 2q_1 + 2q_2q_3)m_U \end{bmatrix}. \tag{3.2}$$

Kadangi gautas matematinis modelis yra ne tiesinė funkcija, ją reikia paversti tiesine, todėl užpildome Jakobi matricą:

$$J = \frac{\partial q}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_0}{\partial q_0} & \frac{\partial q_1}{\partial q_0} & \frac{\partial q_2}{\partial q_0} & \frac{\partial q_3}{\partial q_0} & \frac{\partial w_x}{\partial q_0} & \frac{\partial w_y}{\partial q_0} & \frac{\partial w_z}{\partial q_0} \\ \frac{\partial q_0}{\partial q_1} & \frac{\partial q_1}{\partial q_1} & \frac{\partial q_2}{\partial q_1} & \frac{\partial q_3}{\partial q_1} & \frac{\partial w_x}{\partial q_1} & \frac{\partial w_y}{\partial q_1} & \frac{\partial w_z}{\partial q_1} \\ \frac{\partial q_0}{\partial q_2} & \frac{\partial q_1}{\partial q_2} & \frac{\partial q_2}{\partial q_2} & \frac{\partial q_3}{\partial q_2} & \frac{\partial w_x}{\partial q_2} & \frac{\partial w_y}{\partial q_2} & \frac{\partial w_z}{\partial q_2} \\ \frac{\partial q_0}{\partial q_3} & \frac{\partial q_1}{\partial q_3} & \frac{\partial q_2}{\partial q_3} & \frac{\partial q_3}{\partial q_3} & \frac{\partial w_x}{\partial q_3} & \frac{\partial w_y}{\partial q_3} & \frac{\partial w_z}{\partial q_3} \\ \frac{\partial q_0}{\partial a_x} & \frac{\partial q_1}{\partial a_x} & \frac{\partial q_2}{\partial a_x} & \frac{\partial q_3}{\partial a_x} & \frac{\partial w_x}{\partial a_x} & \frac{\partial w_y}{\partial a_x} & \frac{\partial w_z}{\partial a_x} \\ \frac{\partial q_0}{\partial a_y} & \frac{\partial q_1}{\partial a_y} & \frac{\partial q_2}{\partial a_y} & \frac{\partial q_3}{\partial a_y} & \frac{\partial w_x}{\partial a_y} & \frac{\partial w_y}{\partial a_y} & \frac{\partial w_z}{\partial a_y} \\ \frac{\partial q_0}{\partial a_z} & \frac{\partial q_1}{\partial a_z} & \frac{\partial q_2}{\partial a_z} & \frac{\partial q_3}{\partial a_z} & \frac{\partial w_x}{\partial a_z} & \frac{\partial w_z}{\partial a_z} & \frac{\partial w_z}{\partial a_z} \\ \frac{\partial q_0}{\partial w_x} & \frac{\partial q_1}{\partial w_x} & \frac{\partial q_2}{\partial w_x} & \frac{\partial q_3}{\partial w_x} & \frac{\partial w_x}{\partial w_x} & \frac{\partial w_y}{\partial w_x} & \frac{\partial w_z}{\partial w_x} \\ \frac{\partial q_0}{\partial w_y} & \frac{\partial q_1}{\partial w_y} & \frac{\partial q_2}{\partial w_y} & \frac{\partial q_3}{\partial w_y} & \frac{\partial w_x}{\partial w_y} & \frac{\partial w_y}{\partial w_y} & \frac{\partial w_z}{\partial w_y} \\ \frac{\partial q_0}{\partial w_z} & \frac{\partial q_1}{\partial w_z} & \frac{\partial q_2}{\partial w_z} & \frac{\partial q_3}{\partial w_z} & \frac{\partial w_x}{\partial w_z} & \frac{\partial w_y}{\partial w_z} & \frac{\partial w_z}{\partial w_z} \\ \frac{\partial q_0}{\partial m_x} & \frac{\partial q_1}{\partial m_x} & \frac{\partial q_2}{\partial m_x} & \frac{\partial q_3}{\partial m_x} & \frac{\partial w_x}{\partial m_x} & \frac{\partial w_y}{\partial m_x} & \frac{\partial w_z}{\partial m_x} \\ \frac{\partial q_0}{\partial m_y} & \frac{\partial q_1}{\partial m_y} & \frac{\partial q_2}{\partial m_y} & \frac{\partial q_3}{\partial m_y} & \frac{\partial w_x}{\partial m_y} & \frac{\partial w_y}{\partial m_y} & \frac{\partial w_z}{\partial m_y} \\ \frac{\partial q_0}{\partial m_z} & \frac{\partial q_1}{\partial m_z} & \frac{\partial q_2}{\partial m_z} & \frac{\partial q_3}{\partial m_z} & \frac{\partial w_x}{\partial m_z} & \frac{\partial w_y}{\partial m_z} & \frac{\partial w_z}{\partial m_z} \end{bmatrix}. \tag{3.3}$$

Jakobiano matrica yra užpildoma dalinėmis išvestinėmis iš X matricos elementų. Šiuo atveju kvarternionų ir giroskopo kampų vertėmis.

$$J = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2q_2 & 2q_3 & -2q_0 & 2q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 2q_1 & 2q_0 & 2q_3 & 2q_2 & 0 & 0 & 0 \\ 2q_0 & -2q_1 & -2q_2 & 2q_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ m_U 2q_0 - m_N 2q_2 & m_U 2q_1 + m_N 2q_3 & -m_U 2q_2 - m_N 2q_0 & m_N 2q_1 - m_N 2q_3 & 0 & 0 & 0 \\ m_N 2q_0 - m_U 2q_2 & m_U 2q_2 - m_N 2q_0 & m_U 2q_1 + m_N 2q_3 & m_N 2q_2 - m_U 2q_0 & 0 & 0 & 0 \\ m_U 2q_2 + m_N 2q_0 & m_U 2q_3 - m_N 2q_1 & m_U 2q_0 - m_N 2q_2 & m_U 2q_1 + m_N 2q_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{3.4}$$

Turėdami R, P, H ir Q matricas esame paruošę Kalmano filtro sistemą darbui su akselerometro, giroskopo ir magnetometro jutikliais. Kitos matematinės operacijos vyks naudojant (žr. 1.4 pav.) aprašyta tvarka. Kampų vertėms gauti turėsime iš X vektoriaus panaudoti pirmus 4 elementus ir juos perskaičiuoti į Oilerio kampų sistemą [37].

3.3. Filtrų veikimo spartos palyginimas

Testavimo sistema bus realizuota įterptinėje sistemoje, naudojant STM32L476RG mikrovaldiklį su „Cortex M4“ mikroprocesoriumi. Mikrovaldiklis turi FPU instrukcijas, kurios leidžia optimizuoti vektorines operacijas, kadangi yra atskiros instrukcijos, leidžiančios atlikti sudėties, atimties ir daugybos operacijas su matricomis.

Implementuodami Kalmano filtrą ARM įterptinėje sistemoje naudojome specializuotas instrukcijas darbui su vektoriais. Formulės išraiška (1.16) naudojant ARM instrukcijas gali būti aprašyta:

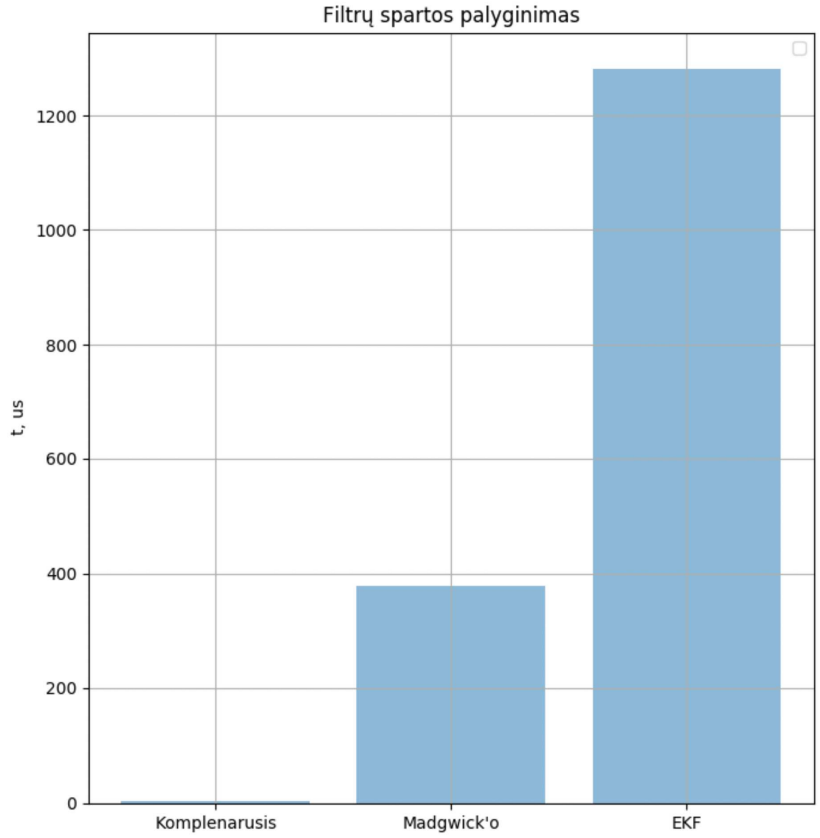
```
// Klaidos kovariacijos matrica
arm_mat_trans_f32(&ekf->H, &ekf->HT);
arm_mat_mult_f32(&ekf->H, &ekf->tmpP, &ekf->tmpYX);
arm_mat_mult_f32(&ekf->tmpYX, &ekf->HT, &ekf->S);
arm_mat_add_f32(&ekf->S, &ekf->R, &ekf->tmpS);
// Kalmano stiprinimo koeficientas
arm_mat_inverse_f32(&ekf->tmpS, &ekf->S);
arm_mat_mult_f32(&ekf->tmpP, &ekf->HT, &ekf->tmpXY);
arm_mat_mult_f32(&ekf->tmpXY, &ekf->S, &ekf->K);

arm_mat_mult_f32(&ekf->K, &ekf->Y, &ekf->tmpX);
arm_mat_add_f32(&ekf->X, &ekf->tmpX, &ekf->X);
```

Specializuotų instrukcijų naudojimas leidžia pagreitinti programos veikimą įterptinėje sistemoje, kadangi tai reikalauja mažiau laiko nei atskiros aritmetinės operacijos tarp kiekvieno vektoriaus elemento.

Madgwick'o filtro įgyvendinimą atlikome panaudodami autoriaus pateiktą programinio kodo biblioteką [11]. Autorius rašydamas kodą stengėsi, kuo mažiau panaudoti matematinių operacijų ir pasikartojančius veiksmus saugojo į atskirus kintamuosius. Autoriaus teigimu, jo siūlomas metodas skirtas objekto orientacijos nustatymui yra labiau tinkamas įterptinėms sistemoms nei Kalmano filtras.

Įgyvendinome komplenarųjį, Kalmano ir Madgwick'o filtrus įterptinėje sistemoje. Panaudodami funkciją, leidžiančią fiksuoti RTC vertę prieš funkcijos kvietimą ir po, užfiksavome filtrų vykdymo trukmes (žr. 3.6 pav.). Iš gautų rezultatų matome, kad komplenariojo filtro vykdymo sparta yra greičiausia, kadangi filtro matematinį modelį sudaro vos kelios matematinės operacijos. Sekantį geriausią rezultatą užfiksavo Madgwick'o filtras. Nepaisant filtro implementacijos, naudojant ARM instrukcijas, ilgiausią vykdymo rezultatą gavome naudodami išplėstąjį Kalmano filtrą.



3.6 pav. Filtrų veikimo spartos palyginimas įterptinėje sistemoje

Gauti rezultatai leidžia nustatyti filtro tinkamumą įterptinėje sistemoje. Jei turime sistemą, kurioje norime kuo mažesnio suvartojimo ir didesnės spartos, Kalmano filtras nėra tinkamas sprendimas, kadangi jis 3 kartus viršija Madgwick'o filtro vykdymo trukmę. Tolesni tyrimai parodys Kalmano filtro naudojimo privalumus, lyginant su labiau optimizuotais filtrais.

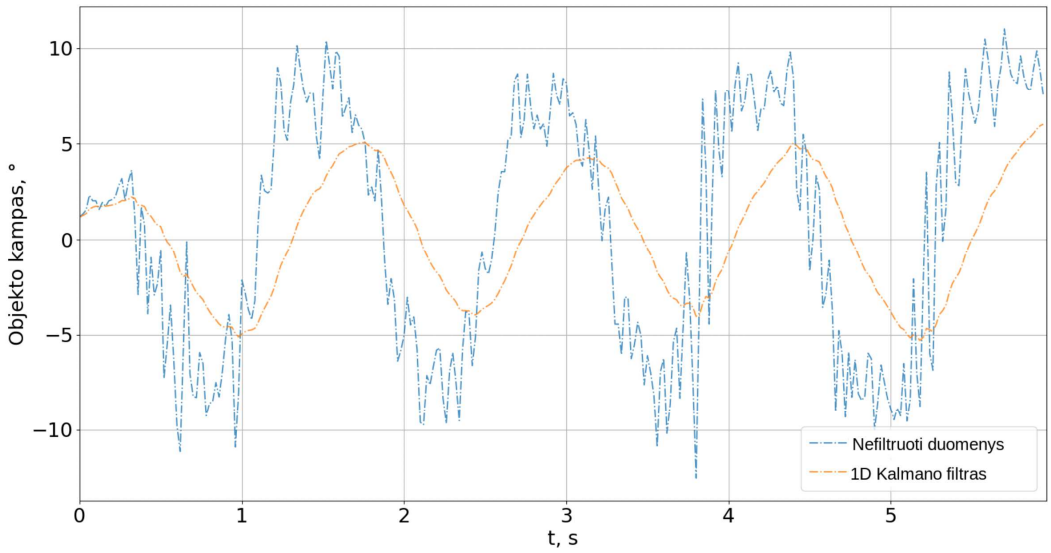
3.4. Jutiklių duomenų korekcijos rekomendacijų pateikimas

Šiame skyriuje aptarsime, apžvelgtų metodų pritaikymą praktikoje. Panaudodami Madgwick'o ir Kalmano filtrus įgyvendinsime žingsniamačiu pagrįstą navigavimo sistemą patalpoje ir GNSS duomenų korekciją. Tokio pobūdžio sprendimai gali būti pritaikyti komerciniuose įrenginiuose, kaip papildomi funkcionalumai.

Kurdami sistemą, kuri leidžia fiksuoti žingsnius, turime suprasti, kaip žingsnių detektavimas veikia, naudojant inercinės matavimo sistemos jutiklius – akselerometrą ir giroskopą. Šiuo atveju labai svarbi jutiklių bloko montavimo vieta. Žingsniamačiai vienas iš pagrindinių funkcionalumų šiuolaikinėse apyrankėse skirtoms sportui ir išmaniuosiuose laikrodžiuose. Todėl žmogui einant gali būti fiksuojamas žingsnis, detektuojant rankų postus pirmyn ir atgal. Kitas metodas – įrenginio montavimas ant pėdos. Rinkoje galime rasti sportinių batelių,

skirtų rezultatams fiksuoti. Juose būna įmontuoti jutikliai, sekantys sportininko aktyvumą.

Atlikome praktinį bandymą, siekdami užfiksuoti žingsnius, naudojant testavimo sistemą, pritaisytą prie riešo. Bandymo metu (žr. 3.7 pav.) atlikome keturis rankų mostus, pirmyn ir atgal, taip imituodami lėtą ėjimą. Pateiktos dvi kreivės: mėlyna kreivė – nefiltruoti akselerometro duomenys apie *Pitch* ašį; raudona kreivė – panaudotas vienmatis Kalmano filtras.

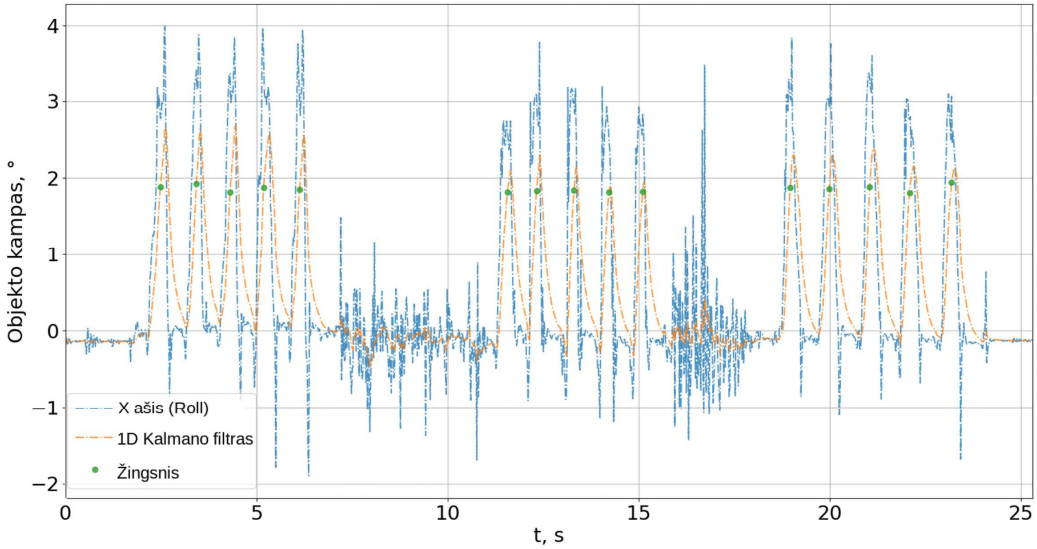


3.7 pav. Žingsnių detektavimas fiksuojant rankos judesius

Gauti rezultatai leidžia vizualiai įvertinti, kad buvo atlikti keturi žingsniai. Tačiau yra sudėtinga realizuoti žingsniamačiu pagrįstą sistemą, kuri montuojama prie riešo. Ėjimo metu gali būti atlikti judesiai aplink *Yaw* ašį, taip pat mostų diapazonas gali skirtis, todėl atsirastų daugiau problemų interpretuojant ar buvo atliktas žingsnis. Dėl šių priežasčių toliau sistema bus kuriama, montuojant jutiklių bloką prie čiurnos.

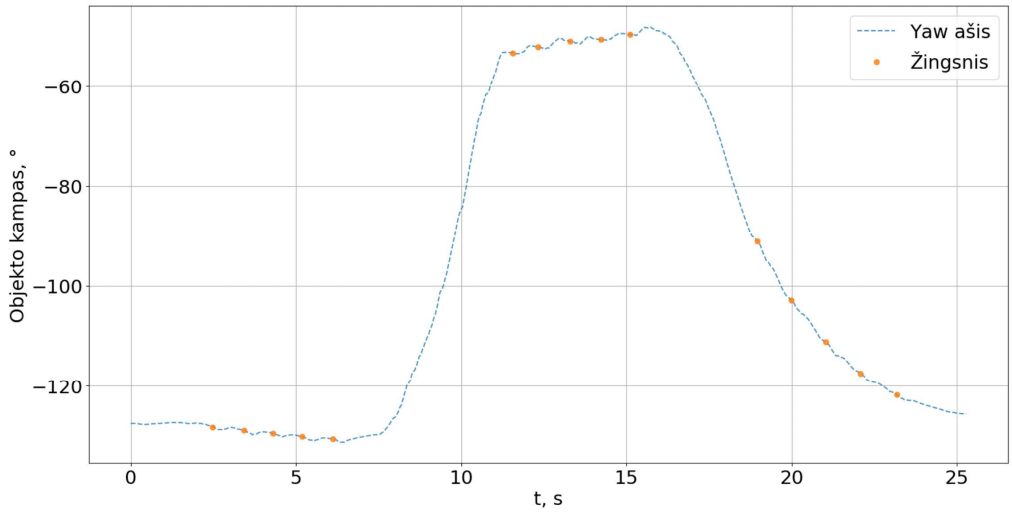
Atlikome bandymus su jutikliu bloku, kuris primontuotas prie žmogaus čiurnos. Iliustracijoje (žr. 3.8 pav.) pateiktas objekto būsenos grafikas pagal *Roll* ašį. Triukšmus išfiltravome panaudojant vienmatį Kalmano filtrą. Žaliu tašku pažymėjome vietas, kuriose mūsų žingsnių detektavimo algoritmas užfiksuoja žingsnį. Buvo atlikti penki žingsniai į priekį, tuomet atliktas pasisukimas į dešinę 90° kampu, tuomet vėl 5 žingsniai vėl pasisukimas ir dar penki žingsniai.

Gauti rezultatai rodo, kad mūsų algoritmas ir jutiklių tikslumas pakankamai geras, siekiant užfiksuoti žingsnius.



3.8 pav. Žingsnių detektavimas nuo čiurnos

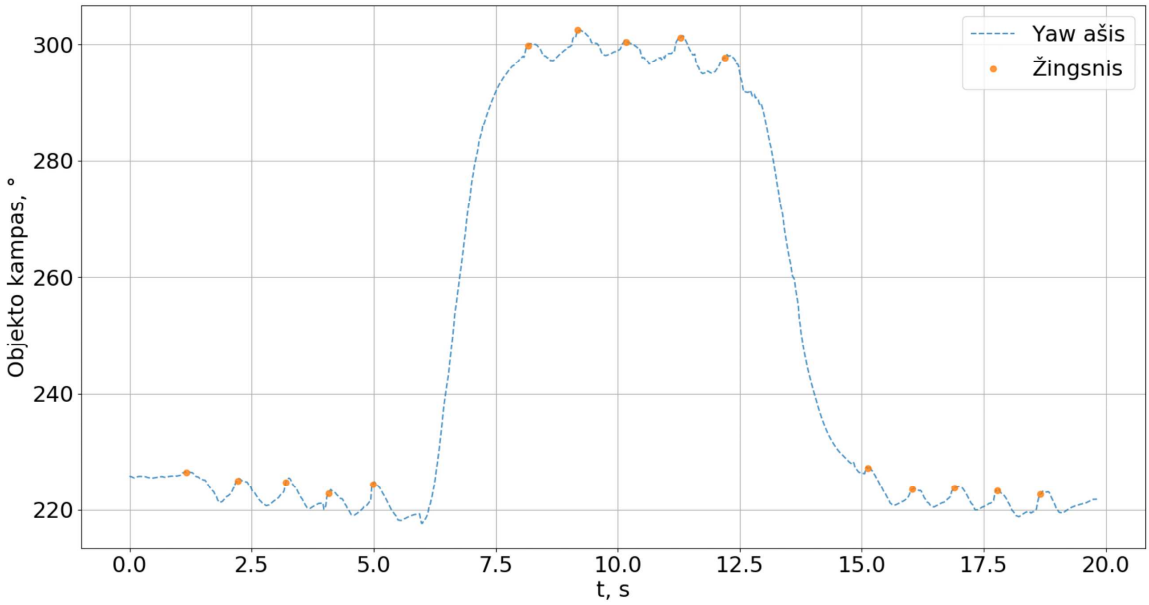
Bandymo metu naudojome Madwick'o filtrą. Gautus rezultatus pateikėme iliustracijoje (3.9 pav.), kurioje užfiksavome objekto padėties kitimą pagal *Yaw* ašį. Grafike pažymėti taškai, kurie žymi užfiksuotus žingsnius. Iš gautų rezultatų matome, kad pirmi penki žingsniai buvo žengti tiesiai, tuomet atliktas pasisukimas į dešinę pusę, tuomet dar žengti penki žingsniai. Objektui pasisukant į kairę pusę užfiksuotas uždelsimas. Panašius rezultatus gavome prieš tai atliktuose bandymuose (žr. 3.3 pav.), kad įvykus staigiam pasisukimui, Madgwick'o filtras lėtai reaguoja į objekto būsenos pasikeitimus. Tokia filtro savybė gali sukelti nemažai klaidų, atliekant žingsniamačiu pagrįstą navigavimo sistemą.



3.9 pav. Žingsnių detektavimas nuo čiurnos naudojant Madgwick'o filtrą

Identiškas bandymas atliekamas naudojant išplėstąjį Kalmano filtrą. Verta paminėti, kad bandymo metu buvo siekiama atkartoti identiškus matavimus. Įterptinėje sistemoje negalėjome įgyvendinti abiejų filtrų veikimo vienu metu, kadangi Madgwick'o filtras labai jautriai reaguoja, jei duomenys nėra atnaujinami nurodytu dažniu, šiu atveju 104 Hz. Šią problemą gauname, kadangi Kalmano filtro vienas ciklas trunka kiek daugiau nei 1 ms.

Naudojant išplėstąjį Kalmano filtrą (žr. 3.10 pav.) pavyko pasiekti geresnius rezultatus nei su prieš tai naudotu Madgwick'o filtru. Grafike galime matyti, kad filtras greitai reaguoja į objekto *Yaw* ašies pasikeitimus, tačiau labiau reaguoja ir į kitų ašių pasikeitimą, kadangi gaunami svyravimai atitinkantys žingsnių momentus.



3.10 pav. Žingsnių detektavimas nuo čiurnos naudojant Kalmano filtrą

Siekiant įgyvendinti žingsniamačiu pagrįstą navigacinę sistemą, privalome aprašyti matematinį modelį. Objekto buvimo koordinatė paskaičiuojama naudojant parametrus: d – žingsnio ilgis, ψ_i – sukimosi kampas:

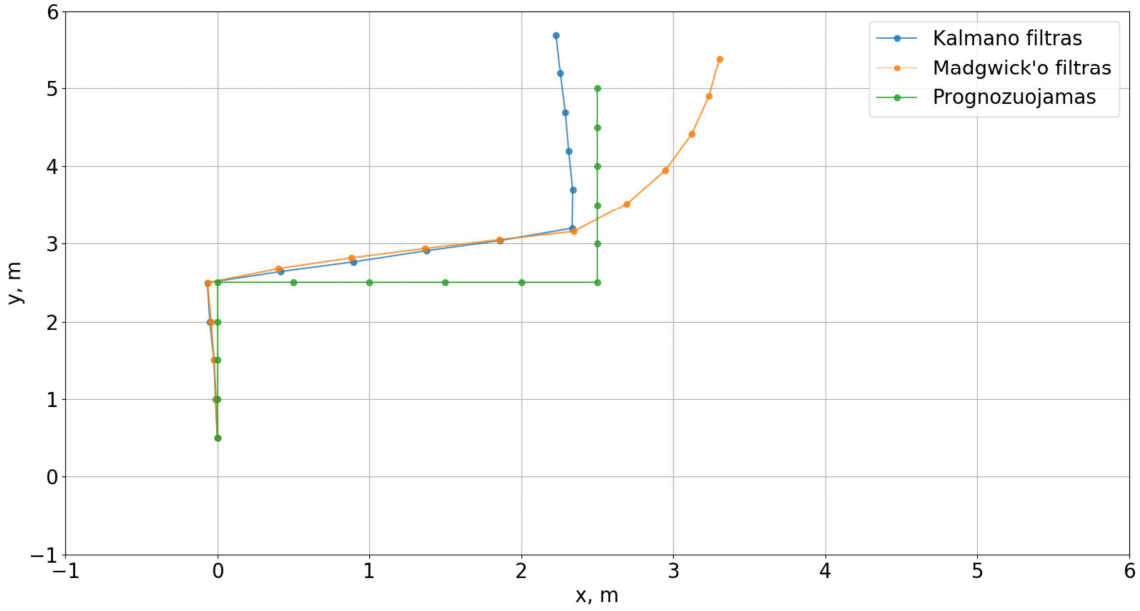
$$\psi_i^{'} = \frac{\pi}{2} - \psi_i, \tag{3.5}$$

$$x_i = x_{i-1} + dcos(\psi_i^{'}), \tag{3.6}$$

$$y_i = y_{i-1} + dsin(\psi_i^{'}). \tag{3.7}$$

Įterptinėje sistemoje įgyvendintas žingsnių aptikimo algoritmas ir naudojant formules (3.5), (3.6), (3.8) paskaičiuota objekto buvimo padėtis. Šiuo atveju didžiausią netikslumą į sistemą įneša žingsnio ilgis, kadangi jis gali būti nepastovus. Todėl kiekvieną kartą galime gauti paklaidas, susijusias su žingsnio ilgiu.

Įgyvendintas matematinis modelis, leidžiantis paskaičiuoti objekto padėtį remiantis praeitomis koordinatėmis, žingsnio ilgiu ir pasisukimo kampu. Iliustracijoje (žr. 3.11 pav.) pateiktas dviejų analizuojamų filtrų pritaikymas koordinatės nustatymui, remiantis žingsniamačiu. Duomenys pateikti koordinačių sistemoje. Remiantis pateiktais vaizdiniais duomenimis galime aprašyti, kokia trajektorija ėjome. Vizualiai prastesnius rezultatus gavome naudojant Madgwick'o filtrą, kadangi gauta lėta reakcija į paskutinį posūkį į kairę pusę.



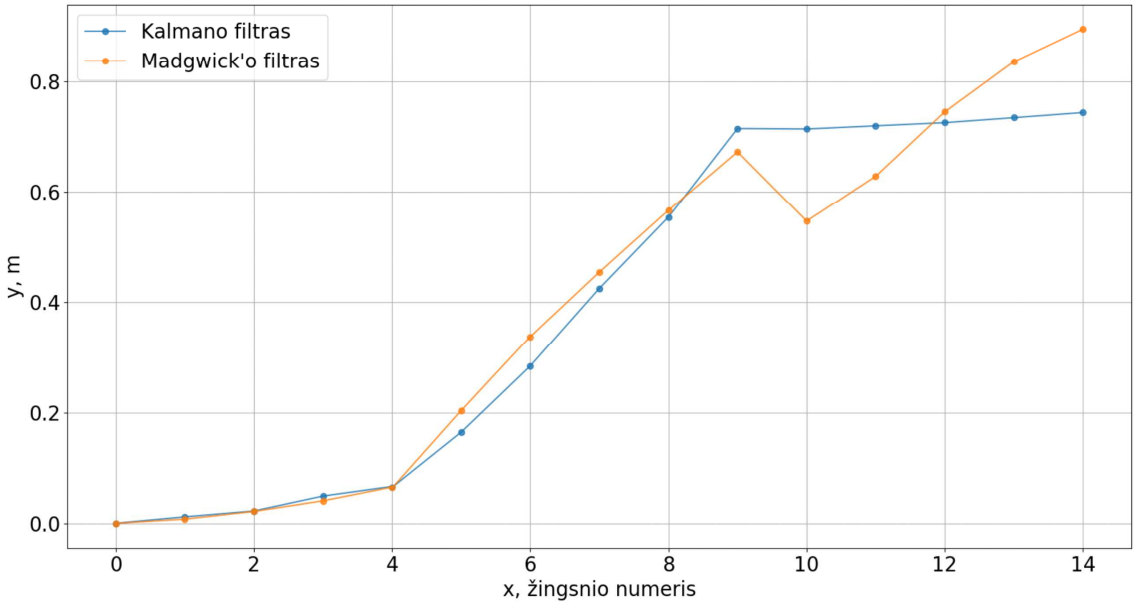
3.11 pav. Žingsniamačiu pagrįstos navigacijos objekto lokalizacijos grafikas

Atlikome skaičiavimus, kuriais norime įvertinti nuokrypio dydį nuo prognozuojamo taško. Skaičiavimai atlikti naudojant vektoriaus ilgio formulę:

$$\vec{v} = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}. \tag{3.8}$$

Iliustracijoje (žr. 3.12 pav.) pateiktas žingsnių taškų nuokrypio ilgis nuo prognozuojamos koordinatės. Nuokrypis nuo prognozuojamos koordinatės gaunamas abiem filtravimo metodais. Didžiausi nuokrypiai gaunami objektui pasisukus dideliu kampu. Didžiausias nuokrypis gaunamas naudojant Madgwick'o filtrą.

Kito bandymo tikslas panaudoti žingsniamačiu pagrįsto objekto padėties navigavimo sistemą integruojant į GNSS navigavimo sistema. GNSS navigavimo sistema turi problemų su objekto padėties ir maršruto sekimu, kai objekto greitis yra mažesnis nei 5 km/h. Tokiu atveju gaunami koordinačių šuoliai į visas puses. Sprendžiant šias navigavimo sistemos problemas, galima integruoti koordinatės koregavimą naudojant inercines matavimo sistemas [22].



3.12 pav. Objekto padėties nuokrypio ilgis nuo prognozuojamos koordinatės

Vienas iš paprasčiausių taikymo būtų yra atnaujinti koordinatę, kai objektas juda. Tai galima nustatyti pagal akselerometro vektoriaus ilgį. Toks funkcionalumas dažniausiai literatūroje minimas, kaip statinės būsenos navigavimas (angl. *Static navigation*) [22]. Būsenos pagreičio įvertinimas paskaičiuojamas formule, kurioje įvedami akselerometro ašių duomenys x,y,z:

$$\vec{v_i} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}. \tag{3.9}$$

Tuomet yra paskaičiuojamas skirtumas tarp vektoriaus ilgio ir prieš tai gauto vektoriaus ilgio:

$$\Delta\vec{v_i} = |\vec{v_i} - \vec{v_{i-1}}|. \tag{3.10}$$

Panaudodami (3.9) ir (3.12) formules, gausime skirtumą tarp vektoriaus ilgio ir pagal tai galėsime nustatyti ar objektas juda. Priešingu atveju net objektui būnant vienoje vietoje GNSS pozicionavimo metu bus gaunami koordinačių šuoliai.

GNSS ir žingsniamačiu pagrįstą navigavimo sistemą integruosime į turto stebėjimo sistemą TMT250. Šiame įrenginyje yra integruotas GNSS imtuvas, leidžiantis nustatyti koordinatę, naudojant įvairių palydovų informaciją. Bandymo metu visa informacija buvo renkama ir saugoma į išorinę įrenginio atmintį, kurią atvaizduosime žemėlapyje. Dėl mažų matmenų sekiklį buvo galima pritaisyti prie žmogaus čiurnos.



3.13 pav. Asmeninis sekiklis

GNSS modulis geba fiksuoti koordinatę 1 Hz dažniu. Gautiems rezultatams atvaizduoti panaudosime *HERE* žemėlapių programos sąsają. Programa yra skirta grafiškai atvaizduoti objekto judėjimo maršrutą, pasaulio koordinačių sistemoje. Bandymo tikslas – realizuoti vieną iš metodų TMT250 programoje ir realiuoju laiku apdoroti duomenis. Kadangi TMT250 mikroprocesorius neturi instrukcijų, skirtų darbui su vektoriais, todėl naudosime Madgwick'o filtrą ir komplenariuoju būdu sujungsime gautus rezultatus.

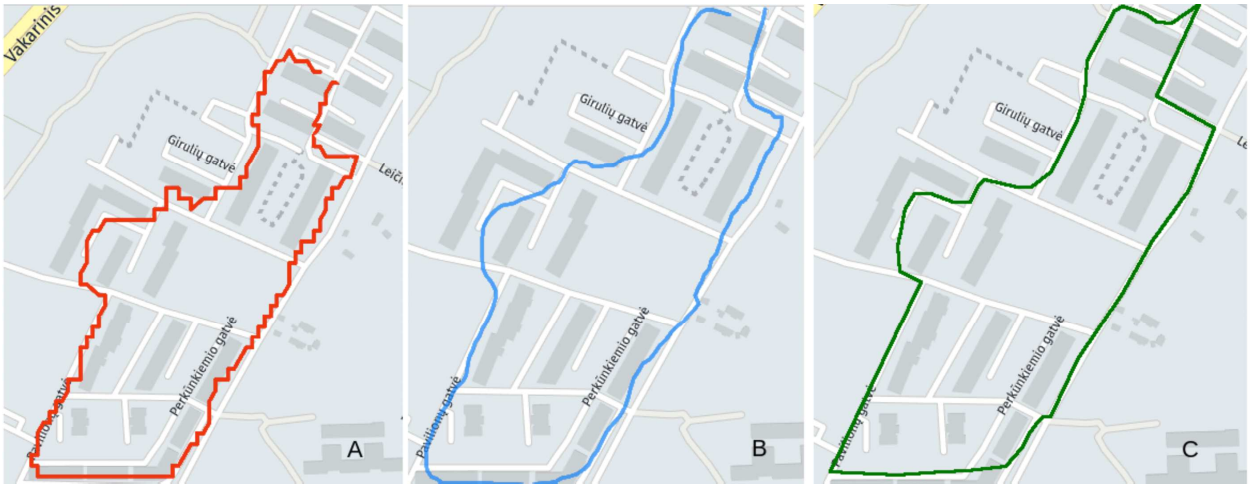
Matematinis modelis skirtas pakeisti nueitą atstumą ir posūkio kampą į pasaulio koordinačių sistemą aprašomas šiomis formulėmis:

$$lat' = arcsin(sin(lat_i)cos(\frac{d}{R}) + cos(lat_i)sin(\frac{d}{R})cos(\psi)), \tag{3.11}$$

$$lon' = arctan(sin(\psi)sin(\frac{d}{R})cos(lat_i), cos(\frac{d}{R}) - sin(lat_i)sin(lat')), \tag{3.12}$$

čia d – atstumas metrais, R – Žemės spindulys, kuris lygus 6378,1 km [33].

Įgyvendinome matematinį modelį ir žingsniamačiu pagrįstą sistemą. Iliustracijoje (žr. 3.14 pav.) pateikėme iš GNSS modulio gautų koordinačių maršrutą, taip pat nufiltruotą ir teorinį.



3.14 pav. Maršruto grafikas

Bandymo metu GNSS atnaujino objekto koordinatę kas 1 s. Iš iliustracijos duomenų matome, kad GNSS duomenų pateiktas maršrutas yra kampuotas ir ne visai atitinka teorinį.

Panaudojus žingsniamačiu pagrįstą filtrą, gauname glotnesnį grafiką. Taip įvyksta, kadangi buvo išfiltruoti pjūklo formos maršruto fragmentai.

3.5. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje apžvelgėme jutiklių filtravimo metodų pritaikymą įterptinėje sistemoje su pasirinktu jutiklių bloku. Gauti rezultatai leidžia spręsti, kad sistemoje, kurioje turime du ar daugiau jutiklių, kurių tikslumas yra koreguojamas vienas nuo kito, komplenariojo filtro savybių neužtenka. Komplenarusis filtras turėtų būti papildytas giroskopo ir magnetometro kalibravimu, kad būtų pasiekti geresni rezultatai. Pažangesni filtrai – Kalmano ir Madgwick'o – parodė geresnius rezultatus.

Įgyvendinome žingsniamačiu pagrįstą sistemą, leidžiančią koreguoti GNSS duomenų tikslumą, pritaikant giroskopo ir akselerometro duomenis. Po atliktų pakeitimų GNSS maršrutas tapo labiau artimas teoriniam. Taip pat šis metodas leistų koreguoti koordinatę, kai GNSS signalas tampa nepasiekiamas arba dėl trukdžių gaunamas staigus koordinatės pokytis. Sprendimą galima papildyti, įvedant GNSS duomenis į išplėstąjį Kalmano filtrą, tačiau tokia sistema gali būti sudėtinga mažo pajėgumo įterptinei sistemai, kadangi į matematinį modelį prisidėtų papildomi trys kintamieji, tai dvi koordinačių reikšmės ir greitis.

Išvados

Pagrindiniai tikslai, kuriuos išsikėlėme tiriamajame darbe buvo atlikti.

1. Sukūrėme tyrimo sistemą, kuri veikia įterptinėje sistemoje, panaudodami akselerometro, giroskopo ir magnetometro jutiklius. Sukonstravome tyrimų stendą, leidžiantį stebėti objekto būsenas keičiant objekto padėtį vienos ar kelių ašių atžvilgiu. Pritaikėme sistemą programinei įrangai, kuri leidžia realiuoju laiku stebėti sistemos perduodamus duomenis ir juos vizualizuoti grafikais ir grafiniu trimačiu objektu.

2. Analizuodami literatūrą išsirinkome tris metodus, kuriuos galime realizuoti įterptinėje sistemoje, siekdami pagerinti akselerometro, giroskopo ir magnetometro išduodamus duomenis. Tyrimui buvo pasirinktas komplenarusis, išplėstasis Kalmano ir Madgwick'o filtrai.

3. Identifikavome pagrindinius jutiklių trūkumus. Įvardijome kiekvieno jutiklio trūkumus atskirai ir pateikėme rekomendacijas trūkumams išspręsti. Praktiškai įsitikinome šių problemų egzistavimu panaudodami įterptinę sistemą ir tyrimų stendą. Bandymo metu pateikėme visus gautus rezultatus grafiškai. Labiausiai išryškėjo giroskopo savaiminio sukimosi problema, kuri daro didelę įtaką siekiant lengviau manipuliuoti jutiklių pateikiamais duomenimis.

4. Įterptinėje sistemoje realizavome komplenarųjį, išplėstąjį Kalmano ir Madgwick'o filtrus. Atlikome tyrimus, kuriais siekėme nustatyti, ar metodai yra pajėgūs išspręsti identifikuotas jutiklių problemas. Realizavome komplenarųjį filtrą panaudodami skirtingus svorio koeficientus sujungdami akselerometro, giroskopo ir magnetometro duomenis. Tyrimo metu pasirinkome keturias vertes, kai akselerometro ir magenetometro duomenys sudarė 5 %, 10 %, 20 % ir 40 % svorio koeficientus. Geriausi rezultatai gauti, kai svorio koeficientas yra 5 %, tačiau filtras neišsprendė savaiminio giroskopo sukimosi problemos. Sistemoje įgyvendinome kvarternionais pagrįstą išplėstąjį Kalmano filtrą. Filtras išsprendė jutiklių problemas ir turėjo greitą reakciją į objekto būsenos pasikeitimus. Panašūs rezultatai gauti naudojant Madgwick'o filtrą, tačiau išryškėjo problema, kad sistema lėtai reaguoja į būsenos pasikeitimus. Filtras pasiekė geriausius rezultatus, kai tyrinėjome, kuris metodas pateikia tiksliausius duomenis po ilgo laiko, kai objektas nejudėjo.

5. Atlikome metodų vykdymo spartos analizę, kurioje išryškėjo, kad išplėstasis Kalmano filtras turi ilgiausią vykdymo trukmę dėl didelės gausos matematinių operacijų ir didelės priklausomybės nuo didelio kiekio parametrų, kurių skaičius mūsų tyrimo atveju siekė 13 skirtingų verčių. Dėl ilgos vykdymo trukmės šis sprendimas nėra tinkamas mažo pajėgumo įterptinei sistemai. Madgwick'o filtras pasiekė optimalų vykdymo spartos rezultatą, todėl šį metodą galima laikyti taikytinu įterptinėje sistemoje.

6. Įgyvendinome žingsniamačiu pagrįstą navigacijos sistemą, siekdami parodyti anksčiau įgyvendintų filtravimo sprendimų poreikį. Įvertinome galimybę realizuoti sistemą prisegtą, prie riešo, tačiau dėl per didelių *Yaw* kampo pokyčių, tokia sistema būtų labai netiksli. Įgyvendinę sistemą pastebėjome, kad Kalmano filtras yra labiau tinkamas tokio pobūdžio sistemai dėl galimybės greitai reaguoti į objekto kampo pasikeitimus. Madgwick'o filtras patvirtino prieš tai gautus rezultatus, kuriais nesugeba staigiai reaguoti į pokyčius, todėl labai dinaminėje sistemoje šis filtras nėra tinkamas tokio pobūdžio navigavimo sistemai, kaip pagrindinis šaltinis. Savo sistemą papildėme GNSS koordinačių koregavimu panaudodami Madgwick'o filtrą. Gauti rezultatai parodė, kad sprendimas gali būti tinkamas koreguoti GNSS koordinates, gautas maršrutas tapo labiau tiesinis ir pašalino nedidelius koordinačių šuolius.



Literatūra

1. LUKAŠEK, M.; VYCHODILOVA, M. (2015). Accelerometry in sport, *Journal of Human Sport and Exercise*, 11.

2. RUOYU, Z. (2016). A Drift Eliminated Attitude and Position Estimation Algorithm in 3D [interaktyvus]. University of Vermont [žiūrėta 2019 m. gruodžio 3 d.]. Prieiga per internetą:<https://scholarworks.uvm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1449&context=graddis>.

3. MATEJ, A. (2008). MEMS accelerometers [interaktyvus]. University of Ljubljana [žiūrėta 2020 m. sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007_2008/MEMS_accelerometers-koncna.pdf>.

4. WELSH. G.; BISHOP.G. (2006). An Introduction to the Kalman Filter, *Proc. Siggraph Course*, 8.

5. BORENSTEIN, J.; OJEDA, L. (2009). Heuristic reduction of gyro drift in gyro-based vehicle tracking, *Int. J. of Vehicle Autonomous Systems Mechanical Engineering*, 78–98.

6. NETO, P.; PIRES J. (2013). 3-D position estimation from inertial sensing: minimizing the error from the process of double integration of accelerations, *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna*, 4026–4031.

7. BISTROVS, V.; KLUGA, A. (2012). Adaptive extended Kalman filter for aided inertial navigation system, *Electronics and Electrical Engineering* 122(6), 37–40.

8. LIGORIO, G.; SABATINI, A. (2013). Extended Kalman Filter-Based Methods for Pose Estimation Using Visual, Inertial and Magnetic Sensors: Comparative Analysis and Performance Evaluation, *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19–41.

9. JULIER, J.; SIMON, J.; UHLMAN, J. (2002). A General Method of Approximating Nonlinear Transformations of Probability Distributions, *IEEE Transactions on Automatic Control* 47(8),1406–1409.

10. WOODMAN, O.; HARLE, R. (2008). Pedestrian Localisation for Indoor Environments, *UbiComp 2008 - Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous Computing*, 114–123.

11. MADGWICK, S. (2010). *An efficient orientation filter for intertial and inertial/magnetic sensor arrays.* [žiūrėta 2020 m. gegužės 19 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/267197884_An_efficient_orientation_filter_for_inertial_and_inertialmagnetic_sensor_arrays>.

12. FORONDA L. (2009). *Automotive Events Detectionusing MEMS Accelerometers.* [žiūrėta 2020 m. balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org/e976/e97057fe09e9dc1062e5eae56c750348e13f.pdf?_ga=2.30900479.1980276868.1589120403-1654095055.1586709918>

13. ORIENTUS | ADVANCED NAVIGATION [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 m. balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.advancednavigation.com/product/orientus>

14. MUSA, P.; CHRISTIE, A. (2016). An Implementation of Direction Cosine Matrix in Rocket Payload Dynamics Attitude Monitoring, *2016 International Conference on Informatics and Computing (ICIC), Mataram*, 271–276.

15. OOSTENDORP, H.; DIGGELEN, J. (2020). Human-Media Interaction. [žiūrėta 2020 gegužės 10 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/46720588_Human-Media_Interaction/citation/download>.

16. SHUTONG, L.; GAO, Y.; MENG, G. (2019). Accelerometer-Based Gyroscope Drift Compensation Approach in a Dual-Axial Stabilization Platform, *Electronics*, 8, 594.

17. AL-FAHOUM, ABADIR, M. (2018). Design of a Modified Madgwick Filter for Quaternion-Based Orientation Estimation Using AHRS, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 10(3): 174–186.

18. CAROSELLI, A.; BAGALA, F. (2013). Quasi-Real Time Estimation of Angular Kinematics Using Single-Axis Accelerometers, *Sensors (Basel, Switzerland)*, 13(1), 918-37.

19. SIMONE, L.; BURNHAM, K. (2018). Comparison of attitude and heading reference systems using foot mounted MIMU sensor data: basic, Madgwick, and Mahony, *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2018*, 644–650.

20. CIRILLO, P.; CIRILLO, A.; DE MARIA, G. (2016). A comparison of multisensor attitude estimation algorithms, *Multisensor Attitude Estimation: Fundamental Concepts and Applications*, 529–539.

21. SHAFIQ, M. (2014). *GNSS/INS Integration in Urban Areas.* [žiūrėta 2020 gegužės 13 d.]. Prieiga per internetą <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2370962/726195_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

22. MUSHFIQUL, A.; LOPEZ, G. (2016). INS/GNSS Localization Using 15 State Extended Kalman Filter, *International Conference in Aerospace for Young Scientists*, 1, 252-261.

23. ABYARJOO, F.; BARRETO, A. (2015). Implementing a Sensor Fusion Algorithm for 3D Orientation Detection with Inertial/Magnetic Sensors, *Innovations and Advances in Computing, Informatics, Systems Sciences*, 313.

24. ZHANLIN, D.; QUAN, H. (2013). Analysis and compensation of MEMS gyroscope drift, *Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*, 592-596.

25. YING, L.; GUO, Z. (2019). Modeling of MEMS gyroscope Random Error Based on Kalman Filter, *2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2999-3003.

26. XU, H.; ZENG, C. (2016). Drift compensation of MEMS gyro with kalman filtering algorithm, *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 29, 962-965.

27. SAED, A.; TARAZAGA, P. (2020). A passive energy-based method for footstep impact localization, using an underfloor accelerometer sensor network with Kalman filtering, *Journal of Vibration and Control*, 1, 1072.

28. NIMMI, S.; VINOD, E. (2020). Fractional Order Extended Kalman Filter for Attitude Estimation, *the Advances in Intelligent Systems and Computing*, 940, 823-832.

29. HASAN, M.; HAFIZUR, M. (2020). Smart Phone Based Sensor Fusion by Using Madgwick Filter for 3D Indoor Navigation, *Wireless Personal Communications*. https://doi.org/10.1007/s11277-020-07338-7.

30. MADGWICK, S.; VAIDYANATHAN, A. (2011). Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm, *International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2011, 5975346.

31. LI, X.; WANG, Y. (2019). Evaluation of AHRS algorithms for Foot-Mounted Inertial-based Indoor Navigation Systems. *Open Geosciences*, 11, 1.

32. FENG, K.; LI, J.; ZHANG, X. (2017). A New Quaternion-Based Kalman Filter for Real-Time Attitude Estimation Using the Two-Step Geometrically-Intuitive Correction Algorithm. *Sensors*, 17, 2146.

33. Movable Type Scripts [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 m. balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.

34. An introduction to vectors [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <https://mathinsight.org/vector_introduction>.

35. Rotation Matrix [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <https://mathworld.wolfram.com/RotationMatrix.html>.

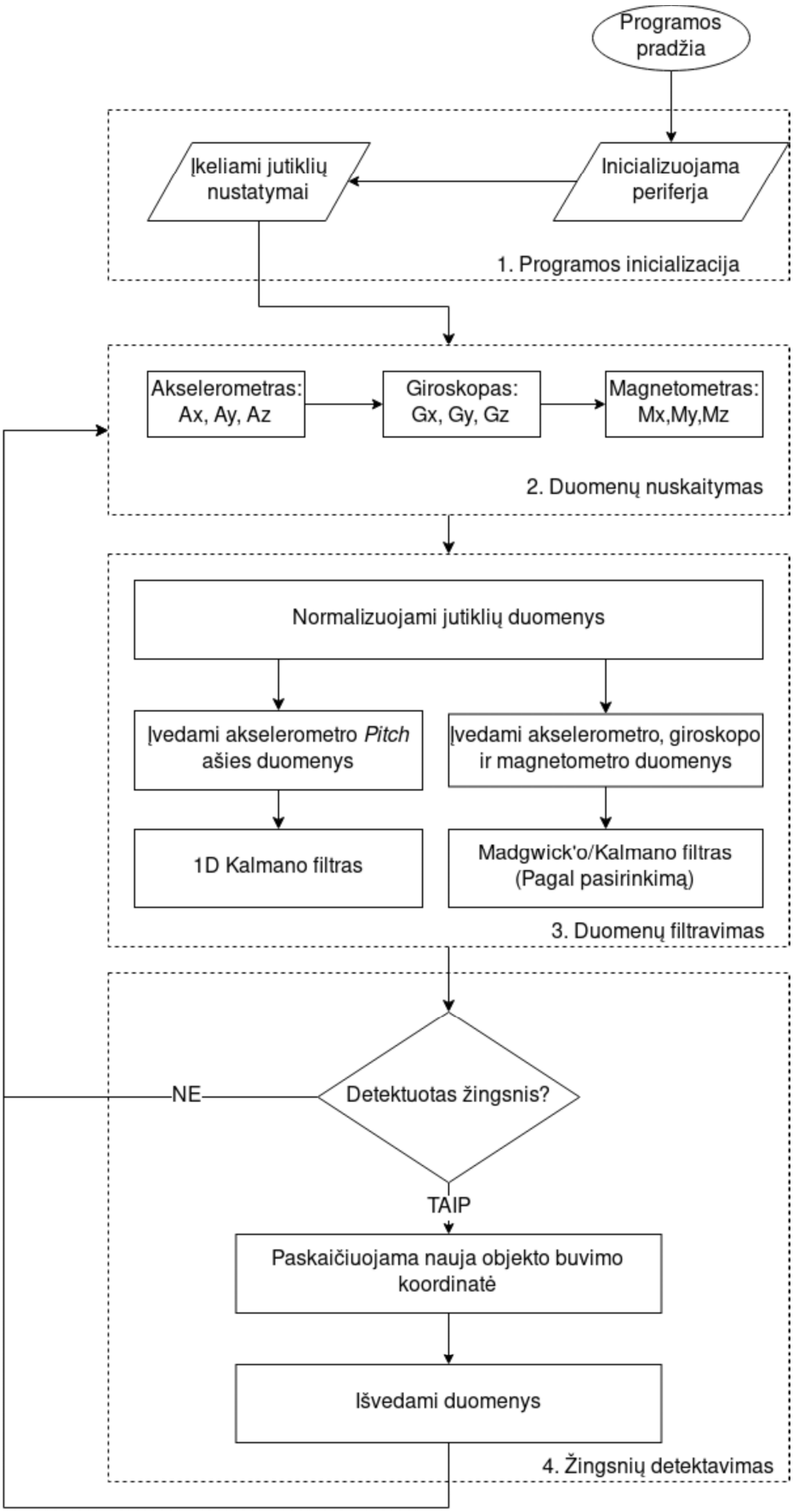
36. Maps API for JavaScript [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <https://developer.here.com/develop/javascript-api>.

37. Euler angles and quaternions [interaktyvus]. [žiūrėta 2020 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <https://docs.unity3d.com/Manual/QuaternionAndEulerRotationsInUnity.html>.

Priedai

A priedas. **Žingsniamačiu pagrįstos navigavimo sistemos programos algoritmas**

B priedas. **Pažyma apie XXIII Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje darbo tema skaitytą pranešimą**


Programos pradžia
Įkeliami jutiklių nustatymai
Inicializuojama periferja
1. Programos inicializacija
Akselerometras: Ax, Ay, Az
Giroskopas: Gx, Gy, Gz
Magnetometras: Mx,My,Mz
2. Duomenų nuskaitymas
Normalizuojami jutiklių duomenys
Įvedami akselerometro Pitch ašies duomenys
Įvedami akselerometro, giroskopo ir magnetometro duomenys
1D Kalmano filtras
Madgwick'o/Kalmano filtras (Pagal pasirinkimą)
3. Duomenų filtravimas
Detektuotas žingsnis?
NE
TAIP
Paskaičiuojama nauja objekto buvimo koordinatė
Išvedami duomenys
4. Žingsnių detektavimas

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

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

ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Mindaugas Macijauskas

Vaizdų technologijų (T111), Sistemų inžinerijos ir kompiuterių technologijų (T120), Signalų technologijų (T121), Aukštų dažnių technologijų (T191) jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą

ELEKTROMECHANINIŲ JUTIKLIŲ DUOMENŲ KOREKCIJOS IR TAIKYMO TYRIMAS

Mokslo komiteto pirmininkas prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas dr. Tomyslav Sledevič

2020 m. balandžio 30 d.
Vilnius