



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATERA

Deimantas Žvirblis

ROBOTŲ TARPUSAVIO ORIENTAVIMO SISTEMOS TYRIMAS
RESEARCH OF THE ROBOT INTER – ORIENTATION SYSTEM

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001

Automatinių sistemų specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULETETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Zita Savickienė
(Vardas, pavardė)
2013-06-10
(Data)

Deimantas Žvirblis

ROBOTŲ TARPUSAVIO ORIENTAVIMO SISTEMOS TYRIMAS
RESEARCH OF THE ROBOT INTER – ORIENTATION SYSTEM

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001

Automatinių sistemų specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

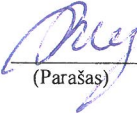
Vadovas

doc. dr. Dainius Udris
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)


(Parašas) 2013-06-03
(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Vaida Buivydienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)


(Parašas) 2013-06-03
(Data)

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

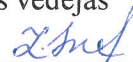
Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001

Automatinių sistemų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas



(Parašas)

Zita Savickienė

(Vardas, pavardė)

2013 02 07

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

2013-02-07 Nr. 02

Vilnius

Studentui Deimantui Žvirbliui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Tarpusavio robotų orientavimo sistemos tyrimas
Research of the Robot Inter – Orientation System

patvirtinta 2012 m. lapkričio 5 d. dekanų potvarkiu Nr. 225el.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2013 m. gegužės 31 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Įvadas.

1. Literatūros apžvalga.

2. Teorinė dalis.

2.1. Robotų padėties erdvėje nustatymo būdai.

2.2. Robotų tarpusavio padėties įvertinimo būdai.

2.3. Magnetinio lauko pokyčių taikymas robotų tarpusavio padėčiai nustatyti.

3. Tiriamoji dalis.

3.1. Funkcinės schemos sudarymas.

3.2. Magnetometro savybių tyrimas.

3.3. Principinės elektrinės schemos sudarymas.

3.4. Magnetinio lauko generatoriaus parinkimas ir jo savybių tyrimas.

3.5. Sistemos eksperimentinis tyrimas.

Išvados ir pasiūlymai.

Literatūros sąrašas.

Vadovas

(Parašas)

dr. doc. Dainius Udris

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

Deimantas Žvirblis

(Vardas, pavardė)

2013-02-07

(Data)

Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas

Elektronikos fakultetas

Automatikos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 3

Data 2013-05-31

Automatikos studijų programos baigiamasis darbas

Pavadinimas **Robotų tarpusavio orientavimo sistemos tyrimas**

Autorius **Deimantas Žvirblis**

Vadovas doc. dr. **Dainius Udris**

Kalba



lietuvių



užsienio

Anotacija

Šiame magistro darbe tiriama robotų tarpusavio orientavimo sistema, kai kryptis nustatoma pagal magnetinio lauko poveikį robotui.

Teorinėje dalyje apžvelgti robotų padėties erdvėje ir tarpusavio padėties nustatymo būdai. Išnagrinėtas magnetinio lauko pokyčių taikymas robotų tarpusavio padėčiai nustatyti, pateikti magnetinio lauko jutiklio paklaidų mažinimo metodai, formulės.

Tiriamąjoje dalyje sudaryta sistemos funkcinė schema. Ištirtos magnetometrų savybės ir parinktas tinkamiausias. Sudaryta sistemos principinė elektrinė schema. Pasirinktos trys magnetinių lauko generatorių – elektromagnetų formos ir atlikti jų magnetinių laukų tyrimai, naudojant specializuotą programą „Maxwell“. Rezultatai pateikti vaizdiniu formatu su magnetinio lauko pasiskirstymu. Atliktas sistemos eksperimentinis tyrimas, pateiktas robotų tarpusavio krypties nustatymo algoritmas, formulės ir metodika. Eksperimentų metu gauti rezultatai pateikti grafiškai.

Atlikus sistemos eksperimentinį tyrimą, pateiktos baigiamojo darbo išvados ir pasiūlymai.

Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, teorinė ir tiriamoji dalys, išvados ir pasiūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 72 p. teksto be priedų, 41 pav., 2 lent., 26 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: robotas, tarpusavio orientavimas, navigacija, magnetinis laukas, magnetometras.

Vilnius Gediminas Technical University

Electronic faculty

Automation department

ISBN ISSN

Copies No. 3

Date 2013-05-31

Automation study programme master thesis.

Title: **Research of the Robot Inter – Orientation System**

Author **Deimantas Žvirblis**

Academic supervisor assoc. doc. dr. **Dainius Udris**

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

Annotation

This Master thesis is a research of the robot inter– orientation system, when the direction is determined by the magnetic field effect on the robot.

Theoretical part is an analysis of robot navigation and robot inter – orientation. Examined the application of the magnetic field change for robots inter – position determination, also magnetic sensor errors reduction methods are presented as well as the equations.

The research part contains of functional and principle electrical scheme designing. Properties of the magnetometers are tested to select the most appropriate. Three different designs were chosen of magnetic field generator (electromagnet) to perform magnetic field studies using specialized software “Maxwell”. Results are presented in graphical form, showing distribution of magnetic fields. Experimental system study is performed also the robot between direction finding algorithm, equations and methods are presented. The experimental results are presented graphically.

The conclusions and recommendations are given at the end of this work.

Structure: introduction, analyze of literature, theoretical and practical parts, conclusions and suggestions, references.

The thesis consists of 72 p. text without appendixes, 41 pictures, 2 tables, 26 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: robot, inter – orientation, navigation, magnetic field, magnetometer.

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

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Deimantas Žvirblis, 20073568

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Automatika, AUSfm-11

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2013 m. gegužės 31 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Robotų tarpusavio orientavimo sistemos tyrimas“ patvirtintas 2011 m. lapkričio 5 d. dekanų potvarkiu Nr. 255el, 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: doc. dr. Dainius Udris. Mano darbo vadovas doc. dr. Dainius Udris.

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

(Parašas)

Deimantas Žvirblis

(Vardas ir pavardė)

Turinys

Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas.....	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga	12
2. Teorinė dalis.....	23
2.1. Robotų padėties erdvėje nustatymo būdai.....	23
2.2. Robotų tarpusavio padėties įvertinimo būdai	32
2.3. Magnetinio lauko pokyčių taikymas robotų tarpusavio padėčiai nustatyti	35
3. Tiriamoji dalis	41
3.1. Funkcinės schemos sudarymas.....	41
3.2. Magnetometrų savybių tyrimas	43
3.3. Principinės elektrinės schemos sudarymas.....	45
3.4. Magnetinio lauko generatoriaus parinkimas ir jo savybių tyrimas	48
3.5. Sistemos eksperimentinis tyrimas	56
Išvados ir pasiūlymai	68
Literatūros sąrašas	70
Priedai	72

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Jutiklių tinklo žemėlapis [3]	13
1.2 pav. Roboto judėjimo trajektorija [3]	13
1.3 pav. Pagrindinis jutiklių išdėliojimas matavimams [5]	15
1.4 pav. Optinio elektroninio enkoderio veikimo principas [6]	16
1.5 pav. Sekimo sistemos blokinė schema [9].....	18
1.6 pav. Mobilaus roboto krypties ir pozicijos nustatymo blokinė schema	20
1.7 pav. Grafinis robotų tarpusavio pozicijos atvaizdavimas [12]	22
1.8 pav. Naudojamo roboto konfigūracija [12]	22
2.1 pav. Inercinės navigacijos blokinė schema.....	25
2.2 pav. Trianguliacijos metodo grafinė interpretacija.....	27
2.3 pav. Žemės magnetinio lauko X, Y ir Z koordinatės	37
2.4 pav. Kompasso padėtis erdvėje lyginant su Žemės horizontalia plokštuma.....	38
2.5 pav. Magnetinio lauko iškraipymas aplinkoje esant feromagnetikui	39
2.6 pav. Magnetometro x ir y vertės nesant iškraipymams.....	39
2.7 pav. Magnetometro x ir y vertės esant iškraipymams.....	39
3.1 pav. Magnetometro HMC5883L funkcinė ir prijungimo principinė elektrinė schema [16]	44
3.2 pav. Maitinimo šaltinio principinė elektrinė schema.....	46
3.3 pav. Inercinio matavimo įrenginio (IMU) principinė elektrinė schema	47
3.4 pav. RF modulio prijungimo principinė elektrinė schema	48
3.5 pav. Elementarus elektromagnetas	49
3.6 pav. Elektromagnetų formos.....	50
3.7 pav. Elektromagnetų skersinių pjūvių brėžiniai	51
3.8 pav. I formos elektromagneto modeliavimo rezultatai.....	52
3.9 pav. U formos elektromagneto modeliavimo rezultatai	53
3.10 pav. W formos elektromagneto modeliavimo rezultatai	54
3.11 pav. Magnetinio lauko generatoriaus principinė elektrinė schema	56
3.12 pav. Bandymų maketas LPC1768	57
3.13 pav. Dviejų robotų tarpusavio orientavimosi sistema	58

3.14 pav. Magnetinio lauko generatorius, sudaryto iš 10 neodiminių magnetų, modeliavimo rezultatai	59
3.15 pav. Magnetometro kalibravimo algoritmas.....	61
3.16 pav. Robotų tarpusavio krypties nustatymo algoritmas	63
3.17 pav. Orientavimosi metu gautų duomenų priklausomybė $Y_K(X_K)$, kai tarpusavio kampas $\theta = 0^\circ$	64
3.18 pav. Orientavimosi metu gautų duomenų X_K , Y_K ir H_{XY} priklausomybės nuo t , kai tarpusavio kampas $\theta = 0^\circ$	65
3.19 pav. Orientavimosi metu gautų duomenų priklausomybė $Y_K(X_K)$, kai tarpusavio kampas $\theta = 90^\circ$	65
3.20 pav. Orientavimosi metu gautų duomenų X_K , Y_K ir H_{XY} priklausomybės nuo t , kai tarpusavio kampas $\theta = 90^\circ$	66
P2.1 pav. Sistemos funkcinė schema.....	73
P3.1 pav. Mikroprocesorinės sistemos principinė elektrinė schema	74
P3.2 pav. Maitinimo šaltinio principinė elektrinė schema	75
P3.3 pav. Inercinio matavimo įrenginio (IMU) principinė elektrinė schema.....	75
P3.4 pav. RF modulio principinė elektrinė schema.....	76
P3.5 pav. Magnetinio lauko generatoriaus principinė elektrinė schema	76

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Magnetometrų savybių palyginimas pagal gamintojus.....	43
2 lentelė. Elektromagnetų magnetinio srauto tankių minimumo ir maksimumo palyginimas	55

Įvadas

Spartus technologijų vystymasis, augimas ir įvairovė skatina atsisakyti žmogaus rankų darbo, pakeičiant autonominiais robotais, įvairiais technologiniais įrengimais. Automatinio valdymo sistemų reikšmė šiuolaikinei visuomenei yra labai didelė. Mes taip priklausome nuo šių sistemų, kad gyvenimas be jų būtų tiesiog neįsivaizduojamas. Gamyklose dažnai naudojami įvairios konstrukcijos, plataus pritaikymo pramoniniai robotai, namuose – autonominiai robotai siurbliai, gatvėse netgi važinėja autonominiai automobiliai.

Nesvarbu, ar tai būtų pramoninis, mobilus ar koks kitoks robotas, viena iš jo pagrindinių užduočių yra nepadaryti žalos žmogui ir aplinkai. Iš čia ir kyla didžiausia robotikos problema – orientavimasis. Robotas, nežinodamas savo koordinačių duotuoju laiko momentu, gali pradėti judėti, atlikti jam pavestas užduotis, ar planuoti tolimesnių veiksmų sekas netinkamai. Todėl reikalingos absoliutinės arba santykinės koordinatės, pagal kurias nustatoma padėtis erdvėje, planuojami tolimesni veiksmai.

Orientavimąsi dar labiau apsunkina tai, kad robotas dažnai neturi pradinių koordinačių, o erdvė, kurioje jis juda, yra dinamiška. Galima orientacija pagal stacionarius objektus, tačiau kiti robotai gali perkelti juos kitur, todėl ir šiuo atveju galima suklysti. Autonominiuose robotuose orientavimosi problema sprendžiama robotui tyrinėjant aplinką, įsimenant erdvę, per laiką atsirandančius aplinkos pokyčius. Naudojami atskaitos taškai, įvedama pradinė informacija, požymiai apie laike nekintančius objektus. Taip pat gali būti įvedami geometriniai, topologiniai erdvės žemėlapiai, arba robotas pats gali juos susidaryti, tyrinėdamas aplinką.

Temos naujumas ir aktualumas. Šiuo metu yra sukurta daugybė robotų, gebančių atlikti jiems paskirtas specifines užduotis, tačiau, iškilus kompleksinėms užduotims, dažnai vienas robotas be patobulinimų negali jų atlikti arba reikalingi keli ir daugiau robotų. Atsiranda nauja robotų orientavimosi problema – tarpusavio robotų orientavimasis.

Kelių robotų veiksmams suderinti darbui kartu, kiekvienas robotas pats turi gebėti orientuotis aplinkoje. Įgyvendinus šią sąlygą tampa žymiai paprasčiau suderinti orientavimąsi tarpusavyje. Robotams dirbant vienoje aplinkoje, pakanka pasidalinti savo koordinatėmis erdvėje. Tai atliekama per tarpinius serverius, į kuriuos skirtingi robotai siunčia savo koordinates, arba tiesiog per ryšio sąsajas perduodama informacija vienas kitam.

Yra sukurta daugybė metodų robotų orientavimuisi aplinkoje spręsti, tačiau tarpusavio orientavimuisi dar tik kuriama. Dažnai pritaikomi būdai skirti vieno roboto orientavimuisi. Bet

kuriuo atveju, tokioms robotų sistemoms keliama dideli tikslumo reikalavimai. Nėra vieningo metodo tinkančio visų tipų robotams, tokie metodai yra nuolat apjungiami, tobulinami, atsižvelgiant į roboto specifines savybes, aplinką, kurioje robotas veikia.

Problema. Robotų tarpusavio orientavimo sistemos nėra plačiai ištirtos. Sukurta daugybė metodų robotų tarpusavio padėčiai įvertinti, tačiau nei vienas iš jų nenaudoja magnetinio lauko pokyčių ir nėra lengvai pritaikomas skirtinguose robotuose.

Tyrimo objektas – robotų tarpusavio orientavimui naudojamas magnetinis laukas.

Darbo tikslas – pritaikant magnetinio lauko jutiklius – magnetometrus, atskirti generuojamą magnetinį lauką nuo Žemės kuriamo ir taip nustatyti antrojo roboto buvimo kryptį pirmojo atžvilgiu.

Siekiant įgyvendinti tiriamojo darbo tikslą, buvo iškelti šie **darbo uždaviniai**:

1. Apžvelgti robotų padėties erdvėje ir tarpusavio padėties įvertinimo būdus.
2. Išnagrinėti magnetinio lauko pokyčių taikymą robotų tarpusavio padėčiai nustatyti.
3. Sudaryti sistemos funkcinę schemą.
4. Ištirti magnetometrų savybes.
5. Sudaryti principinę elektrinę schemą.
6. Parinkti magnetinio lauko generatorių ir ištirti jo parametrus.
7. Ištirti sudarytą eksperimentinę sistemą.

Darbo metodai: mokslinės literatūros apžvalga, robotų padėties erdvėje nustatymo ir tarpusavio padėties įvertinimo būdų analizė, magnetinio lauko generatoriaus modeliavimas su programiniu paketu „Maxwell“, eksperimentinė analizė.

1. Literatūros apžvalga

Didžioji dalis literatūros leidinių, knygų, robotų tarpusavio orientavimosi sistemų tematika, tik pamini galimus metodus, tačiau jų nenagrinėja. Kiek plačiau robotų orientavimasis, pozicionavimas aprašomas moksliniuose straipsniuose, publikacijose kurių medžiaga ir bus remiamasi šiame darbe.

Straipsnyje „*Mobile Robot Positioning – Sensors and Techniques*“, išleistame žurnale „*Robotic Systems*“, autoriai Johannas Borensteinas, H. R. Everettas, Liqiangas Fengas ir Davidas Wehes, aprašo mobilių robotų pozicionavimo metodus, pateikia 7 pozicionavimo kategorijas. Nei viena iš pateiktų kategorijų nesuteikia galimybės nustatyti tikslios pozicijos. Todėl autoriai suskirsto šias kategorijas į dvi grupes, kurias jungiant pasiekiamas didesnis tikslumas [1].

Nuvažiuto atstumo ir greičio matavimas yra plačiausiai naudojamas mobiliuose robotuose: suteikia trumpalaikį tikslumą, yra nebrangus, pasižymi dideliu nuskaitymo greičiu. Tačiau fundamentinė šio metodo esmė yra judesio integravimas per laiką, kuris neišvengiamai veda prie didėjančios paklaidos. Atsiranda orientavimo netikslumai, kurie proporcingai didėja priklausomai nuo nuvažiuto atstumo. Nekreipdami dėmesio į šiuos netikslumus, dauguma tyrėjų pripažįsta, kad nuvažiuto atstumo ir greičio matavimo metodas yra svarbi robotų navigacijos sistemos dalis ir navigacijos problema būtų sumažinta, jeigu būtų pasiektas didesnis matavimų tikslumas.

Ratų pasisukimas yra vienas iš svarbesnių navigacijos parametrų (x , y ir θ). Todėl reikalingas jutiklis, kuris matuotų tokį pasisukimą. Dažniausiai naudojami magnetiniai kompasai, kurie matuoja Žemės magnetinį lauką. Pastarasis naudojamas kaip atskaitos taškas pasisukimo kampui apskaičiuoti.

Signalinių švyturių sistemos yra tiek pat paplitusios bendrojoje laivų ir lėktuvų navigacijoje, kaip ir mobiliųjų robotų. Šis metodas yra patikimas, tikslus ir naudojantis nedaug resursų. Dėl to gaunamas didelis nuskaitymo dažnis ir aukštas patikimumas, tačiau išauga įdiegimo ir priežiūros kaina. Reikalingas tikslus švyturių sumontavimas, kad būtų pasiektas aukštas pozicijos nustatymo tikslumas.

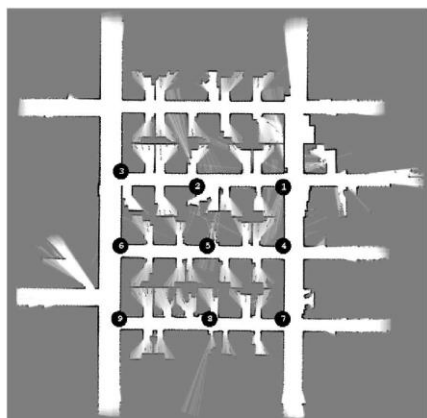
Stacionarūs orientyrai gali būti atpažinti naudojant jutiklių duomenis. Orientyro kriterijai gali būti forma, spalva ir pan. Pagrindinis reikalavimas, kad robotui būtų paprasta išskirti formą ar spalvą iš aplinkos. Pozicijos nustatymo naudojant žemėlapius metodo esmė – robotas naudodamas turimus

jutiklius sukuria vietinį aplinkos žemėlapi. Šis žemėlapis yra lyginamas su duotuoju. Jei jie sutampa, robotas apskaičiuoja buvimo vietą žemėlapyje ir nustato judėjimo kryptį.

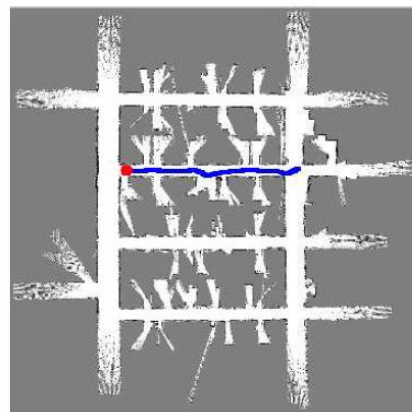
Šio straipsnio pabaigoje pateikiamos išvados ir lentelė su metodų palyginimu [1].

Surachaius Panichas ir Nitisa Afzulpukaras straipsnyje „*Mobile Robot Integrated with Gyroscope by Using IKF*“, publikuotame žurnale „International Journal of Advanced Robotics Systems“, aprašomo roboto pozicijos nustatymo būdas, kai naudojama kamera ir kompasas, matavimams patikslinti – nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo kartu su inerciniu matavimu naudojant giroskopą. Šiame metode naudojamas Kalmano filtras, kuris įvertina pozicijos ir orientavimosi paklaidas ir grąžina atgal į nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo sistemą, kartu patikslindamas kai kuriuos parametrus ir giroskopo nukrypimus. Modeliavimo ir eksperimentiniuose rezultatuose lyginami du metodai: nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimas, naudojant kartu su giroskopu metodas, su vaizdo kameros panaudojimu ir kompasu metodu. [2]

Straipsnyje „*Mobile Robot Navigation using Sensor Network*“, autoriai Maximas A. Batalinas, Gauravas S. Sukhatme ir Myronas Hattigas, kuris buvo pristatytas IEEE tarptautinėje konferencijoje „*Robotics and Automation*“, pateikia jutiklių tinklo algoritmą roboto navigacijai. Jutiklių mazgai veikia kaip kelrodžiai robotui, pagal kuriuos turėdamas patalpos žemėlapi robotas nustato savo poziciją jame. Pats robotas neapskaičiuoja krypties, o tik prisijungia prie jutiklių tinklo ir nustato prie kurio jutiklio yra prisijungta. Autorių siūlomas algoritmas pagrįstas radijo signalo stiprumo matavimu, taip nusprendžiant, kuris jutiklis yra arčiausiai [3].



1.1 pav. Jutiklių tinklo žemėlapis [3]

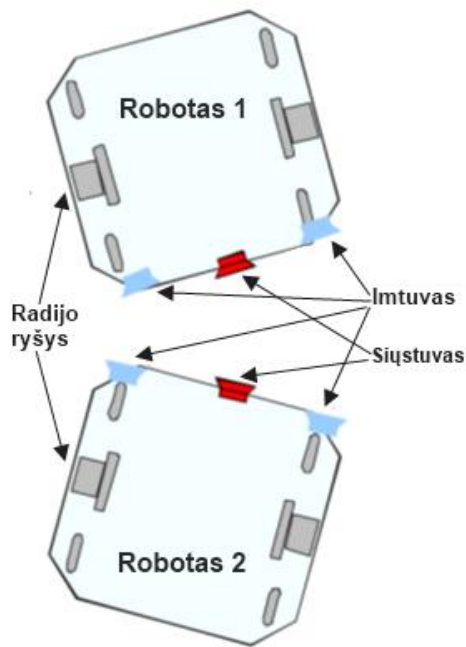


1.2 pav. Roboto judėjimo trajektorija [3]

Daugybė atliktų eksperimentų su robotu ir jutiklių tinklu patvirtino šio metodo patikimumą. Šiuose eksperimentuose nebuvo naudojami jokie kiti metodai: pasaulinė vietos nustatymo sistema, inercinė navigacija ar magnetiniai kompasai [3].

Janas Dyresas Bjerknese, Wenguo Li, Alanas FT Winfieldas ir Chrisas Melhuishas straipsnyje *“Low Cost Ultrasonic Positioning System for Mobile Robots”* aprašo nedidelės kainos 2D ir 3D (dviejų ir trijų dimensijų) roboto pozicijos nustatymo sistema. Naudojami tiek ultragarso, tiek radijo dažnio signalai, su kuriais pozicijos nustatymo tikslumas yra geresnis nei 1%. Straipsnyje pateikiamas sprendimas, kaip realiu laiku nustatyti keletos robotų pozicijas 2D ir 3D aplinkoje, naudojant ultragarso signalus, kartu su radijo dažnio sinchronizacija. Nėra reikalaujama turėti bendrą robotų serverį į kurį atskiri robotai siųstų savo duomenis. Kiekvienas robotas pats nustato savo poziciją autonomiškai. Yra pateikiami matematiniai skaičiavimai, naudojamos elektronikos aprašymas, detalizuotas 2D ir 3D algoritmas. Pasak šio straipsnio autorių, pagrindinis metodo privalumas, kad robotui pačiam nustatyti, apskaičiuoti savo buvimo vietą nereikalingas galingas skaičiavimo kompiuteris. Tai pat apskaičiuoti duomenys naudojami pačiam robotui valdyti ir jų nereikia atsisiųsti per radijo ryšį [4].

ANS 9-ojoje tarptautinėje konferencijoje *„Robotics and Remotes Systems“*, Vašingtone, Shragas Shovalis ir Johannas Borensteinas pristatė pranešimą *„Measuring The Relative Position And Orientation Between Two Mobile Robots With Binaural Sonar“*. Pranešime pristatomas pozicijos nustatymo ir orientavimosi metodas tarp dviejų robotų naudojant dvigubą ultragarsinio jutiklio sistemą (angl. *dual binaural ultrasonic sensor system*). Kiekvienas robotas aprūpintas ultragarsinio signalo siųstuvu, kuris siunčia signalą dviem imtuvams, pritaisytiems ant kito roboto. Yra numatyta, kad abu robotai gali komunikuoti per infraraudonųjų spindulių radijo ryšį. Imtuvas pamatuoja atstumą iki siųstuvo ant kito roboto, ir sudaromas geometrinis modelis pagal visus imtuvų duomenis [5].

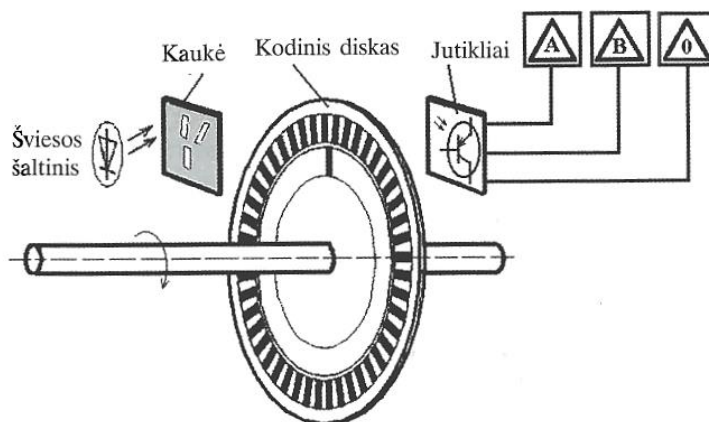


1.3 pav. Pagrindinis jutiklių išdėliojimas matavimams [5]

Algirdas Smilgevičius, knygoje „*Automatikos mikromašinos*“, aprašo automatikos mikromašinas, jų veikimo principus, savybes. Dešimtajame šios knygos skyriuje aprašomi sukimosi greičio ir padėties enkoderiai, kurie yra plačiai naudojami robotų navigacijoje – nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimuose [6].

Autorius aprašo enkoderių paskirtį, kokiais tikslais gali būti naudojami. Tiksliai sukimosi greičio, kelio ir erdvės padėties matavimui valdymo sistemose naudojami enkoderiai. Enkoderis yra analoginis arba skaitmeninis keitiklis, kurio išėjime gaunamas analoginis signalas arba tam tikras impulsų skaičius, proporcingas sukimosi greičio arba posūkio kampui. Enkoderis yra mechanikos ir elektronikos jungiamasis elementas. Pagal enkoderio informaciją variklis gali sukis nustatytu greičiu, jo velenas gali užimti tam tikrą tikslią padėtį. [6]

Pasak knygos autoriaus, enkoderiai skirstomi į sukiuosius ir tiesinius, o jų išėjimo signalai gali būti analoginiai arba skaitmeniniai. Labiausiai paplitę optiniai enkoderiai: prieauginiai ir absoliutieji. Prieauginis enkoderis – optinis elektroninis matavimo keitiklis, kurio veleno sukimosi greičio arba kampinės padėties vertė gaunama sumuojant matavimo prieaugius. Absoliutieji enkoderiai – optiniai elektroniniai matavimo keitikliai, kuriuose veleno kampinės padėties vertė gaunama tiesioginio nuskaitymo būdu nesumuojant pavienių matavimo prieaugių.



1.4 pav. Optinio elektroninio enkoderio veikimo principas [6]

Tai pat knygoje nurodomi enkoderių pagrindiniai parametrai, pagal kuriuos iš katalogų turėtų būti parenkami enkoderiai: matavimo įtampa, kodinio disko brūkšnių skaičius, išėjimo signalai, kodo signalai, leidžiamas apsisukimų skaičius, didžiausias nuskaitymo dažnis ir kiti [6].

Povilas Pukys, Jonas Stonys ir Juozapas Arvydas Virbalas parašė vadovėlį „*Teorinė elektrotechnika*“, skirtą aukštųjų technikos mokyklų studentams [7].

Pirmuose penkiuose skyriuose išnagrinėtas nusistovėjęs sutelktųjų parametrų tiesinėse nuolatinės srovės režimas, sinusinėse ir periodinėse nesinusinėse grandinėse bei pateikti tokių grandinių analizės metodai. Šeštame skyriuje pateikti pagrindiniai pereinamųjų procesų tiesinėse elektros grandinėse analizės metodai. Septintame skyriuje – pagrindiniai keturpolių teorijos aspektai. Aštuntame ir dešimtame skyriuose studentai supažindinami su netiesinių nuolatinės bei kintamosios srovės grandinių ir magnetinių grandinių analizės pradmenimis. Devintajame skyriuje aprašomi pagrindiniai magnetinio lauko dydžiai: magnetinis laukas, magnetinio srauto tankis, magnetinio lauko stipris, magnetinis srautas. Tai pat feromagnetinių medžiagų charakteristikos, jų savybės. Feromagnetinės medžiagos skirstomos į minkštamagnetes ir kietamagnetes. Pateikiamos svarbiausios magnetinių grandinių sąvokos, magnetinių grandinių dėsniai: Ampero visuminės srovės dėsnis, Omo, Kirchhoffo dėsniai magnetinėms grandinėms [7].

Autoriai Héberis Sobreira, A. Paulosas Moreira ir Joãosas Sena Estevesas 2010 metais publikavo straipsnį „*Characterization of Position and Orientation Measurement Uncertainties in a Low-Cost Mobile Platform*“, kuriame pateikė metodą charakterizuojantį pozicijos ir orientavimosi

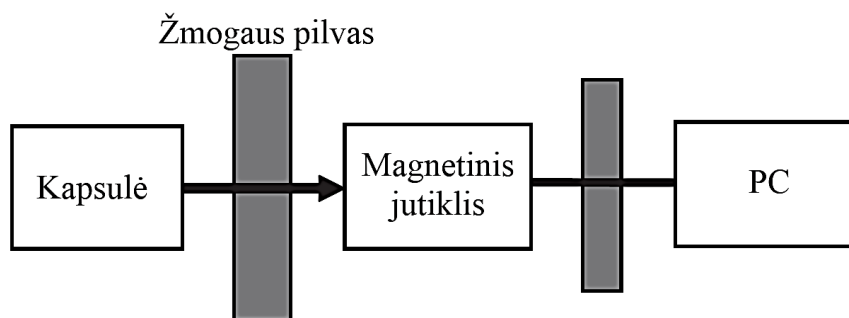
matavimų neapibrėžtumą. Šis metodas nereikalauja didelių skaičiavimo resursų, todėl gali būti realizuotas mažos skaičiuojamosios gebos mikrovaldikliuose. Pasak autorių, kiekviena lokalizavimo sistema turi gebėti charakterizuoti apskaičiuotų pozicijos ir orientavimosi verčių neapibrėžtumus (paklaidas). Kitaip šie skaičiavimai yra beverčiai. Šis darbas buvo pradėtas remiantis J. S. Esteves' so darbu, kurio pateikto metodo esmė – kiekvienas pozicijos orientavimosi matavimas turi ribotą paklaidą su žinoma maksimalia verte.

Šis metodas buvo panaudotas ir išbandytas naudojant mobilų robotą „CleverRob“. Šio roboto padėties nustatymas susideda iš pozicijos apskaičiavimo (x_r , y_r) ir pasisukimo kampo (θ_r). Pozicijos apskaičiavimui, roboto lokalizacijos sistemoje naudojami du signaliniai švyturiai (angl. *active beacons*) pagal kuriuos apskaičiuojami du kampai: $P1$ (dabartinis) ir $P2$ (prieš tai buvęs). Signaliniai švyturiai sudaryti iš infraraudonųjų spindulių siųstuvo/imtuvo. Autorių teigimu šiame robote panaudota lokalizavimo sistema turi dideles paklaidas. Jų pateiktas metodas neatlieka sudėtingų matematinių skaičiavimų ir yra nesunkiai įgyvendinamas. Iš pateiktų autorių rezultatų matyti, kad paklaidos yra daug mažesnės ir metodas sėkmingai veikia pasirinktame robote [8].

Autoriai Suedas Mahfuzulas Azizas, Milosas Grcicas ir Tharshanas Vaithianathanas publikavo straipsnį tema „*A Real-Time Tracking System for an Endoscopic Capsule using Multiple Magnetic Sensor*“. Šiame straipsnyje pristatoma diagnostinės kapsulės sukuriančios magnetinį lauką sekimo sistema realiu laiku. Tokia sistema panaudojama virškinimo trakto, kurį gastroenterologai apibūdina kaip „juodąją dėžę“, tyrimams medicinoje. Endoskopinė kapsulė gali rinkti virškinamojo trakto diagnostinius duomenis ten kur tradiciniais metodais to padaryti nepavyksta. Iš gautų diagnostinių duomenų gastroenterologai gali tiksliau nustatyti pakitimus virškinamajame trakte, atsiradusius dėl ligų. Tokios endoskopinės kapsulės panaudojimui reikalinga sekimo sistema, kuri realiu laiku nustatytų kapsulės buvimo vietą kai ji keliauja traktu. Autoriai pateikia informaciją apie tokios sekimo sistemos projektavimą ir įgyvendinimą naudojant kelis magnetinius jutiklius. Aprašo naudojamą elektroniką magnetinio lauko matavimui, sekimo algoritmus paremtus empiriškai sudarytais modeliais ir eksperimentiniais rezultatais. Remiantis rezultatais, ši sistema yra tinkama naudojimui [9].

Pirmajame skyriuje apžvelgiamos kitų tyrėjų atliekamų panašių tyrimų publikacijos, nurodomos jų teigiamos ir neigiamos pusės lyginant su pateikta autorių. Antrajame skyriuje pateikiama autorių siūlomos sekimo sistemos blokinė schema (5 pav.). Magnetis yra įmontuotas

endoskopinėje kapsulėje, kurią praryja pacientas. Trys magnetiniai jutikliai yra pritvirtinami prie kūno magneto magnetinio lauko aptikimui. Jutikliai siunčia magnetinio lauko (magnetinio srauto tankis B) vertes į kompiuterį (PC). Remiantis gautais duomenimis kompiuterinė programa apskaičiuoja endoskopinės kapsulės buvimo vietą ir atvaizduoja ją monitoriuje.



1.5 pav. Sekimo sistemos blokinė schema [9]

Trečiajame skyriuje pateikiamas naudojamų komponentų ir elektronikos aprašymas su pagrindimais, principinės schemos. Magnetinio lauko šaltiniu autoriai pasirenka neodiminį magnetą ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Privalumas – kapsulėje nereikalingas joks papildomas energijos šaltinis, kuris būtų reikalingas panaudojus rites. Tai pat toks sprendimas yra saugesnis žmogui. Magneto liekamosios magnetinės indukcijos dydis priklauso nuo jo dydžio. Kadangi šią kapsulę turi praryti žmogus, autoriai parenka 10 mm. skersmens ir aukščio, cilindro formos magnetą. Magnetinio lauko jutikliu pasirenkamas Honeywell firmos HMC2003 jutiklis. Šis jutiklis turi tris analoginius išėjimus kiekvienai ašiai (x, y, z), kurių išėjimo įtampas 0 – 5 V, o matuojama magnetinio srauto tankis nuo – 250 μT iki +200 μT , jautrumas 40 nT. Tai pat parenkami kiti reikalingi elektronikos komponentai.

Ketvirtajame skyriuje pateikiamas programinės įrangos aprašymas, į kurį įeina magnetinių jutiklių duomenų nuskaitymas, sekimo sistemos algoritmo aprašymas, atstumo iki magneto nustatymo metodika ir vizualizacija kompiuteryje. Penktajame – eksperimentų rezultatai: paklaidų tyrimas, realaus ir apskaičiuoto atstumo skirtumo tyrimas, sistemos tyrimas naudojant kelis (skirtingus, vienodus) magnetinio lauko jutiklius, tyrimas keičiant terpę kurioje patalpinta kapsulė su magnetu (vanduo ir $\text{NaCl}+\text{KCl}$ skystis). Galiausiai, šeštajame skyriuje pateikiamos išvados.

Autoriai nurodo, kad atsižvelgiant į eksperimentinių tyrimų rezultatus, sistema geba sekti magnetą su santykinai maža paklaida. Gaunamas paklaidas planuojama sumažinti tobulinant

empirinį sistemos modelį ir algoritmą. Sekimo sistemos tikslumas taip pat bus pagerintas panaudojus didesnės skiriamosios gebos analoginius skaitmeninius keitiklius [9].

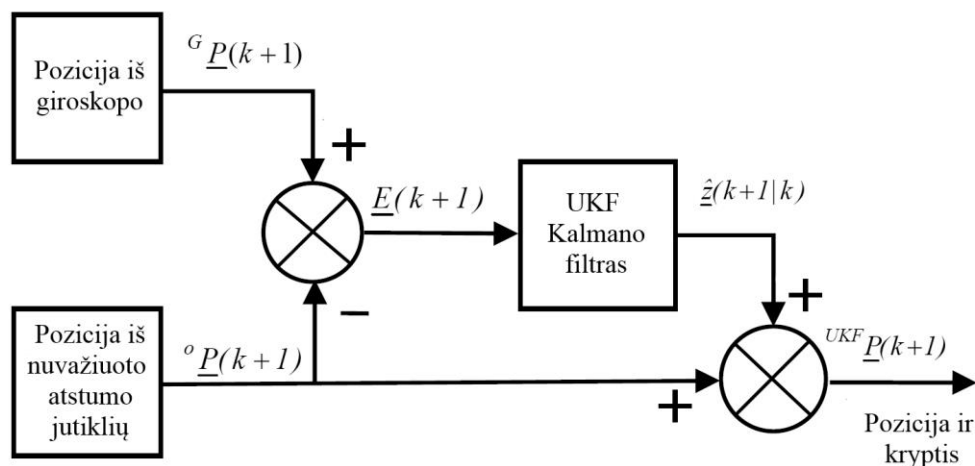
Stasys Mickūnas 2004 metais išleistoje knygoje „*Elektromagnetiniai laukai ir bangos*“ aprašo pagrindinius elektromagnetinio lauko dėsnius, kurių pagrindas – Maksvelo lygtys. Maksvelo lygčių pagrindu analizuojami statiniai ir stacionarieji laukai, nustatomi pagrindiniai jų dėsniai. Pagrindinė knygos dalis skirta kintamojo elektromagnetinio lauko nagrinėjimui. Čia smulkiai analizuojamas elektromagnetinių bangų spinduliavimas, atspindys, lūžis, difrakcija. Nagrinėjamos nukreiptosios elektromagnetinės bangos bangolaidžiuose bei virpesiai veikimui paaiškinti.

Knygos pabaigoje pateikti bendri įkrautų dalelių judėjimo elektromagnetiniame lauke dėsningumai, reikalingi daugelio elektroninių mikrobangų prietaisų veikimui paaiškinti.

Beveik kiekvieno skyriaus gale pateikti uždavinių sprendimo pavyzdžiai, kuriais siekiama pabrėžti pagrindinius to skyriaus dėsningumus arba išryškinti tokias elektromagnetinio lauko savybes [14].

Autoriai Faroukas Azizis ir Nasseris Houshuangis 2005 metais publikavo straipsnį „*Accurate Mobile Robot Position Determination Using Unscented Kalman Filter*“. Šio darbo tikslas – tiksliai nustatyti mobilaus roboto poziciją ir kryptį integruojant duomenis gautus iš nuvažiuoto atstumo ir inercinių jutiklių. Nuvažiuoto atstumo jutikliai dažnai pasižymi įvairiomis paklaidomis, todėl šių paklaidų sumažinimui panaudotas optinio pluošto giroskopas. Duomenys gauti iš abiejų tipų jutiklių yra integruojami naudojant UKF (angl. *Unscented Kalman Filter*). Pozicija ir kryptis gauta naudojant UKF yra palyginama su rezultatais, kai naudojamas EKF – išplėstasis Kalmano filtras (angl. *Extended Kalman Filter*) [10].

Antrajame straipsnio skyriuje atskirai nagrinėjamas pozicijos nustatymas metodas naudojant nuvažiuoto atstumo jutiklius ir vienos ašies optinio pluošto giroskopą. Pateikiami matematiniai skaičiavimai abiem atvejams. Trečiajame skyriuje abiejuose atvejuose gautos pozicijos duomenys apjungiami panaudojus Kalmano filtrą. Pasak autorių, naudojant UKF nelineinėms problemoms spręsti pasiekiami geresni rezultatai nei su EKF. Paveiksle 6 pav. pateikiama mobilaus roboto pozicijos ir krypties nustatymo blokinė schema, kai naudojamas UKF.



1.6 pav. Mobilaus roboto krypties ir pozicijos nustatymo blokinė schema naudojant UKF [10]

Sudaryto metodo veiksmingumui įsitikinti autoriai atliko du eksperimentinius bandymus, kurių rezultatus pateikia 4-ame skyriuje. Bandymams atlikti panaudotas komerciniam naudojimui paruoštas mobilus robotas *Pioneer 2-Dxe* ir *KVH E-core* giroskopas, kurio tikslumas 0,014 °/s. Iš roboto jutiklių (nuvažiuoto atstumo ir giroskopo) gauti duomenys perduodami į programų paketą „*Matlab*“, kuriame sudaryti UKF ir EKF modeliai.

Pirmasis bandymas susideda iš dviejų dalių:

1. Robotas turi judėti 3 metrus į priekį, sustoti, pasisukti 180° kampu, vėl judėti į priekį 3 metrus ir pasisukti 180° kampu.
2. Robotas pirmame punkte patektu maršrutu turi judėti 15 kartų, tai užtrunka maždaug 13 minučių.

Duomenų patikimumui užtikrinti, abiem atvejais eksperimentas buvo pakartotas 5 kartus. Pirmuoju atveju tikrinamas metodo tikslumas robotui judant trumpu atstumu, antruoju – ilgu. Kaip ir buvo autorių tikėtasi, trumpo maršruto metu nustatyta pozicija ir kryptis tiek naudojant UKF, tiek EKF yra tiksli, paklaidos nedidelės. Ilgo maršruto metu UKF paklaidos yra žymiai mažesnės nei EKF.

Antrojo bandymo metu, buvo imituojamas ratų diametro nevienodumas, sumažinant oro slėgį kairiojoje rato padangoje. Roboto maršrutas toks pats koks buvo pirmojo bandymo pirmoje dalyje. Tai pat, kaip ir buvo autorių tikėtasi, UKF apskaičiuota pozicija ir kampas yra tikslesni nei EKF.

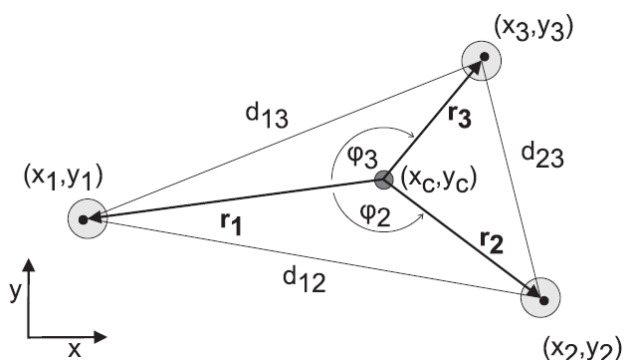
Paskutiniame skyriuje pateikiamos išvados [10].

Autoriai JaeMusas Yunas, SungBusas Kimis ir JangMyungas Lee 2006 metais išleistame straipsnyje „*Robust Positioning a Mobile Robot with Active Beacon Sensors*“ pateikia dar vieną sprendimą roboto orientavimosi erdvėje problemai spręsti. Jų siūlomas metodas remiasi signalinių švyturių panaudojimu. Kiekvienas signalinis švyturys turi savo unikalų, identifikuojantį numerį, yra sudarytas iš radijo (RF) ryšio modulio ir ultragarsinių bangų siųstuvo. Robotas siunčia norimo signalinio švyturio unikalų numerį per RF ryšio kanalą, o signalinis švyturys gavęs savo identifikuojantį numerį siunčia ultragarsinį bangos signalą atgal. Robotas pamatęs laiką per kurį gavo atsakymą, nustato atstumą iki signalinio švyturio. Tokiu būdu robotas gaudamas atstumus iki patalpoje išdėliotų signalinių švyturių nustato savo buvimo vietą erdvėje. Kadangi, aplinkoje gali būti daug veiksmų galinčių įtakoti matavimus, autoriai panaudojo Kalmano filtrą didesniai tikslumui pasiekti. Šis straipsnis susideda iš 5 dalių: 1-oji yra įvadas, 2-oje dalyje aprašomas sistemos veikimo principas, 3-oje dalyje sudaromas ir aprašomas Kalmano filtras, 4-oje dalyje pateikiami kompiuteriniai imitavimo ir eksperimentiniai rezultatai, 5-oje pateikiamos išvados ir pasiūlymai [11].

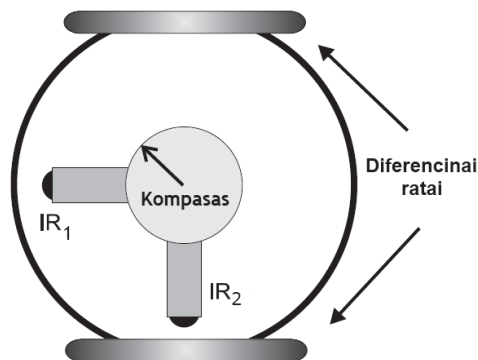
Tarptautinėje IEE konferencijoje „*Mechatronics and Automation*“, 2005 metais autoriai Mikas Peasgoodas, Chrisopheris Clarkas ir Johnas McPheesas pristatė pranešimą tema „*Localization of Multiple Robots with Simple Sensors*“. Šiame pranešime pateikiamas filtro algoritmas pritaikomas tarpusavio robotų orientavimuisi naudojant nebrangius, mažos galios jutiklius. Šis metodas skirtas multi – mikro robotų sistemoms, kai dydžio limitas riboja jutiklių parinkimą.

Trijų robotų lokalizavimas žinomoje aplinkoje atliekamas apjungiant keleto mažų atstumo jutiklių duomenis su tarpusavio robotų atstumu, gautu iš kitų robotų. Lokalizavimo problema yra įvertinti bendrą poziciją ir orientavimąsi naudojant vieną trikampį, kurio kraštinės atitinka roboto poziciją. Roboto pozicija, susijusi su trikampio centroide, ir yra nustatoma pagal absoliutines koordinates, gaunamas naudojant robotų tarpusavio atstumo matavimus. Kiekvienas robotas pozicijos nustatymui trikampyje naudoja identišką filtro algoritmą. Geriausi gauti kiekvieno filtro rezultatai yra persiunčiami kitiems robotams ir yra naudojami tolimesniuose skaičiavimuose. Bendros pozicijos imitavimas atliekamas naudojant tris robotus, kurių kiekvienas naudoja kompasą ir du atstumo jutiklius (IR_1 ir IR_2). Rezultatai rodo, kad šis metodas gali nustatyti roboto buvimo padėtį tarp kitų robotų uždaroje aplinkoje. Autoriai, palyginę rezultatus su imitavimo rezultatais, kai

robotai turi tik savo pačių duomenis, pastebėjo, kad robotas nesugeba sėkmingai nustatyti savo padėties trikampyje [12].



1.7 pav. Grafinis robotų tarpusavio pozicijos atvaizdavimas [12]



1.8 pav. Naudojamo roboto konfigūracija [12]

Autorius Michaelis J. Caruso straipsnyje „*Applications of magnetic sensors for low cost compass systems*“, pateikia metodą krypties nustatymui, kuris naudoja magnetinį jutiklį (magnetometrą) ir pakrypimo kampo jutiklį (akcelerometrą). Pasak autoriaus, komercinės aviacijos kompanijos naudoja krypties ir aukščio sistemas kurių kaina yra dešimtys tūkstančių dolerių. Paprastuose orlaiviuose ar mažuose mėgėjiškuose lėktuvėliuose tokias sistemas taikyti būtų neracionalu. Todėl autorius siūlo savo metodą, kuris remiasi kompasu panaudojimu kartu su akcelerometru pasvirimo paklaidai pašalinti. Tai pat, pateikiamas kompasu kalibravimo metodas, kuris pašalina šalia esančių feromagnetikų įtaką kompasui, apžvelgiama dėl temperatūros pokyčių atsirandanti paklaida. Laikantis pateiktų metodų pasiekiamas geresnis nei 1° krypties nustatymo tikslumas [13].

2. Teorinė dalis

2.1. Robotų padėties erdvėje nustatymo būdai

Robotų padėties nustatymas yra neatsiejama robotų tarpusavio orientavimosi dalis. Remiantis Borenstein, H.R. Everett, L. Feng, ir D. Wehe straipsniu „*Mobile Robot Positioning – Sensors and Techniques*“, galima išskirti 7 mobiliųjų robotų padėties nustatymo (pozicionavimo) kategorijas [1]. Tačiau nei viena iš jų nesuteikia galimybės nustatyti tiksliai pozicijos. Išskirsčius šias kategorijas į dvi grupes ir apjungiant jas, pasiekiamas didesnis tikslumas.

I. Santykinių koordinačių matavimai:

1. Nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimas (angl. *Odometry*).
2. Inercinė navigacija.

II. Absoliutinių koordinačių matavimai:

3. Magnetiniai kompasai.
4. Signaliniai švyturiai (angl. *Active Beacons*).
5. Visuotinė vietos nustatymo sistema (ang. *Global Positioning Systems*).
6. Stacionarūs orientyrai.
7. Pozicijos nustatymas naudojant žemėlapius.

Nodajantis pateiktu skirstymu apžvelgiami robotų padėties nustatymo būdai.

2.1.1. Nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimas

Nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimas (angl. *odometry*) yra plačiausiai naudojamas mobiliuose robotuose: suteikia trumpalaikį tikslumą, yra nebrangus ir leidžia didelį nuskaitymo greitį. Tačiau fundamentinė šio metodo esmė yra judesio integravimas laike, dėl kurio neišvengiamai atsiranda didėjanti paklaida. Orientavimosi netikslumai proporciškai didėja priklausomai nuo nuvažiuoto atstumo. Nekreipiant dėmesio į šias paklaidas, dauguma tyrėjų pripažįsta, kad nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo metodas yra svarbi robotų navigacijos sistemos dalis ir navigacijos problema būtų sumažinta, jeigu būtų pasiektas didesnis matavimų tikslumas.

Šis metodas aprašomas paprastomis lygtimis, jeigu ratų sukimosi greitis kinta tiesiškai pagrindo atžvilgiu. Dažniausiai nuvažiuotas atstumas ir greitis apskaičiuojamais gautais duomenimis iš prieauginių enkoderių [15]. Tarkim duotuoju laiko momentu i kairiojo ir dešiniojo rato enkoderio susumuotas pulsų skaičius yra $N_{K,i}$ (kairys) ir $N_{D,i}$. Tai pat priimkime, kad konstanta c_m naudojama perskaičiuojant enkoderio pulsų skaičių į nuvažiuotą atstumą yra:

$$c_m = \frac{\pi \cdot D_n}{n \cdot C_e}; \quad (2.1)$$

čia: D_n – rato diametras milimetrais;

C_e – enkoderio skiriamoji geba impulsais per apsisukimą;

n – pavaros redukcijos perdavimo santykis tarp variklio (prie kurio pritvirtintas enkoderis) ir varančiojo rato.

Žinant šią konstantą c_m , apskaičiuojamas tiek kairiojo $\Delta U_{K,i}$ tiek dešiniojo $\Delta U_{D,i}$ rato nuvažiuotas sumins atstumas duotuoju laiko momentu i :

$$\Delta U_{K/D,i} = c_m \cdot N_{L/R,i}. \quad (2.2)$$

Dėl ratų prasisukimo ir kitų priežasčių, tiesiškumo gali ir nebūti. Tuomet atsiranda paklaidos, kurios gali būti suskirstytos į sisteminės ir nesisteminės.

Sisteminės paklaidos atsiranda dėl roboto kinematinų netikslumų, tokių kaip nevienodas ratų diametras, arba netikslų ratų bazė. Nesisteminės paklaidos atsiranda dėl ratų sukibimo su pagrindu: ratų prasisukimo, išorinių veikiančių jėgų ir pan. Paprastai kai naudojamas nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo metodas kartu su stacionarių orientyrų metodu yra gaunamos nesisteminės paklaidos.

2.1.2. Inercinė navigacija

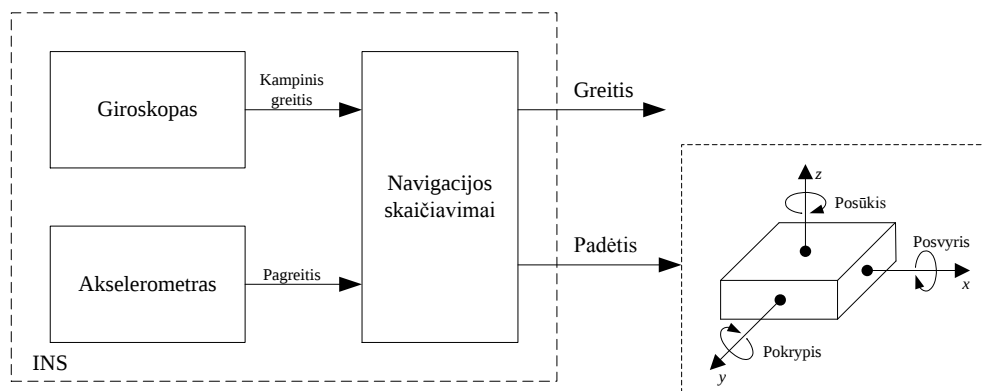
Inercinės navigacijos metode naudojami tiesiaegio pagreičio jutikliai – akcelerometrai ir kampinio pagreičio – giroskopai. Matavimai yra integruojami vieną arba 2 kartus (akcelerometrų matavimai), kad nustatytų padėtį. Šios sistemos privalumas – savarankiškumas. Nereikalingi jokie išoriniai nustatymai. Tačiau per laiką šio metodo jutiklių duomenys nukrypsta nuo tikrųjų. Inerciniai jutikliai nėra tinkami vietos nustatymui per didesnę laiko periodą. Naudojant inercinės navigacijos metodą, kartu su nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo metodu galima išvengti pastarojo paklaidų.

Akcelerometras (angl. *Accelerometer*) – prietaisas, kuris matuoja pagreitį. Vienaašiai arba daugiaašiai modeliai suranda vektoriaus normą, jo kryptį ir pagreitį kaip vektoriaus dydį. Gali aptikti orientaciją, greitėjimą, vibraciją, smūgį, ir kritimą.

Giriskopo svarba mobilių robotų navigacijoje yra didelė, nes pagal jų duomenis galima kompensuoti nuvažiuoto atstumo ir greičio metode atsirandančias paklaidas. Nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo metode bet koks momentinis netikslumas, paklaida lemia nuolat augančią pozicijos paklaidą. Dėl šios priežasties reikia tokius netikslumus skubiai aptikti ir juos kompensuoti. Giroskopas – prietaisas, skirtas kampiniam greičiui matuoti.

Apjungiant akcelerometro ir giriskopo duomenis, atliekant perskaičiavimus (priklausomai nuo sistemos šie skaičiavimai skiriasi) gaunami du išėjimo dydžiai: greitis ir padėtis. Pastarasis parametras skaidomas dar į tris:

- Posvyris (angl. *roll*) – kampas nusakantis sukimąsi aplink x ašį;
- Pokryptis (angl. *pitch*) – kampas nusakantis sukimąsi aplink y ašį.
- Posūkis (angl. *yaw*) – kampas nusakantis sukimąsi aplink z ašį.



2.1 pav. Inercinės navigacijos blokinė schema

2.1.3. Magnetinis kompasas

Ratų pasisukimas yra vienas iš svarbesnių navigacijos parametrų (θ). Todėl reikalingas jutiklis, kuris matuotų tokį pasisukimą (kampą θ arba sukimąsi aplink z ašį). Dažniausiai naudojami magnetiniai kompasai – magnetometrai, kurie matuoja Žemės magnetinį lauką, kuris naudojamas kaip atskaitos taškas.

Magnetometras – prietaisas matuoti magnetinio lauko stiprumui ir kartais jo kryptį. Pagrindinė magnetometro paskirtis, matuoti Žemės magnetinio lauko stiprį. SI sistemos matavimo vienetas magnetinio lauko stiprio matavimui yra tesla (T). Tai yra labai didelis matavimo vienetas, todėl praktikoje, mokslininkai ir tyrėjai dažniau naudoja nano teslas (nT). Inžinieriai dažnai matuoja magnetinio lauko stiprį Gausais (1 Gausas = 100000 nT).

Magnetometrai skirstomi į 2 pagrindinius tipus:

- Skaliariniai magnetometrai – matuoja magnetinio lauko bendra stiprumą į kurį yra nukreipti;
- Vektoriniai magnetometrai – turi savybę matuoti magnetinio lauko vektorių.

Šių prietaisų panaudojimas robotų navigacijoje pasireiškia tuo, kad naudojant jų gautus duomenis apskaičiuojama kryptis laipsniais (azimutas), rodanti į magnetinę šiaurę.

$$\theta = \arctan(H_y / H_x); \quad (2.3)$$

čia: H_y ir H_x iš magnetometro gautų vektorių dydžiai, atitinkamai x ir y ašis.

Gautas kampas naudojamas kaip atskaitos taškas apskaičiuoti roboto pasisukimo kampui.

2.1.4. Signaliniai švyturiai

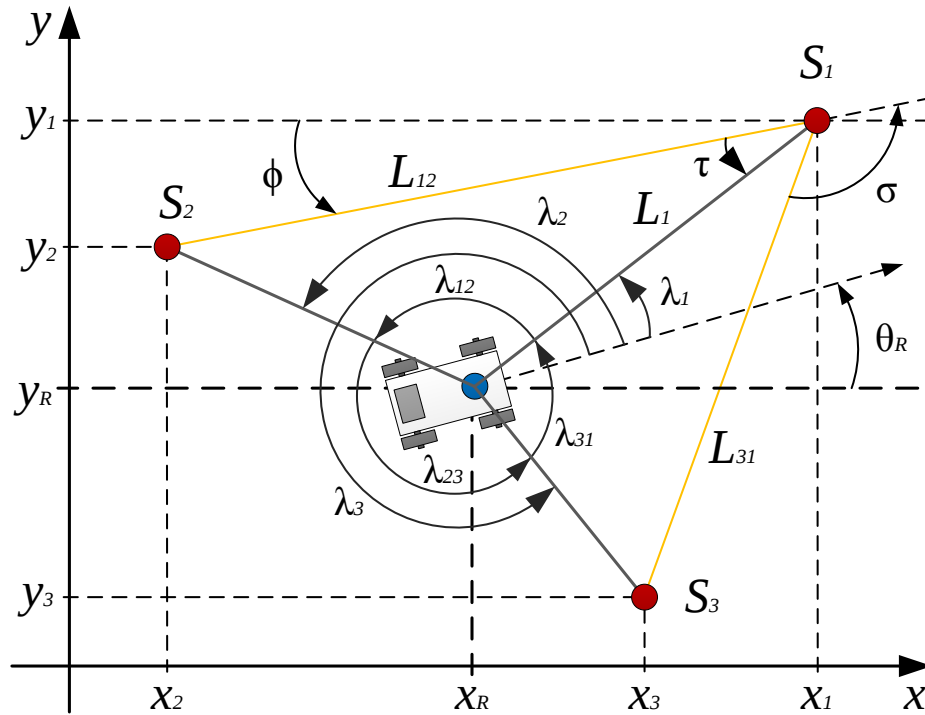
Signalinių švyturių sistemos yra tiek pat paplitusios bendrojoje laivų ir lėktuvų navigacijoje, kaip ir mobiliųjų robotų. Šis metodas yra patikimas, tikslus ir naudojantis nedaug resursų. Dėl to gaunamas didelis nuskaitymo dažnis ir aukštas patikimumas, tačiau išauga įdiegimo ir priežiūros kaina. Reikalingas tikslus švyturių sumontavimas, tam kad būtų pasiektas aukštas pozicijos nustatymo tikslumas.

Išskiriami du signalinių švyturių tipai:

1. Trišalis (angl. *Trilateration*).
2. Trianguliacinis (angl. *Triangulation*).

Trišalė sistema – tai roboto pozicijos nustatymas grindžiamas nuvažiuoto atstumo matavimu iki žinomo signalinio švyturio. Trišalėje navigacijos sistemose paprastai yra trys ir daugiau siųstuvų pritaistytų žinomose aplinkos vietose ir vienas imtuvas ant roboto korpuso. Ir atvirkščiai, gali būti vienas siųstuvas ant roboto ir imtuvas pritaistytas ant sienos. Naudojantis realiu laiku gauta informacija, sistema apskaičiuoja atstumą tarp stacionarių siųstuvų ir imtuvo ant roboto. Visuotinė vietos nustatymo sistema (GPS) yra trišalės navigacijos pavyzdys.

Trianguliacinėje sistemoje yra trys ir daugiau aktyvių siųstuvų žinomose vietose, kaip parodyta 10 pav. paveiksle (S_1, S_2, S_3). Roboto apsisukimų jutiklis korpuse matuoja kampus λ_1, λ_2 ir λ_3 tarp siųstuvų švyturių ir ratų išilginės ašies. Pagal šiuos tris matavimus nežinomos x_R ir y_R koordinatės bei roboto kryptis θ_R gali būti apskaičiuotos. L_{12} yra atstumas tarp švyturio S_1 ir S_2 , L_{31} – atstumas tarp S_3 ir S_1 , L_1 – atstumas tarp roboto ir S_1 .



2.2 pav. Trianguliacijos metodo grafinė interpretacija

Bendrinis geometrinės trianguliacijos algoritmas [26]:

1. Jeigu matoma mažiau nei trys švyturiai, pozicijos nustatyti neįmanoma.

2. Apskaičiuojamas kampas λ_{12} tarp pirmojo S_1 ir antrojo S_2 švyturio:

$$\lambda_{12} = \lambda_2 - \lambda_1. \quad (2.4)$$

3. Jeigu $\lambda_1 > \lambda_2$ tuomet:

$$\lambda_{12} = 360 + (\lambda_2 - \lambda_1). \quad (2.5)$$

4. Apskaičiuojamas kampas λ_{31} tarp trečiojo S_3 ir pirmojo S_1 švyturio:

$$\lambda_{31} = \lambda_1 - \lambda_3. \quad (2.6)$$

5. Jeigu $\lambda_3 > \lambda_1$ tuomet:

$$\lambda_{31} = 360 + (\lambda_1 - \lambda_3). \quad (2.7)$$

6. Iš žinomų švyturių S_1 ir S_2 koordinačių apskaičiuojamas atstumas L_{12} .

7. Iš žinomų švyturių S_1 ir S_3 koordinačių apskaičiuojamas atstumas L_{31} .

8. Apskaičiuojamas kampas γ :

$$\gamma = \sigma - \lambda_{31}. \quad (2.8)$$

9. Apskaičiuojamas kampas τ :

$$\tau = \tan^{-1} \left[\frac{\sin \lambda_{12} \cdot (L_{12} \cdot \sin \lambda_{31} - L_{31} \cdot \sin \gamma)}{L_{31} \cdot \sin \lambda_{12} \cdot \cos \gamma - L_{12} \cdot \cos \lambda_{12} \cdot \sin \lambda_{31}} \right]. \quad (2.9)$$

$$10. \text{ Jeigu } \begin{cases} \lambda_{12} < 180^\circ \\ \tau < 0^\circ \end{cases}, \text{ tuomet } \tau = \tau + 180^\circ. \quad (2.10)$$

$$11. \text{ Jeigu } \begin{cases} \lambda_{12} > 180^\circ \\ \tau > 0^\circ \end{cases}, \text{ tuomet } \tau = \tau - 180^\circ. \quad (2.11)$$

12. Jeigu $|\sin \lambda_{12}| > |\sin \lambda_{31}|$, tuomet:

$$L_1 = \frac{L_{12} \cdot \sin(\tau + \lambda_{12})}{\sin \lambda_{12}}. \quad (2.12)$$

13. Jeigu $|\sin \lambda_{12}| < |\sin \lambda_{31}|$, tuomet:

$$L_1 = \frac{L_{31} \cdot \sin(\tau + \sigma - \lambda_{31})}{\sin \lambda_{31}}. \quad (2.13)$$

14. Apskaičiuojama roboto koordinatė x_R :

$$x_R = x_1 - L_1 \cdot \cos(\phi + \tau). \quad (2.14)$$

15. Apskaičiuojama roboto koordinatė y_R :

$$y_R = y_1 - L_1 \cdot \sin(\phi + \tau). \quad (2.15)$$

16. Apskaičiuojamas roboto krypties kampas:

$$\theta_R = \phi + \tau - \lambda_1. \quad (2.16)$$

17. Perskaičiuojamas roboto krypties kampas, jeigu $\theta_R \leq -180^\circ$:

$$\theta_R = \theta_R + 360^\circ. \quad (2.17)$$

18. Perskaičiuojamas roboto krypties kampas, jeigu $\theta_R > 180^\circ$:

$$\theta_R = \theta_R - 360^\circ. \quad (2.18)$$

Signalinių švyturių metodo trūkumas – signaliniai švyturiai turi būti sufokusuoti kūgio formos signalo sklidimui. Priešingai, švyturiai nėra matomi daugelyje zonų, problema yra gana rimta, nes mažiausiai trys švyturiai turi būti matomi trianguliacijos metodui naudoti.

2.1.5. Visuotinė vietos nustatymo sistema

GPS (angl. *Global Positioning System*) – Visuotinė padėties nustatymo sistema, arba Globali Pozicionavimo Sistema, leidžia nustatyti objekto koordinates bet kurioje pasaulio vietoje. Sistemos pagrindas – IT technologijų sąveika su planetą gaubiančiu GPS palydovų tinklu. Tai viena iš palydovinių navigacijos sistemų. Kiekvienas GPS palydovas radiosignalais į Žemę perduoda informaciją apie savo buvimo vietą (koordinates), tikslų laiką ir identifikavimo kodą.

GPS sistema su papildoma įranga pritaikoma navigacijoje – apskaičiuojamas maršrutas tarp pasirinktų taškų, rodomas objekto judėjimas detaliame žemėlapyje, grafinio kelvedžio nurodymai kaip įveikti artėjančias kryžkeles, sankryžas ar posūkius, o nukrypus – kaip vėl sugrįžti į maršrutą. Paklaida gali siekti iki kelių metrų. GPS navigacija masiškai taikoma transporto, turizmo ir kt. srityse. Tai pat ir nustatant didelių robotų padėtį tam tikroje teritorijoje, planuojant jų maršrutus.

Ant roboto montuojami GPS signalo imtuvai – tai prietaisai, priimančys signalus iš GPS palydovų. GPS imtuvas priima signalus iš 3–5 artimiausių GPS palydovų, esančių tiesioginio matomumo zonoje, algoritmais apdoroja gautus signalus ir pateikia robotui tokias buvimo vietos koordinates:

- platumą;
- ilgumą;
- aukštį virš jūros lygio;
- judėjimo greitį;
- judėjimo kryptį.

Robotas iš GPS imtuvo ankščiau pateiktą informaciją gauna tekstiniu pavidalu, per duomenų perdavimo sąsają: USB arba UART. Gauti duomenis niekada nėra paruošti naudojimui, dažnai reikia pritaikyti Kalmano filtrą paklaidų pašalinimui. Tai pat iš GPS gauti duomenys yra apjungiami su inercinės navigacijos, nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo metodo ir magnetometro duomenimis.

2.1.6. Stacionarūs orientyrai

Stacionarūs orientyrai gali būti atpažinti naudojant jutiklių (kamos, ultragarso jutikliai ir kt.) duomenis. Orientyro kriterijais gali būti forma, spalva ir t.t. Pagrindinis reikalavimas, kad robotui būtų paprasta išskirti formą ar spalvą iš aplinkos. Prieš robotui naudojant šį metodą, turi būti įrašyta informacija į roboto atmintį apie kiekvieną orientyrą. Aptikus ir atpažinus orientyrą robotas nustato savo poziciją aplinkoje. Robotas tik apytiksliai žino savo buvimo vietą, todėl jis turi nuolat ieškoti orientyrų apribotoje aplinkoje. Dėl šios priežasties kartu su šiuo metodu yra naudojamas nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo metodas.

Išskiriami 2 šio metodo orientyrų tipai:

1. Natūralūs orientyrai – objektai ar savybės kurie jau yra aplinkoje ir turi kitą paskirtį, nei roboto navigacijai užtikrinti.
2. Dirbtiniai orientyrai – specialiai sukurti objektai ar žymekliai, kurie reikalingi aplinkoje tik dėl robotų navigacijos tikslų.

Natūralūs orientyrai suteikia lankstumo ir reikalauja, kad jokios modifikacijos aplinkoje nebūtų vykdomos. Dirbtinis orientyras yra nebrangus ir gali suteikti papildomos informacijos užkoduotos šablonais ar formomis.

Šiame metode pozicijos tikslumas priklauso nuo atstumo ir kampo tarp roboto ir orientyro, todėl orientyrų navigacija yra netiksli kai robotas yra nutolęs dideliu atstumu nuo orientyro. Didesnis tikslumas pasiekiamas, tik tuo atveju, kai robotas yra šalia orientyro. Daugeliu atvejų įprastuose robotuose naudojami mikrovaldikliai nėra pajėgūs apdoroti didelio duomenų srautus. Dėl šios priežasties reikalingas galingesnis kompiuteris, kai norima pasiekti realaus laiko judėjimą pagal orientyrus.

Aplinkos sąlygos, tokios kaip apšvietimo pasikeitimas, gali būti problematiškos: mažo matomumo orientyrai gali būti visiškai neatpažinti, arba kiti objektai aplinkoje, su panašiais bruožais, gali būti klaidingai palaikyti kitais orientyrais. Tai yra labai rimtas paklaidos atvejis, nes gali įtakoti visiškai klaidingą roboto pozicijos nustatymą.

Šiam metodui naudoti reikalinga:

- Orientyrai turi būti matomi roboto darbo aplinkoje.
- Apytikslė pradinė padėtis, kad robotas žinotų, kur ieškoti orientyrų. Jeigu pradinė padėtis nėra žinoma, robotas turi vadovautis daug laiko reikalaujančiu paieškos procesu. Toks paieškos

procesas gali nepasisekti ir gali įtakoti klaidingas aplinkos objektų interpretacijas.

- Orientyrai ir jų buvimo vietos aplinkoje, proceso metu, duomenų bazėje turi išlikti nepakitę.

2.1.7. Pozicijos nustatymas naudojant žemėlapius

Pozicijos nustatymui naudojant žemėlapius metodo esmė, kad robotas naudodamasis turimus jutiklius sukuria vietinį aplinkos žemėlapi. Šis žemėlapis yra lyginamas su užduotu. Jei jie pakankamai sutampa, robotas apskaičiuoja savo buvimo vietą žemėlapyje ir nustato judėjimo kryptį. Žemėlapis gali būti pateikiamas kaip CAD aplinkos modelis arba kaip jutiklių duomenų struktūra. Tai pat pritaikant įvairius algoritmus, šis metodas gali būti naudojamas robotui pačiam susipažinti su aplinka. Pagrindinis trūkumas – griežti reikalavimai sudarant žemėlapi iš jutiklių duomenų (priartėjimo jutikliai, inerciniai ir t.t.) ir aplinka turi būti kaip įmanoma mažiau dinamiška. Paprastai šis metodas naudojamas apribotoje aplinkoje.

Yra du iš esmės skirtingi pradžios taškai nuo kurių pradedamas pozicijos nustatymas naudojant žemėlapius: jau yra egzistuojantis žemėlapis ir robotas turi jį pats susikurti. Tam kad robotas autonomiškai sukurtų aplinkos žemėlapi, jis turi ją ištyrinėti. Paprastai daroma prielaida, kad robotas pradeda tyrinėjimą neturėdamas jokių pradinių žinių apie aplinką. Tuomet, vykdoma pasirinkta judėjimo strategija, kuri per trumpiausią laiką apima didžiausią aplinkos plotą. Tokia judėjimo strategija vadinama „tyrinėjimo strategija“, ir ji labai priklauso nuo naudojamų jutiklių rūšies.

Dauguma tyrėjų tiki, kad joks vienas jutiklis pats negali pakankamai tiksliai surinkti realios aplinkos savybių, kad pakaktų navigacijai užtikrinti. Todėl, būtina jungti duomenis iš skirtingų jutiklių. Toks procesas vadinamas jutiklių sinteze (angl. *Sensor Fusion*). Kuriami mechanizmai, kurie panaudoja heterogeninę informaciją gautą iš lazerinių radarų su sonaro sistema, tam kad sukurtų patikimą ir pilną aplinkos modelį. Jutiklių sintezė šiuo metu yra aktyvi sritis ir literatūroje yra aprašyta daugybė jutiklių duomenų tipų jungimų variantų.

Vienas iš didžiausių iššūkių žemėlapių navigacijoje yra jų atpažinimas, t.y., atpažinti panašumus tarp esamo lokalaus žemėlapi ir išsaugoto globalaus žemėlapi. Dirbant su žemėlapių atpažinimu dažnai susiduriama su pasirinkto vaizdo atpažinimo kampo ir pozicijos suderinimo problema. Bendrai, atpažinimas yra vykdomas išskiriant savybes tiek vieno tiek kito paveikslėlio ir jas lyginant.

2.2. Robotų tarpusavio padėties įvertinimo būdai

Kompleksinėms užduotims spręsti vieno roboto dažnai nepakanka, reikalingas dar vienas ar net keletas robotų. Atsiranda poreikis apjungti šiuos robotus darbui kartu. Tai atlikti galima dviem būdais:

1. Visi robotai specialiai suprogramuojami užduočiai atlikti, t.y. pagrindinė užduotis išskaidoma į mažesnes ir išdalinama skirtingiems robotams. Šiuo atveju robotai dirba sinchronizuotai. Tačiau išėjus iš rikiuotės vienam robotui, kiti robotai arba tęsia savo užduotį arba sustoja. Tokiu atveju, užduoties atlikimas žlunga. Reikalingas papildomas asmuo – operatorius, stebintis arba gaunantis įspėjimus apie robotų darbą. Toks būdas dažnai naudojamas pramonės srityje, kur užduotys yra monotoniškos, nuolat besikarojančios.
2. Antrasis būdas grindžiamas autonominiu veiksmų planavimu ir hierarchiniu problemos skaidymo procesu, po kurio seka užduočių paskirstymas (centralizuotas arba per derybų/siūlymų procesą), ir tuomet vykdoma paskirta užduotis. Jeigu vienam robotui nepavyksta atlikti užduoties, vykdomas perplanavimo procesas, kurio metu problema ištaisoma perskirstant užduotį(-is).

Pirmasis būdas labai paprastas ir tinkamas naudoti iš anksto numatant visus galimus užduoties vykdymo variantus ir parenkant optimaliausią. Toks būdas negali būti naudojamas dinamiškai kintančioje aplinkoje.

Antrasis – žymiai sudėtingesnis, reikalaujantis didelių realių laiku atliekamų matematinių skaičiavimų, kompleksinių algoritmų, realizuojamas pasitelkus neraiškiają logiką ir/ar neuroninis tinklus.

Nesvarbu kuris būdas būtų pasirenkamas, kiekvienas robotas pats turi gebėti orientuotis aplinkoje ir tik tuomet tarpusavyje. Tarpusavio orientavimasis – tai robotų tarpusavio padėties įvertinimas, kai nustatomas atstumas, kryptis ir padėtis erdvėje. Šie duomenys gali būti tiesiog persiunčiami iš vieno roboto į kitą, arba centralizuotai – vienam „vadovaujančiam“ robotui arba serveriui. Pastarasis atlieka duomenų saugojimo funkciją, tai pat gali vykdyti robotų valdymą – paskirstant užduotis.

Robotų tarpusavio padėtį įvertinti tampa žymiai paprasčiau kai robotas žino savo padėtį erdvėje. Skyriuje 2.1 būtent tai ir apžvelgta – septynops kategorijos suskirstytos į dvi grupes, kurias

apjungiant pasiekiamas aukštas pozicijos nustatymo tikslumas. Akivaizdu jog visi šie metodai puikiai tinka ir yra naudojami robotų tarpusavio padėčiai įvertinti. Tačiau niekada nei vienas iš metodų nėra naudojamas atskirai.

Nuvažiuto atstumo ir greičio matavimas – tai pamatinis metodas, nuo kurio prasideda dažno roboto orientavimasis. Įvertinant tarpusavio robotų padėtį šis būdas praktiškai vienas niekada nenaudojamas dėl proporciškai didėjančios paklaidos, tačiau vis dėl to galimas. Žinant pradines robotų koordinates ir sekant kiekvieno roboto nuvažiuotą atstumą yra nustatoma robotų tarpusavio padėtis. Vis dėl to, racionaliau šį būdą naudoti kartu su kitais metodais.

Inercinė navigacija – kaip ir nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo metodas, taip ir šis, praktiškai niekada nėra naudojamas atskirai, o tik kartu su kitais metodais. Pažvelgus į 9 pav. paveikslą (2.1.2 skyrius) matoma jog šis metodas tinka greičio ir padėties sekimui. Robotų tarpusavio padėčiai įvertinti šie duomenys naudojami kartu su pirmuoju, anksčiau paminėtu, jo paklaidoms šalinti.

Magnetiniai kompasai – tai jutikliai, būdas naudojamas nustatyti pasisukimo kampui. Šiuo atveju yra žinomas kampas tarp kiekvieno roboto ir magnetinės šiaurės, kuris naudojamas kaip atskaitos taškas roboto pasisukimo kampui θ gauti. Vėl gi, šis metodas pats vienas robotų padėčiai įvertinti nėra tinkamas naudoti.

Šie būdai, įvertinant robotų tarpusavio padėtį, laikomi pamatiniais metodais ir siekiant užtikrinti aukštą padėties įvertinimo kokybę dažnai naudojami visi trys kartu. Toliau pateikiami metodai: signaliniai švyturiai, visuotinė vietos nustatymo sistema, stacionarūs orientyrai ir pozicijos nustatymas naudojant žemėlapius labai dažnai naudoja bent vieną iš aukščiau pateiktų.

Signalinių švyturių metode naudojami specialiai įrengiami objektai – švyturiai, kurie skleidžia tam tikro dažnio signalą diskretizuotais intervalais arba kai to pareikalaujama. Signalas gali būti ultragarsinis, infraraudonųjų spindulių ar radijo dažnio. Kai robotas orientuojasi pats erdvėje robotas nustato prie kurio švyturio yra prisijungęs, t.y. kuris švyturys yra arčiausiai (nustatoma matuojant nuvažiuotą atstumą) ir/arba koks kampas tarp jų (nustatoma naudojant magnetinius kompasus). Toks

metodas yra taikytinas ir robotų tarpusavio padėčiai įvertinti, centralizuojant visų robotų duomenis taip sudarant sąrašą prie kurio švyturio koks robotas yra prisijungęs (koku kampu ar atstumu). Šis metodas reikalauja tikslaus švyturių sumontavimo, taip dirbtinai pakeičiant aplinką.

Egzistuoja šio metodo atmaina, kurioje nereikalaujama švyturių montavimo aplinkoje, jie montuojami ant pačių robotų. Šiuo atveju robotui nereikia aplinkoje ieškoti įrengtų švyturių, jie ieško vienas kito, o suradę nustato tarpusavio kampą ar atstumą. Toks signalinių švyturių panaudojimo būdas aprašomas netgi keliuose literatūros apžvalgoje pateiktuose straipsniuose: „*Measuring The Relative Position And Orientation Between Two Mobile Robots With Binaural Sonar*“ [5] ir „*Localization of Multiple Robots with Simple Sensors*“ [12]. Šie abu metodai yra gana panašūs.

Pirmajame, kiekvienas robotas turi ultragarsinio signalo siųstuvu, kuris siunčia signalą dviem imtuvams, pritaisytiems ant kito roboto. Imtuvas pamatuoja atstumą iki siųstuvo ant kito roboto, ir sudaromas geometrinis modelis pagal visus imtuvų duomenis. Yra numatyta, kad abu robotai gali komunikuoti per infraraudonųjų spindulių radijo ryšį.

Antrajame metode, trijų robotų lokalizavimas žinomoje aplinkoje atliekamas apjungiant keleto mažų atstumo jutiklių duomenis su tarpusavio robotų atstumu, gautu iš kitų robotų. Šie robotai išsidėlioję erdvėje sudaro trikampį, kuriuo remiantis apskaičiuojami atstumai ir kampai nuo vieno roboto iki kito. Bendros pozicijos imitavimas atliekamas naudojant tris robotus, kurių kiekvienas naudoja kompasą ir du infraraudonųjų spindulių atstumo jutiklius. Robotas besisukdamas ieško kito roboto, t.y. bando pagauti kito roboto siunčiamą signalą. Žinodamas savo pasisukimo kampą, kai užfiksuojamas vienas ir kitas robotas, gaunamas vienas iš trikampio kampų. Robotams pasidalinus šiais duomenimis per ryšio sąsają, įvertinama tarpusavio padėtis.

Visuotinė vietos nustatymo sistema, žinoma sutrumpintu pavadinimu GPS, leidžianti nustatyti objekto koordinates bet kurioje pasaulio vietoje. Tokia sistema tai pat gali būti naudojama robotų tarpusavio padėčiai įvertinti, kai visų robotų gauti duomenys iš GPS yra vienoje vietoje. Tačiau dėl GPS sistemos specifikos, dažnai ši sistema riboja galimybes panaudoti robotų tarpusavio padėčiai nustatyti:

- GPS veikia tik atviroje aplinkoje.
- Tikslumas 3–5 metrai.
- Turi būti matomi bent keli palydovai.

Dėl šių priežasčių ši sistema tinkama naudoti tik dideliems robotams, kurie geba judėti dideliame, atviraime plote. Tikslumas gali būti padidintas naudojant DGPS, kai padėtis tikslinama pagal stacionarių bazinių stočių signalus, dažniausiai naudojant GSM ryšį. Ši paslauga mokama ir suteikiama tik patikimiems vartotojams, tikslinimas užtrunka iki 1 minutės.

Stacionariūs orientyrai. Šio metodo esmė – robotas pagal tam tikrus kriterijus (spalva, formą ar pan.), naudojant vaizdo kamerą, lazerinius skenerius ar panašius jutiklius, atpažįsta orientyrus ir pagal tai įverina savo vietą aplinkoje. Skyriuje 2.1.6. apžvelgtas šis metodas, kai vienas robotas nustato savo padėtį erdvėje. Tai atliekama panaudojant natūralius orientyrus arba sukuriant dirbtinius. Toks metodas gali būti pritaikomas ir robotų tarpusavio padėčiai įvertinti. Vienas iš galimų pritaikymo pavyzdžių, būtų, kai kiekvienas robotas autonomiškai nustato savo padėtį erdvėje pagal satacionarius orientyrus ir šia informacija pasidalina su kitais. Kitas variantas – kiekvienas robotas turi specifinį kriterijų (spalva, forma, aiškiai matomas užrašas, simbolis) pagal kurį kiti robotai atpažįsta ir apskaičiuoja kryptį, atstumą iki roboto. Šie skaičiavimai gali būti atliekami panaudojus nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo metodą, inercinę navigaciją, tiesiog privažiuojant prie roboto. Tačiau dažniausiai tai atliekama panaudojus iš vaizdo kameros gautus duomenis, pagal kuriuos apskaičiuojama kitro roboto pozija ir kryptis.

Pozicijos nustatymas naudojant žemėlapius, robotų tarpusavio oreintavimo sistemose, pasireiškia tuo, kad robotas pats nustato savo padėtį žemėlapyje ir ją pasidalina su kitais robotais, tiesiogiai arba per tarpinį duomenų serverį. Padėties nustatymas erdvėje vykdomas apdorojant iš įvairių jutiklių (atstumo, kamerų ir kt.) gautus duomenis iš kurių nustatoma padėtis turimame žemėlapyje. Tai pat šis metodas labai dažnai naudojamas kartu su nuvažiuoto atstumo ir greičio matavimo metodu, inercine navigacija.

2.3. Magnetinio lauko pokyčių taikymas robotų tarpusavio padėčiai nustatyti

Magnetiniam laukui mauoti naudojami kelių tipų kompasai (magnetometrai): angl. *Fluxgate*, angl. *Magnetoresistive*.

„*Fluxgate*“ kompasas yra elektromagnetinis prietaisas naudojantis dvi ir daugiau mažų ričių (viela apvyniota aplink šerdį, sudarytą iš labai laidžios magnetinės medžiagos), kurios matuoja

Žemės magnetinio lauko horizontalią dedamąją. Tokio kompasų privalumas – matavimai gali būti lengvai perkelti į skaitmeninę formą. Šie kompasai geba matuoti Žemės magnetinį lauką su mažesne nei 1 mGa (miligauso) skiriamąja geba. Pagrindinis trūkumas – šie kompasai yra gana dideli, jautrūs įvairiems trikdžiams, o jų reakcijos laikas yra gana mažas. Kartais judant šiems kompasams jų reakcijos laikas gali būti 2 – 3 sekundės. Toks matavimų vėlinimas nėra pageidaujamas, kai kompasas naudojamas greitai judančiuose objektuose.

Kitas magnetinių jutiklių tipas yra magnetorezistyvieniai (angl. „*Magnetoresistance*“) (MR) jutikliai. Šių jutiklių principas remiasi medžiaga, kurios elektrinė varža keičiasi kai kinta išorinis magnetinės laukas. Jutiklis padarytas iš plonos juostelės (NiFe), kurios elektrinė varža kinta priklausomai nuo veikiančio magnetinio lauko. Šie jutikliai pasižymi gerai apibrėžtomis jautriomis ašimis ir yra masiškai naudojami gaminant integruinius grandynus. MR jutiklių jautrumas yra žemesnis nei 0,1 mGa, gaminami mažuose kietuose korpusuose ir jų reakcijos laikas mažesnis nei 1 ms. Judančiuose objektuose šių jutiklių matavimai yra gana tikslūs, o rezultatai pateikiami iki 1000 kartų per sekundę.

Šį efektą pirmasis atrado Williams THOMSON (labiau žinomas kaip Lordas Kelvinas) 1856 metais. Jis eksperimentavo su geležies gabalėliais ir atrado, kad varža didėja, kai srovės tekėjimo kryptis sutampa su magnetinės jėgos (0°) ir mažėja kai kampas tarp srovės krypties ir magnetinės jėgos krypties yra mažesnis nei 90° . Jis atliko tuos pačius eksperimentus su nikelio plokšte ir atrado, kad savybės tokios pat, bet įtaka buvo žymiai didesnė. Šis efektas buvo pavadintas angl. *anisotropic magnetoresistance* (AMR).

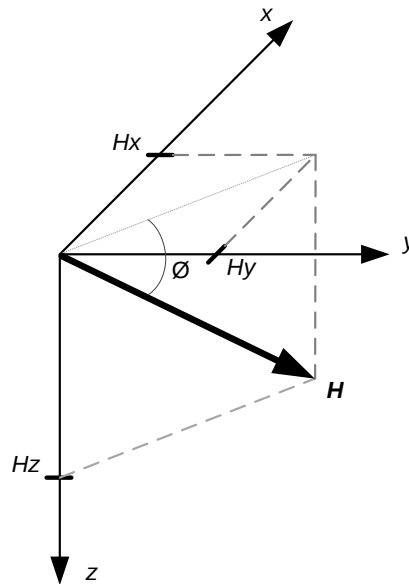
AMR efektas yra plačiai naudojamas Žemės magnetinio lauko jutikliuose, srovės matavimui (matuojant sukurtą magnetinį lauką aplink laidininką), judėjimo aptikimui, linijiniai pozicijai ir kampui matuoti. Magnetiniai kompasai (magnetometrai), kuriuose naudojami AMR tipo magnetiniai jutikliai, dėl savo tikslumo ir greitaveikos puikiai tinka šiame darbe aprašomai sistemai.

Žemės magnetinio lauko stiptis yra maždaug nuo 0,25 iki 0,6 Ga ir turi dedamąją lygiagrečią Žemės paviršiui, kuri visuomet nukreipta į magnetinę šiaurę. Terminas magnetinė šiaurė reiškia Žemės magnetinio poliaus poziciją ir skirtingose žemės vietose gali skirtis $\pm 25^\circ$. Toks skirtumas vadinamas deklinacijos arba nukrypimo kampu ir gali būti pašalintas žinant geografinę poziciją ir tos pozicijos nukrypimo kampo vertę.

Dažniausiai magnetometrai robotų orientavimosi sistemose naudojami, pasisukimo kampui θ nustatyti, arba tiesiog kaip kompasai.

Naudojant magnetometrus, kai siekiama didesnio tikslumo nei 1° atsiranda įvairios paklaidos, kurios įtakoja azimutą. Tokios paklaidos atsiranda dėl:

- ASK rezoliucijos.
- Magnetinio jutiklio paklaidų.
- Temperatūros pokyčių.
- Šalia esančių metalų.
- Kompaso padėtis erdvėje.
- Kintančio Žemės magnetinis lauko.



2.3 pav. Žemės magnetinio lauko X, Y ir Z koordinatės

$$|H| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}; \quad (2.19)$$

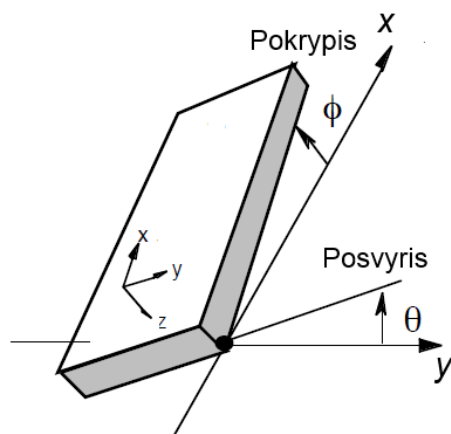
čia: $\emptyset$ – nuolydžio (nukrypimo) kampas.

Iš 2.3 pav. paveikslo matyti, kad surasti kompasų kryptį, arba azimutą reikia nustatyti H_x ir H_y Žemės magnetinio lauko dedamąsias ir pridėti arba atimti nukrypimo (nuolydžio) kampą. Azimutas gali būti apskaičiuojamas taip:

$$\text{Azimutas} = \arctan(H_y / H_x). \quad (2.20)$$

Labai dažnai kompasai nėra horizontalioje plokštumoje. Daugeliu atvejų jie laikomi rankoje, yra sumontuoti ant lėktuvo, ar ant roboto, kuris yra ant nelygaus reljefo. Tada dar sudėtingiau nustatyti azimutą ar įvertinti pasisukimo kampą. Paklaidos atsirandančios dėl paviršiaus nelygumų

gali būti gana didelės ir priklauso nuo pakėlimo kampo. Tipiškas metodas ištaisyti šiai paklaidai yra naudoti pagreičio jutiklius, pavyzdžiui akcelerometrą, kuris išduoda pokrypio ar posvyrio kampus.



2.4 pav. Kompasso padėtis erdvėje lyginant su Žemės horizontalia plokštuma

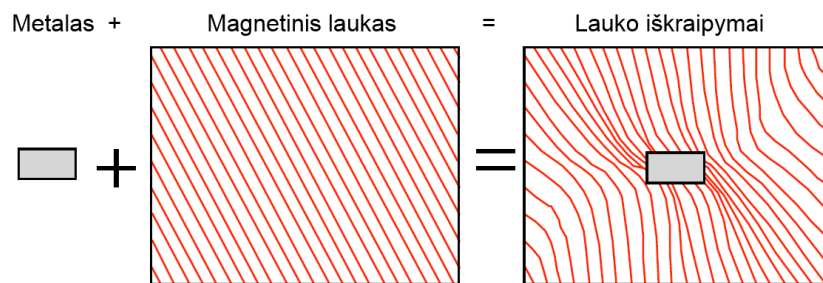
Kompasso padėties erdvėje paklaidos kompensavimui, žinant posvyrio ir pokrypio kampus reikalingos visos trys magnetometro koordinatės (x , y ir z). Įvertinus posvyrio ir pokrypio kampus pašalinamos kompasso padėties erdvėje paklaidą ir apskaičiuoti Žemės magnetinio lauko dedamosios H_X ir H_Y :

$$\begin{aligned} H_X &= X \cdot \cos \varphi + Y \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi - Z \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi; \\ H_Y &= Y \cdot \cos \theta + Z \cdot \sin \theta. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Kai H_X ir H_Y koordinačių vertės yra perskaičiuotos, apskaičiuojamas azimutas:

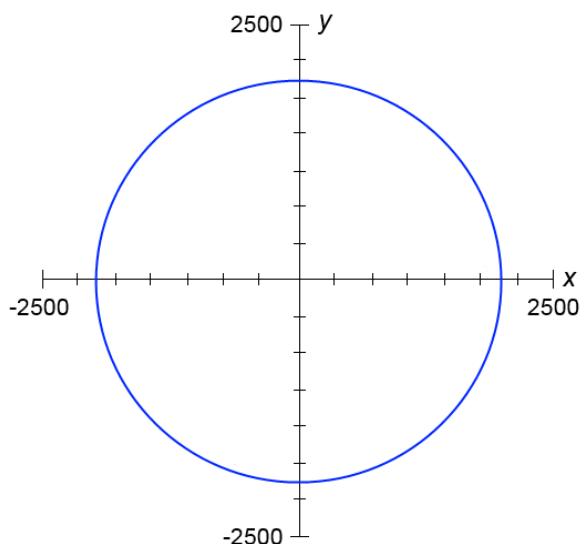
$$\text{Azimutas} = \arctan(H_Y / H_X). \quad (2.22)$$

Kompassui veikiant aplinkoje kurioje nėra metalų Žemės magnetinis laukas veikiantis kompasą nėra iškraipomas. Tačiau realybėje, kompasai yra montuojami automobiliuose, lėktuvuose, robotuose ir ant platformų kuriose labai dažnai pasitaiko feromagnetinių medžiagų (geležies, nikelio, plieno, kobalto). Dėl šių feromagnetikų įtakos yra iškraipomas Žemės magnetinis laukas veikiantis kompasą, todėl ir kompasso parodymai tampa netikslūs. Žvelgiant į šį efektą kaip į dviejų magnetinių laukų sumą, atsiradusias paklaidas galima pašalinti.

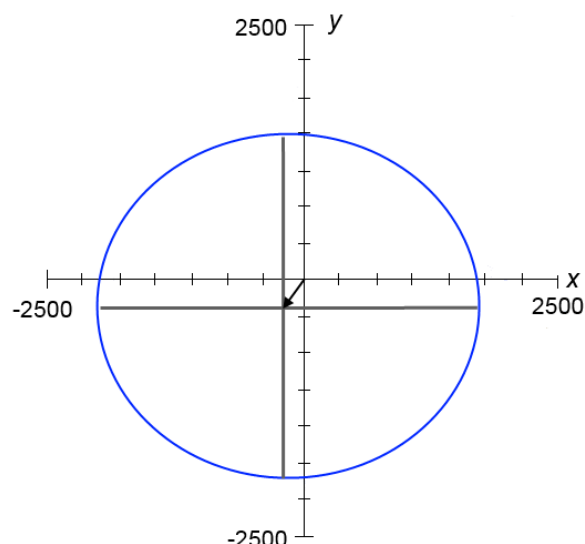


2.5 pav. Magnetinio lauko iškreipimas aplinkoje esant feromagnetikui

Paveiksle 2.6 pav. grafiškai atvaizduojamos x ir y vertės kai kompasas yra sukamas ratu aplink savo ašį horizontalioje plokštumoje. Šiame pavyzdyje aplinkoje nėra jokių metalų ir matoma, kad gaunamas apskritimas kurio centras yra x ir y ašies susikirtimo taške $(0,0)$. Tokiu atveju azimutas gali būti apskaičiuojamas kaip pateikta (2.22) formulėje. Kai magnetometras yra sumontuotas robote, veikiantys varikliai, korpusas iškreipia kompasio parodymus. Judant robotui ratu aplink savo ašį ir fiksuojant kompasio parodymus gaunamas 2.7 pav. paveiksle pateiktas grafikas. Kaip matoma x ir y vertės yra iškreiptos ir nėra gaunama apskritimo forma (gaunama elipsė), kurios centras nėra x ir y ašies susikirtimo centras, o yra nukrypęs. Toks nukrypimas yra anksčiau minėtųjų veiksnių (variklių, korpuso ir pan.) pasekmė ir gali būti eliminuotas laikant, kad toks nukrypimas yra nekintantis.



2.6 pav. Magnetometro x ir y vertės nesant iškreipymams



2.7 pav. Magnetometro x ir y vertės esant iškreipymams

Paklaida, dėl feromagnetikų įtakos kompasui, gali būti eliminuojama įvedant perskaičiavimo faktorius kiekvienai ašiai X_F ir Y_F bei žinant kompensavimo vertes X_{OFF} ir Y_{OFF} (nukrypimo vertės nuo taško 0,0):

$$\begin{aligned} X_V &= X_F \cdot X + X_{OFF}; \\ Y_V &= Y_F \cdot Y + Y_{OFF}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Kompensuoti šias paklaidas taikomas paprastas kompas kalibravimo metodas:

- Kompasas sumontuojamas ant roboto ar kito objekto ir sukamas ratu horizontalioje plokštumoje;
- Surandamos abiejų ašių (x ir y) maksimali ir minimali vertė;
- Naudojant gautas vertes apskaičiuojami nežinomi dydžiai.

Didesnės maksimalios vertės koordinatės perskaičiavimo faktorius prilyginamas vienetui.

$$X_F = 1 \quad arba \quad (Y_{MAX} - Y_{MIN}) / (X_{MAX} - X_{MIN}); \quad (2.24)$$

$$Y_F = 1 \quad arba \quad (X_{MAX} - X_{MIN}) / (Y_{MAX} - Y_{MIN});$$

$$X_{OFF} = \left[(X_{MAX} - X_{MIN}) / 2 - X_{MAX} \right] \cdot X_F; \quad (2.25)$$

$$Y_{OFF} = \left[(Y_{MAX} - Y_{MIN}) / 2 - Y_{MAX} \right] \cdot Y_F.$$

Sistemose kuriose naudojamas magnetometras, jo duomenys turi būti priimami esant horizontalioje padėtyje, t.y. turi būti taikomas pakėlimo kompensavimas. Atlikus minėtąjį veiksmą, iš kiekvieno matavimo turi būti pašalinta paklaida atsirandanti dėl aplinkoje esančių feromagnetinių medžiagų. Kai šie du veiksmi yra atlikti turi būti įvertintas deklinacijos kampas. Šie trys veiksmi yra privalomi, kai norima išvengti paklaidų ir apskaičiuoti azimutą.

Azimutas (kampas rodantis į magnetinę šiaurę) robotų orientavimosi sistemose gali būti naudojamas kaip atskaitos taškas apskaičiuojant roboto pasisukimo kampą. Toks atskaitos taškas yra bendras keliems robotams ir yra naudojamas robotams orientuoti viena kryptimi.

3. Tiriamoji dalis

Šio darbo tikslas pritaikant magnetinio lauko jutiklius – magnetometrus, atskirti generuojamą magnetinį lauką nuo Žemės kuriamo ir taip nustatyti antrojo roboto buvimo kryptį pirmojo atžvilgiu. Pagrindiniai du veiksmas kuriuos turi gebėti atlikti robotas yra magnetinio lauko matavimas ir jo generavimas. Pirmasis robotas per pasirinktą ryšio kanalą išsiunčia antrajam robotui signalą – pradėti generuoti magnetinį lauką. Tuo tarpu pirmasis – matuoja magnetinio lauko pokyčius, kuriuos įvertindamas nustato antrojo roboto kryptį. Šiam tikslui įgyvendinti sudaroma sistemos funkcinė ir principinė elektrinė schemas, parinkamas magnetometras ir magnetinio lauko generatorius, atliekamas sudarytos sistemos eksperimentinį tyrimas.

3.1. Funkcinės schemos sudarymas

Robotų tarpusavio orientavimosi sistemos funkcinėje schemoje pavaizduotos svarbiausios dalys bei funkcijos, o elementus jungiančios linijos yra tų dalių bei funkcijų tarpusavio ryšiai. Funkcinėse schemose elementai vaizduojami stačiakampiais blokais arba sutartiniais grafiniais simboliais, o pavadinimai ir žymėjimai įrašomi į sistemos elementus.

Robotų tarpusavio orientavimosi sistemos funkcinė schema (2 priedas) susideda iš:

- Mikroprocesorinės sistemos MPS:
 - mikroprocesorius – MP;
 - emuliatorius JTAG (angl. *Joint Test Action Group*) – JTAG;
 - operatyviosios atminties įrenginys – OAĮ;
 - pastoviosios atminties įrenginys – PAĮ;
 - programuojamos pastoviosios atminties įrenginys – PPAĮ;
 - priežiūros laikmatis – WDT (angl. *Watchdog Timer*);
 - laikmačiai, skaitikliai – LS;
 - realaus laiko laikmatis – RTC (angl. *Real Time Clock*);
 - įvedimo–Išvedimo įrenginys – Įv. –Iš.Į.;
 - nuosekliojo ryšio kanalas – UART (angl. *Universal Asynchronous Receiver – Transmitter*) ;
 - sinchroninis ryšio kanalas – SPI (angl. *Serail Peripheral Interface*);
 - dvikryptis duomenų perdavimo kanalas – TWI (angl. *Two Wire Interface* arba I2C).

- magnetinio lauko generatorius – MLG;
- 2,4 GHz. RF (angl. *Radio Frequency*) ryšio modulis – RFM;
- TTL lygio keitiklis į USB – TTL–USB;
- JTAG keitiklis į USB – JTAG–USB;
- asmeninis kompiuteris – AK;
- inercinių matavimų įrenginys (9 laisvės laipsniai) – IMU:
 - magnetometras – MGM;
 - akcelerometras – AKM;
 - giroskopas – GIR.

Mikroprocesorinė sistema (MPS) atlieka robotų tarpusavio orientavimuisi reikalingus veiksmus, pagal jos vidinėje programų pastoviojoje atmintyje išsaugotą programą. Programinės įrangos įrašymas į mikrovaldiklio atmintį ir jos derinimas vykdomas per JTAG emuliatorių, kuris su asmeniniu kompiuteriu (AK) sujungiamas per USB sąsają. Tai pat numatoma dar viena ryšio sąsaja (UART), kuri jungiama prie AK su TTL lygio keitikliu į USB (TTL–USB), įvairių parametrų perdavimui. Naudojant 2,4 GHz. Radijo ryšio modulį, kuris su mikroprocesoriumi sujungiamas sinchronine ryšio sąsaja (SPI), vykdoma robotų tarpusavio komunikacija.

Šios sistemos robotų tarpusavio orientavimosi metodas remiasi, magnetinio lauko matavimu ir jo generavimu. Todėl šią sistemą tai pat sudaro magnetinio lauko generatorius (MGL), bei inercinių matavimų įrenginys (IMU). Magnetinio lauko generatorius, prie mikroprocesorinės sistemos prijungiamas per įvesties–išvesties įrenginį (Įv.–Iš.Į.). Inercinių matavimų įrenginys sudarytas iš magnetometro (MGM), kuris skirtas magnetinio lauko matavimo funkcijai atlikti ir dviejų papildomų: akcelerometro (AKM) ir giroskopo (GIR). Akcelerometras – įrenginys matuojantis tiesiaiegiį pagreitį, giroskopas – sukamąjį. Šie du įrenginiai reikalingi magnetometro matavimų korekcijoms atlikti. Tai pat gali būti naudojami paties roboto tikslesniam judėjimui erdvėje užtikrinti (inercinė navigacija).

Mikroprocesorinėje sistemoje tai pat numatytas priežiūros laikmatis (WDT), kuris apsaugo nuo programinės įrangos klaidų. Laikmačių skaitiklių blokas (LS) ir realaus laiko laikmatis (RTC) skirti diskretizuotiems ir/ar nustatytu laiku veiksams atlikti.

3.2. Magnetometrų savybių tyrimas

Magnetiniai kompasai (magnetometrai), kuriuose naudojami AMR tipo magnetiniai jutikliai, dėl savo tikslumo ir greitaveikos puikiai tinka šiai sistemai. Pagrindinės savybės, parametrai apibūdinantys magnetometrus yra matavimo dažnis, analoginio skaitmeninio keitiklio (ASK) skilčių skaičius (bitais), jautrumas (mGa), magnetinio srauto tankio matavimo ribos, krypties nustatymo tikslumas (laipsniais). Tai pat svarbi savybė yra duomenų atidavimo sąsaja. Paprastai galimos I2C arba/ir SPI sąsajos. Atsižvelgiant į šiuos parametrus parinkamas magnetometras. Šiam tikslui sudaryta 1 lentelė, kurioje palyginti trijų skirtingų gamintojų siūlomi magnetometrai.

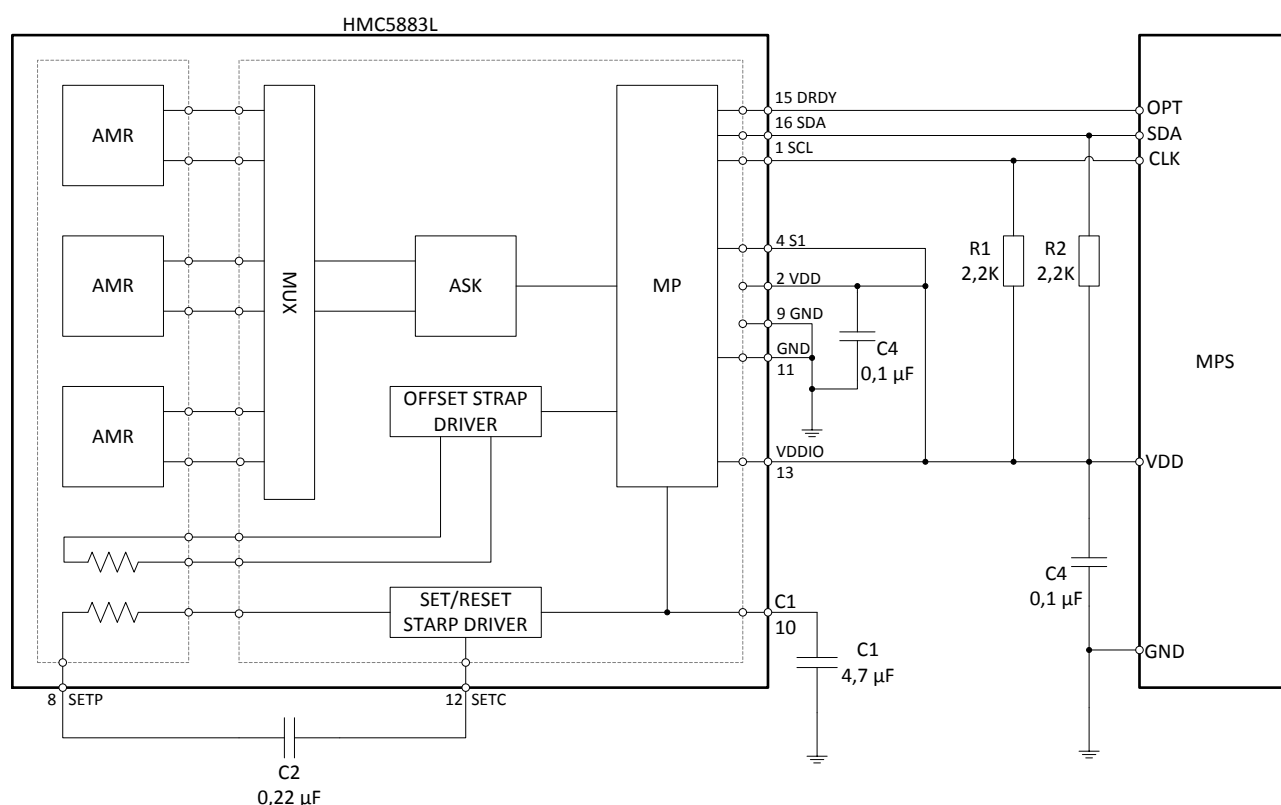
1 lentelė. Magnetometrų savybių palyginimas pagal gamintojus

Gamintojas	Modelis	Matvimų dažnis	Duomenų sąsaja	ASK skilčių skaičius	Jautrumas	Magnetinio srauto tankio matavimo ribos	Krypties nustatymo tikslumas, laipsniais
Honeywell	HMC5883L	160 Hz	I2C	12 bitų	2 mGa	±8,1Ga (keičiama)	1° – 2°
Memsic	MMC3316xMT	–	I2C	16 bitų	2 mGa	±16 Ga (nekeičiama)	< 1°
Freescale	MAG3110	80 Hz	I2C	16 bitų	1 mGa	± 10 Ga (nekeičiama)	1°

Kaip matyti iš aukščiau pateiktos lentelės, skirtingų gamintojų magnetometrai pasižymi gana skirtingomis savybėmis. Didžiausiu matavimo dažniu pasižymi Honeywell firmos magnetometras HMC5883L [16], mažiausiu – Freescale MAG3110 [18]. Tuo tarpu Memsic magnetometro MMC3316xMT [17] ši savybė aprašyme nepateikiama. Visų trijų nagrinėjamų magnetometrų duomenų sąsaja yra vienoda – I2C. AMR tipo jutikliai magnetometruose yra prijungiami prie vidinio valdiklio per ASK. Todėl yra svarbi ASK skilčių skaičius: mažiausias – HMC5883L, didžiausias – MMC3316xMT ir MAG3110. Kita svarbi magnetometrų savybė yra naudojamo magnetinio lauko jutiklio jautrumas, kuris gali siekti 0,1 mGa. Šiuose magnetometruose jis yra 1 – 2 mGa. Žemės magnetinis srauto tankis skirtingose vietose svyruoja nuo 0,25 Ga iki 0,6 Ga. Tačiau magnetometrų matuojamas magnetinio srauto tankis yra žymiai didesnis. Taip yra todėl, kad magnetometrai dažnai veikia magnetiškai triukšmingose aplinkose. Didžiausias magnetiniu srauto tankio matavimo ribas turi MMC3316xMT magnetometras, mažiausias – HMC5883L. Honeywell firmos magnetometras pasižymi viena savybe kurios neturi nei vienas iš kitų lyginamų

magnetometrų – magnetinio srauto tankio matavimo ribos šiame magnetometre gali būti keičiamos nuo $\pm 0,88$ Ga iki $\pm 8,1$ Ga. Ši savybė leidžia keičiant ribą pasiekti didesnę matavimų tikslumą, jautrumą. Gamintojai tai pat deklaruoja kokią krypties nustatymo tikslumą laipsniais galima pasiekti naudojant jų magnetometrus.

Peržvelgus anksčiau išvardintų gamintojų gaminius, parenkamas vienas naujesnių Honeywell magnetometrų HMC5883L. Pagrindinės savybės lėmusios šį pasirinkimą yra keičiama magnetinio srauto tankio matavimo ribos ($\pm 8,1$ Ga) ir matavimų dažnis (160 Hz).



3.1 pav. Magnetometro HMC5883L funkcinė ir prijungimo principinė elektrinė schema [16]

HMC5883L magnetometras sudarytas iš 3 AMR tipo jutiklių, kurių kiekvienas atsakingas už skirtingą ašį (x, y arba z), o jų rezoliucija siekia 2 mGa. Šie jutikliai per multiplekserį (MUX) prijungiami prie 12 bitų analoginio skaitmeninio keitiklio (ASK), kurio matavimai perduodami į vidinį valdiklį (MP). Viduje magnetometro esantis valdiklis saugo duomenis, bei valdo jų nuskaitymą iš AMR tipo jutiklių. Išsaugoti matavimai, gali būti prieinami kitai mikroprocesorinei

sistamai (MPS) per dvikryptę duomenų magistralę (I2C arba kitaip TWI). Tai pat per šią magistralę vykdomas magnetometro konfigūravimas.

Šio magnetometro savybės:

- Maža vartojama srovė (100 μ A) ir žema maitinimo įtampa (2,16–3,6 V).
- Maksimalus matavimų dažnis 160 Hz.
- Išvesties prievadas (DRDY), kurio būseną pasikeičia atlikus AMR jutiklių matavimus.
- Vidinis 12 bitų analoginis skaitmeninis keitiklis.
- AMR jutiklio jautrumas 2 mGa, magnetinio srauto tankio matavimo ribos $\pm 8,1$ Ga.
- Kompasso krypties nustatymo tikslumas $1^\circ - 2^\circ$.
- Maži gabaritai (3,0x3,0x0,9 mm).
- Paprasta prijungimo schema (reikalingi tik keli papildomi kondensatoriai).

3.3. Principinės elektrinės schemos sudarymas

Šiuolaikinėje elektronikoje pakanka parinkti pagrindinius elementus, o jų prijungimo principines elektrines schemas pateikia patys gamintojai. Tai smarkiai palengvina principinių elektrinių schemų sudarymą. Principinė elektrinė schema pateikiama prieduose (3 priedas).

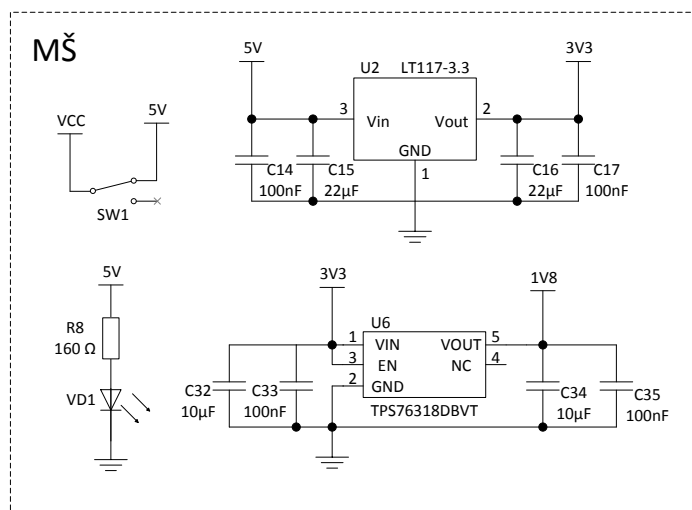
Sudarant mikroprocesorinės sistemos principinę elektrinę schemą, gamintojas tai pat pateikia mikrovaldiklio prijungimo bendrinę schemą. Rementis ja sudaroma principinė elektrinė schema (blokas MPS). MPS sudaro mikrovaldiklis U1 (NXP Philips LPC1769), veikiantis 120 MHz taktiniu dažniu. Šiam taktų dažniui pasiekti prijungiamas išorinis 12MHz kvarcinis rezonatorius X1, bei keli kondensatoriai C11 ir C12 22 pF. Kadangi yra reikalavimas sistemai naudoti realaus laiko skaitiklį (RTC), jo veikimui tai pat reikalingas išorinis kvarcinis rezonatorius X2 (32,768kHz) ir 3 V baterija BAT1.

Ijungus maitinimą mikrovaldikliui, visų jo registrų vertės yra neapibrėžtos. Reikalingas elektrinis signalas, kuris atliktų pradinius visų registrų nustatymus, tai – „RESET“ signalas. Jam yra išskirtas atskiras mikrovaldiklio prievadas, tačiau dažnai ši signalo grandinė yra integruota į valdiklio schemą. Signalas „RESET“ užduotis – neleisti pradėti mikrovaldikliui dirbti, kol nėra tam sąlygų (maitinimo įtampa turi pakilti iki darbinės vertės, turi startuoti taktinių impulsų generatorius), o visiems parametrams esant normos ribose, nustatyti teisingas pradines registrų vertes ir leisti

dirbti. Parenkama paprasčiausia RC grandinė, prijungta prie mikrovaldiklio „RESET“ išvado: įjungus maitinimą, kondensatoriaus įtampa pakils per tam tikrą laiko tarpą ir leis mikrovaldikliui pradėti darbą. RC grandinės prijungimui naudojamas 10 kΩ rezistorius (R1) ir 100 nF talpos kondensatorius (C9). Tokios vertės rekomenduojamos gamintojo specifikacijoje [20]. Tai pat lygiagrečiai kondensatoriui C9 prijungiamas mygtukas BUT1, kurį nuspaudus mikrovaldiklis yra perkraunamas, t.y. programa pradedama vykdyti nuo pat pradžių.

Kondensatoriai C1 – C6 prijungiami prie mikrovaldiklio skirti atskirų mikrovaldiklio vidinių dalių maitinimo įtampai filtruoti. Sudaroma standartinė jungtis prijungti emuliatoriui JTAG, kurios signalai TRST, TDI, TMS, TCK, RTCK, TDO ir RESET prijungiami prie mikrovaldiklio ir papildomai prijungiami per rezistorius R2–R7 (10kΩ) prie GND.

Mikroprocesorinės sistemos maitinimo įtampa yra 3,3 V, o visos sistemos įėjimo įtampa 5 V. Todėl reikalingas įtampos keitiklis (žeminamasis keitiklis). Parenkamas stabilizatorius LT117–3.3. Šio stabilizatoriaus įėjime ir išėjime prijungiami kondensatoriai, kurie veikia kaip žemų ir aukštų dažnių filtrai – apsaugo maitinimą nuo aukštadažnių įtampos svyravimų.



3.2 pav. Maitinimo šaltinio principinė elektrinė schema

Indikacijai, ar įjungtas maitinimas, naudojamas šviesos diodas VD1. Jam nuosekliai prijungiamas rezistorius R1, apkrovai ir įtampos kritimui sudaryti. Jo vertė apskaičiuojama pagal Omo dėsnį grandinės daliai [21]:

$$R_1 = \frac{U_{VREG} - U_{VD1}}{I_{VD1}} = \frac{5 - 1,8}{0,02} = 160 \, \Omega; \quad (3.1)$$

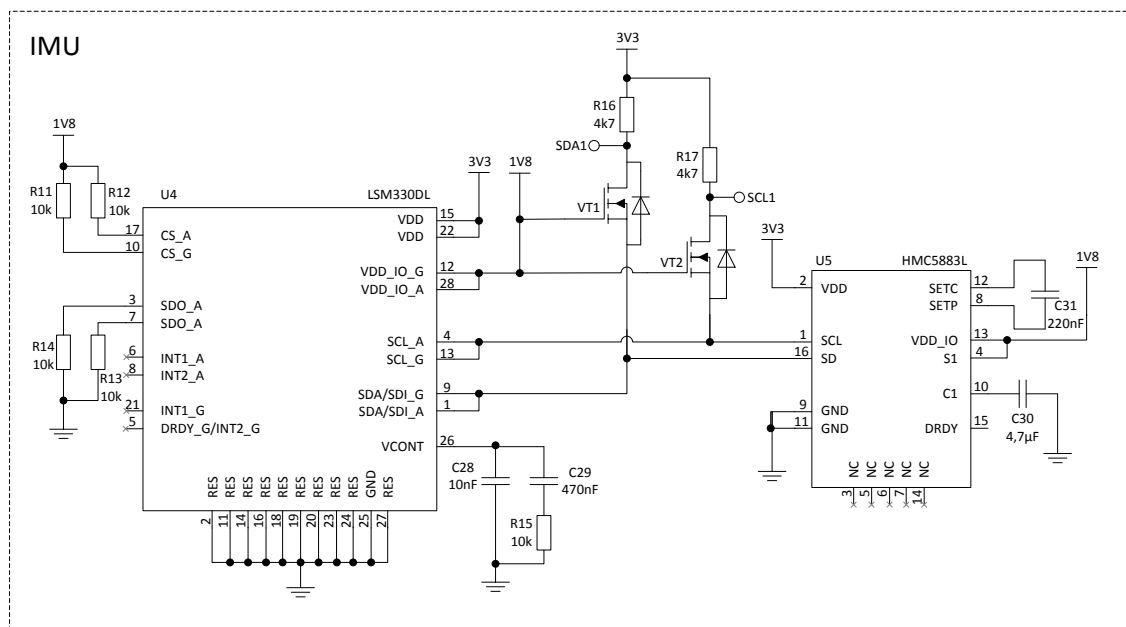
čia: U_{VREG} – stabilizuota maitinimo įtampa (+5 V);

U_{VD1} – šviesos diodo maitinimo įtampa (+1,8 V);

I_{VD1} – šviesos diodo tiesioginė srovė (20 mA).

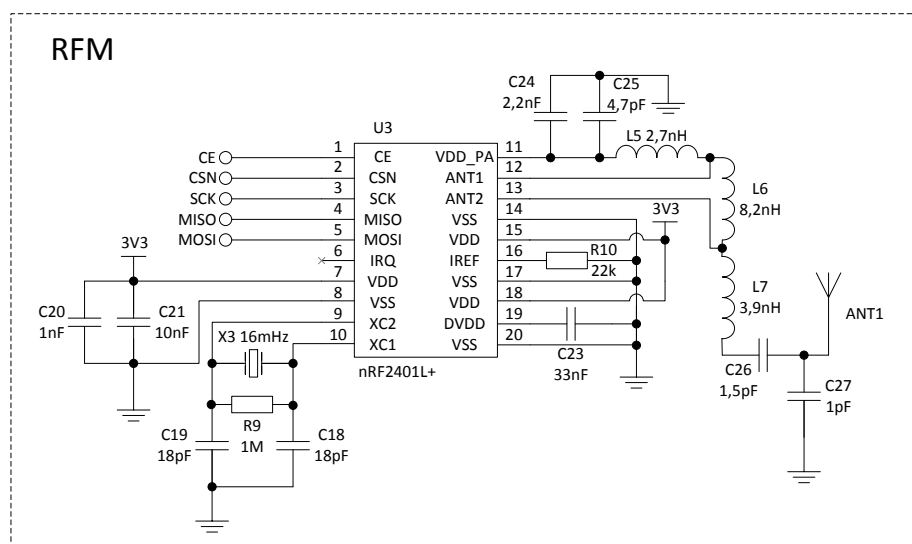
Dalis sistemos įtaisų gali būti maitinami iš 1,8 V įtampos šaltinio. Todėl reikalingas papildomas stabilizatorius, kuris keistų (pažemintų) įtampą iš 3,3 V į 1,8 V. Įrenginiai maitinami iš 1,8 V nuolatinės įtampos šaltinių (konkrečiu atveju galėtų būti IMU) vartoja labai nedaug srovės. Atsižvelgdami į tai parenkamas 150 mA stabilizatorius U6 TPS73618DBVT ir į jo grandines tai pat įjungiami kondensatoriai C32 – C35 – maitinimo įtampos svyravimams slopinti.

Sudarant IMU modulį parenkamos tik pagrindinės jo dalys, t.y. magnetometras, giroskopas ir akcelerometras. Skyrelyje 3.2 buvo parinktas magnetometras HMC5883L. Gamintojas dokumentacijoje pateikia šio magnetometro prijungimo principinę elektrinę schemą [16]. Pastaruoju metu daugelis gamintojų į vieną korpusą stengiasi sutalpinti kuo daugiau įrenginių, tam kad palengvinti schemų projektavimą ir sutaupyti vietos. Parenkamas gamintojo ST akcelerometras ir giroskopas viename luste U4 LSM330DL. Gamintojas tai pat dokumentacijoje pateikia pilną prijungimo principinę elektrinę schemą [22]. Remiantis gamintojų rekomenduojamomis prijungimo schemomis sudaroma galutinė IMU principinė elektrinė schema. Kadangi mikrovaldiklio I2C kanalo įtampos yra 3,3 V, o IMU 1,8 V reikia jas suvienodinti, tam parenkami nedidelės galios, didelės greitaveikos lauko tranzistoriai VT1 ir VT2.



3.3 pav. Inercinio matavimo įrenginio (IMU) principinė elektrinė schema

RF modulio principinė elektrinė schema sudaroma, pagal gamintojo rekomendacijas, pateikiamas dokumentacijoje [19]. Prie mikrovaldiklio U1, RF modulis U3 prijungiamas per SPI sąsają. Papildomai prie RD modulio reikia prijungti kvarcinį rezonatorių X3 (16 MHz) su kondensatoriais C18, C19(18pF), kondensatorius C20 (1 nF), C19 (10 nF), C23 (33nF) – skirti maitinimo įtampai filtruoti. Tai pat antenos prijungimo grandinė, sudaryta iš kondensatorių C24, C25, C26 ir C27 ir droselių L5, L6 ir L7.



3.4 pav. RF modulio prijungimo principinė elektrinė schema

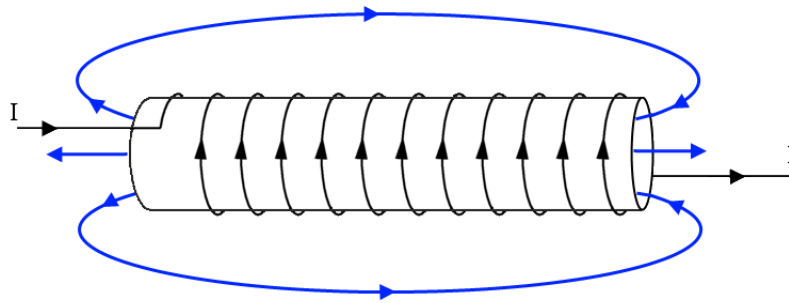
Pagal sudarytą principinę elektrinę schemą gali būti sudarinėjama montažinė schema. Atsižvelgiant į mikroprocesoriniai sistemai iškeltus reikalavimus, bei parinką mikrovalklį šios mikroprocesorinės sistemos montažinės schemos galima ir neprojektuoti, o nusipirkti gamykloje pagamintą su visais elementais ir t.t. Tokiu atveju belieka suprojektuoti atskirus modulius kurie turėtų galimybę būti prijungiami prie mikroprocesorinės sistemos: magnetinio lauko generatoriaus (MLG), radijo ryšio modulio (RFM), bei inercinių matavimų įrenginį (IMU).

3.4. Magnetinio lauko generatoriaus parinkimas ir jo savybių tyrimas

Paprasčiausiu magnetinio lauko generatoriumi gali būti elementarus elektromagnetas.

Elektromagnetas – elektromagnetinis prietaisas, pasižymintis magneto savybėmis tuomet, kai per prietaiso elektrines grandines teka elektros srovė. Elementaraus elektromagneto sudedamosios dalys yra ritė bei feromagnetikas, apie kurį vyniojami ritės laidai. Rite tekanti elektros srovė sukuria

magnetinį lauką. Dingus elektros srovei, prietaisas praranda magneto savybes. Daugelio vijų ritė, kai ja teka elektros srovė, vadinama solenoidu.



3.5 pav. Elementarus elektromagnetas

Elektromagnetai pagal šerdies formą yra skirstomi į:

- Pasagiškuosius.
- Strypinius.
- Cilindrinius ir t.t.

Elektromagneto (solenoido) viduje magnetinis laukas yra vienalytis. Jo magnetinio lauko indukcija apskaičiuojama:

$$B = \frac{\mu_0 \mu N I}{l}; \quad (3.2)$$

čia μ_0 – magnetinė konstanta;

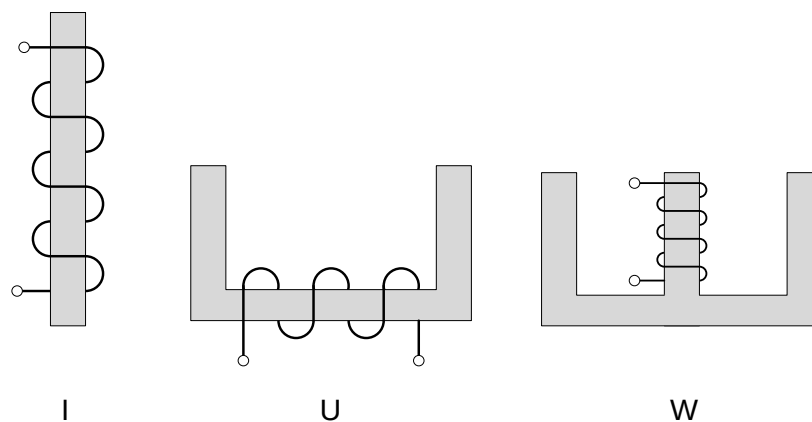
μ – aplinkos santykinė magnetinė svarba, nusakanti jos magnetines savybes;

l – ritės ilgis;

N – vijų skaičius.

Magnetinio lauko indukcija priklauso nuo vijų skaičiaus ir juo tekančios srovės, kuo šie parametrai didesni tuo magnetinio lauko indukcija didesnė.

Šioje sistemoje gali būti naudojami strypiniai (I), pasagiškieji (U), arba W formos elektromagnetai, kurie pateikti 3.6 pav. Norint įsitikinti kiekvieno magneto tinkamumu atliekamas kiekvieno elektromagneto modaliavimas, naudojant programų paketą „Maxwell“ [23].



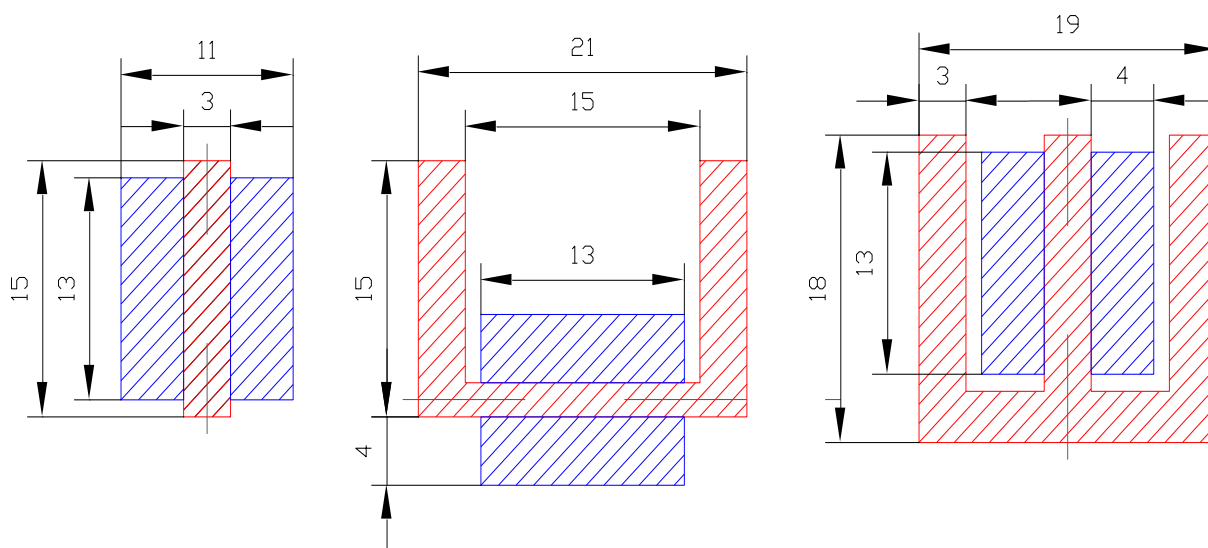
3.6 pav. Elektromagnetų formos

Magnetinių laukų modeliavimui pasirinkta „Ansoft“ firmos produkcij „Maxwell“, kuri pilnai atlieka reikalingus skaičiavimus ir sprendžia iškeltus uždavinius. Ši programa „Maxwell 13“ yra pilna versija. Ji skaičiuoja magnetinius, elektrostatinus, šiluminius ir kitus laukus.

Vykdamant modeliavimą „Maxwell“ programa atliekami šie veiksmai:

1. Sukuriamas naujas projektas.
2. Paruošiama braižymo aplinka: parenkamas matavimo vienetas, mastelis.
3. Sukuriamas 2D arba 3D modelis, arba importuojamas jau nubraižytas su kita programa (pvz. AutoCAD).
4. Parenkamos objekto dalių medžiagos.
5. Parenkami modelio parametrai: srovė, įtampa, modeliuojamos aplinkos ribos.
6. Sukuriamos modelio analizavimo taisyklės ir vykdomas analizavimas.
7. Gauti rezultatai pateikiami grafine arba lenteline forma.

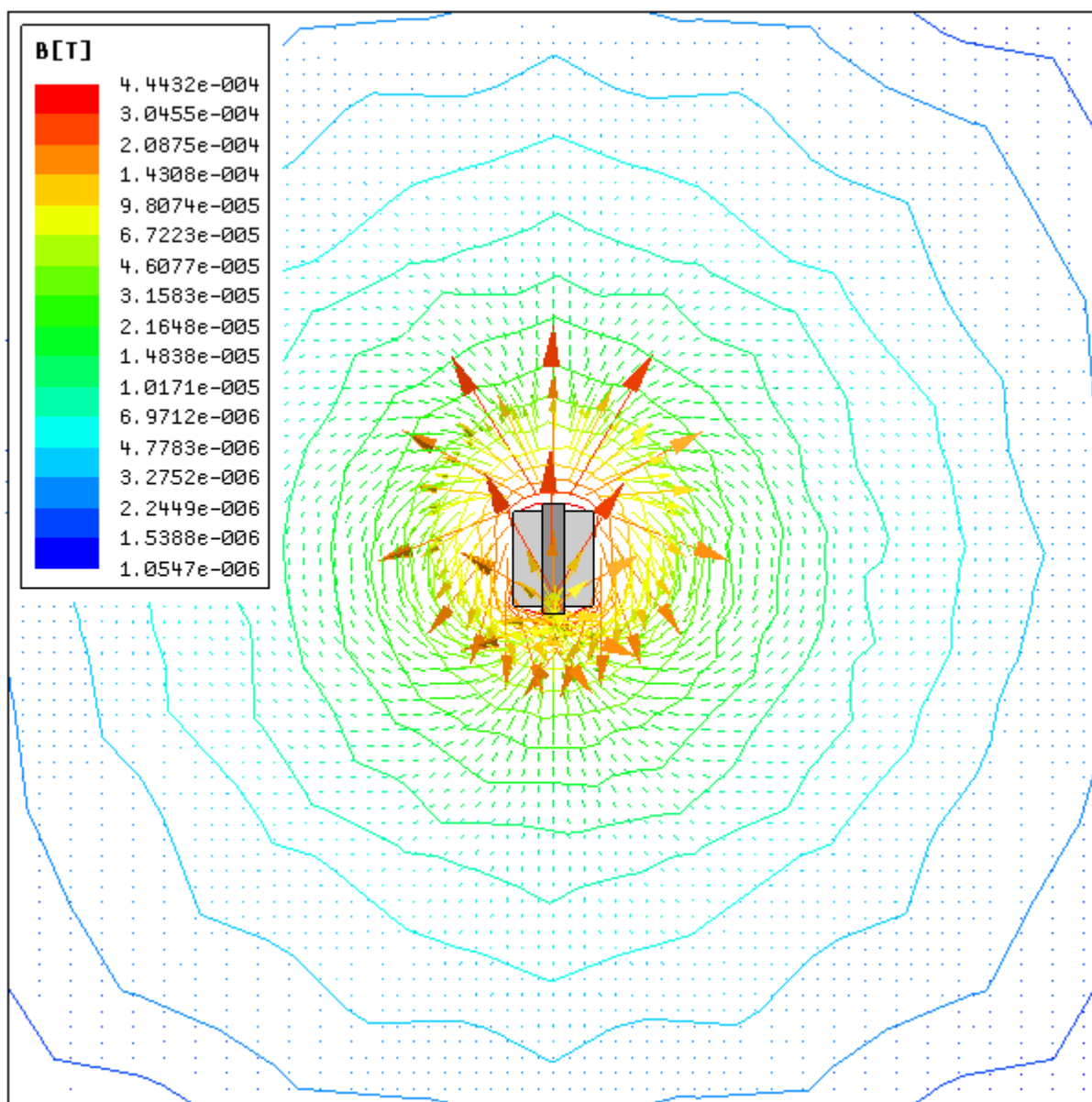
Paveiksle 3.7 pav. pateiktos visų trijų pasirinktų elektromagnetų formų skersinių pjūvių brėžiniai nubraižyti naudojantis „AutoCAD“ programų paketu. Mėlyna spalva pažymėta dalis atitinka elektromagneto apviją, jų plotas per visas tris formas nesikeičia. Raudona spalva pažymėta šerdis. Matmenys pateikti milimetrais. Remiantis šiais brėžiniais buvo sudaryti modeliai programų pakete „Maxwell“.



3.7 pav. Elektromagnetų skersinių pjūvių brėžiniai

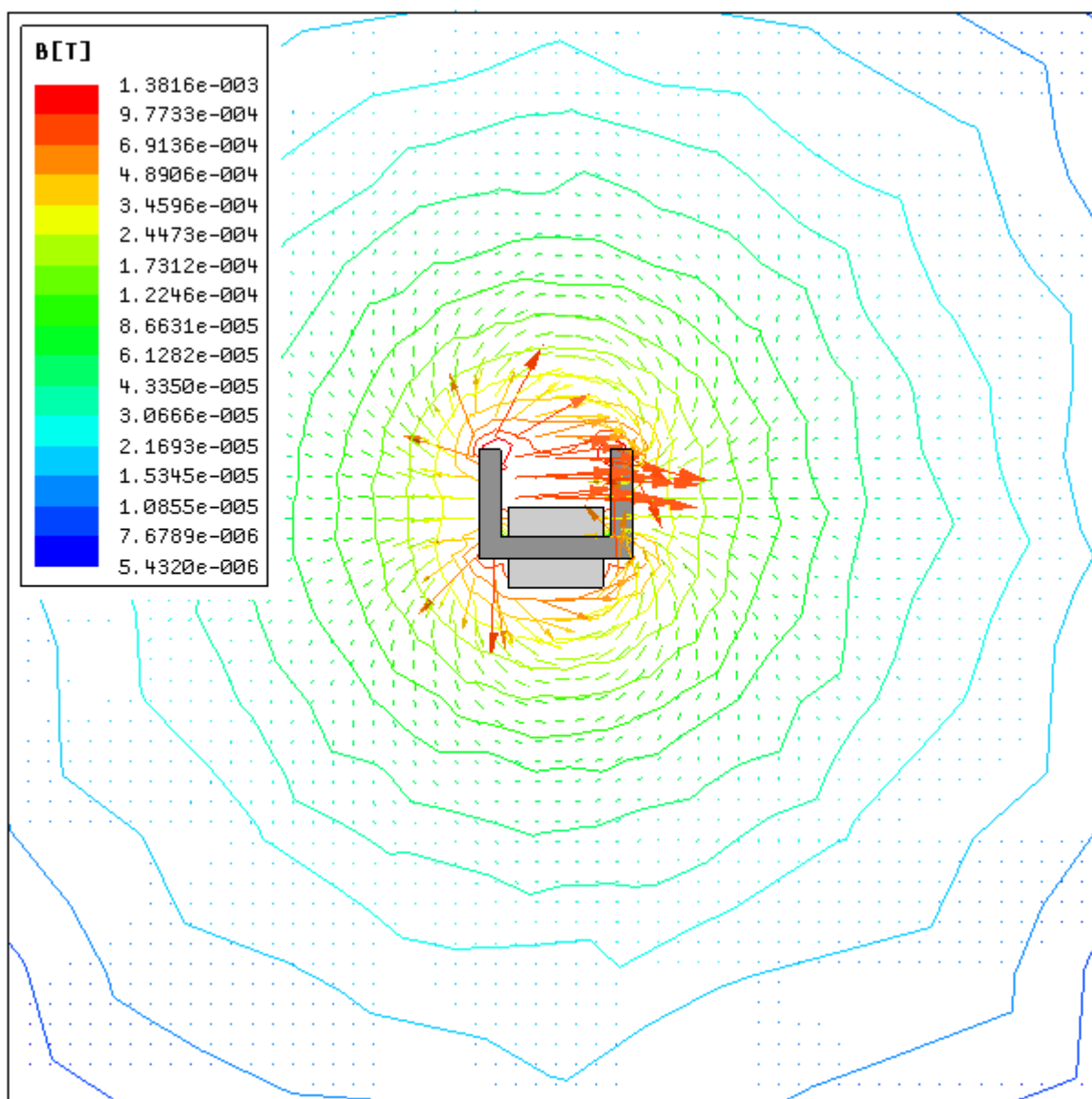
Gauti rezultatai modeliuojant kiekvieną atskirai elektromagnetų formą pateikti žemiau (3.8 pav. – 3.10 pav. paveiksluose). Elektromagneto šerdies parinkta medžiaga yra geležis, o apvijos – varis, tekanti srovė per apvijas lygi 10 A, aplinkos terpė vakuumas. Programoje „Maxwell“ nėra nurodomas aplink šerdį vyniojamų vijų skaičius N , o nurodomas plotas kuriuo teka srovė. Šis plotas visuose elektromagnetuose yra vienodas, todėl ir vijų skaičius yra toks pat. Kadangi svarbu plotas kuriam veikia magnetinis laukas, pasirinktas modeliavimo aplinkos plotas 150x150 mm. Elektromagnetų matmenys yra pasirinkti atsižvelgus į robotų dydį (100x100 mm), kuriuose šis metodas galėtų būti pritaikomas.

Pastebėta, kad visais trim atvejais, didinant arba mažinant srovę, magnetinio lauko stiprio vektorių kryptis nesikeičia, kinta tik pats magnetinio lauko stiprio parametras. Pakeitus srovės tekėjimo kryptį (ženklą), magnetinio srauto tankio vektorių kryptys pasikeičia – tampa priešingos buvusioms.



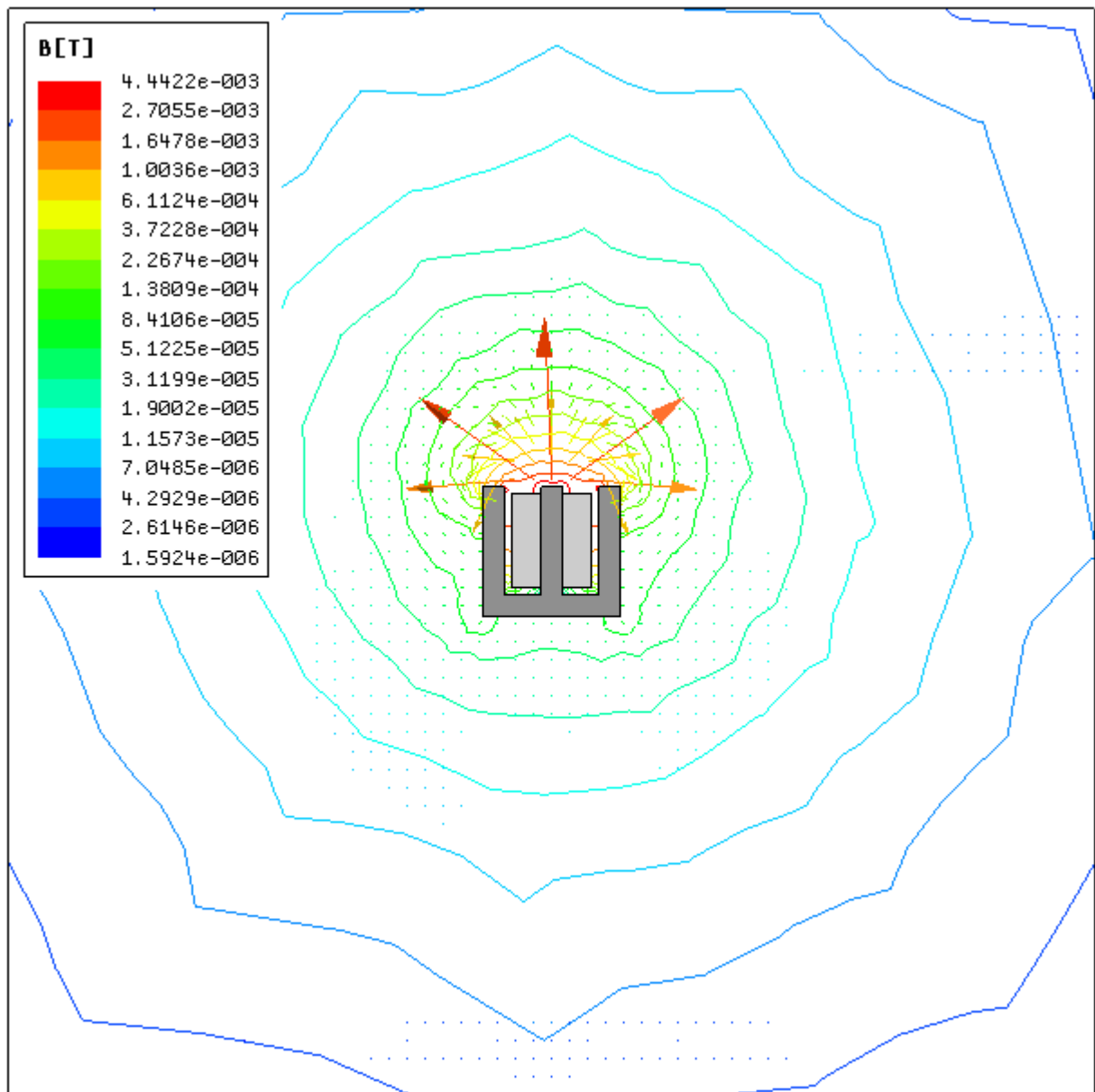
3.8 pav. I formos elektromagneto modeliavimo rezultatai

Paveiksle 3.8 pav. pateikiami I formos elektromagneto modeliavimo rezultatai: magnetinio srauto tankis B ir jo vektoriai, žymimi rodyklėmis. Kaip matoma iš spalvų paletės magnetinio srauto tankis kinta nuo $4,4432 \times 10^{-4}$ T iki $1,0547 \times 10^{-6}$ T. Magnetino srauto tankio vektorių linijos kaip ir buvo tikėtasi išeina iš vienos elektromagneto šerdies pusės ir sueina į kitą.



3.9 pav. U formos elektromagneto modeliavimo rezultatai

Paveiksle 3.9 pav. pateikiami U formos elektromagneto modeliavimo rezultatai: magnetinio srauto tankis B ir jo vektoriai, žymimi rodyklėmis. Magnetinio srauto tankis kinta nuo $1,3816 \times 10^{-3}$ T iki $5,4320 \times 10^{-6}$ T. Kaip matyti vektorių linijos nesklinda iš elektromagneto viršaus, o iš dešinės pusės. Pakeitus srovės kryptį vektorių linijos sklinda iš kairės elektromagneto pusės.



3.10 pav. W formos elektromagneto modeliavimo rezultatai

Paveiksle 3.10 pav. pateikiami W formos elektromagneto modeliavimo rezultatai: magnetinio srauto tankis B ir jo vektoriai, žymimi rodyklėmis. Kaip matyti iš spalvų paletės, magnetinio srauto tankis kinta nuo $4,4422 \times 10^{-3}$ T iki $1,5924 \times 10^{-6}$ T. Šiuo atveju magnetinio srauto tankis didesnis elektromagneto priekyje ir magnetinio srauto tankio vektorių linijos užsidaro būtent per šerdį, kuri apgaubia apvijas. Taip prislopinamas antrojo elektromagneto poliaus poveikis.

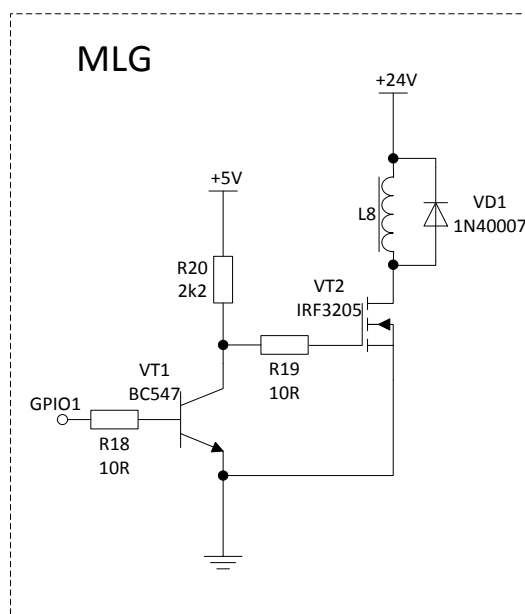
2 lentelė. Elektromagnetų magnetinio srauto tankių minimumo ir maksimumo palyginimas

Elektromagneto forma	$B_{\min}$, T	$B_{\min}$, Ga	$B_{\max}$, T	$B_{\max}$, Ga
I	1,0547e-6	0,010547	444,32e-6	4,4432
U	5,4320e-6	0,054320	1381,6e-6	13,816
W	1,5924e-6	0,015924	4442,2e-6	44,422

Iš gautų rezultatų matyti, kad mažiausias magnetinio srauto tankis susidaro I formos elektromagnete ($1,0547 \times 10^{-6}$ T), o didžiausias W formos ($4442,2 \times 10^{-6}$ T). Vienas iš magnetiniam lauko generatoriui keliamų reikalavimų yra kryptingai pasiskirstęs magnetinio lauko stiptis, t.y. magnetinio srauto tankio linijos neturi būti išsidariusios aplink visą elektromagnetą, o kiek įmanoma labiau koncentruotos aplink magnetinio srauto tankio vektorių. Kaip matoma iš gautų rezultatų, šį kriterijų geriausiai atitinka W formos magnetas. Šios formos elektromagnetas tai pat pasižymi savybe (dėl savo šerdies formos) – magnetinio srauto tankio vektoriaus linijos užsidaro per elektromagneto šerdį, taip prislopinama antrojo poliaus įtaka magnetiniam laukui. Geriausiai tinkanti elektromagneto forma yra W, tačiau gali būti panaudojamas ir I formos elektromagnetas šiame darbe aprašomiems uždaviniams spręsti.

Pasirinkto magnetometro jautrumas yra 5 mGa, o matuojamo magnetinio srauto tankio ribos $\pm 8,1$ Ga. Minimalus magnetinio srauto tankis visų elektromagnetų modeliujamame plote (150×150 mm) yra didesnis nei magnetometro jautrumas. Maksimalus magnetinio srauto tankis visų modeliujamų elektromagnetų aplinkoje yra gana skirtingas, tačiau ši vertė gaunama tik prie pat elektromagneto, o tolstant nuo jo mažėja. Magnetometras U ir W formos elektromagnetų skleidžiamo magnetinio srauto tankio nesugebėtų pamatuoti, nes jis viršija matuojamas ribas. Tačiau, šios ribos yra viršijamos tik kai atstumas iki elektromagneto yra mažesnis nei 20 mm. Atsižvelgiant į tai, visos ištirtos elektromagnetų formos yra tinkamos naudoti, jei magnetinio srauto tankis neviršija magnetometro ribų, t.y. magnetometras niekada nepriartėja prie magnetinio lauko generatoriaus arčiau nei 20 mm.

Tokiam elektromagnetui valdyti reikalinga nedidelė grandinė sudaryta iš tranzistorinio rakto. Principinė elektrinė schema pateikta 3.11 pav.



3.11 pav. Magnetinio lauko generatoriaus principinė elektrinė schema

Šis tranzistorinis raktas sudarytas iš dviejų pakopų: galios dalies ir valdymo. Galios dalį sudaro lauko tranzistorius VT2, kuris parenkamas su didesne galios atsarga. Šio tranzistoriaus maksimali santakos – ištakos srovė 110 A, o įtampa 55 V. Pagal gamintojo rekomendacijas parenkama užtūros varža $R19 = 10 \Omega$. Elektromagnetui (ritė su feromagnetine šerdimi) L8, lygiagrečiai prijungiamas diodas VD1, kad apsaugotų nuo atgalinės srovės. Kadangi naudojamo mikrovaldiklio išėjimo įtaiso įtampa yra 3,3 V, o galios tranzistoriaus VT2 valdymo įtampa 5 V, reikalingas papildomas tranzistorius, galios grandinės valdymo impulsams formuoti. Parenkamas NPN tipo tranzistorius BC547, pagal gamintojo rekomendacijas parenkami rezistoriai R18 ir R20. Sudarytas tranzistorinis raktas veikia kaip jungiklis, priklausomai nuo to koks valdymo signalas paduodamas iš mikrovaldiklio (GPIO).

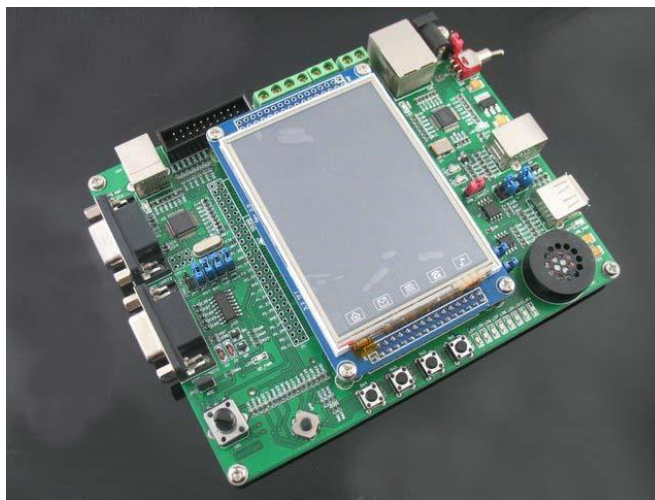
3.5. Sistemos eksperimentinis tyrimas

Sistemos eksperimentiniam tyrimui atlikti minimaliai reikalingi du robotui. Šiam tikslui nenaudojami realių robotų, juos imituos dvi apvalios plokštelės besisukančios aplink savo ašį. Ant vienos iš jų sumontuojamas jutiklis (IMU) ant kitos – magnetinio lauko generatorius. Plokštelė

sukdamasi aplink savo ašį atitinka veiksmą, kai robotas sukasi aplink savo. Abi šios plokštelės pastatomos nedideliu atstumu (iki 30 cm) viena nuo kitos.

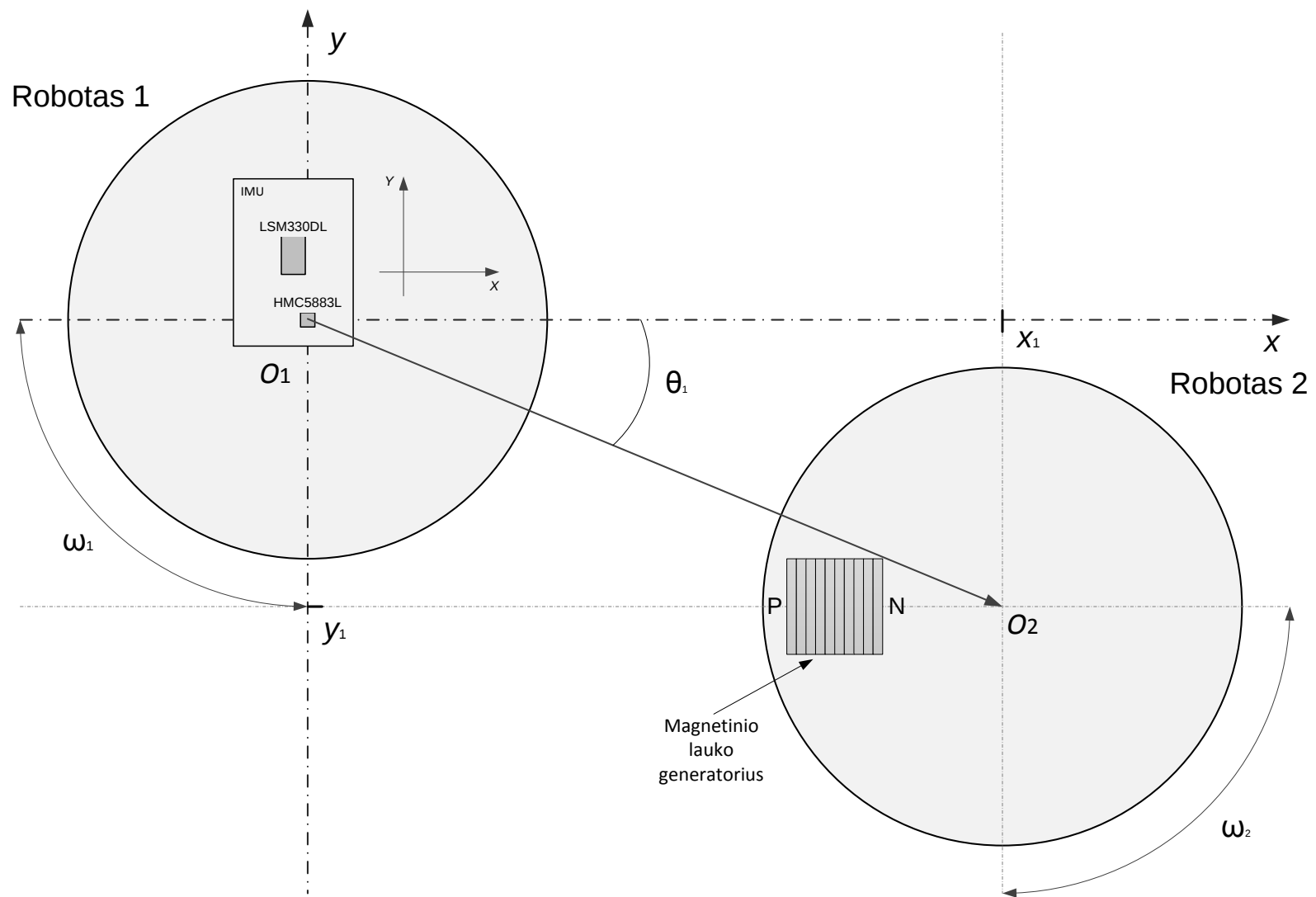
Paveiksle 3.13 pav. pateikta dviejų robotų tarpusavio orientavimosi sistema. Abu robotai gali sukstis aplink savo ašį $O_{1,2}$ kampiniu greičiu $\omega_{1,2}$. Pirmasis robotas turi 3.3 skyriuje pateiktą IMU (akcelerometras, giroskopas, magnetometras), naudojamą magnetiniam srauto tankiui matuoti.

IMU plokštė yra prijungiama prie 3.12 pav. paveiksle pateiktos bandymų plokštės LPC1768, kuri atitinka 3.1 punkte pateiktos funkcinės schemos MPS bloką. Ji turi visas reikalingas duomenų perdavimo sąsajas: I2C – prijungti IMU, SPI – prijungti radijo ryšio modulis, RS232 sąsają per kurią gali būti perduodami duomenys į kompiuterį. Be šių reikalingiausių, dar turi: LCD ekraną, dvi CAN Bus ir vieną RS485 sąsajas, USB OTG ir USB Host, mygtukus, potenciometrą, Ethernet sąsają, RTC laikrodį ir t.t. Ši bandymų plokštė naudojama konfigūruoti magnetometrui, gautiems iš jo duomenims atvaizduoti LCD ekrane, vykdyti robotų tarpusavio orientavimosi algoritmus kampui tarp robotų apskaičiuoti ir persiųsti nustatytai informacijai į kompiuterį.

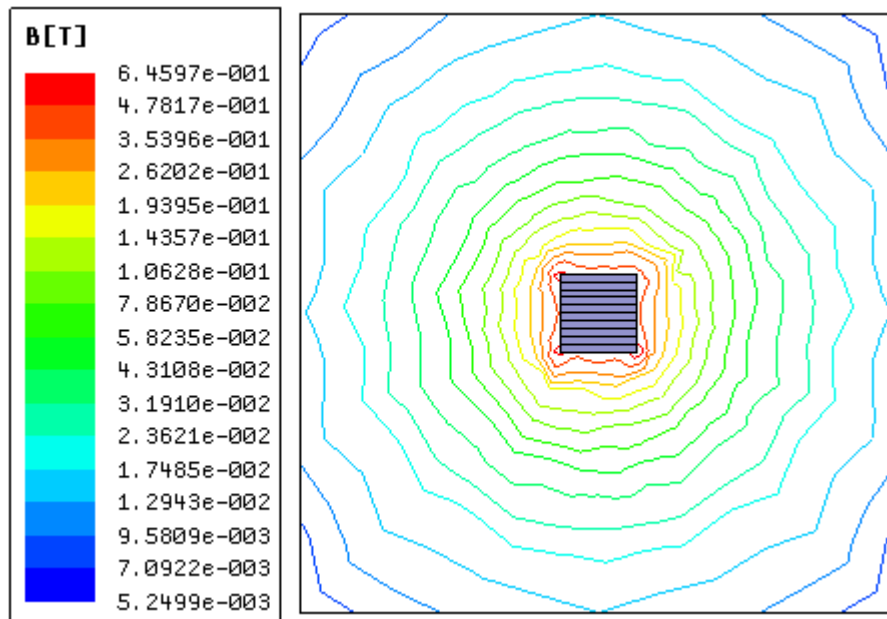


3.12 pav. Bandymų maketas LPC1768

Antrasis robotas turi magnetinio lauko generatorių. Gali būti panaudojami 3.4 skyrelyje pateikti elektromagnetai, tačiau bandymų metu naudojami 10 vienetų cilindro formos neodiminių magnetų, kurių matmenys 20x2 mm. Taip yra pasirinkta dėl to, kad namų sąlygomis pagaminti kokybiškai veikiantį vieną iš elektromagnetų sunkiai pavyktų. Tai pat, dviejų robotų orientavimosi užduočiai atlikti nėra būtinas valdomas magnetinio lauko generatorius. Naudojamo magnetinio lauko generatoriaus modelis, atliktas programų paketu „Maxwell“, pateiktas paveiksle 29 pav.



3.13 pav. Dviejų robotų tarpusavio orientavimosi sistema



3.14 pav. Magnetinio lauko generatorius, sudaryto iš 10 neodiminių magnetų, modeliavimo rezultatai

Kaip matyti iš modeliavimo rezultatų (3.14 pav.), magnetinio srauto tankis prie pat magneto yra 0,64597 T, modeliavimo aplinkos pakraščiuose – 0,0052499 T. Modeliavimo aplinka – vakuumas, kurios plotas yra 50x50 mm. Magnetinio lauko generatoriaus (10 neodiminių magnetų) parinkta medžiaga NdFe30, o plotas 20x20 mm.

Pirmasis robotas prieš pradėdamas orientavimosi veiksmus turi sukalibruoti magnetometrą, t.y. pašalinti aplink esančių feromagnetikų įtaką, dėl kurios atsiranda paklaidos. Kalibravimas atliekamas remiantis teorinės dalies 2.3 skyriuje pateikta medžiaga. Robotui sukantis aplink savo ašį O_1 (kartu ir magnetometrui aplink savo) ieškoma x ir y ašių maksimalių ir minimalių verčių ($X_{\max}$, $X_{\min}$, $Y_{\max}$, $Y_{\min}$). Šios vertės naudojamos perskaičiavimo koeficientams (X_F , Y_F) ir kompensavimo vertėms (X_{OFF} , Y_{OFF}) rasti.

$$\begin{aligned} X_K &= X_F \cdot X_R + X_{\text{OFF}}; \\ Y_K &= Y_F \cdot Y_R + Y_{\text{OFF}}. \end{aligned} \tag{3.3}$$

čia: X_R , Y_R – atitinkamai x ir y ašies realios vertės gautos iš magnetometro;

X_K , Y_K – atitinkamai x ir y ašies sukalibruotos vertės.

Didesnės maksimalios vertės koordinatės perskaičiavimo faktorius prilyginamas vienetui.
Perskaičiavimo faktorių apskaičiavimas:

$$\begin{aligned} X_F &= 1 \quad \text{arba} \quad X_F = (Y_{MAX} - Y_{MIN}) / (X_{MAX} - X_{MIN}); \\ Y_F &= 1 \quad \text{arba} \quad Y_F = (X_{MAX} - X_{MIN}) / (Y_{MAX} - Y_{MIN}); \end{aligned} \quad (3.4)$$

Kompensavimo verčių apskaičiavimas:

$$\begin{aligned} X_{OFF} &= \left[(X_{MAX} - X_{MIN}) / 2 - X_{MAX} \right] \cdot X_F; \\ Y_{OFF} &= \left[(Y_{MAX} - Y_{MIN}) / 2 - Y_{MAX} \right] \cdot Y_F. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Kalibravimo nebūtina kartoti prieš kiekvieną tolimesnį veiksmą, jis atliekamas vieną kartą prieš pradėdant orientavimosi veiksmus. Tikslesniam kalibravimui užtikrinti, galima robotui apsisukti aplink savo ašį ir daugiau nei vieną kartą.

Grafinis kalibravimo algoritmas pateiktas 3.15 pav. paveiksle.

1 blokas – sukamas ciklas kol robotas apsisuks 360° .

2 blokas – nuskaityti duomenys iš magnetometro (X ir Y).

3 blokas – tikrinama ar nuskaityta X vertė yra didesnė už jau žinomą X_{max} , jei taip, preinama prie 4 bloko.

4 blokas – atnaujinama X_{max} vertė.

5 blokas – tikrinama ar nuskaityta X vertė yra mažesnė už X_{min} , jei taip pereinama prie 6 bloko.

6 blokas – atnaujinama X_{min} vertė.

7 blokas – tikrinama ar nuskaityta Y vertė yra didesnė už jau žinomą Y_{max} , jei taip, preinama prie 8 bloko.

8 blokas – atnaujinama Y_{max} vertė.

9 blokas – tikrinama ar nuskaityta Y vertė yra mažesnė už Y_{min} , jei taip pereinama prie 10 bloko.

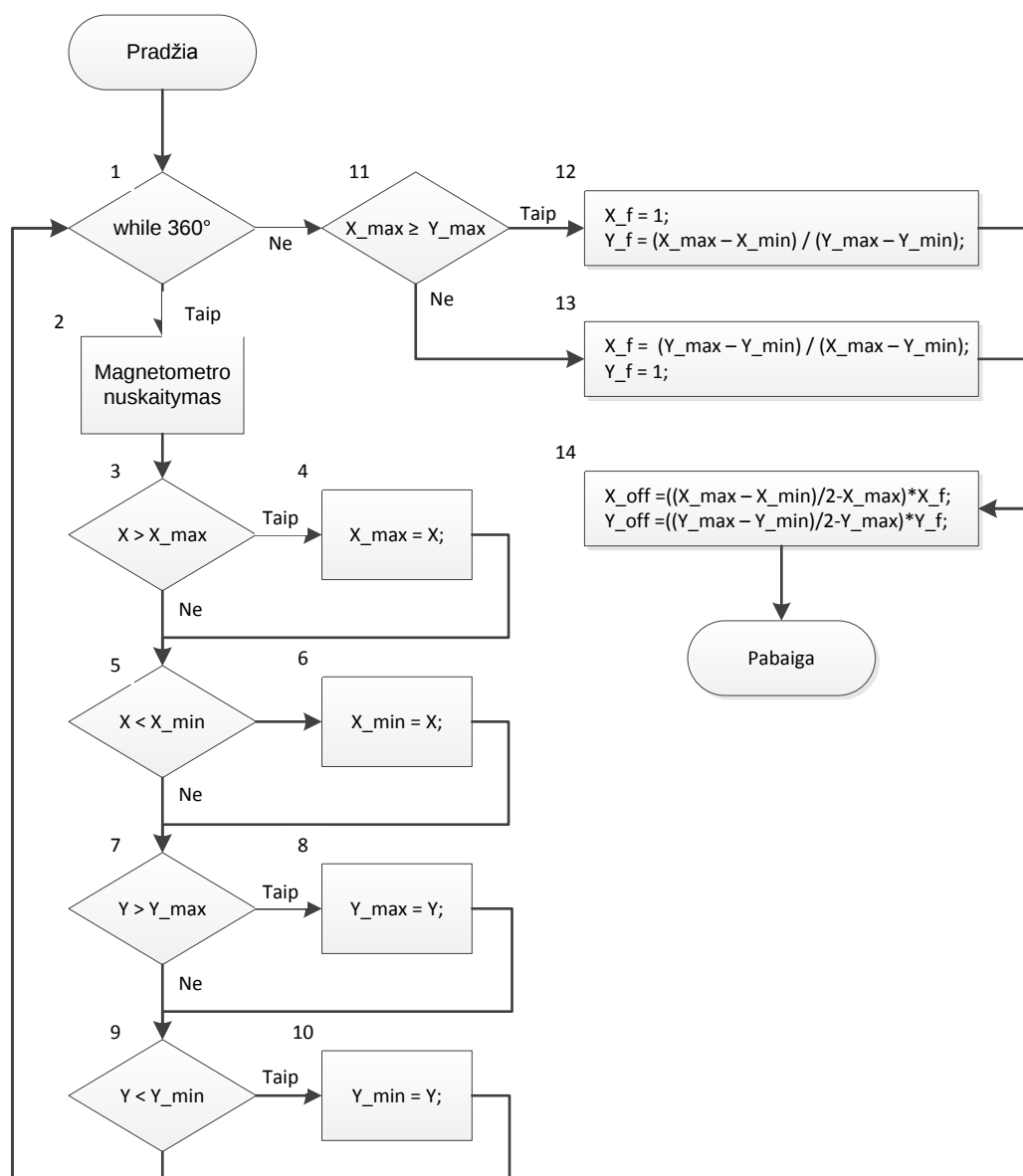
10 blokas – atnaujinama Y_{min} vertė.

11 blokas – tikrinama ar X_{max} vertė yra didesnė arba lygi už Y_{max} , jei taip pereinama prie 12 bloko, jei ne – 13 bloko.

12 blokas – apskaičiuojamos X_f ir Y_f vertės pagal (3.4) išraišką, kai $X_f = 1$.

13 blokas – apskaičiuojamos X_f ir Y_f vertės pagal (3.4) išraišką, kai $Y_f = 1$.

14 blokas – pagal (3.5) išraišką apskaičiuojamos X_{off} ir Y_{off} vertės.



3.15 pav. Magnetometro kalibravimo algoritmas

Įvykdžius kalibravimą galima pradėti robotų tarpusavio krypties (kampų) nustatymą. Pirmasis robotas stovi vietoje ir per radijo ryšio kanalą persiunčia antrajam robotui užduotį pradėti sukis aplink savo ašį (eksperimento metu tiesiog paspaudžiamas mygtukas pradėti). Kaip matyti iš paveikslo 3.13 pav. naudojamas magnetinio lauko generatorius nuo roboto sukimosi ašies O_2 prastumtas į šalį, o teigiamas polius P nusuktas į roboto išorę. Kadangi magnetinio lauko generatorius yra prastumtas nuo sukimosi ašies, besisukant antrajam robotui aplink savo ašį, pirmąjį veikia skirtingo dydžio magnetinis laukas. Radus maksimalų veikiančio magnetinio srauto tankio

vektoriaus dydį, jo kampas atitinka ieškomą kampą θ . Magnetinio lauko vektoriaus dydis apskaičiuojamas iš gautų iš magnetometro ir sukalibruotų X_K ir Y_K verčių:

$$H_{XY} = \sqrt{X_K^2 + Y_K^2}; \quad (3.6)$$

čia: X_K ir Y_K – sukalibruotos, pagal (3.3) išraišką, magnetometro X ir Y matavimų vertės.

Kol antrasis sukasi aplink savo ašį, pirmasis ieško maksimalaus magnetinio srauto tankio vektoriaus dydžio ir išsisaugo X_K ir Y_K vertes. Žinant šias vertes, Robotas 1 apskaičiuoja kampą θ , kuris yra maksimalaus magnetinio srauto tankio vektoriaus kampas ir kartu rodo kryptį į antrąjį robotą:

$$\theta = \arctan(Y_K / X_K). \quad (3.7)$$

Yra akivaizdu, jog gautas kampas θ rodo antrojo roboto kryptį pirmojo atžvilgiu ir atvirkščiai, todėl antrajam robotui nėra būtina kartoti tą pačią veiksmų seką iš naujo. Pakanka per RF ryšio kanalą perduoti šį kampą.

Grafinis robotų tarpusavio padėties nustatymo algoritmas pateiktas 3.16 pav. paveiksle.

1 blokas – inicializuojami kintamieji, nustatomi į 0.

2 blokas – nustatomos magnetometro matuojamo magnetinio srauto tankio ribos į $\pm 0,88$ Ga.

3 blokas – vykdomas ciklas kol antrasis robotus apsisuks aplink savo ašį.

4 blokas – nuskaitomi duomenys (x, y) iš magnetometro.

5 blokas – patikrinama ar duomenys nėra lygūs -4096 (skaičius kuris reiškia, jog magnetinis srauto tankis viršija matuojamas ribas), jeigu taip pereinama prie 6 bloko, jeigu ne – 9.

6 blokas – tikrinama ar nustatyta magnetometro rezoliucija yra mažesnė už maksimalią, jei taip pereinama prie 7 bloko, jei ne – 8.

7 blokas – padidinama magnetometro rezoliucija.

8 blokas – grąžinama, kad nepavyko nustatyti kito roboto krypties, robotas per arti.

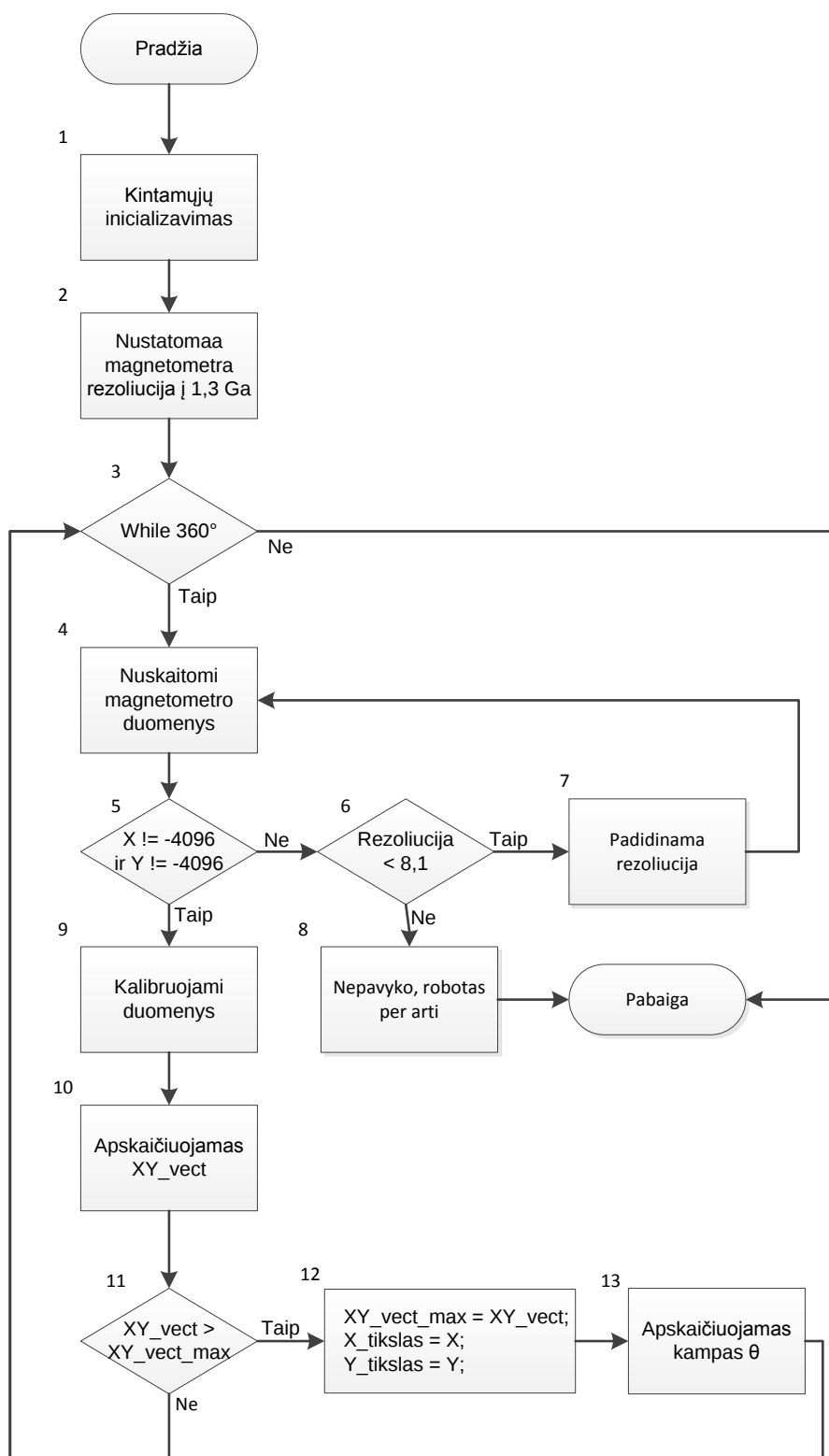
9 blokas – kalibruojami gauti duomenys iš magnetometro pagal (3.3) išraišką.

10 blokas – apskaičiuojamas magnetinio lauko vektoriaus dydis pagal (3.6) išraišką.

11 blokas – tikrinama ar gautas magnetinio srauto tankio vektorius yra didesnis už žinomą maksimalų, jei taip pereinama prie 12 bloko, jei ne – 3.

12 blokas – išsaugomos naujos vertės.

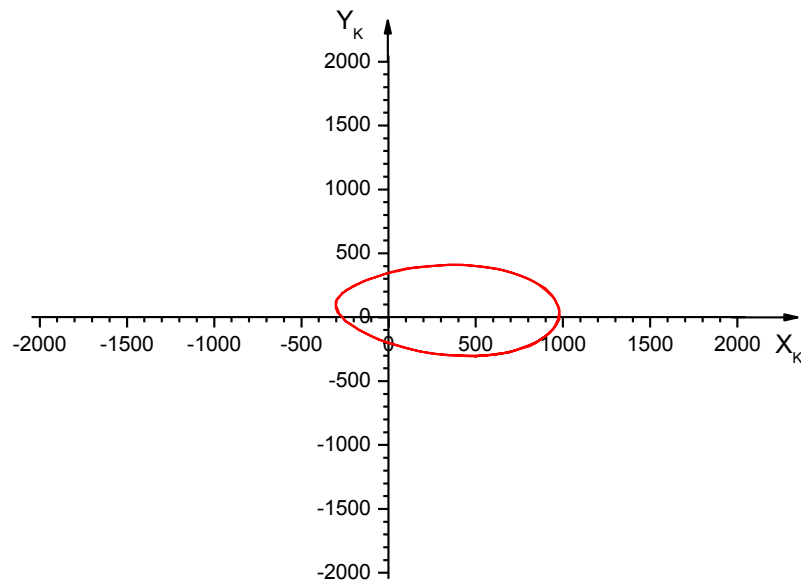
13 blokas – apskaičiuojamas kampas θ pagal (3.7) išraišką.



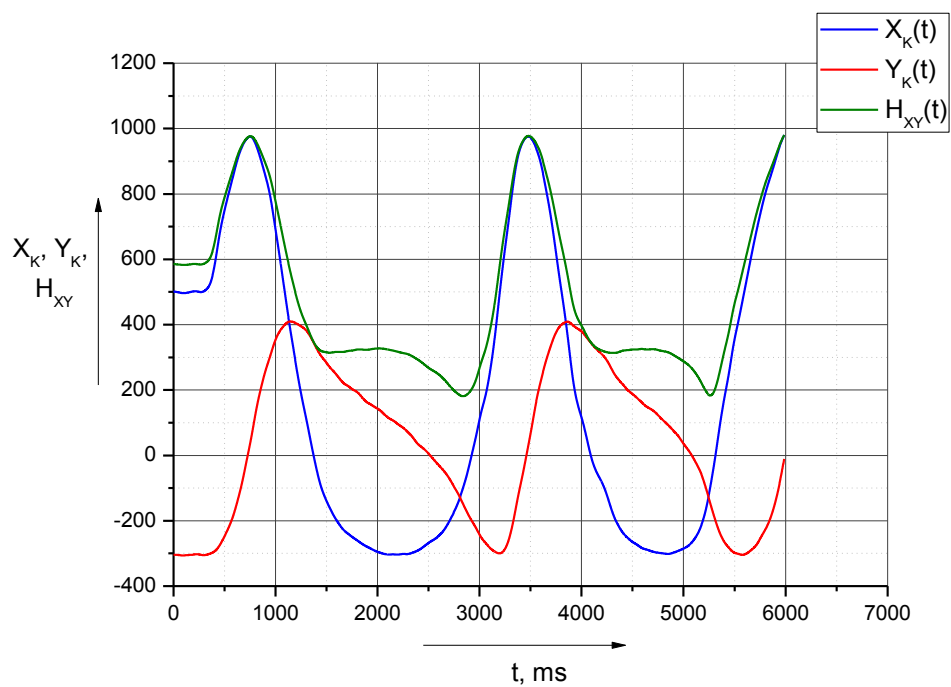
3.16 pav. Robotų tarpusavio krypties nustatymo algoritmas

Šie algoritmai yra realizuoti bandymų makete LPC1768, prie kurio prijungta IMU plokštė. Šioje plokštėje įrašyta programa leidžia mygtukų paspaudimais keisti magnetometro parametrus, atvaizduoja diskretizuotais laiko intervalais (kas 15 ms) gautus duomenis iš magnetometro. Tai pat vykdydama orientavimosi algoritmą ant ekrano realiu laiku grafiškai atvaizduoja gaunamus duomenis iš magnetometro bei rodo apskaičiuojamą kampą θ . Visi šie duomenys yra siunčiami per RS232 sąsają į kompiuterį iš kurių sudaromi grafikai iliustruojantys kaip kinta magnetinio srauto tankis robotams orientuojantis. Programoje naudojami duomenys skaičiavimams (gautos x ir y vertės) nėra perskaičiuojamos į realius fizikinius dydžius – magnetinio srauto tankį. Taip daroma tam, kad išlaikyti kuo patogesnius, realesnius duomenis mikrovaldiklui skaičiavimams atlikti (double ir float duomenų tipų aritmetinės operacijos užtrunka ilgiau).

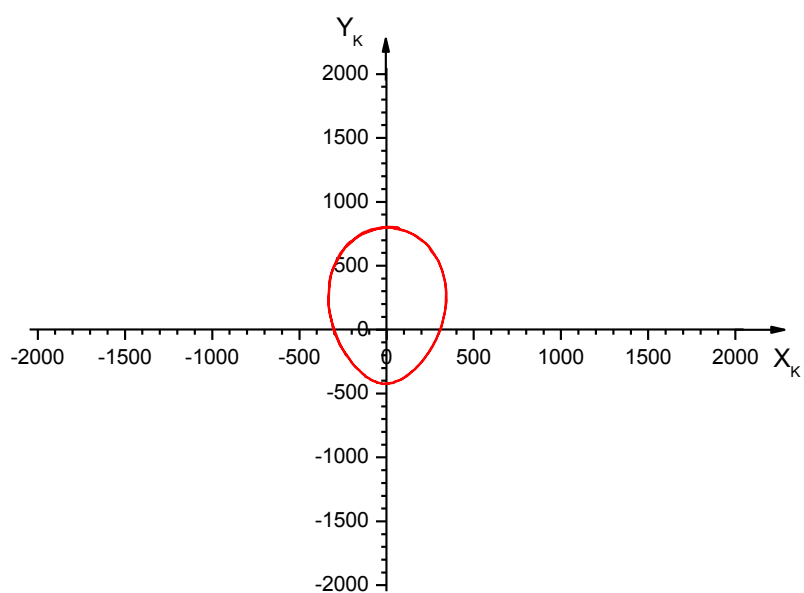
Iš bandymų maketo LPC1768 orientavimosi metu siunčiami duomenys (X_K , Y_K , H_{XY}) į asmeninį kompiuterį. Šie duomenys grafiškai atvaizduoti 3.17 – 3.20 pav. paveiksluose.



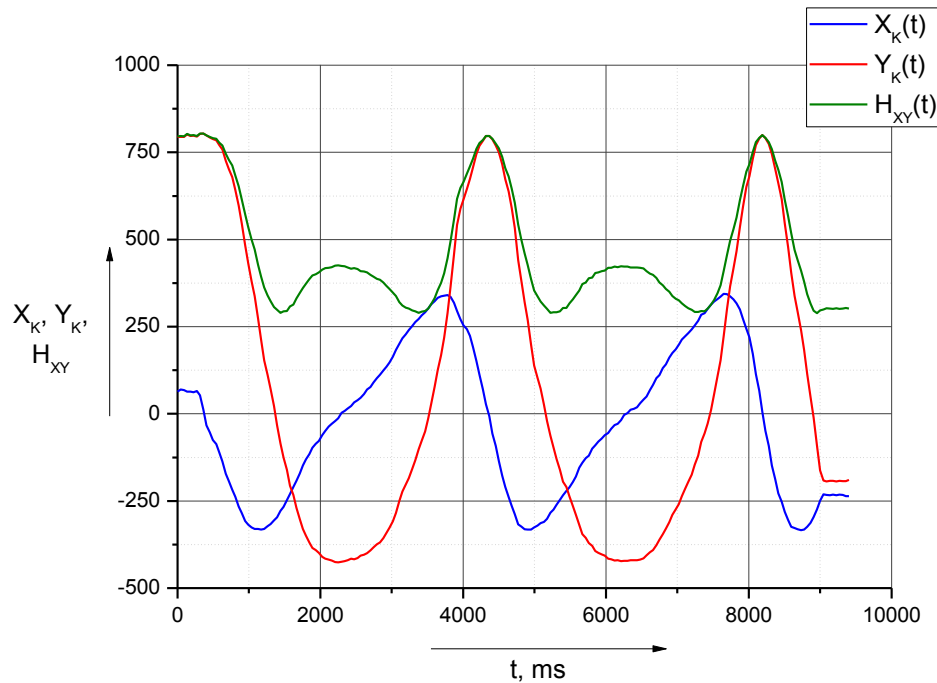
3.17 pav. Orientavimosi metu gautų duomenų priklausomybė $Y_K(X_K)$, kai tarpusavio kampas $\theta = 0^\circ$



3.18 pav. Orientavimosi metu gautų duomenų X_K , Y_K ir H_{XY} priklausomybės nuo t , kai tarpusavio kampas $\theta = 0^\circ$



3.19 pav. Orientavimosi metu gautų duomenų priklausomybė $Y_K(X_K)$, kai tarpusavio kampas $\theta = 90^\circ$



3.20 pav. Orientavimosi metu gautų duomenų X_K , Y_K ir H_{XY} priklausomybės nuo t , kai tarpusavio kampas $\theta = 90^\circ$

Paveiksle 3.17 pav. pateikta orientavimosi metu gautų iš maketo sukalibruotų verčių Y_K priklausomybė nuo X_K , kai tarpusavio kampas tarp robotų yra 0° . Kaip matyti, gaunama forma panaši į „kiaušinio“, kurio į vieną iš viršūnių einančio vektoriaus iš koordinatų pradžios kampas yra apytiksliai lygus 0° . Sekančiame grafike, 3.18 pav., pateiktos matavimų X_K , Y_K ir magnetinio lauko vektoriaus ilgio H_{XY} priklausomybė nuo laiko t . Iš šių grafikų matyti, kad esant didžiausiam magnetinio lauko vektoriaus ilgiui (tai yra momentas kai magnetinio lauko generatorius yra atsisukęs tiesiai į magnetometrą) gaunamas kampas ir yra ieškomas kampas θ , kuris šiuo atveju yra 0° . Paveiksluose 3.19 pav. ir 3.20 pav. pateikiamos tos pačios priklausomybės, tik nustatytas tarpusavio kampas θ yra 90° .

Iš šių grafikų galime teigti, kad didžiausias magnetinio srauto tankis veikiantis magnetometrą bus tuomet, kai besisukantis antrasis robotas atsisuks tiesiai į pirmąjį, t.y. magnetinio lauko generatoriaus P polius bus atsisukęs tiesiai į magnetometrą. Tuo metu pirmajame robote gautas magnetinio lauko vektorius bus didžiausias ir jo kampas ir bus kampas θ nusakantis kryptį tarp abiejų robotų.

Akivaizdu, jog sudaryta sistema geba surasti robotų tarpusavio kampą θ . Šis metodas praktiškai gali būti pritaikomas robotų tarpusavio orientavimo užduočiai įgyvendinti su tam tikromis sąlygomis:

1. Magnetinio lauko generatorius turi būti parenkamas atsižvelgiant į atstumą tarp robotų, kuris priklauso nuo skleidžiamo magnetinio lauko stiprumo. Šiuo atveju panaudoti neodiminiai magnetai leidžia pasiekti atstumą iki 30 cm.
2. Kai robotų tarpusavio orientavimosi procese dalyvauja daugiau nei 2 robotai, turi būti naudojamas valdomas magnetinio lauko generatorius – elektromagnetas.
3. Tik reikiamu momentu, reikiamas robotas suaktyvina savo elektromagnetą.

Įvertinus šias sąlygas, yra galimas šiame darbe aprašytas robotų tarpusavio orientavimasis aprašytas šiame darbe.

Išvados ir pasiūlymai

Šiame magistro darbe sudarytas metodas robotų tarpusavio orientavimuisi vykdyti, kuris remiasi generuojamo magnetinio lauko matavimu, pagal tai nustatant kryptį link kito roboto. Programa „Maxwell“ sudaryti magnetinio lauko generatorių – elektromagnetų modeliai, kurie skiriasi savo forma. Taip pat sudarytos sistemos funkcinė ir principinė elektrinė schemos, pateikti magnetometro kalibravimo ir robotų tarpusavio krypties nustatymo algoritmai. Apibendrinant tyrimo rezultatus galima suformuluoti tokias išvadas:

- Išanalizavus elektromagnetų modeliavimo rezultatus, gautus programa „Maxwell“, matyti, kad mažiausias magnetinio srauto tankis susidaro I formos elektromagnete ($1,0547 \times 10^{-6}$ T), o didžiausias W formos ($4442,2 \times 10^{-6}$ T). W formos elektromagneto magnetinio srauto tankio vektoriaus linijos užsidaro per elektromagneto šerdį, taip prislopinama antrojo poliaus įtaka magnetiniam laukui.
- Iš sistemos eksperimentinių tyrimų metu gautų duomenų galime teigti, kad pasiūlytas metodas yra veikiantis, o pateiktas algoritmas gali būti pritaikomas robotų tarpusavio orientavimo užduočiai įgyvendinti.
- Sudarytos sistemos didžiausias magnetinio srauto tankis veikiantis magnetometrą bus tuomet, kai magnetinio lauko generatoriaus P polius bus atsisukęs tiesiai į magnetometrą. Šiuo momentu gautas magnetinio lauko vektorius bus didžiausias, o jo kampas ir bus kampas θ , nusakantis kryptį tarp dviejų robotų.
- Robotų tarpusavio orientavimosi procese dalyvaujant daugiau nei dviems robotams, turi būti naudojamas valdomas magnetinio lauko generatorius – elektromagnetas. Tik reikiamu momentu, reikiamas robotas turi suaktyvinti savo elektromagnetą.
- Magnetinio lauko generatorius turi būti parenkamas atsižvelgiant į atstumą tarp robotų, kuris priklauso nuo skleidžiamo magnetinio lauko stiprumo. Šiuo atveju panaudoti neodiminiai magnetai leidžia pasiekti atstumą iki 30 cm.
- Pateiktas robotų tarpusavio orientavimo metodas neatlieka sudėtingų matematinių skaičiavimų ir gali būti realizuotas ne itin sparčiuose mikrovaldikliuose. Todėl parinktas, 120 MHz taktinio dažnio, mikrovaldiklis LPC1769 gali būti pakeičiamas į silpnesnį – 16 MHz.

Pasiūlymai ir rekomendacijos:

- Tobulėjant technologijoms atsiranda tikslesnių, jautresnių magnetometrų, todėl rekomenduojama patobulinti šią sistemą pakeičiant esamą magnetometrą naujesniu.
- Nuo magnetinio lauko generatoriaus priklauso kokių atstumu bus nustatoma dviejų robotų tarpusavio kryptis, todėl reikalingi kiti modeliavimo tyrimai atliekami ne tik su elektromagnetų formomis, bet ir su naudojamomis medžiagomis.
- Magnetometro, matuojamo magnetinio srauto tankio dydis, buvo panaudotas kampui tarp robotų įvertinti, tačiau yra galimybė pagal šį parametą nustatyti ne tik kryptį bet ir atstumą. Tam rekomenduojama atlikti tolimesnius magnetinio srauto tankio priklausomybės nuo atstumo tarp robotų tyrimus.

Literatūros sąrašas

1. Johannas Borensteinas, H. R. Everettas, Liqiangas Fengas ir Davidas Wehes. Mobile Robot Positioning – Sensors and Techniques, Journal of Robotics Systems. Michigan, 1997.
2. Surachaius Panichas ir Nitisas Afzulpukaras. Mobile Robot Integrated with Gyroscope bu Using IKF. Thailand, 2011.
3. Maximas A. Batalinas, Gauravas S. Sukhatme ir Myronas Hattigas. Mobile Robot Navigation using a Sensor Network. New Orlean, 2004.
4. Janas Dyresas Bjerknesas, Wenguos Liuas, Alanas FT Winfieldas ir Chrisas Melhuishas. Low Cost Ultrasonic Positioning System for Mobile Robots. Bristol, 2007.
5. Shragas Shovalis ir Johannas Borensteinas. Measuring The Relative Position And Orientation Between Two Mobile Robots With Binaural Sonar. Washington, 2001.
6. Algirdas Smilgevičius. Automatikos mikromašinos. Vilnius: Technika, 2005.
7. Povilas Pukys, Jonas Stonys ir Juozapas Arvydas Virbalas. Teorinė elektrotechnika. Kaunas: Technologija, 2008.
8. Héberis Sobreira, A. Paulosas Moreira ir Joãosas Sena Estevesas. Characterization of Position and Orientation Measurement Uncertainties in a Low–Cost Mobile Platform. Coimbra, 2010.
9. Suedas Mahfuzulas Azizas, Milosas Grcicas ir Tharchanas Vaithianathanas. A Real–Time Tracking System for an Endoscopic Capsule using Multiple Magnetic Sensor. Heidelberg, 2008.
10. Faroukas Azizis ir Nasseris Houshuangis. Accurate Mobile Robot Position Determination Using Unscented Kalman Filter. Hammond, 2005.
11. JaeMusas Yunas, SungBusas Kimis ir JangMyungas Lee. Robust Positioning a Mobile Robot with Active Beacon Sensors. Heidelberg, 2006.
12. Mikas Peasgoodas, Chrisopheris Clarkas ir Johnas McPheesas. Localization of Multiple Robots with Simple Sensors. Michigan, 2005.
13. Michaelis J. Caruso. Applications of magnetic sensors for low cost compass systems. San Diego, 2000.
14. Stasys Mickūnas. Elektromagnetiniai laukai ir bangos. Kaunas: Technologija, 2004.
15. Johannas Borensteinas ir Liqiangas Fengas. Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots. IEEE, 1996.

16. Magnetometro Honeywell HMC5883L aprašymas [žiūrėta 2012-12-02]. Prieiga per internetą: http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf.
17. Magnetometro Memsic MMC3316xMT aprašymas [žiūrėta 2013-05-25]. Prieiga per internetą: <http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/Magnetic-Sensors-Datasheets/mmc3316xmt.pdf>.
18. Magnetometro Freescale MAG3110 aprašymas [žiūrėta 2013-05-25]. Prieiga per internetą: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MAG3110.pdf.
19. RF transiverio nRF24L01+ aprašymas [žiūrėta 2012-12-04]. Prieiga per internetą: http://www.nordicsemi.com/eng/content/download/2726/34069/file/nRF24L01P_Product_Specification_1_0.pdf.
20. Mikrovaldiklio Philips NXP ARM Cortex-M3 LPC1769 aprašymas [žiūrėta 2012-12-04]. Prieiga per internetą: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10360.pdf.
21. Pukys, P., Stonys, J., Virbalas, A. J., Teorinė elektrotechnika. Elektros grandinių teorijos pagrindai. Kaunas: Technologija, 2008. 12p., 31p.
22. Akcelerometro ir giroskopo LSM330DL aprašymas [žiūrėta 2012-12-05]. Prieiga per internetą: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00034579.pdf>.
23. Programinės įrangos „Maxwell“ aprašymas [žiūrėta 2013-02-20]. Interneto prieiga: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/Electromechanical+Design/ANSYS+Maxwell>.
24. Lietuvos Respublikos terminų bankas [žiūrėta 2013-05-20]. Interneto prieiga: <http://terminai.vlkk.lt/pls/tb/tb.search>.
25. L. Radzevičius. Elektros inžinerijos magistrantūros studijų tiriamieji ir baigiamieji darbai. Metodiniai nurodymai. Vilnius: Technika, 2009.
26. Joãosas Sena Estevesas, Adrianosas Carvalhosas ir Carlosas Coutosas. Position and Orientation Errors in Mobile Robot Absolute Self-Localization Using an Improved Version of the Generalized Geometric Triangulation Algorithm. IEEE, 2006.

Priedai

1 priedas. Jaunųjų mokslininkų konferencijos pažyma



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

XVI-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“
ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Deimantas Žvirblis

*Elektros inžinerijos ir automatizavimo, robotikos, valdymo
inžinerijos jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą*

Robotų tarpusavio orientavimo sistemos tyrimas

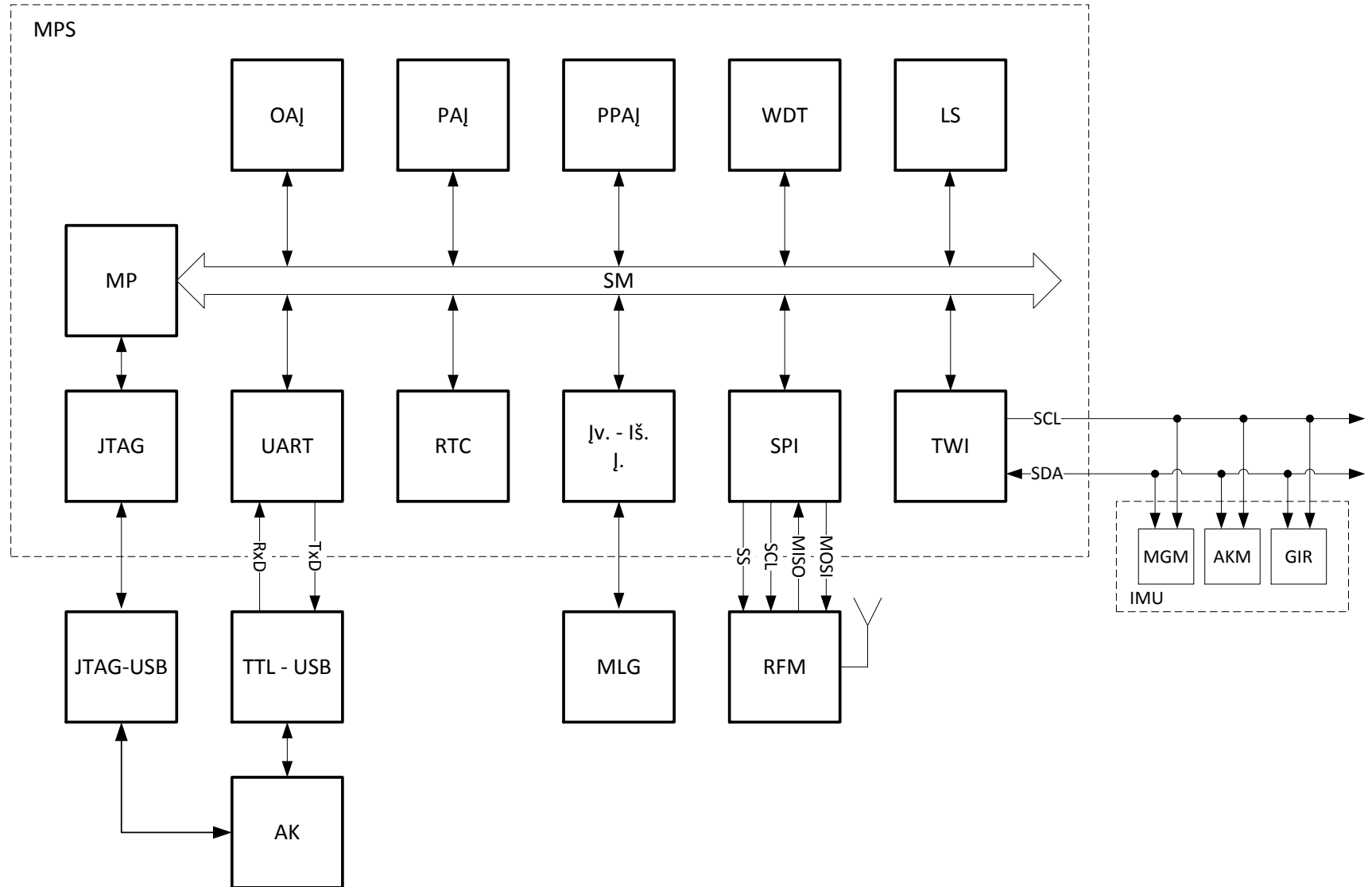
Mokslo komiteto pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas Martavičius

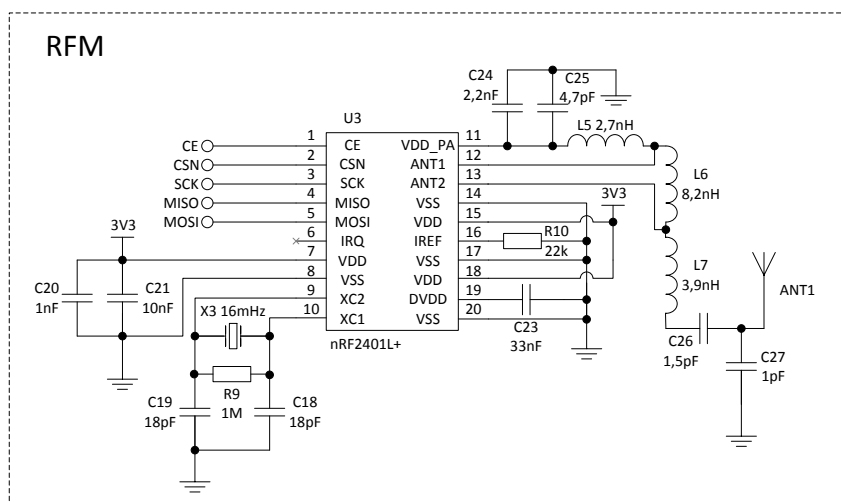
Sekcijos pirmininkas

doc. dr. Andrius Petrovas

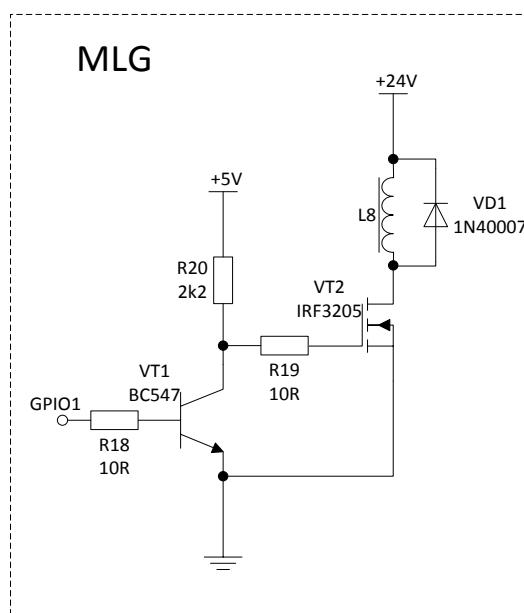
2013 m. kovo 15 d.
Vilnius



P2.1 pav. Sistemos funkcinė schema



P3.4 pav. RF modulio principinė elektrinė schema



P3.5 pav. Magnetinio lauko generatoriaus principinė elektrinė schema