

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

OLGA FIODOROVA

MOBILIOJO ROBOTO KOORDINAČIŲ
NUSTATYMAS NAUDOJANT ŽINOMOS
APLINKOS INFORMACIJĄ

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2016, Kaunas

UDK 621.865.8(043.3)

Disertacija rengta 2011–2016 metais Kauno technologijos universiteto Elektros ir elektronikos fakultete, Automatikos katedroje.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Kastytis Kiprijonas ŠARKAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – OIT).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Lietuvių kalbos redaktorė:

Rozita Žnamenskaitė

Leidykla „Technologija“

© O. Fiodorova, 2016

ISBN 978-609-02-1233-2

TURINYS

PAAIŠKINIMAI	5
ĮVADAS	6
1. MOBILIŲJŲ ROBOTŲ PADĖTIES UŽDAROJE APLINKOJE NUSTATYMO METODAI.....	8
1.1. Padėties koordinacių nustatymo principai.....	9
1.1.1. Trilateracija ir trianguliacija	9
1.1.1.1. Globalioji pozicionavimo sistema	10
1.1.2. Scenos analizė.....	11
1.1.3. Artumo principas	11
1.2. Pasyviosios mobiliųjų robotų padėties nustatymo sistemos.....	11
1.2.1. Elektros kabeliai	11
1.2.2. Žymės	11
1.2.3. Švyturiai.....	12
1.2.4. Orientyrai	12
1.3. Aktyviosios mobiliųjų robotų padėties nustatymo sistemos	14
1.3.1. Inercinė navigacija.....	14
1.3.2. Odometrija	14
1.4. Hibridinės padėties nustatymo sistemos	15
1.4.1. SLAM algoritmai.....	15
1.4.2. Aplinkos informacijos naudojimas padėčiai uždaroje aplinkoje nustatyti	16
1.4.2.1. Nuoseklusis aplinkos skenavimas	16
1.4.2.2. Kooperacinis aplinkos skenavimas.....	19
1.5. Apibendrinimas	20
1.6. Pirmojo skyriaus išvados.....	20
2. MOBILIOJO ROBOTO PADĖTIES KOORDINACIŲ NUSTATYMAS, NAUDOJANT ŽINOMOS PATALPOS PROFILĮ	22
2.1. Mobiliojo roboto padėties koordinacių pagal žinomos patalpos profilį nustatymo galimybės.....	22
2.2. Mobiliojo roboto padėties koordinacių nustatymo pagal žinomos patalpos profilių sutapatinimą metodas	23
2.3. Mobiliojo roboto padėties koordinacių pagal žinomos patalpos profilio svorio centrą nustatymo metodas	28
2.4. Antrojo skyriaus išvados	32
3. MOBILIOJO ROBOTO PADĖTIES KOORDINACIŲ ŽINOMOJE APLINKOJE NUSTATYMO METODŲ PLĖTOTĖ.....	34
3.1. Mobiliojo roboto padėties koordinacių nustatymo pagal žinomos patalpos profilių sutapatinimą metodo realizavimas ir funkcionalumo tyrimas.....	34
3.1.1. Optimizavimo strategijos pasirinkimas. Greičiausio nusileidimo daugiamačiai metodai	35
3.1.2. Rosenbroko metodo esmė ir realizacija	36
3.1.3. Mobiliojo roboto padėties koordinacių nustatymas sutapatinant profilius	40

3.2. Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo pagal žinomos patalpos svorio centrą metodo realizavimas ir tyrimas.....	52
3.2.1. Metodo matematinis pagrindimas.....	52
3.2.2. Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo, naudojant žinomos patalpos profilio svorio centrą, metodo realizacija.....	54
3.3. Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymas skirtingos konfigūracijos aplinkose	57
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	65
4. REIKALAVIMAI MOBILIOJO ROBOTO PADĖTIES KOORDINAČIŲ NUSTATYMO SISTEMAI.....	66
4.1. Gamybinės patalpos konfigūracijos įtaka mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo paklaidai ir laikui	66
4.2. Papildomų kliūčių gamybinėje patalpoje atsiradimo įtaka mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo laikui ir paklaidai	73
4.3. Mobiliojo roboto skenerio paklaidos įtakos įvertinimas	80
4.4. Rekomendacijos lanksčios automatizuotos gamybos sistemai, naudojančiai mobiliuosius robotus detalėms transportuoti.....	82
4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados	83
IŠVADOS.....	84
LITERATŪRA.....	85
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	90

PAAIŠKINIMAI

Autonominis mobilusis robotas – tai robotas, bet kuriuo metu galintis keisti savo judėjimo trajektoriją, nesusietas su viena konkrečia trasa; jo nereikia kiekvieną kartą perprogramuoti, o praėjus tam tikram laikui jis turi pakrauti savo maitinimo šaltinį.

Supervizorius (arba ***išorinė valdymo sistema***) – tai kompiuterinė sistema su programa, skirstančia darbinės užduotis laisviems, gamyboje naudojamiems robotams ir formuojanti jų navigacijos trasas. Ši sistema realiame laike seka, kaip realizuojamos jos suformuotos gamybinės užduotys, kaip mobilieji robotai juda nurodytomis trasomis. Taip pat prognozuoja galimus konfliktus ir koreguoja robotų trasas taip, kad konfliktų būtų išvengta.

Padėtis (padėties taškas, pozicija) – mobiliojo roboto arba supervizoriaus nustatyta pozicija (konkretus taškas), žymima $[X Y]$. Pirmas narys (X) yra padėties koordinatė pasirinktoje koordinacių sistemoje pagal x ašį, o antras narys (Y) – padėties koordinatė pasirinktoje koordinacių sistemoje pagal y ašį.

IVADAS

Pagrindinė visų judančių mobiliųjų įrenginių problema – navigacija aplinkoje. Mobilieji robotai – tai autonominės mobiliosios platformos, galinčios ne tik savarankiškai judėti į nurodytą paskirties vietą, ten atlikti tam tikras užduotis bei grįžti atgal, bet ir dirbti nuotoliniu režimu.

Šiame darbe išplėtotas metodas ir algoritmai gali būti pritaikyti lanksčioje automatizuotoje gamyboje, kurioje naudojami mobilieji robotai. Autonominių mobiliųjų robotų judėjimas gamyboje nėra ribojamas bėgių konstrukcijų ar kitų standžių jungčių, o vykdomos užduotys ir judėjimo trasos yra parenkamos konkrečiu laiko momentu laisviems ir arčiausiai užduoties tikslo esantiems mobiliesiems robotams.

Mobilieji robotai, vykdydami jiems priskirtas užduotis, turi judėti nuo pradinių koordinacių iki užduoties tikslo, taip pat jie turi orientuotis aplinkoje, kad nukrypę nuo savo judėjimo trajektorijos grįžtų į nurodytą maršrutą. Mobilieji robotai, naudojami lanksčios gamybos procese, gali nukrypti nuo nurodytų koordinacių dėl tam tikrų pašalinių veiksnių, tokių kaip tepalų balos arba pašaliniai daiktai, kliūtys ant važiuojamosios dalies.

Dažniausiai mobiliojo roboto padėčiai aplinkoje nustatyti yra naudojamos papildomos aparatūrinės priemonės ir technologijos. Šiame darbe pasiūlyti ir ištirti du koordinacių nustatymo metodai, pagrįsti tik žinomos aplinkos teikiamos informacijos analize.

Darbo aktualumas

Šiais laikais sėkmingai išspręstos globaliosios navigacijos atviroje aplinkoje problemos, tačiau tokios navigacijos taikymas tampa probleminis kalbant apie mobiliojo autonominio roboto orientaciją uždaroje gamybinių patalpų erdvėse.

Mobilusis robotas, atliekantis įvairias gamybines užduotis uždaroje patalpose/erdvėse, susiduria su įvairiaisiais trukdžiais pradedant patalpos grindų netolygumais ir baigiant problemomis dėl naudojamos aparatūrinės įrangos klaidų.

Mobiliojo roboto padėties koordinacių nustatymo problema labai aktuali. Mobilusis robotas turi būti tose koordinatėse, kurios jam yra nurodytos, nes tik tada bus įvykdyta jam priskirta gamybinė užduotis. Žinodamas savo buvimo vietos koordinatas, jis gali planuoti tolimesnius veiksmus, saugiai judėti iš taško *A* į tašką *B*.

Šiame darbe siūlomas naujas metodas, leidžiantis naudojant tik žinomos aplinkos teikiamą informaciją nustatyti mobiliojo roboto padėties koordinatas. Siekiama pasiūlyti algoritmus, kurie mobiliojo roboto padėtį nustatytų be papildomos navigacinės aparatūrinės įrangos. Tokio pobūdžio padėties koordinacių nustatymo sistema yra aktuali ir gali būti taikoma lanksčioje automatizuotoje gamyboje, kurią padeda vykdyti autonominiai mobilieji robotai.

Kuriamam metodui yra keliami tam tikri reikalavimai. Pirmiausia, padėties koordinacių nustatymo greitaveika, taip pat adaptacija įvairios konfigūracijos profiliams. Šiame darbe sukurti algoritmai šiuos reikalavimus atitinka.

Darbo tikslas – išplėtoti mobiliojo roboto, naudojamo lanksčioje automatizuotoje gamyboje, padėties koordinačių nustatymo žinomoje aplinkoje metodą, pagrįstą tik matomos aplinkos teikiamos informacijos analize, ir patikrinti metodo funkcionalumą.

Darbo uždaviniai

1. Išanalizuoti egzistuojančius mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo metodus, kurie galėtų tikti darbo tikslui pasiekti.
2. Patobulinti mobiliojo roboto koordinačių nustatymo žinomoje aplinkoje metodus.
3. Ištirti patobulintų mobiliojo roboto koordinačių nustatymo žinomoje aplinkoje metodų funkcionalumą ir veikimą, esant įvairiems profiliams ir dinaminėms kliūtims tiriamoje aplinkoje.
4. Pateikti papildomus reikalavimus lanksčios automatizuotos gamybos sistemai, naudojančiai mobiliuosius robotus detalėms transportuoti.

Mokslinis naujumas

1. Ištirtas naujas koordinačių nustatymo žinomoje aplinkoje metodas, pagrįstas žinomos aplinkos profilių sutapatinimu.
2. Išplėtotas ir ištirtas naujas koordinačių nustatymo žinomoje aplinkoje metodas, pagrįstas žinomos aplinkos profilio svorio centro panaudojimu.

Darbo rezultatų praktinė vertė

Sukurtų principų, realizuojančių mobiliųjų robotų padėties koordinačių nustatymą žinomoje aplinkoje nenaudojant papildomos aparatūros – kai judėjimo trasos automatiškai formuojamos naudojant valdymo sistemą su supervizoriumi – taikymas leidžia efektyviai spręsti mobiliųjų robotų judėjimo trajektorijų planavimo klausimus. Išplėtotas metodas yra universalus ir gali būti pritaikytas gamybiniuose procesuose bei socialinėje sferoje (paslaugų robotai), kur naudojami mobilieji robotai.

Ginamieji teiginiai

1. Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo, naudojant tik žinomos aplinkos profilio konfigūracijos informaciją, metodo plėtotė.
2. Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo, naudojant tik žinomos aplinkos profilio konfigūracijos informaciją, metodo pritaikymas, kai aplinkoje yra dinaminės kliūtys.

Darbo aprobavimas

Pagrindiniai daktaro disertacijos tyrimų rezultatai aprobuoti 1 publikacija mokslinės informacijos instituto (ISI) pagrindinio sąrašo leidinyje, 2 publikacijomis konferencijų pranešimų medžiagoje ir 3 pranešimais tarptautinėse mokslo konferencijose.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, naudotos literatūros sąrašas ir autorės publikacijų sąrašas. Bendra disertacijos apimtis yra 90 puslapių, 72 paveikslai, 1 lentelė ir 79 bibliografinės nuorodos.

1. MOBILIŲJŲ ROBOTŲ PADĖTIES UŽDAROSE APLINKOJE NUSTATYMO METODAI

Viena iš pagrindinių problemų, kurios kyla dirbant su visais egzistuojančiais robotizuotais mobiliaisiais įrenginiais, judančiais savarankiškai ir autonomiškai, t. y. be žmogaus pagalbos, – padėties koordinačių jį supančioje aplinkoje nustatymas.

Šiais laikais padėties nustatymo problemos atviroje aplinkoje sėkmingai sprendžiamos, tačiau atvirai aplinkai sukurtų metodų taikymas uždaroje gamybinėje patalpoje tampa problemine [1, 2].

Nevalia pamiršti, kad mobilusis robotas, atliekantis įvairias užduotis uždaroje gamybinėje patalpoje, susiduria su įvairiausiais trukdžiais: nuo visokių pašalinių daiktų ir naujai atsiradusių kliūčių ant važiuojamosios dalies [3] iki problemų, kurios kyla dėl naudojamos aparatūrinės įrangos klaidų [4–6]. Nežiūrint visų šių trukdžių, mobilusis autonominis robotas turi laisvai judėti į paskirties vietą, formuoti tikslų jį supančios aplinkos profilį ir nustatyti savo realią padėtį toje aplinkoje tam, kad greitai ir operatyviai įvykdytų jam skirtą užduotį [7, 8].

Pastaraisiais metais judančių robotizuotų mobiliųjų įrenginių padėties nustatymo uždaroje aplinkoje metodai sparčiai tobulinami [9] todėl, kad gamyboje labai populiarėja daugiafunkciai pramoniniai mobilieji įrenginiai ir didėja įvairių autonominių mobiliųjų įrenginių, naudojamų įvairiausiose gyvenimo sferose, paklausa.

Padėties koordinatės mobilusis įrenginys nustato vadovaudamasis įvairių pagalbinių išorinių sistemų – įvairių jutiklių, išorinių navigacijos prietaisų ir kt. – rodmenimis, atlikdamas ciklinę jutiklių „apklausą“. Aparatūros lygmenyje kiekvienas ciklas gali būti palaikomas įvairių tipų ir veikimo principo jutiklių, formuojančių įvairios apimties ir intensyvumo duomenų srautus.

Mobilusis robotas, naudojamas lanksčioje automatizuotoje gamyboje ir atliekantis įvairias gamybines užduotis, turi reaguoti į jį supančios dažniausiai uždaros aplinkos ypatumus, o išorinė valdymo sistema (supervisorius), prižiūrinti gamybą ir naudojamų robotų darbą, turi sekti bendrą plano vykdymą, esant būtinybei keisti ir sinchronizuoti visų pavaldžių valdymo sistemos struktūrų darbą [7, 8].

Tam, kad robotas judėtų į paskirties vietą, jam būtina suformuoti tikslų jį supančios patalpos profilį. Tai galima pasiekti naudojant lazerinius, ultragarsinius arba infraraudonųjų spindulių skenerius.

Egzistuoja daug būdų judančių objektų padėčiai nustatyti. Sąlygiškai juos galima skirstyti į santykinius ir absoliučiuosius. Santykiniai padėties nustatymo būdai šie: inercinė navigacija [10, 11] ir odometrija [12]. Absoliutusis padėties nustatymo būdas – aktyvieji švyturiai [13, 14, 15].

Skirtingų metodų ir algoritmų parinkimas priklauso nuo iškeltos užduoties ir sistemai keliamų reikalavimų.

Didžioji dalis padėties nustatymo sistemų yra paremtos trilateracijos (angl. *trilateration*) [78] ir trianguliacijos (angl. *triangulation*) [9, 16] naudojant ultragarsą

[17, 18, 79], radijo bangas [19] ir kt., scenos analizės (angl. *scene analysis*) [9, 20, 21] ir artumo (angl. *proximity*) principais [9].

Literatūroje [9] taip pat išskiriamos kelios atstumo matavimo technikos: priimamo signalo stiprumas (angl. *Received Signal Strength, RSS*) [22, 23], gavimo laikas (angl. *Time of Arrival, ToA*) [24, 25], gavimo laiko skirtumas (angl. *Time Difference Of Arrival, TDoA*) [26, 27] ir priimamas signalas (angl. *Received Signal, RSP*) [28].

Padėčiai aplinkoje nustatyti taip pat naudojamos įvairios žymės, orientyrai [29, 30] ir kt.

Mokslinėje literatūroje išskirti dar keli dažniausiai taikomi padėties uždaroje aplinkoje nustatymo sistemų klasifikavimo būdai [31, 32, 33]:

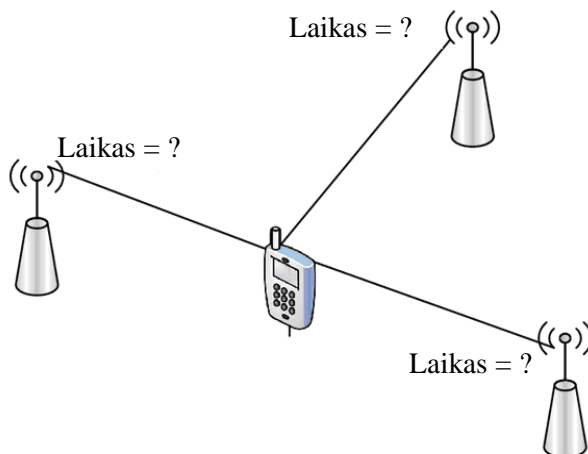
- padėties nustatymas naudojant pasyviąsias padėties nustatymo sistemas;
- padėties nustatymas naudojant aktyviąsias padėties nustatymo sistemas;
- padėties nustatymas naudojant hibridines padėties nustatymo sistemas.

Pasyvioji padėties nustatymo sistema priima ir apdoroja išorinio šaltinio teikiamą informaciją apie savo padėties koordinates ir kitas savo judėjimo charakteristikas, o aktyvioji – nustato buvimo padėtį pati. Globaliosios navigacijos algoritmai yra pasyviosios navigacijos sistemos, lokaloji (vietinė) navigacija gali būti tik pasyvioji.

1.1. Padėties koordinačių nustatymo principai

1.1.1. Trilateracija ir trianguliacija

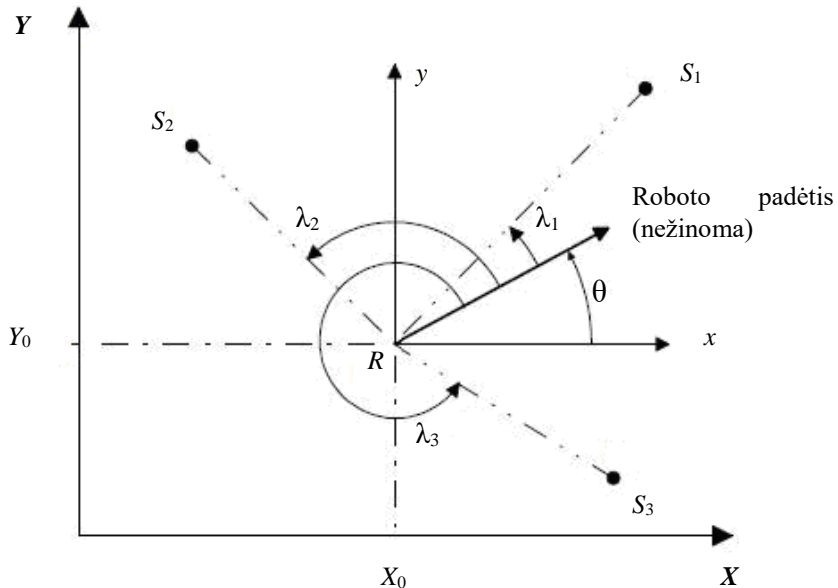
Trilateracija yra pozicijos nustatymo metodas, paremtas atstumo iki žinomų „švyturių“ matavimu (1.1 pav.). Tokiose sistemose paprastai yra trys ir daugiau siųstuvų, sumontuotų žinomose aplinkos vietose, bei vienas imtuvas roboto korpuse. Priešingai gali būti vienas siųstuvas roboto korpuse, o imtuvai montuojami švyturiuose [9, 16, 34].



1.1 pav. Trilateracijos principas [34]

Trianguliacinėse sistemose yra trys arba daugiau aktyviųjų siųstuvų (1.2 pav., siųstuvai S_1 , S_2 ir S_3), sumontuotų žinomose aplinkos vietose. Posūkio jutiklis roboto

korpusė registruoja kampus $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ir pagal juos apskaičiuoja objekto padėtį (1.2 pav.) [9, 16, 33, 34].



1.2 pav. Trianguliacijos principas [32]

Taikant trianguliacijos metodą ir norint, kad mobilusis įrenginys būtų matomas didesniu atstumu, švyturių sklaidžiamus signalus reikia sufokusuoti pagal kūgio formos sklaidos modelį.

Geometrinės trianguliacijos [33] ir *Newton-Raphson trianguliacijos* [35] metodai veikia sistemingai tik kai robotas yra trikampyje, sudarytame iš trijų švyturių. Srityse, kurios nepriklauso šiam trikampiui, mobiliojo roboto padėties koordinatės nustatyti yra problemiška.

1.1.1.1. Globalioji pozicionavimo sistema

Ryščiausias trilateracinės sistemos pavyzdys – tai globalioji pozicionavimo sistema (GPS), kurią sudaro 24–32 palydovai, perduodantys radijo signalus. Trilateracijos metodais antžeminiai imtuvai gali apskaičiuoti savo padėtį matuodami laiką, per kurį nukeliauja palydovo sklaidžiamais signalais, apimantys informaciją apie momentinę palydovo vietą. Žinant tikslų atstumą nuo Žemės imtuvų iki 3 palydovų, galima apskaičiuoti imtuvo geografinę platumą, ilgumą ir aukštį virš jūros lygio. Normaliam darbui GPS imtuvas turi „matyti“ bent 3 palydovus. Dėl palydovų signalų ekranavimo uždaroje patalpoje GPS darbas sutrinka [31, 34, 36].

Šios sistemos sukeliama paklaida atviroje erdvėje siekia nuo 1 iki 5 metrų. Pastatuose su gelžbetoninėmis stogo dangomis minima technologija yra visiškai neveiksminga. Mažo ploto teritorijoje GPS signalas yra labai netikslus, rodmenys nestabilūs, dėl to prastėja galimybė nustatyti mobiliojo roboto padėties koordinatės.

1.1.2. Scenos analizė

Padėties nustatymo metodai, paremti scenos analizės principu [20, 21, 34], leidžia atlikti tam tikros erdvės aplink objektą, kurio koordinacių yra ieškoma, monitoringą. Monitoringas vykdomas jutikliais, kurių veikimo diapazonas perdengia nagrinėjamą aplinką, pavyzdžiui, infraraudonaisiais spinduliais. Scenos analizės principas susideda iš pagrindinių dviejų etapų. Pirmasis etapas grindžiamas informacijos apie aplinką, kurioje bus vykdomas padėties nustatymas, rinkimu, o antrasis – aplinką identifikuojančių unikalių žymių duomenų bazės sudarymu. Aplinkoje esančios žmės dažniausiai naudoja atspindėto signalo stiprumo (RSS) rodmenis. Du labiausiai paplitę scenos analizės metodai: *k*-artimiausio kaimyno (angl. *k-nearest neighbor*) ir tikimybinis. Esminis tokių sistemų trūkumas – kalibravimo būtinybė [9, 20, 21].

1.1.3. Artumo principas

Padėties nustatymo metodas, pagrįstas artumo principu [9], daugiausia taikomas radijo dažnio sistemose [9, 20, 34]. Metodo realizacijai reikalingas antenų tinklas, išdėstytas žinomose patalpos vietose. Mobilusis robotas skleidžia radijo bangas, kurias priima patalpoje išdėstytos antenos. Padėtis yra nustatoma pagal tai, kuri iš antenų priėmė stipriausią objekto skleidžiamą signalą.

1.2. Pasyviosios mobiliųjų robotų padėties nustatymo sistemos

1.2.1. Elektros kabeliai

Pirmieji pasyviosios navigacijos mobiliųjų robotų modeliai judėjo griežtai apibrėžta trajektorija naudojant elektros kabelius, paslėptus gamybinių patalpų grindyse.

Metodo esmė. Mobiliuosiuose robotuose montuojami nesudėtingos konstrukcijos įrenginiai, gebantys priimti elektros kabelių skleidžiamą elektromagnetinę spinduliuotę ir nustatyti judėjimo kryptį. Robotai gali judėti skirtingomis trajektorijomis, kadangi skirtingais elektros kabeliais yra siunčiamas skirtingo dažnio signalas [32].

Metodo trūkumas. Toks navigacijos būdas brangus ir nelankstus, todėl lanksčios automatizuotos gamybos vietose yra netinkamas.

1.2.2. Žymės

Metodo esmė. Atsiradę įrenginiai su kompiuterine rega leido atsisakyti navigacijos naudojant elektros kabelius ir pereiti prie navigacijos, kuriai pasitelkiamos ryškios ant grindų nupieštos (fluorescencinės) linijos. Robotas kamera seka šias linijas ir savarankiai juda palei jas. Taikomos ir kitos panašios koncepcijos. Roboto judėjimo trajektorijoje, tam tikrame aukštyje, išdėstomi tam tikros formos objektai-žymekliai, kuriuos robotas jutikliais „liečia“ ir taip nustato savo padėtį [32].

Žymeklinės navigacijos modeliai yra papildomi šiuolaikiniais analoginiais jutikliais, gebančiais nustatyti žymės formą, taip pat naudojami įvairūs skaitmeniniai jutikliai, kurie gauna iš žymės išsamius duomenis apie aplinką.

Radio dažnio identifikavimo sistemos (angl. *Radio Frequency Identification, RFID*) veikia naudojant unikalias žymes. Šių sistemų veikimas yra pagrįstas prie objekto pritvirtintos žymės, turinčios unikalų numerį, nuskaitymu specialiu skaitytuvu. Šiose sistemose nėra būtinas tiesioginis ryšys tarp unikalios žymės ir skaitytuvo.

Radio dažnio identifikavimo sistemos skirstomos į dvi kategorijas:

- pasyvosios RFID sistemos [39, 40, 41];
- aktyviosios RFID sistemos [37, 38].

Aktyviųjų RFID sistemų unikalios žymės turi savo energijos šaltinį (bateriją) ir siųstuvus. Pasyviųjų sistemų žymės jokių siųstuvų ir energijos šaltinio neturi, o tiesiog atspindi radijo bangas, kurias skleidžia skaitytuvo antena.

Metodo trūkumai. Pirmuoju atveju linijos dažnai nusitrina, yra užstojamos kitų robotų arba žmonių, o sankryžose, kuriose sueina kelios maršrutinės linijos, robotai pasimeta ir dažniausiai sustoja negalėdami suprasti, kur jiems toliau judėti. Pagrindinis tokio metodo trūkumas išlieka tas, kad judėjimas vyksta pagal nurodytas trasas, o tai nepriimtina mobiliesiems autonominiams robotams su laisvojo judėjimo programa. Antruoju atveju navigacijos schema pagrįsta įrenginio (roboto) ir jį supančios aplinkos kontaktu.

Paklaida. Tokių sistemų paklaida siekia nuo kelių centimetrų iki 10 metrų. Aktyviųjų RFID sistemų paklaida diapazone tarp 20–100 metrų siekia 1–3 metrus, o štai pasyviųjų RFID sistemų paklaida 2 metrų diapazone siekia 7–20 cm [31, 42].

1.2.3. Švyturiai

Dar viena pasyvioji lokalsios navigacijos koncepcija yra susijusi su švyturių naudojimu.

Metodo esmė. Šaltinių, skleidžiančių radijo signalus, išdėstymas roboto veikimo zonoje. Švyturių sistemose taikomi trilateracijos ir trianguliacijos principai [9, 16].

Švyturiai lengvai aptinkami ir teikia informaciją apie esamą poziciją be didelių iškraipymų. Tam, kad būtų galima tiksliai nustatyti roboto esamą vietą, reikia, kad švyturiai būtų pastatyti tam tikruose aplinkos taškuose [13, 14].

Tokios sistemos užtikrina didelį patikimumą, tačiau joms reikalingos didelės montavimo ir priežiūros išlaidos. Lankstesnę sistemą padėties koordinatėms nustatyti galima sukurti naudojant radarinius kompleksus, kurie geba surasti objektų, patekusių į jų veikimo zoną, koordinates.

Metodo trūkumas. Švyturių sistemoms reikalingos didelės montavimo ir priežiūros išlaidos. Taip pat švyturiai netinka tikralaikėse sistemose dėl papildomų laiko nuostolių (kelios sekundės), susijusių su roboto valdymo sistemos užklausos formavimu stočiai, į kurią judama, ir atsakymo laukimu.

Paklaida. Metodo paklaida siekia 7–10 cm (5 metrų diapazone) [42].

1.2.4. Orientyrai

Metodo esmė. Orientyrais gali būti įvairios geometrinės figūros (pavyzdžiui, stačiakampiai, linijos, apskritimai), jie gali turėti papildomos informacijos (pavyzdžiui, brūkšninių kodų forma). Orientyrai yra išdėstyti fiksuotose ir žinomose

pozicijose, kurias robotas gali nustatyti pats. Kuo paprastesnės formos orientyras, tuo greitesnis jo atpažinimo procesas. Be to, turi būti pakankamas kontrastas lyginant su bendruoju fonu. Visos orientyrų savybės (forma, spalva, dydis) turi būti įrašytos į roboto atmintį.

Orientyrai skirstomi į dvi pagrindines grupes: specialiai sudarytus ir natūralius. Natūralūs orientyras – tai objektai arba savybės, kurios natūraliai pasitaiko aplinkoje ir kurių tiesioginė paskirtis nėra susijusi su navigacija. Specialiai sudaryti orientyras – tai specialiai konkretaus roboto navigacijos klausimams spręsti sukurti objektai ar ženklai, kurie išdėstomi atitinkamoje gamybinėje erdvėje (aplinkoje) [32].

Kuriant pasyviašias lokaliąsias navigacijos sistemas vis dažniau kaip orientyras naudojami statiniai (pavyzdžiui, specialūs bokštai). Robotai, turintys kompiuterinę regą, gana tiksliai nustato atstumą iki orientyro, analizuodami orientyro vaizdo geometrinių parametrų kaitą, toldami/artėdami jo atžvilgiu. Tuo atveju, kai specialiai sudarytų švyturių montuoti neįmanoma, robotas gali pats išskirti tam tikrus supančios aplinkos elementus ir savo koordinates susieti su jais. Tokio metodo trūkumas yra orientyrų paieška keičiantis aplinkos sąlygoms (pavyzdžiui, apšvietimo lygiui).

Judančių objektų padėties nustatymas naudojant specialiai sudarytus orientyrus yra paprastesnis negu naudojant natūralius orientyrus, kadangi pasižymi didesniu kontrastu aplinkos atžvilgiu. Specialiai sudarytų orientyrų privalumas tas, kad jų tikslus dydis, forma ir spalva žinomi iš anksto. Specialiai sudarytų orientyrų pozicionavimo sistemos pagrįstos kompiuterine rega ir vaizdų apdorojimu. Šių sistemų paklaida priklauso nuo paklaidos, atsiradusios išgaunant orientyro vaizdų geometrinius parametrus iš vaizdo plokštumos, kuri savo ruožtu priklauso nuo santykinės padėties ir kampo tarp roboto bei orientyro. Paklaida didėja, kai santykinis atstumas didėja arba kai regėjimo kampas išeina iš patikimo atpažinimo zonos. Egzistuoja orientyras, kurių veikimas nėra susijęs su vaizdo jutiklių naudojimu. Populiarijantys specialiai sudaryti orientyras – brūkšniniai kodai [43, 44].

Naudojami natūralūs orientyras suteikia lankstumo, ir jiems nereikalingi aplinkos pakeitimai, o dirbtiniai orientyras yra nebrangūs ir gali turėti papildomos informacijos (pavyzdžiui, jų forma). Orientyrų tipo pasirinkimas priklauso nuo gamybinės patalpos konfigūracijos, mobiliojo roboto atpažinimo sistemos sudėtingumo ir kt. dalykų.

Metodo trūkumai. Orientyrų metodas yra daugiau pagalbinė priemonė roboto navigacijai gamybinėse patalpose. Ir kuo roboto veikimo zonoje orientyrų daugiau, tuo tikslesnis roboto padėties koordinatinių nustatymas.

Maksimalus efektyvus atstumas tarp mobiliojo roboto ir orientyro yra kur kas trumpesnis negu aktyviųjų švyturių sistemose.

Tokiose sistemose, kadangi naudojama kompiuterinė rega, reikia daugiau informacijos apdorojimo negu švyturių sistemose. Daugeliu atvejų borto kompiuteriai negali pakankamai greitai vykdyti natūralių orientyrų atpažinimo algoritmų mobiliam robotui judant realiajame laike.

Orientyrų naudojimu pagrįstai navigacijai reikalinga apytikslė paleidimo vieta, kad robotas žinotų, kur ieškoti orientyrų (borto kompiuteryje turi būti orientyrų

žemėlapis). Jei paleidimo padėtis nežinoma, robotas turi atlikti daug laiko užimančią paieškos procedūrą. Šis paieškos procesas gali nepavykti, ir tai gali sukelti klaidingą objektų interpretaciją vaizde [32].

Paklaida. Sistemų paklaida siekia 1–2 metrus [31, 42].

1.3. Aktyviosios mobiliųjų robotų padėties nustatymo sistemos

1.3.1. Inercinė navigacija

Metodo esmė. Inercinėse navigacijos sistemose naudojami giroskopai ir akcelerometrai. Pozicijai nustatyti rodmenys yra integruojami. Inercinės navigacijos sistemos pranašumas – savarankiškumas, t. y. nereikalinga informacija iš išorės [11].

Metodo trūkumas. Inercinėje navigacijoje duomenų perdavimas užtrunka, kadangi yra vykdomas duomenų integravimas.

Kai mobiliųjų robotų navigacijoje naudojami akcelerometrai, išryškėja prastas signalo ir triukšmo santykis esant mažam pagreičiui. Akcelerometrai – labai jautrūs įvairiems paviršiaus nelygumams įrenginiai, todėl bet kokie trikdžiai horizontalioje padėtyje trukdo jutikliams nustatyti gravitacinės akceleracijos komponentę ir pakoreguoti rodmenis.

Pagrindinis inercinių sistemų trūkumas – matavimo klaidų kaupimas aktyvaus darbo metu. Jos neefektyvios tais atvejais, kai objekto greitis staigiai ir dažnai keičiasi. Kuo tikslesnės sistemos, tuo jos brangesnės.

Paklaida. Siekia nuo kelių centimetrų iki kelių decimetrų [32].

1.3.2. Odometrija

Metodo esmė. Pavienių judesių informacijos per tam tikrą laiką integravimas, kuris neišvengiamai veda prie neriboto klaidų kaupimo. Vis dėlto dauguma mokslininkų sutinka, kad odometrijos metodas yra svarbi roboto navigacijos sistemų dalis.

Tokiose sistemose ratų pasisukimo kampas paverčiamas į linijinį roboto poslinkį. Tačiau yra atvejų, kai dėl ratų praslydimo ir kitų priežasčių ratai gali sukurti neproporcingai linijiniam poslinkiui. Gautos paklaidos gali būti skirstomos į sisteminės ir nesisteminės. Sisteminės paklaidos yra tos, kurios atsiranda dėl kinematinė roboto klaidų, pavyzdžiui, nevienodas ratų skersmuo, kuris gali atsirasti, jei svorio centras pasislinks link vieno rato. Nesisteminės paklaidos yra tos, kurių rezultatas yra grindų sąveika su ratais, pavyzdžiui, ratų praslydimas dėl nelygumų ir įtrūkimų [12, 45, 46, 47].

Dažniausiai mobiliesiems robotams įdiegiamos hibridinės odometrijos ir „orientyro“ navigacinės sistemos, kur orientyrai turi būti tankiai sudėlioti robotą supančioje aplinkoje, ir jos yra pagrįstos blogiausio atvejo sisteminėmis paklaidomis. Tokios sistemos jautrios nesisteminėms klaidoms.

Metodo trūkumas. Orientacinių klaidų kiekis didėja proporcingai roboto nuvažiuotam atstumui.

Paklaida. Tokių sistemų paklaida svyruoja nuo centimetrų iki decimetrų, tai priklauso nuo roboto nuvažiuoto atstumo [32].

1.4. Hibridinės padėties nustatymo sistemos

1.4.1. SLAM algoritmai

Hibridinės padėties nustatymo sistemos be papildomos įrangos (orientyrų [48, 49, 50, 51] ir inercinių įrenginių [52, 53]) dar naudoja algoritmus, pagrįstus mobilųjį robotą supančios aplinkos dvimačių ar trimačių [54, 55, 56] žemėlapių sudarymu. Tokiose sistemose naudojamos įvairios kompiuterinės regos priemonės ir įvairūs SLAM (*Self Localization And Mapping*) algoritmai [57, 58].

Metodo esmė. Žemėlapių sudarymu pagrįstas padėties nustatymas – tai metodikos, kuriose mobilusis robotas naudoja jutiklius supančios aplinkos žemėlapiui sukurti. Šis vietinis žemėlapis gali būti lyginamas su turimu (iš anksto paruoštu) žemėlapiu, jau saugomu atmintyje. Jei atitikmuo nustatomas, robotas gali apskaičiuoti savo esamą padėtį ir orientaciją aplinkoje. Iš anksto saugomi žemėlapiai gali būti sukurti CAD (*Computer-Aided Design*) sistemomis arba paties mobiliojo roboto, kuris važinėdamas po darbinę erdvę sukuria analizuojamos aplinkos žemėlapi.

SLAM metodų įgyvendinimą galima suskirstyti į etapus: orientyrų aplinkoje paieška, ypatybių (žymių) suradimas, būsenos įvertinimas ir būsenos bei ypatybių atnaujinimas. Kiekvienam etapui įgyvendinti egzistuoja atskiri būdai. SLAM metodų kokybiškai realizacijai reikia tarpusavyje kombinuoti įvairius algoritmus.

Vienas svarbiausių ir sunkiausių žemėlapiams pagrįstos navigacijos aspektų yra žemėlapio pritaikymas, t. y. atitikimo tarp esamo vietos žemėlapio ir saugomo darbinės erdvės žemėlapio nustatymas. Suderinimas pasiekiamas pirmiausia išgaunant ypatumus, po to nustatant teisingą atitikimą tarp vaizdo ir modelio ypatybių, paprastai priverstinės paieškos forma.

Egzistuoja daugybė SLAM algoritmų: L-SLAM [59] algoritmas, kuriam naudojamas skeneris, LSD-SLAM [60], ORB-SLAM [61], VSLAM [62] algoritmai, kuriems naudojama kompiuterinė rega, DV-SLAM [63] algoritmai, kuriems naudojami magnetiniai jutikliai, *Landmark* SLAM [64] ir kt.

Žemėlapių sudarymu pagrįstas padėties nustatymas turi privalumų, nes natūraliai roboto darbinėje aplinkoje atsirandančias struktūras taiko padėties informacijai gauti. Taip pat egzistuoja algoritmai, kuriais leidžiama robotui pažinti naują aplinką ir sumažinama koordinačių nustatymo paklaida tyrimo metu. SLAM metodai tobulėja labai sparčiai, kadangi tobulėja tokia pagalbinė sritis kaip kompiuterinė rega bei gerinama jutiklių kokybė.

Metodo trūkumas. Problema, susijusi su žemėlapių sudarymu, tai „autonominio tyrinėjimo“ sunkumai. Norint sudaryti žemėlapi, mobilusis robotas turi ištirti aplinką ir pažymėti neužfiksuotas vietas. Paprastai manoma, kad robotas pradeda savo tyrinėjimą visai nepažindamas aplinkos. Tada laikomasi tam tikros judėjimo strategijos, kuria siekiama maksimaliai padidinti pažymėtos teritorijos plotą per trumpiausią laiko tarpą. Tokia judėjimo strategija vadinama „tyrinėjimo strategija“ ir labai priklauso nuo naudojamo jutiklio rūšies. Vienas jutiklis negali nustatyti visų tam tikros aplinkos ypatumų. Šiai problemai įveikti reikia suderinti duomenis iš skirtingų jutiklių, o kartais tai realizuoti būna labai sunku.

Paklaida. Svyruoja nuo milimetro iki decimetro.

1.4.2. Aplinkos informacijos naudojimas padėčiai uždaroje aplinkoje nustatyti

Informaciją apie mobilųjį robotą supančią aplinką gali teikti laipsniškai skenuojantis įrenginys, pavyzdžiui, skeneris. Dažniausiai iš lazerinio skenerio gaunami duomenys naudojami statinėms bei dinaminėms kliūtims [65] išskirti ir konfliktinėms situacijoms nustatyti. Skenerio teikiamą informaciją galima panaudoti ir patalpos profiliui sudaryti, kuris savo ruožtu padėtų surasti mobiliojo roboto padėties koordinates. Analizuojant žinomos patalpos profilį, galima ne tik gauti informaciją apie mobiliojo roboto judėjimą bei padėtį, bet ir įvertinti kitų dinaminų objektų judėjimo greitį bei padėtį [65].

Lazeriniai skeneriai veikia trianguliacijos principu. Lazerio spindulys (atskiras taškas, linija ar keletas linijų) projektuojamas ant skenuojamo objekto. Vaizdo kamera, esanti šone nuo lazerio spindulio šaltinio, „mato“ lazerio spindulio vaizdą ant tiriamo objekto. Spindulio taškai ant objekto, esančio toliau, matomi kameroje pasislinkę atžvilgiu taškų, esančių ant artimesnių objektų.

Pagrindinis skenavimo privalumas yra tas, kad šis metodas pakankamai greitas, nekontaktinis ir tikslus. Didžiausios problemos kyla lazeriniams skeneriams susidūrus su labai spindžiais, šviečiančiais, skaidriais arba šviesą sugeriančiais paviršiais ar objektais.

Literatūroje [65] sutinkami nuosekliojo ir kooperacinio aplinkos skenavimo metodai, naudojami aplinkos informacijai gauti.

1.4.2.1. Nuoseklusis aplinkos skenavimas

Nuoseklusis aplinkos skenavimas, pagrįstas kelių skenavimų iš dviejų skirtingų pozicijų vykdymu, leidžia nustatyti analizuojamos aplinkos pakitimus. Taikant tokį metodą galima aptikti aplinkoje esančias dinamines ir statines kliūtis [65]. Jei kliūtis aptinkama per abi skenavimo procedūras, kliūties greitis išmatuojamas ir kliūties padėtis bei greičio informacija gali būti panaudoti mobiliojo roboto navigacijai.

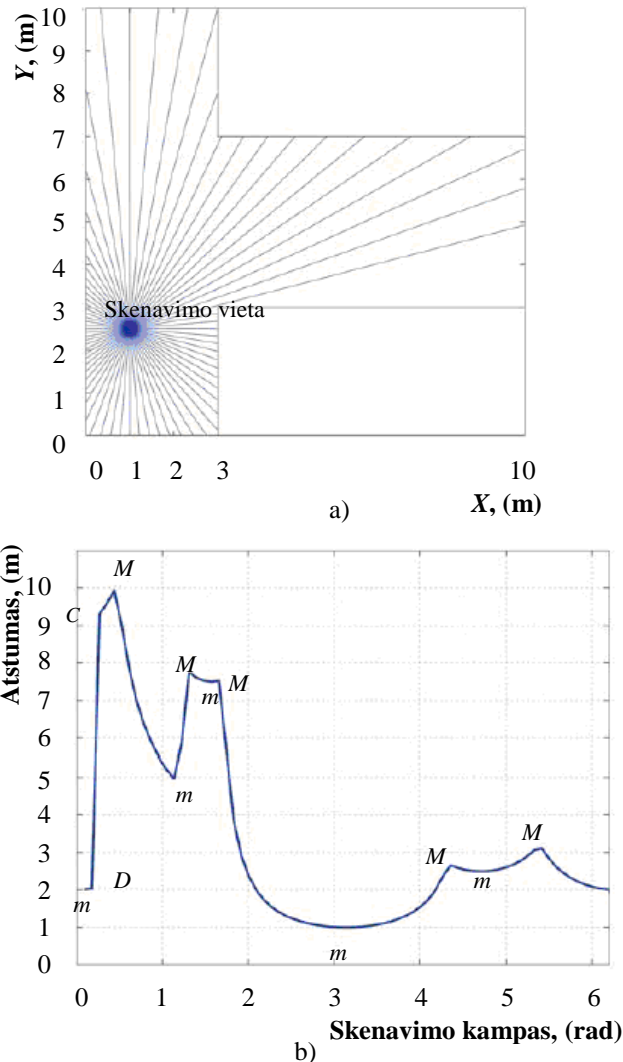
Tikslus mobiliojo roboto padėties nustatymas yra esminis reikalavimas valdant mobilųjį robotą. Judesiu plokštumoje apskaičiuoti reikalinga informacija apie roboto padėtį (x bei y koordinates) ir orientaciją (Θ). Mobiliojo roboto koordinatėms nustatyti pirmiausia reikia surinkti informaciją apie jį supančią aplinką. Tam visa darbinė aplinka yra skenuojama. 1.3 paveiksle (*a*) parodyta, kaip vyksta aplinkos skenavimas [65]. Jei skeneris matavo atstumą N kartų per 360° , tada skenavimo žingsnis atskaičiuojamas $360/N$. 1.3 paveiksle (*b*) parodytas iš skenerio gautų duomenų sudarytas patalpos profilis. Tokiam profiliui sudaryti ieškomi aplinkos charakteringieji taškai, t. y. minimumo (m), maksimumo (M) vietos, trūkio (D) taškai ir jungimo taškas (C). Profiliui, parodytam 1.3 paveiksle (*b*), gauta seka atrodo taip: $mDCMmMmMmMmM$. Analizuojant aplinką, kurioje atsiranda dinaminės kliūtys (1.4 pav., *a*), gaunamas profilis (1.4 pav., *b*), kuriam seka pasikeičia į $CDDCmMmMmMmMmM$. Papildomi trūkio taškai parodo, kad skeneris užfiksavo kliūtį.

Norint nustatyti roboto buvimo vietą, nagrinėjama aplinka papildomai padalijama į 9 skirtingus sektorius, kiekvienam sektoriui priskiriant savo unikalią žymę-seką.

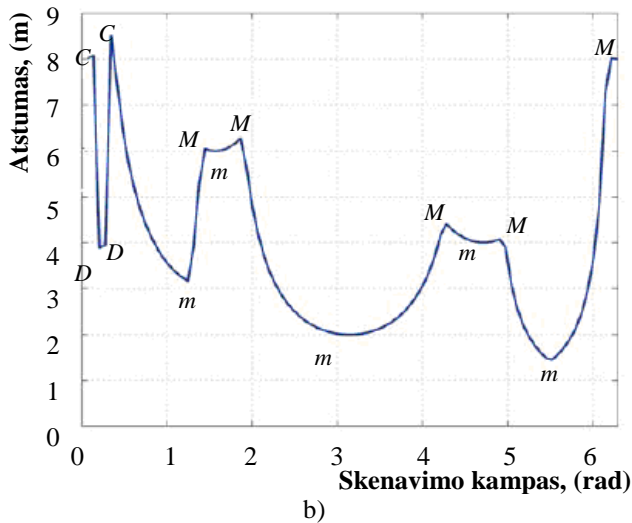
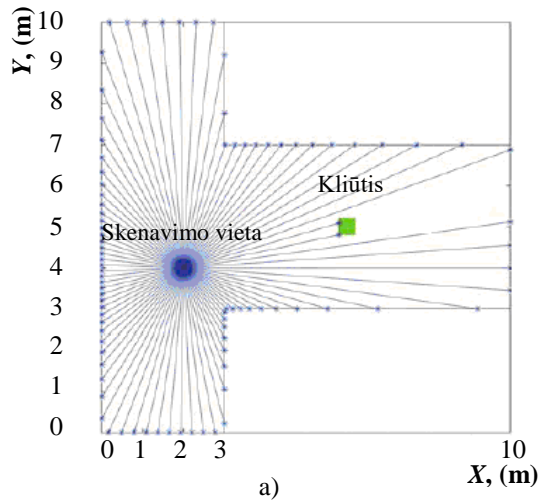
Nustačius sektorių, kuriame yra robotas, nustatoma jo pozicija ir orientacija, t. y. apskaičiuojami parametrai x , y ir Θ . Šiems parametrams gauti reikalinga informacija apie:

- viršūnių ir kraštų, matomų šiame sektoriuje, koordinates;
- jutiklio rodmenis kiekvienam matomam kraštui.

Taigi pradžioje atliekamas pirmasis aplinkos skenavimas ir sudaromas patalpos profilis. Po to yra atliekamas antrasis skenavimas ir gaunamas naujas patalpos profilis. Abiejų skenavimų metu gautų unikalių žymių-sekų informacija palyginama. Šios nuosekliųjų duomenų grupės taip pat gali būti naudojamos nustatant kliūtis padėtį. Kliūtis padėtis ir greitis gali būti įvertinti palyginant abiejų skenavimų metu gautą informaciją apie aplinką.



1.3 pav. Aplinkos be kliūtis skenavimas: a) skenerio diskretiniai spinduliai 5 laipsnių žingsniu; b) patalpos profilis [65]



1.4 pav. Aplinkos su kliūtimi skenavimas: a) skenerio diskretiniai spinduliai 5 laipsnių žingsniu; b) patalpos profilis [65]

Dviejų duomenų grupių palyginimas taip pat gali suteikti papildomų duomenų apie mobiliojo roboto padėtį ir orientaciją, nes robotas juda tam tikrą atstumą nuoseklioje skenavimo schemeje.

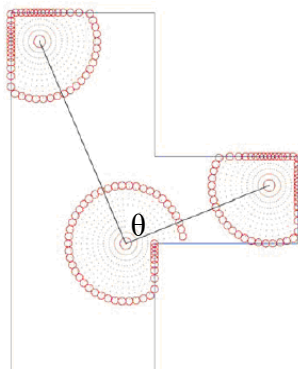
Straipsnio autorių atliktame eksperimente matosi, kad naudojant nuoseklų skenavimą roboto padėtis yra nustatoma su 3–5 mm paklaida. Eksperimentas buvo atliktas *T* formos aplinkoje, kurios dydis 0,4×0,6 m.

Mobiliojo roboto padėties nustatymo sistemose, kuriose naudojamas profilio skenavimas, objektų padėtis yra nustatoma analizuojant tik charakteringus aplinkos taškus. Esminis dalykas – patalpa turi būti stačiakampė.

1.4.2.2. Kooperacinis aplinkos skenavimas

Mobiliojo roboto padėties nustatymo metodas atliekant kooperacinį skenavimą laiko robotus susijusiomis sistemomis ir leidžia nustatyti atstumą tarp robotų centrų [65].

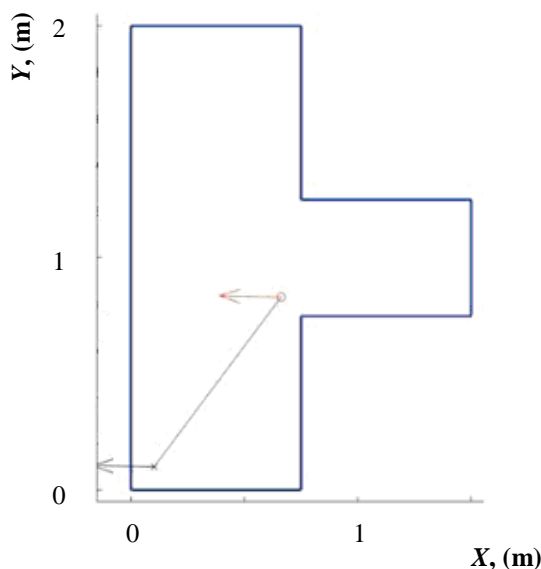
Tikrinant metodiką autorių [65] atliktas eksperimentas su trimis robotais T formos aplinkoje (1.5 pav.).



1.5 pav. T formos aplinka su trimis robotais [65]

Norint rasti atstumą ir krypties kampą tarp robotų, reikalinga vaizdo kamera ir kodavimo įrenginys (enkoderis), leidžiantys nustatyti kryptį tarp dviejų robotų. Tokioje sistemoje papildomai dar naudojamas infraraudonasis nuotolio jutiklis, kuris išmatuoja atstumą nuo roboto centro iki patalpos sienos.

Literatūroje [65] aprašytas dar vienas eksperimentas naudojant kooperacinį skenavimą. Eksperimentas buvo atliktas T formos aplinkoje, kurios dydis $1,5 \times 2,0$ m (1.6 pav.).



1.6 pav. T formos aplinka su trimis robotais [65]

Taikant šį metodą, roboto padėtis nustatyta su 1 cm paklaida. Tačiau reikia pažymėti, kad tokiu atveju autoriai [65] prisiriša prie analizuojamos patalpos konfigūracijos.

Mobiliojo roboto padėčiai nustatyti imama aplinka, kurioje yra stačių kampų, metodo veikimas esant apskritam profiliui neapertas. Skaičiavimams naudojami profilio charakteringieji taškai, kuriais išskiriamos tam tikros vietos aplinkoje. Šie taškai leidžia nustatyti mobiliojo roboto padėtį.

1.5. Apibendrinimas

1.1 lentelėje pateiktas padėties nustatymo metodų palyginimas [9, 32, 42], atsižvelgiant į kelis parametrus: sistemos paklaidą ir veikimo atstumą.

1.1 lentelė. Padėties nustatymo sistemų palyginimas

Padėties nustatymo sistema	Paklaida	Atstumas
GPS	1–10 m	Globalus
Žymės (RFID technologija)	Nuo kelių centimetrų iki dešimčių metrų	1–50 m
Orientyrai	1–2 m	50 m
Švyturiai	Apie 7 cm	5 m
Inertinė navigacija ir odometrija	1 proc. nuo patalpos dydžio	Neribotas
Žemėlapių sudarymas	Nuo 10 cm iki kelių metrų	Patalpa
Infraraudonųjų spindulių sistemos	Iki kelių metrų	1–10 m
Radijo dažnio sistemos	Apie 1 m	10–100 m
Ultragarsinės sistemos	1–3 cm	2–10 m

Apibendrinus literatūroje rastus paklaidų ir atstumo duomenis matyti, kad kuo mažesnis tyrimuose naudojamos patalpos dydis, tuo su mažesne paklaida nustatomos judančių objektų padėties koordinatės.

Taip pat nustatyta, kad daugeliui egzistuojančių judančių objektų koordinačių nustatymo metodų ir algoritmų reikalinga papildoma išorinė aparatūrinė įranga (vaizdo kameros, akcelerometrai ir kt.) bei pagalbinės priemonės (aktyvūs švyturiai, žymės, orientyrai).

Papildomos aparatūros naudojimas sudaro sąlygas kurti naujus algoritmus ir metodus, realizuojančius judančių mobiliųjų įrenginių vidinės valdymo sistemos ir navigacinės įrangos tarpusavio darbo sinchronizavimą bei ryšio nustatymą.

1.6. Pirmojo skyriaus išvados

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad judančių objektų padėties uždaroje aplinkoje nustatymo sistemos skirstomos į pasyvias, aktyvias ir hibridines. Pasyvioji padėties nustatymo sistema priima ir apdoroja išorinio šaltinio teikiamą informaciją apie savo padėties koordinatės ir kitas savo judėjimo charakteristikas, aktyvioji – nustato buvimo padėtį pati, o hibridinėse padėties nustatymo sistemose naudojamos įvairios kompiuterinės regos priemonės.

2. Robotų padėties nustatymo žinomoje aplinkoje metodų analizė parodė, kad daugeliui egzistuojančių judančių objektų koordinatinių nustatymo metodų yra reikalinga papildoma išorinė aparatūrinė įranga (vaizdo kameros, akcelerometrai ir kt.) bei įvairios pagalbinės priemonės (žymės, orientyrai ir kt.)
3. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad vis plačiau mobiliojo roboto padėties koordinatėms nustatyti taikomi įvairūs SLAM algoritmai, tačiau šių metodų paklaida svyruoja nuo kelių dešimčių centimetrų iki metro.
4. Literatūroje aprašytas padėties koordinatinių nustatymo metodas, pagal kurį koordinatės yra nustatomos vykdant aplinkos skenavimą. Mokslininkų rezultatai parodė, kad mobiliojo roboto valdymo sistema turi galimybę rinkti informaciją apie jį supančią aplinką ir atkurti patalpos profilį naudojant skenerį. Tačiau, kaip parodė mokslininkų gauti modeliavimo rezultatai, robotų padėtis yra nustatoma analizuojant tik aplinkos charakteringus taškus, o ne jos visumą. Kitas tokių metodų trūkumas – patalpa turi būti stačiakampė.

2. MOBILIOJO ROBOTO PADĖTIES KOORDINAČIŲ NUSTATYMAS NAUDOJANT ŽINOMOS PATALPOS PROFILĮ

2.1. Mobiliojo roboto padėties koordinačių pagal žinomos patalpos profilį nustatymo galimybės

Bet koks autonominis mobilusis robotas, vykdydamas gamybinę užduotį, yra valdomas tiek savo vidinės valdymo sistemos, tiek išorinės valdymo sistemos, kuri nuolatos seka mobiliojo įrenginio judėjimą.

Išorinė valdymo sistema – supervizorius – tai kompiuterinė sistema su programa, skirstančia darbinės užduotis laisviems, gamyboje naudojamiems robotams ir formuojanti jų judesio trajektorijas. Ši sistema realiuoju laiku seka, kaip realizuojamos jos suformuotos gamybinės užduotys, kaip mobilieji robotai vykdo navigaciją nurodyta trajektorija. Taip pat prognozuoja galimus konfliktus ir koreguoja robotų trasas taip, kad jų būtų išvengta. Šiems veiksams atlikti išorinei valdymo sistemai būtina žinoti, kur konkrečiu laiko momentu yra mobilusis robotas, ar jis nenukrypo nuo nurodytų koordinačių.

Supervizorinė sistema, turėdama visą informaciją apie supančią aplinką, gali atlikti šias funkcijas:

- nustatyti optimalią judėjimo trajektoriją nuo vieno taško (buvimo vietos) iki kito taško (tikslas) ir šią informaciją perduoti mobiliam robotui;
- numatyti konfliktų vietas ir koreguoti roboto elgesį taip, kad būtų išvengta susidūrimų;
- padėti autonominio mobiliojo roboto vidinei valdymo sistemai apskaičiuoti padėties koordinates.

Mobilusis robotas turi žinoti padėties koordinates tam, kad galėtų tiksliai nustatyti savo padėtį toje aplinkoje (veikimo zonoje), kurioje vykdo jam pavestas užduotis. Žinodamas savo buvimo vietos koordinates, jis gali planuoti tolimesnius veiksmus, kad saugiai judėtų iš taško A į tašką B .

Kiekvienas mobilusis robotas, judėdamas jam priskirta (nurodyta) trasa, sprendžia savo autonominius uždavinius: nuolat skenuoja gamybinę aplinką (seka savo padėties koordinates) ir skenavimo metu gautą informaciją per grįžtamojo ryšio priemones perduoda išorinei valdymo sistemai. Jei mobiliojo roboto judėjimo kelyje atsiranda įvairios dinaminės ar/ir statinės kliūtys ir jis nukrypsta nuo nurodytos judėjimo trastos, supervizorius pakoreguoja roboto judėjimo trajektoriją bei padėties parametrus taip, kad nukrypimas būtų minimalus.

Roboto skenavimo sistema turi techninių galimybių matomos aplinkos skenavimui atlikti ir pateikti duomenis padėties koordinatėms apskaičiuoti. Dėl įvairių techninių priežasčių ši roboto padėtis gali nesutapti su ta, kurią jam nurodė supervizorius ir kurioje jis turi būti konkrečiu laiko momentu. Tačiau išorinė valdymo sistema turi galimybę gauti mobiliojo roboto, vykdančio gamybinę užduotį, profilio informaciją iš to taško, kuriame robotas turėjo būti, ją palyginti su roboto nustatyta aplinkos informacija iš to taško, kuriame jis yra, ir pagal tai nustatyti roboto padėties koordinates, įvertindama, ar įvyko nukrypimas, ar ne. Jeigu

nukrypimo nėra, jokių veiksmų atlikti nereikia, o jei nukrypimas įvyko, būtina koreguoti mobiliojo roboto trasą, kad gamybinė užduotis būtų sėkmingai įvykdyta.

Įvertinus šiuolaikinių kompiuterinių sistemų pajėgumus, mobiliojo roboto valdymo sistema turi laiko rezervą papildomiems uždaviniams spręsti. Verta nepamiršti, kad mobilieji robotai aplinkai stebėti turi įvairių skenavimą atliekančių įtaisų, todėl skenuodami aplinką jie gali rinkti informaciją, sudaryti savo „matomos“ patalpos profilį ir lyginti jį su profiliu, kurį pateikia išorinė valdymo sistema (supervizorius), turinti žinomos aplinkos matematinį modelį.

Egzistuoja įvairūs matematiniai metodai informacijai palyginti. Tačiau palyginimų rezultatas dvejopas: informacija gali arba sutapti, arba nesutapti, jokios konkrečios informacijos apie norimą pasiekti tikslą negaunama. Tad po įvairių ieškojimų apsisotą prie dviejų galimų tyrimo ir analizės būdų, leidžiančių nustatyti judančio objekto (nagrinėjamu atveju mobiliojo roboto) koordinatės, naudojant jo „matomos“ patalpos profilio ir supervizoriaus pateikiamo profilio informaciją [7, 8].

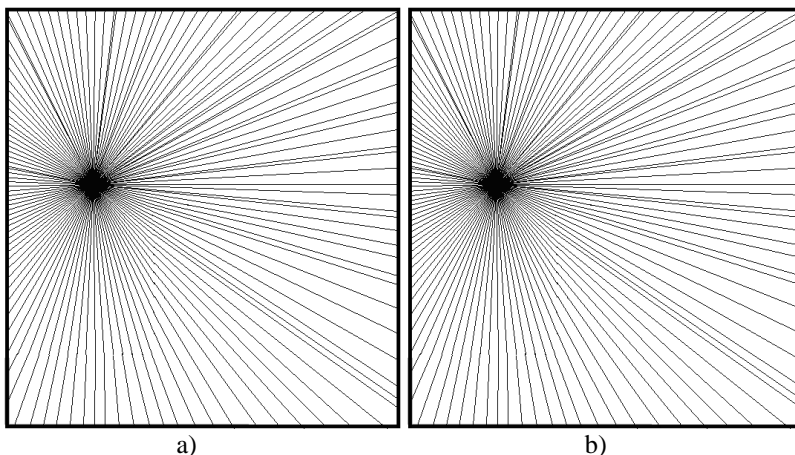
2.2. Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo pagal žinomos patalpos profilių sutapatinimą metodas

Mobiliojo roboto padėties koordinatėms pagal žinomos patalpos profilį nustatyti reikalinga:

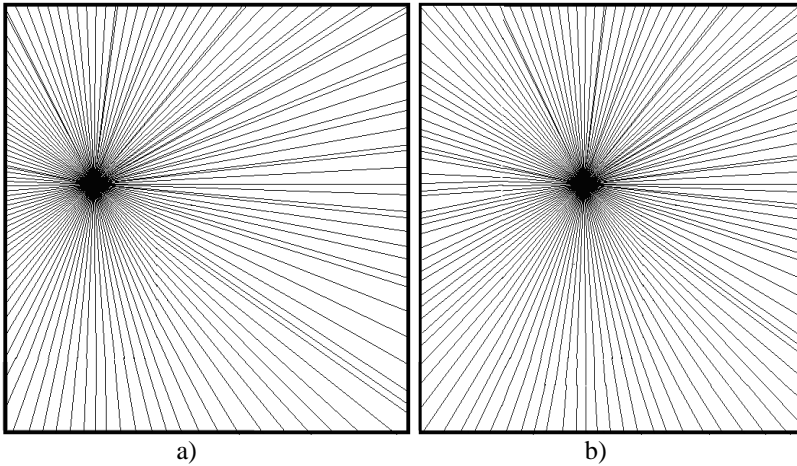
- mobiliojo roboto skenavimo sistema;
- išorinė valdymo sistema.

Šis metodas pagrįstas dviejų profilių (mobiliojo roboto nuskenuoto ir supervizoriaus sudaryto) palyginimu.

Mobilusis robotas, naudodamasis savo skenavimą atliekančiais įtaisais, skenuoja aplinką (2.1 pav., *b* ir 2.2 pav., *b*) ir sudaro „matomos“ patalpos profilį iš to taško, kuriame konkrečiu laiko momentu jis yra. Lygiagrečiai išorinė valdymo sistema „skenuoja“ aplinką (2.1 pav., *a* ir 2.2 pav., *a*) ir nustato „matomos“ patalpos profilį iš pozicijos, kurioje tuo laiko momentu turi būti mobilusis robotas.



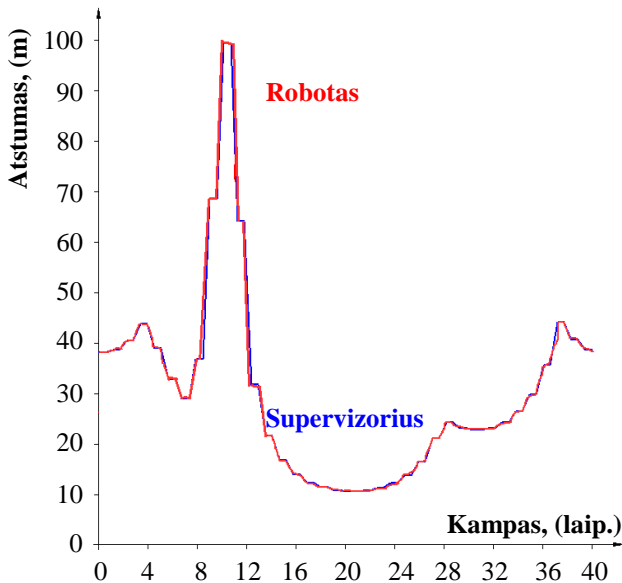
2.1 pav. Supervizoriaus (*a*) ir mobiliojo roboto (*b*) spindulių konfigūracija, kai realios mobiliojo roboto padėties koordinatės sutampa su supervizoriaus nurodytomis koordinatėmis



2.2 pav. Supervizoriaus (a) ir mobiliojo roboto (b) spindulių konfigūracija, kai realios mobiliojo roboto padėties koordinatės nesutampa su supervizoriaus nurodytomis koordinatėmis

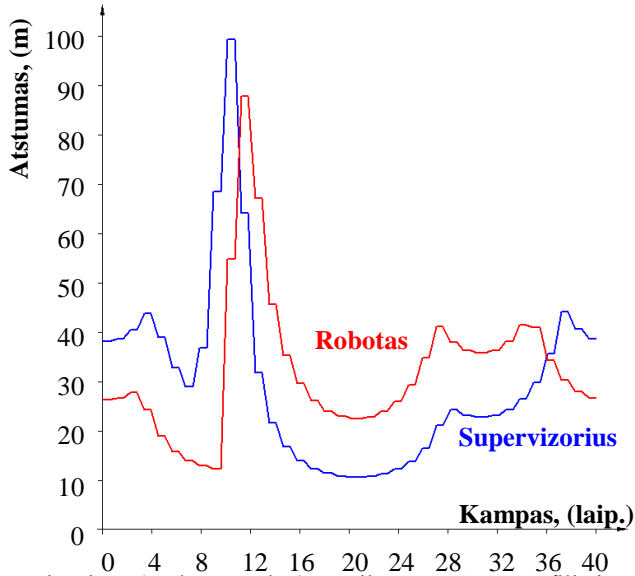
Kai yra gauti mobiliojo roboto ir supervizoriaus „matomų“ patalpų profiliai, galima juos tarpusavyje palyginti.

Pirmas atvejis: supervizoriaus ir mobiliojo roboto profiliai sutampa (2.3 pav.), mobilusis robotas yra supervizoriaus nurodytame taške.



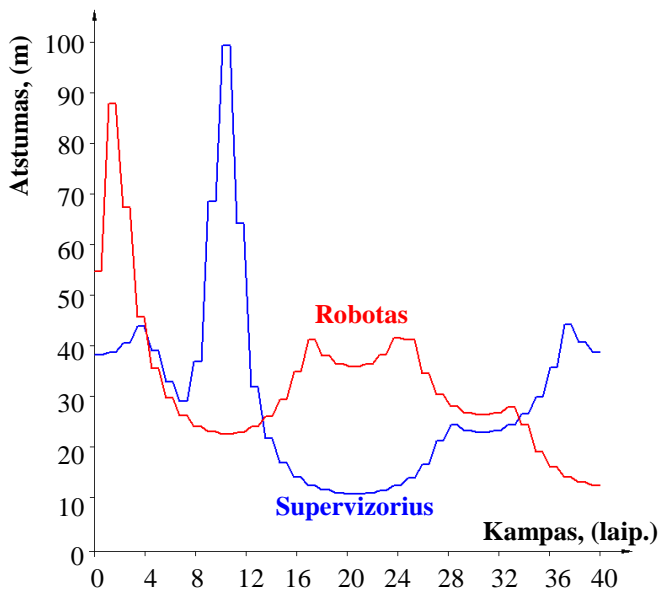
2.3 pav. Supervizoriaus pateiktas (mėlyna spalva) ir mobiliojo roboto (raudona spalva) skenuotas žinomos patalpos profilis (profilis gaunamas iš to paties taško) [7]

Antras atvejis: mobiliojo roboto ir supervizorinės sistemos profiliai nesutampa (2.4 pav.), mobilusis robotas dėl atsitiktinių priežasčių nukrypo nuo nurodytų koordinatinių.



2.4 pav. Supervizoriaus (mėlyna spalva) pateiktas patalpos profilis iš pozicijos, kurioje turi būti mobilusis robotas ir mobiliojo roboto (raudona spalva) skenuotas patalpos profilis iš pozicijos, kurioje jis yra [7]

Trečias atvejis: mobiliojo roboto ir supervizoriaus profiliai nesutampa ir mobilusis robotas yra pametęs orientaciją, t. y. pradeda skenavimą kitu kampu negu išorinė valdymo sistema (2.5 pav.).

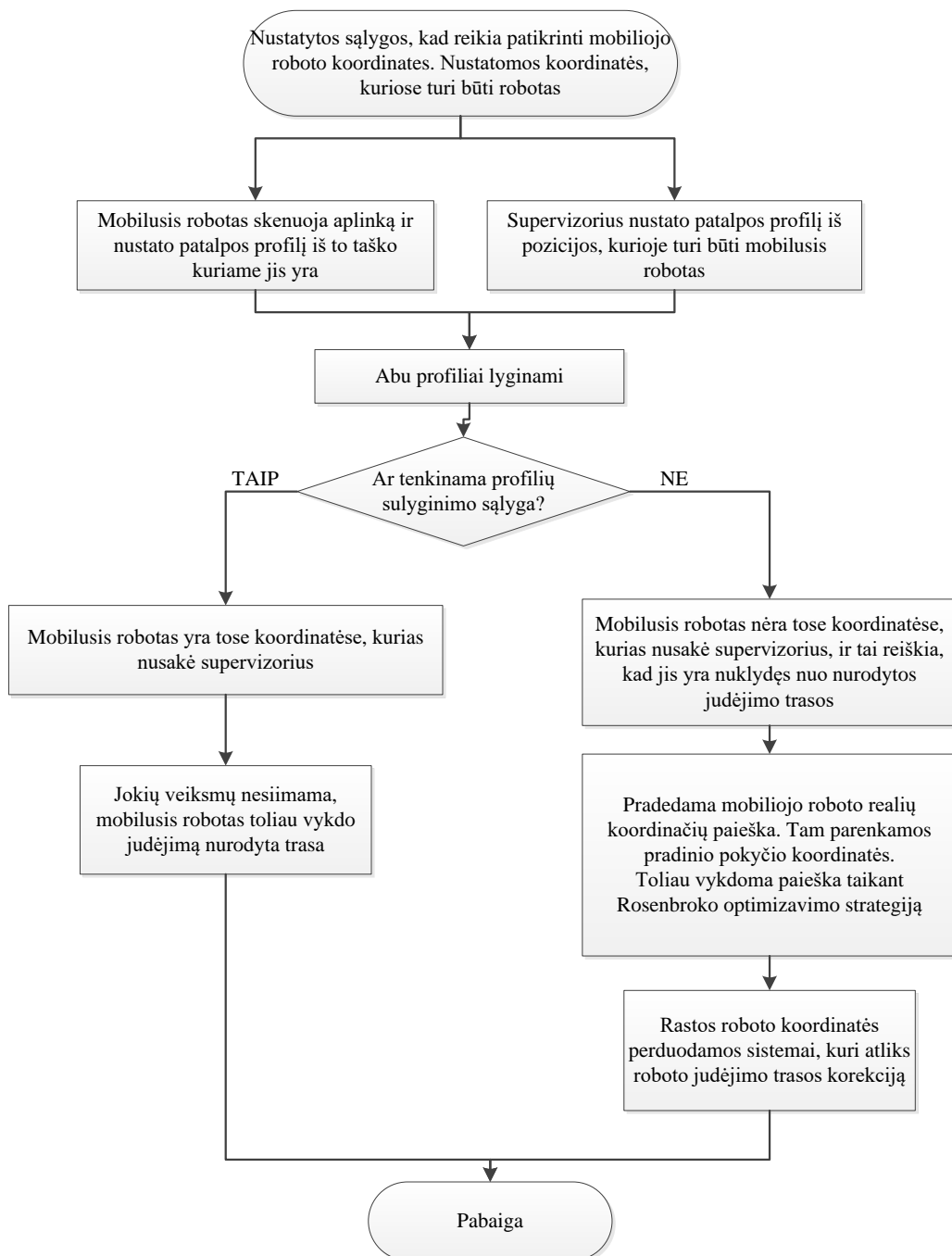


2.5 pav. Supervizoriaus (mėlyna spalva) pateiktas patalpos profilis iš pozicijos, kurioje turi būti mobilusis robotas ir mobiliojo roboto (raudona spalva) skenuotas patalpos profilis iš pozicijos, kurioje jis yra, bet pametęs krypties orientaciją [7]

Tokia situacija visad galima, kai mobilusis robotas, nukrypęs nuo nurodytų koordinačių, pasisuka, pamesdamas orientaciją krypties, kurią buvo gavęs iš supervizoriaus. Jei mobilusis robotas neturi krypties nustatymo sistemos, tada darosi neaišku, nuo kur prasideda profilio skenavimas. Šiuo atveju, net vykdant skenavimą iš to paties taško, profiliai gaunami netapatūs ir be papildomų skaičiavimų roboto padėties nustatyti nepavyks.

Mobiliojo roboto padėties koordinatės galima nustatyti keliais būdais. Pirmasis būdas remiasi žinomos patalpos profilių sutapatinimu [7]. Kiekvienam skenavimo kampui apskaičiuojamas matavimų skirtumas tarp abiejų profilių ir visų skenavimo kampų gauti skirtumai susumuojami. Gautas rezultatas ir nusako nukrypimą nuo tikrųjų koordinačių. Supervizorius, nustatęs, kad yra koordinačių nukrypimas, nustato profilį iš kito taško. Jei atlikus tuos pačius veiksmus gautas rezultatas yra blogesnis (didesnis) už buvusį, galima teigti, kad pasirinktas naujas taškas yra dar toliau nuo realių mobiliojo roboto koordinačių, o jei rezultatas yra geresnis (mažesnis), reiškia, kad artėjama prie tikslios padėties. Norint gauti galutinį rezultatą reikia nustatyti supervizoriaus paieškos koordinačių keitimo algoritmą. Mobiliojo roboto padėties koordinatėms po įvykusio nukrypimo nustatyti reikia taikyti klasikinį optimizavimo uždavinį, kur supervizoriui keičiant koordinatės yra optimizuojamas profilių nesutapimas, tad gautas profilių palyginimo rezultatas yra optimizavimo funkcionalas ar kitaip vadinamas optimizavimo kriterijus. Taigi toliau darbe bus pasirinktas vienas iš dvimatės paieškos greičiausio nusileidimo optimizavimo metodų.

Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo pagal žinomos patalpos profilių sutapatinimą algoritmo blokinė schema pateikta 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatinių nustatymo pagal žinomos patalpos profilių sutapatinimą algoritmo blokinė schema

2.3. Mobiliojo roboto padėties koordinačių pagal žinomos patalpos profilio svorio centrą nustatymo metodas

Antrasis mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo būdas paremtas žinomos patalpos profilio svorio centro nustatymu [8]. Nuskenuotas profilis (nagrinėjamu atveju žinomos aplinkos – gamybinės patalpos – profilis) sudaro uždara figūrą. Bet kokios formos figūra turi vieną ypatingą tašką – tai tos figūros svorio centras. Nesvarbu, iš kurio taško tame pačiame profilyje yra skenuojama aplinka, svorio centras visada bus tame pat taške profilio atžvilgiu. Supervizorius – tai kompiuterinė programa, kuri neturi apčiuopiamo skenerio aplinkai skenuoti. Modeliuodamas supervizorius nustato patalpos profilį iš pozicijos, kurioje konkrečiu laiko momentu turi būti mobilusis robotas; šitą profilį vėliau galima lyginti su roboto nuskenuotu profilium.

Šiam metodui realizuoti reikalingi du tos pačios patalpos profiliai: 1) supervizoriaus, kurio koordinatės yra žinomos ir gali būti laisvai keičiamos, o jo nustatytas patalpos profilio svorio centras turi tikslias koordinates, bei 2) mobiliojo roboto, kuris nustato svorio centro tašką savo padėties koordinačių atžvilgiu skenuodamas aplinką.

Kiekvienas iš šių profilių turi perstumtą atskaitos tašką svorio centro atžvilgiu. Taip įvyksta dėl to, kad mobilusis robotas laiko, jog yra taške su nulinėmis koordinatėmis. Jei šie taškai, kuriuose yra mobilusis robotas ir supervizorius, absoliučiąjį koordinačių atžvilgiu nėra ten pat, gaunami skirtingi profiliai, tačiau svorio centras turi tas pačias koordinates. Taigi žinodami supervizoriaus absoliučiąsias koordinates turime ir svorio centro absoliučiąsias koordinates, kurios padeda nustatyti mobiliojo roboto absoliučiąsias koordinates.

Mobilusis robotas skenuoja aplinką, keisdamas skenerio krypties kampą ir matuodamas atstumą iki artimiausios kliūties. Apžvelgus visą aplinką 360° kampu gaunama serija taškų, atitinkančių iškiliojo daugiakampio viršūnes. Šį daugiakampį dvimatės erdvės atveju ir galima vadinti patalpos profilium. Turint žinomos patalpos profilį iš pozicijos, kurioje mobilusis robotas yra konkrečiu laiko momentu, apskaičiuojamas šio profilio svorio centras. Lygiagrečiai išorinė valdymo sistema sudaro patalpos profilį iš pozicijos, kurioje tuo metu turi būti mobilusis robotas ir taip pat apskaičiuoja sudaryto profilio svorio centrą.

Bendruoju atveju plokščiosios figūros, apibūdinamos paviršiumi S , svorio centro koordinatės (x_c ir y_c) apskaičiuojamos taip [8]:

$$x_c = \frac{1}{M} \iint_S x \cdot \sigma(x, y) dx dy; \quad (2.1)$$

ir

$$y_c = \frac{1}{M} \iint_S y \cdot \sigma(x, y) dx dy. \quad (2.2)$$

Šiose išraiškose M yra daugiakampio ribojamos figūros masė, o $\sigma(x, y)$ – tankis. Tankio išraiška reikalinga tuo atveju, kai figūra yra nevienalytė ar kintančio storio. Masė apskaičiuojama taip:

$$M = \iint_S \sigma(x, y) dx dy. \quad (2.3)$$

Kai mobilusis robotas juda gamybinėje patalpoje, padėties koordinatėms nustatyti reikia turėti tiksliai informaciją apie patalpos profilį, iš kurios bus apskaičiuota aplinko svorio centro padėtis. Kiti parametrai yra neaktualūs, kadangi aplinka yra homogeniška (vienalytė iškiliojo daugiakampio formos aplinka su nežymiomis fluktuacijomis, neturinti labai išsikišusių dalių). Atliekant skaičiavimus ir modeliuojant priimama, kad (2.1–2.3) išraiškose tankio reikšmė lygi vienetui ($\sigma = \text{const} = 1$). Kai tankis lygus vienetui, o masė $M \Rightarrow S$, mobiliojo roboto koordinatų nustatymo išraiškos darosi paprastesnės [8]:

$$x_C = \frac{1}{M} \iint_S x \cdot dx dy; \quad (2.4)$$

ir

$$y_C = \frac{1}{M} \iint_S y \cdot dx dy. \quad (2.5)$$

Gautos supervizoriaus ir mobiliojo roboto patalpos profilio svorio centrų koordinatės tarpusavyje yra palyginamos.

Jei mobilusis robotas yra tose koordinatėse, kurias jam nusakė supervizorinė sistema, t. y. jis nenukrypo (dėl pašalinių judančių objektų/mechanizmų ar techninio gedimo) nuo nurodytų koordinatų, tai supervizoriaus ir mobiliojo roboto „matomos“ patalpos profilio svorio centrų vertės turi sutapti (2.7 pav.).

Jei mobilusis robotas nukrypo nuo koordinatų, kurias jam nurodė išorinė valdymo sistema, tada supervizoriaus pateikto ir mobiliojo roboto skenavimo metu gauto „matomos“ patalpos profilio svorio centrų vertės nesutaps (2.8 pav.). Įvertinus tai, jog nesvarbu, iš kurio taško yra skenuojama žinoma aplinka, patalpos profilio figūros svorio centro padėtis profilio atžvilgiu visada bus ta pati, todėl iš gauto svorio centrų skirtumo galima išskaičiuoti roboto padėties koordinates.

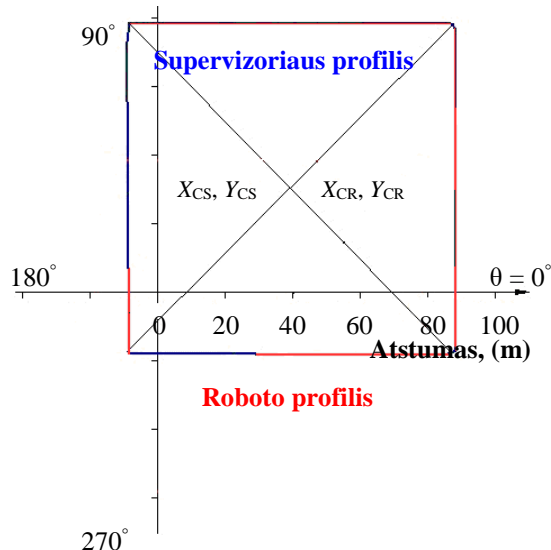
Suprantama, kad žinomos patalpos profilis bus baigtinis tik tuo atveju, kai aplinka uždara, t. y. nėra aplinkos taškų, kurie skeneriui atrodo esą be galo toli.

Taikant šį mobiliojo roboto koordinatų nustatymo metodą taip pat galima situacija, kai mobilusis robotas ne tik nukrypsta nuo nurodytos judėjimo trasos, bet ir praranda krypties orientaciją (2.9 pav.).

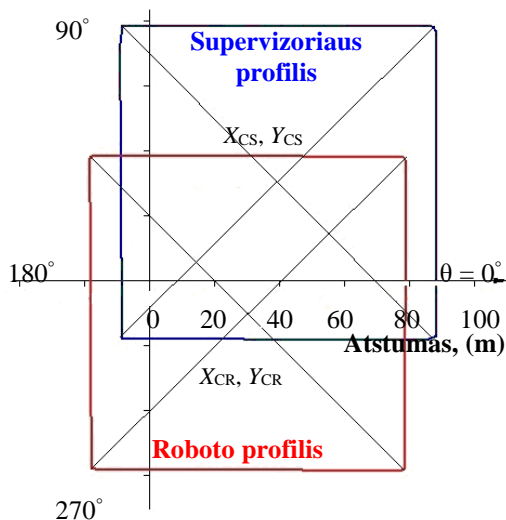
Šiuo atveju patalpos profilio svorio centro reikšmę galima apskaičiuoti nežiūrint į tai, kokių kampu pradeda skenavimą mobiliojo roboto skeneris. Tačiau tiek mobiliojo roboto skenerio, tiek išorinės valdymo sistemos pateikti profiliai yra skirtingose (o roboto dar ir pasuktoje) koordinatų sistemose, tad rasti bendrą sprendinį be papildomos informacijos tampa komplikuoja.

Norint išvengti nereikalingų skaičiavimų pageidautina, kad mobilusis robotas turėtų krypties nustatymo aparatūrą, kad jo ir supervizoriaus profilių nuskaitymo pradžios kryptis būtų ta pati.

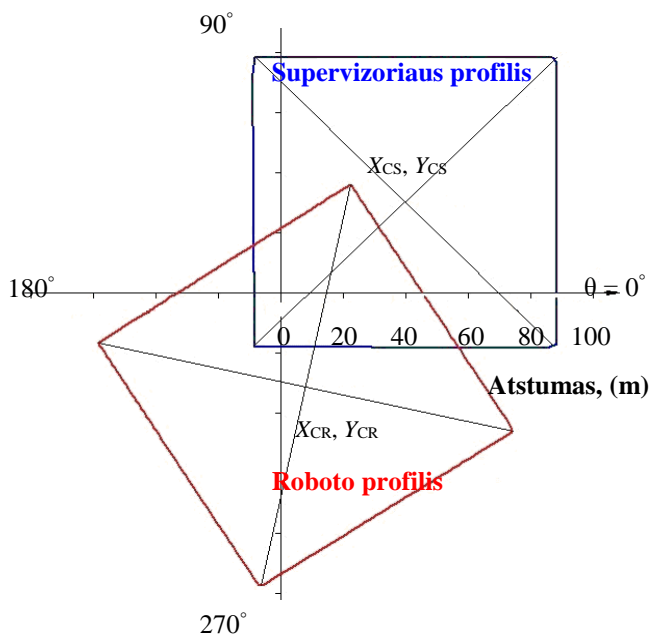
Mobiliojo roboto padėties koordinatę pagal žinomos patalpos profilio svorio centrą nustatymo algoritmo blokinė schema pateikta 2.10 pav.



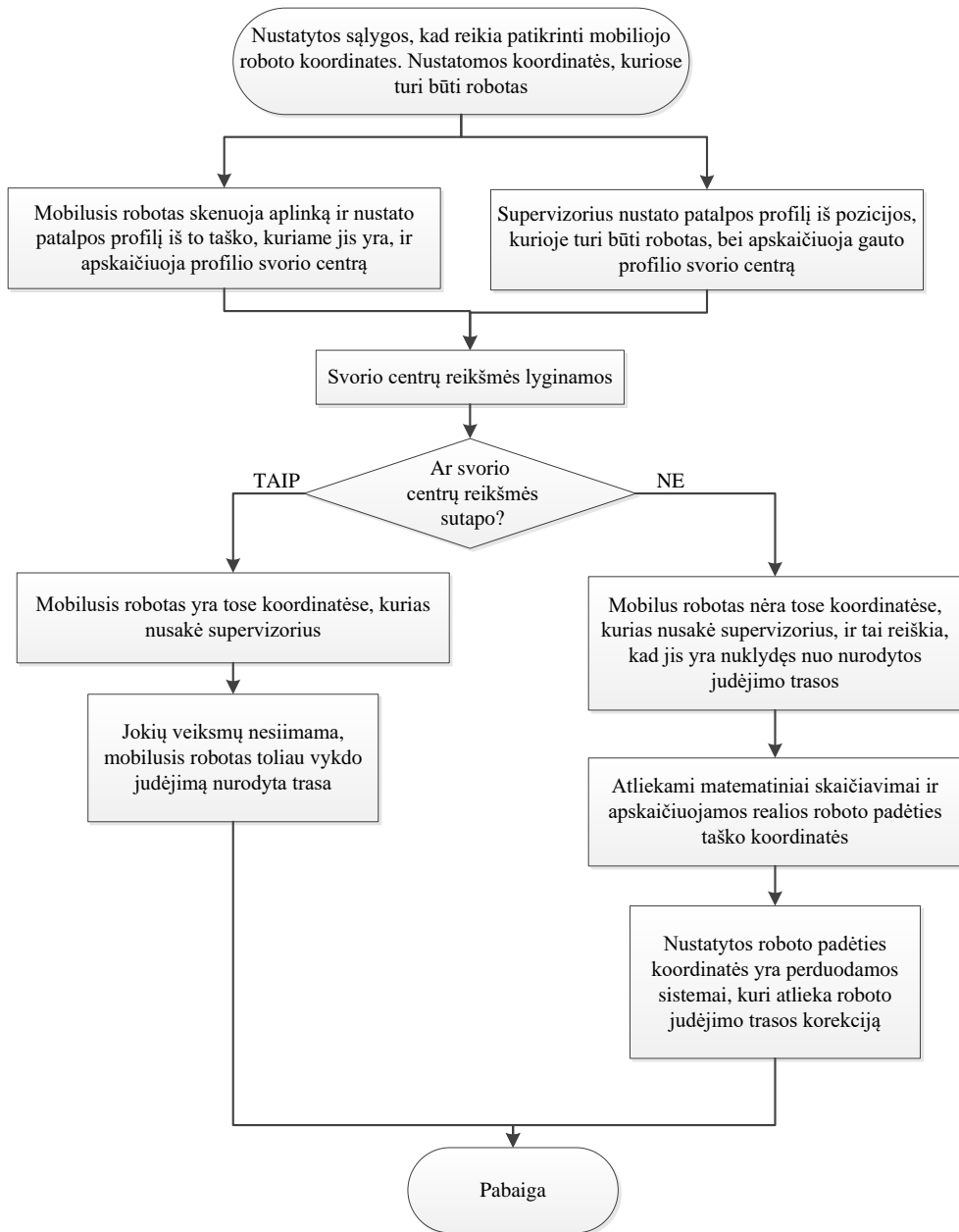
2.7 pav. Supervizoriaus pateiktas (mėlyna spalva) ir mobiliojo roboto (raudona spalva) skenuotas profiliai iš pozicijos, kurioje robotas yra, bei jų svorio centrai, kai roboto skeneris skenuoja ta pačia kryptimi bei iš to paties taško kaip ir supervizorius



2.8 pav. Supervizoriaus pateiktas profilis iš pozicijos, kurioje turi būti mobilusis robotas (mėlyna spalva), ir roboto (raudona spalva) skenuotas profilis iš pozicijos, kurioje jis yra, bei jų nustatytos svorio centro koordinatės, kai roboto skenerio ir supervizoriaus profilio nustatymo pradžios kryptis yra ta pati



2.9 pav. Supervizoriaus pateiktas profilis iš pozicijos, kurioje turi būti mobilusis robotas (mėlyna spalva), ir roboto (raudona spalva) skenuotas profilis iš pozicijos, kurioje jis yra, bei jų svorio centrai, kai roboto skenerio ir supervizoriaus profilio nustatymo pradžios kryptys yra skirtingos



2.10 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatžių pagal žinomos patalpos profilio svorio centrą nustatymo algoritmo blokinė schema

2.4. Antrojo skyriaus išvados

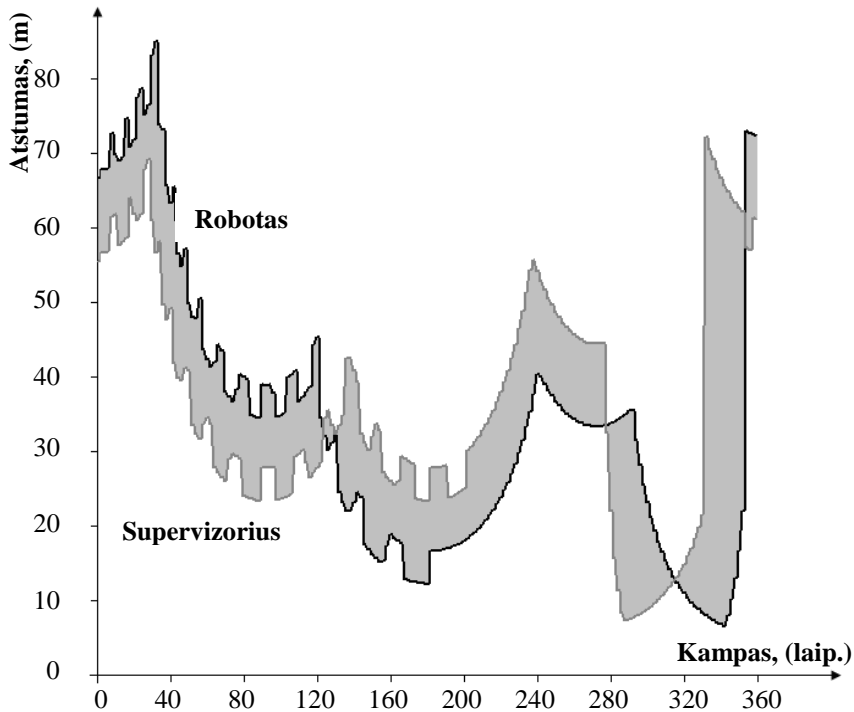
1. Pateikti ir išanalizuoti du mobiliojo roboto padėties koordinatžių žinomoje patalpoje nustatymo metodai, pagrįsti patalpos profilio informacijos analize, kurią gauna mobiliojo roboto skenavimo sistema ir supervisorius.

2. Pirmasis metodas pagrįstas mobiliojo roboto ir supervizoriaus suformuotų žinomos patalpos profilių sutapatinimu. Pasiūlyta, kad sutapatinimo uždavinys turi būti sprendžiamas keičiant supervizoriaus turimas mobiliojo roboto padėties koordinates taip, kad skirtumas tarp roboto suformuoto ir supervizoriaus sudaryto profilių būtų minimalus, t. y. sprendžiant klasikinį netiesinio programavimo optimizavimo uždavinį.
3. Antrasis metodas pagrįstas suformuoto žinomos patalpos profilio figūros svorio centro nustatymu. Parodyta, kad turint atskirai supervizoriaus ir mobiliojo roboto nustatytas santykinės žinomos patalpos profilio svorio centro koordinates bei supervizoriaus nurodytas roboto koordinates, kuriuose jis konkrečiu laiko momentu turi būti, galima surasti mobiliojo roboto realias padėties žinomoje aplinkoje koordinates.

3. MOBILIOJO ROBOTO PADĖTIES KOORDINAČIŲ ŽINOMOJE APLINKOJE NUSTATYMO METODŲ PLĖTOTĖ

3.1. Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo pagal žinomos patalpos profilių sutapatinimą metodo realizavimas ir funkcionalumo tyrimas

Mobiliojo roboto padėties koordinačių pagal žinomos patalpos profilių nustatymo metodas remiasi kelių profilių (mobiliojo roboto ir supervizoriaus) palyginimu. Informacijos, sukauptos apie žinomos patalpos profilius (supervizoriaus ir mobiliojo roboto), palyginimas gali būti atliktas ieškant profilių ploto skirtumo (3.1 pav.), t. y. absoliučiojo integralinio profilių skirtumo kriterijaus minimumo.



3.1 pav. Supervizoriaus ir mobiliojo roboto profiliai. Skirtumas tarp profilių pažymėtas pilka spalva

Kriterijus – tai reiškinys ar funkcija, kurio ar kurios reikšmę optimizuojant norima gauti minimalią ar maksimalią. Matematinio požiūriu optimizavimo kriterijus aprašo daugiamatį paviršių, turintį viena koordinate daugiau, negu yra projektuojamų ar reguliuojamų parametrų [76].

Optimumas – tai projektuojamosios aplinkos vieta, kur kriterijus įgauna mažiausią ar didžiausią reikšmę (ekstremaliąją reikšmę) lyginant su kitomis, gretutinėmis jo reikšmėmis. Ieškant mobiliojo roboto padėties koordinačių, aktuali yra kriterijaus funkcijos minimumo paieška [76].

Visos ekstremaliosios reikšmės, tenkinančios paieškos sąlygas, yra vadinamos lokaliaisiais optimumais. Tikrai pati geriausia reikšmė, tenkinanti optimumą, yra vadinama globaliaja.

Absoliutusias integralinis profilių skirtumo kriterijaus minimumas skaičiuojamas taip [7]:

$$E = \int_0^{360} |F_{S\alpha} - F_{R\alpha}| d\alpha \Rightarrow \min; \quad (3.1)$$

čia $F_{S\alpha}$ ir $F_{R\alpha}$ supervizoriaus modeliuojamo ir mobiliojo roboto nuskenuoto profilio spindulių ilgiai, atitinkantys tą pačią skenavimo kampo kryptį, o α – skenerio skenavimo žingsnis (laipsniais).

Sutapus supervizoriaus ir mobiliojo roboto koordinatėms, integralinis profilių skirtumo kriterijus bus lygus nuliui ar jam artimas.

Nesutapus supervizoriaus ir mobiliojo roboto koordinatėms, integralinis profilių skirtumo kriterijus nebus lygus nuliui. Nesutapus profiliams, vykdoma optimizavimo procedūra. Supervizorius pagal optimizavimo algoritmą keičia savo pateikiamas robotui koordinatas taip, kad integralinis profilių skirtumo kriterijus mažėtų. Kai integralinis profilių skirtumo kriterijus nebemažėja, optimizavimas baigiamas, nes supervizorius surado artimiausias koordinatas toms, kuriose šiuo metu yra robotas.

3.1.1. Optimizavimo strategijos pasirinkimas. Greičiausio nusileidimo daugiamačiai metodai

Norint rasti mobiliojo roboto padėties koordinatas, paiešką reikia atlikti keičiant koordinatas x ir y , o tokiai paieškai tinka daugiamačiai optimizavimo metodai. Pati paprasčiausia daugiamatė erdvė turi dvi koordinatas, kriterijaus funkcijos reikšmė šiuo atveju būtų trečioji koordinatė, t. y. kriterijaus funkcija būtų atvaizduojama paviršiumi trimatėje erdvėje. Jei yra du keičiami parametrai, tai kriterijus yra erdvinis paviršius; jei parametų daugiau negu du – turime daugiamatį paviršių, vadinamą hiperpaviršiumi [76].

Daugiamačiais metodais, atliekant skenavimus, gaunama vis nauja informacija apie aplinką ir ieškomos ekstremumų reikšmės. Jei po skaičiavimų rezultatas gaunamas mažesnis negu prieš tai, tada ši informacija yra naudinga, o jei rezultatas gaunamas didesnis – informacija nenaudinga. Tolimesniems skaičiavimams atlikti įsimenama tikrai geriausia reikšmė, atitinkamos koordinatės ir kiti reikalingi parametrai. Visų daugiamačių metodų esmė – ieškant ekstremumo reikšmės atlikti kuo mažiau matavimų [76].

Taikant didžiumą daugiamatės optimizacijos metodų naudojama informacija apie gradientą. Gradiento fizikinę esmę geriausiai galima įsivaizduoti trimatėje erdvėje. Pasak [76], paėmus bet kurią tašką trimatės erdvės paviršiuje, didžiausia įkalnė iš šio taško atitiks gradiento kryptį, o paties didžiausio nuolydžio kryptis bus priešinga gradiento kryptčiai. Dauguma metodų, kurių veikimas paremtas gradiento pagrindu, yra vadinami greičiausio nusileidimo metodais. Kadangi skaičiavimai vykdomi ne išvestinėmis, o pokyčiais, gradiento reikšmė priklauso nuo priimto

optimizuojamų kintamųjų žingsnio dydžio. Egzistuoja įvairūs skaičiavimo algoritmai, o jų pagrindu sukurta daug skaičiavimo metodų.

Optimizavimo metodų įvairovė atsirado dėl skirtingo optimizavimo kriterijaus funkcionalo pobūdžio. Gradientiniai metodai turi tokį trūkumą, kad juose linkstama paiešką vykdyti į artimiausią ekstremumą. Autorių [7] atlikti tyrimai parodė:

- jei profilis yra homogeniškas, kriterijaus funkcionalas turi tik vieną minimumą;
- jei profilis yra homogeniškas su nežymiais profilio ribų varijavimais, funkcionalas turi daug lokaliųjų minimumų, tačiau imant didelį pradinį optimumo paieškos žingsnį pavyksta rasti lokalųjį minimumą, savo reikšme labai artimą globaliajam minimumui;
- jei profilis yra nehomogeniškas, t. y. turi išsikišančių sienų, nišų ir pan., teigti, kad surastas minimumas bus globalusis, negalima ir šio metodo paieškai taikyti nepatartina.

Dėl šių priežasčių paieškai patartina taikyti optimizavimo metodą, nesusietą su tiesiogine gradientine paieška, kadangi sugaištamas papildomas laikas gradientui apskaičiuoti. Sudėtingiems optimizavimo uždaviniams spręsti literatūroje [66] rekomenduojama taikyti Simplekso arba Rosenbroko optimizavimo metodus. Tačiau taikant Simplekso metodą po kiekvieno paieškos žingsnio papildomai reikia skaičiuoti simplekso reikšmę, dėl to ilgėja optimizavimo kriterijaus apskaičiavimas.

O štai pagal Rosenbroko metodą, skirtingai nei taikant gradientinius metodus ir Simplekso metodą, pirmiausia paieška vykdoma kiekvienos koordinatės kryptimi eilės tvarka, taip organizuojant skaičiavimo algoritmą, kad atliktas žingsnis visada būtų sėkmingas [66]. Antra, Rosenbroko metodas efektyviausias tuo, kad vadinamosios Rosenbroko funkcijos sudaryto paviršiaus ekstremumų pagal kitus greičiausio nusileidimo optimizavimo metodus rasti nepavyksta, o Rosenbroko metodas tai leidžia [66].

3.1.2. Rosenbroko metodo esmė ir realizacija

Rosenbroko metodo skaičiavimo algoritmo esmė ta, kad kiekvienu paieškos žingsniu artėjama prie funkcionalo minimumo. Taigi iš pradžių pradiniam taškui paskaičiuojama funkcionalo reikšmė, o tolimesnė skaičiavimo seka turi būti tokia.

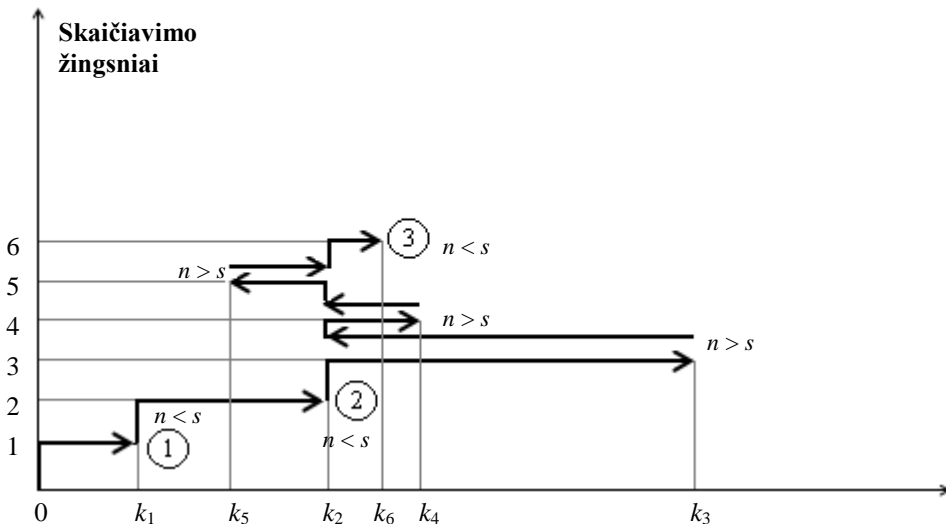
- Atliekamas žingsnis pirmąja koordinate ir paskaičiuojama funkcionalo reikšmė. Jei ši reikšmė yra mažesnė negu prieš tai buvusi, kryptis fiksuojama kaip teisinga ir priimama, kad kitas žingsnis ta koordinatės kryptimi bus didesnis. Jei reikšmė yra didesnė, kryptis keičiama į priešingą. Jei ir tai neduoda rezultato, žingsnis yra mažinamas, jei reikia, keičiamos kryptys ir žingsnis dar mažinamas tol, kol bus nustatyta, kad funkcionalo paskutinioji reikšmė mažesnė už reikšmę, kuri buvo prieš šios koordinatės paiešką.
- Atliekamas žingsnis antrąja koordinate, laikantis tų pačių taisyklių kaip ir su pirmąja koordinate.

Kitas paieškos ratas pradedamas eilės tvarka nuo pirmosios koordinatės ir t. t., kol pasiekiamas norimas optimizavimo tikslumas. Rosenbroko metodo realizavimo

algoritmas yra vienodas abiem koordinatų ašims (x ir y). Tačiau žinotina, kad po kiekvieno sėkmingo žingsnio vyksta paieška keičiant kitą koordinatę, o jei kintamų parametrų yra daugiau negu du, atliekami žingsniai tolimesnėmis koordinatėmis užbaigiant paskutiniąją [74].

Modeliavimo terpėje realizuojant Rosenbroko optimizavimo algoritmą ir vykdant optimumo paiešką, buvo nurodytas 1 % dydžio pradinis paieškos žingsnis. Pradinis paieškos žingsnis parenkamas įvertinus arba ilgiausią skenerio spindulio ilgį, arba patalpos matmenis.

Pasirinktos žingsnio kitimo strategijos ciklograma pavaizduota 3.2 paveiksle.



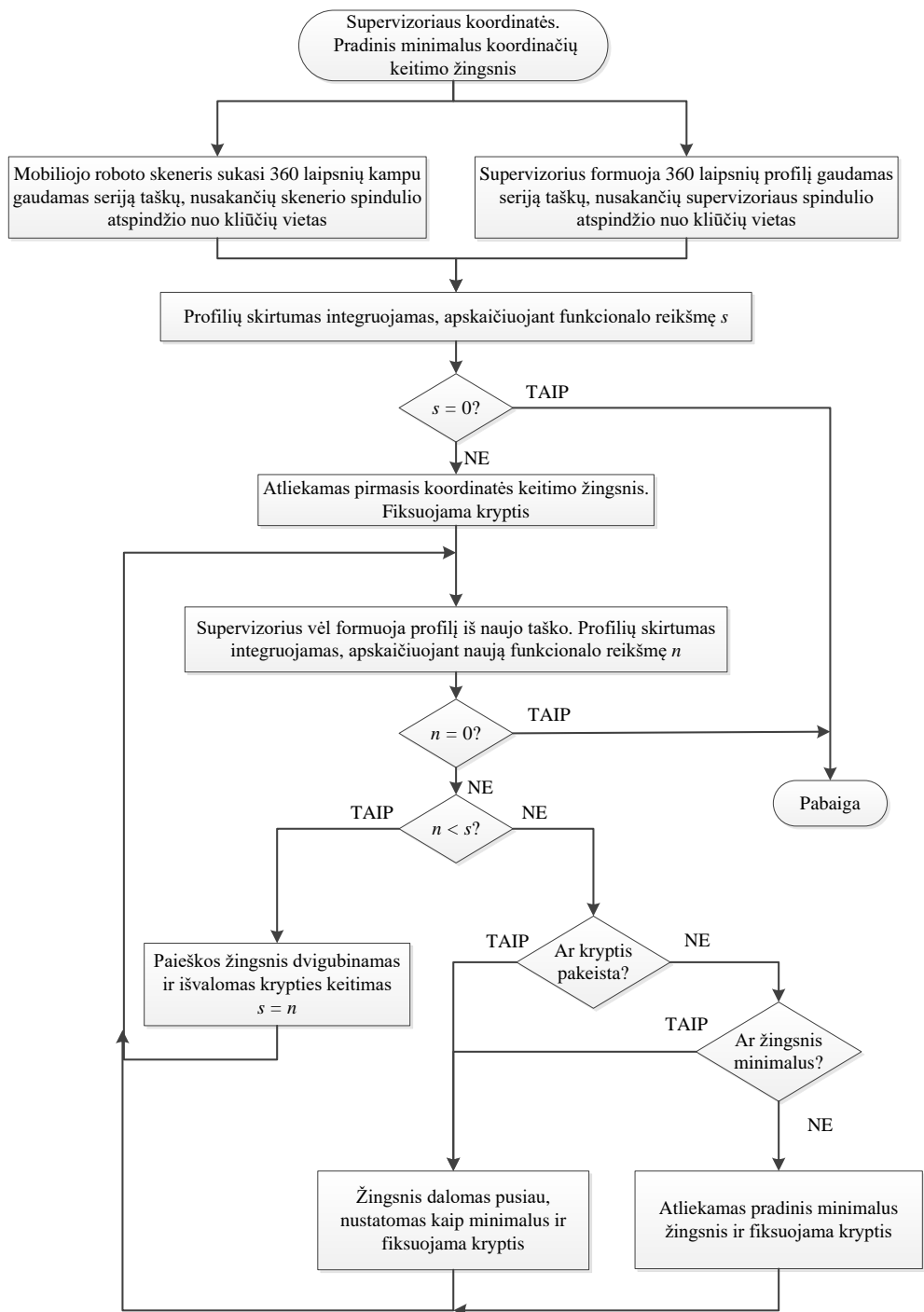
3.2 pav. Grafinis Rosenbroko optimizavimo proceso algoritmo veikimo principas; čia s – buvusi geriausia kriterijaus reikšmė, o n – naujai gauta kriterijaus reikšmė

Taigi pirmiausia funkcionalo reikšmė skaičiuojama pradiniam taškui, kuris ciklogramoje (3.2 pav.) pažymėtas 0. Toliau atliekamas pirmas paieškos žingsnis pirmąja koordinate ir apskaičiuojama funkcionalo reikšmė naujame taške k_1 (3.2 pav.). Ciklogramoje parodytas atvejis, kai nauja kriterijaus (funkcionalo) reikšmė n taške k_1 yra mažesnė už buvusią s , tad tokiu atveju kryptis fiksuojama kaip sėkminga ir atsimenama nauja reikšmė $s=n$. Toliau vyksta kitos koordinatės paieška. Paieška vėl vyks tol, kol naujai gauta kriterijaus reikšmė šia koordinate bus geresnė už prieš tai buvusią. Ciklogramoje (3.2 pav.) vietos, kuriose valdymas yra perduodamas kitos koordinatės paieškai, pažymėtos skaičiais apskritimuose. Kai valdymas vėl perduodamas nagrinėjamai koordinatei, atliekamas antras dvigubas paieškos žingsnis (pirmame žingsnyje užfiksuota kryptimi). Gaunamas naujas taškas k_2 (3.2 pav.), kuriame vėl skaičiuojama kriterijaus reikšmė. Ši reikšmė lyginama su prieš tai buvusiu kriterijaus reikšme taške k_1 . 3.2 paveiksle parodyta situacija, kai po antro žingsnio naujai gauta funkcionalo reikšmė yra dar mažesnė už apskaičiuotą kriterijaus reikšmę taške k_1 , tad trečias paieškos žingsnis vėl dvigubinamas, gaunamas naujas taškas k_3 (3.2 pav.), jam vėl apskaičiuojama kriterijaus reikšmė. Šiuo atveju nauja kriterijaus reikšmė, apskaičiuota taške k_3 (3.2 pav.), bus didesnė

negu buvo taške k_2 , tokiu atveju grįžtama į prieš tai buvusią geriausią reikšmę taške k_2 ir atliekamas ketvirtas mažesnis paieškos žingsnis ta pačia kryptimi.

Gaunamas naujas taškas k_4 (3.2 pav.) ir jame skaičiuojama funkcionalo reikšmė, kuri lyginama su geriausia prieš tai buvusia funkcionalo reikšme taške k_2 . 3.2 paveiksle parodyta situacija, kai kriterijaus reikšmė taške k_4 yra didesnė už kriterijaus reikšmę taške k_2 . Tokiu atveju vėl grįžtama į tašką k_2 ir kryptis keičiama į priešingą. Atliekamas penktas pradinis paieškos žingsnis, gaunamas taškas k_5 (3.2 pav.), kuriame skaičiuojama nauja funkcionalo reikšmė. Ciklogramoje parodytas atvejis, kai funkcionalo reikšmė taške k_5 (3.2 pav.) yra didesnė negu funkcionalo reikšmė taške k_2 . Esant tokiai situacijai grįžtama į tašką k_2 , vėl keičiama kryptis ir atliekamas dvigubai mažesnis už pradinį šeštas paieškos žingsnis, gaunamas taškas k_6 , jame vėl skaičiuojama kriterijaus reikšmė, kuri lyginama su prieš tai buvusia, ir t.t.

Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo, kai naudojama žinomos patalpos profilio teikiama informacija ir profiliai sutapatinami, metodo realizavimo algoritmas pateiktas 3.3 paveiksle.

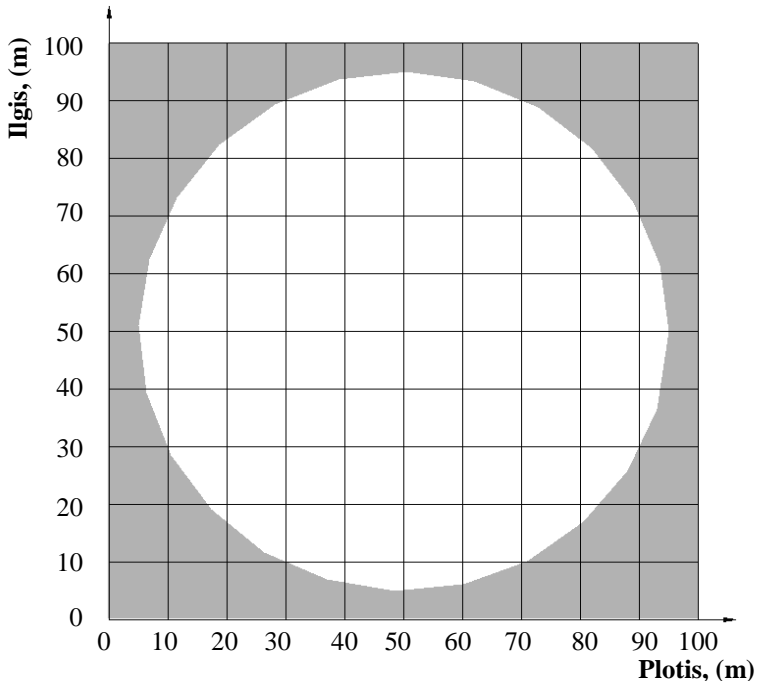


3.3 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatė pagal žinomos patalpos profilė metodo realizavimo algoritmas taikant Rosenbroko optimizavimo strategiją

3.1.3. Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymas sutapatinant profilius

Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymas naudojant žinomos patalpos profilį – tai naujas ir iki šiol dar netirtas koordinačių nustatymo metodas, todėl būtina ištirti jo veikimą esant įvairioms sąlygoms ir skirtingos konfigūracijos patalpoms.

Pirmiausia mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo pagal žinomos patalpos profilį metodo funkcionavimas patikrintas analizuojant paprasčiausią apskritą patalpos profilį, kuriame nėra kampų, statinių ir dinaminių kliūčių (3.4 pav.).



3.4 pav. Analizuojamas apskritas patalpos profilis

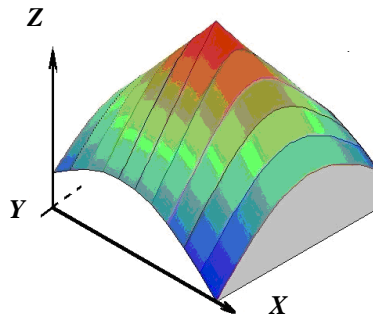
Apskritimo formos patalpos profilis pasirinktas todėl, kad tokios formos figūra pasižymi tolygiu, t. y. be lokaliųjų ekstremumų, funkcionalo paviršiumi (3.5 pav.).

3.5 paveiksle pateiktas paviršius, vaizduojantis funkcionalo kitimą visiškai tuščioje apskritoje patalpoje, atvaizdavimui paimtas plotas 10×10 m, kurio viduje yra funkcionalo minimumas. Optimizavimo uždavinio sprendimas tokiai funkcionalo reikšmei problemų nekelia, nes paviršius turi tik vieną labai išreikštą ekstremumą. 3.5 paveiksle pavaizduota funkcionalo E paviršių sudaranti jam atvirkščia reikšmė, nes taip pavaizduotas paviršius yra aiškesnis.

Tiriant mobiliųjų robotų koordinačių nustatymo naudojant žinomos patalpos profilį metodo funkcionalumą, naudota „CentaurusCPN“ paketo virtualioji aplinka [77].

Virtualiojoje aplinkoje sudarytų modelių veikimas išbandytas modeliuojant juos asmeniniame kompiuteryje, kurio techniniai parametrai tokie: procesorius –

Intel® Xeon® CPU 5110, 1,6 GHz (4 branduoliai), 8,00 GB RAM, 64 bitų operacinė sistema.

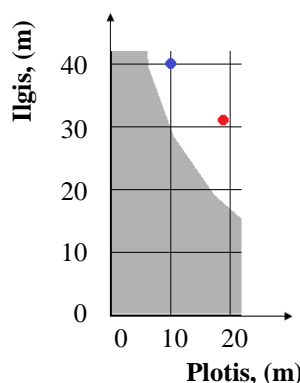


3.5 pav. Apskrito profilio, kuriame nėra kliūčių funkcionalo atvirkštinės reikšmės, paviršius

Toliau darbe pateikti mobiliojo roboto padėties koordinatžių nustatymo trukmės ir paklaidos skaičiavimai, vykdyti naudojant aprašyto asmeninio kompiuterio pajėgumus.

Norint realizuoti žinomos patalpos profilio sudarymą, optimizavimo strategiją ir padėties koordinatžių nustatymą buvo sudarytas eksperimentinis modelis, kurio veikimas išbandytas esant situacijai, kai mobilusis robotas dėl tam tikrų priežasčių nukrypo nuo nurodytų koordinatžių. Modeliavimo metu sudarytas dirbtinis koordinatžių nukrypimas tarp realios roboto buvimo vietos ir pozicijos, kurioje jis turi būti bei kurioje yra supervizorius. Analizuojant nesudėtingos konfigūracijos (3.4 pav.) žinomos patalpos profilį pastebėta, kad realizuojant Rosenbroko optimizavimo algoritmą užtenka smulkaus (1 % startinės koordinatės) pradinio žingsnio tam, kad būtų rastos mobiliojo roboto padėties koordinatės.

Metodo funkcionavimas tiriant apskritą profilį patikrintas esant tokioms pradinėms sąlygoms: mobiliojo roboto koordinatės priskiriamos prie plokštumos taškų su vertėmis $X_R = 19,30$ m ir $Y_R = 30,20$ m, o supervizorinės sistemos taškas, t. y. pozicija, kurioje turi būti robotas, $X_S = 10,0$ m ir $Y_S = 40,0$ m (3.6 pav.).

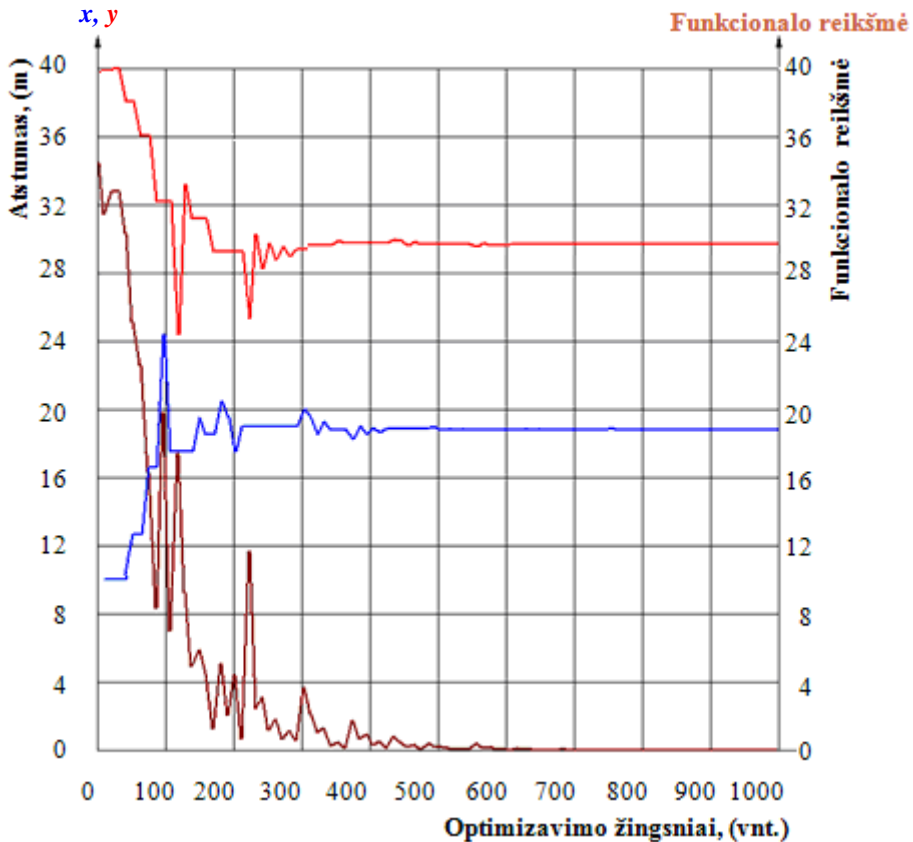


3.6 pav. Mobiliojo roboto (raudona spalva) ir supervizoriaus (mėlyna spalva) padėtys analizuojamu momentu apskritame profilyje

3.7 paveiksle parodyta, kaip vyksta mobiliojo roboto padėties koordinačių apskritame profilyje paieška taikant Rosenbroko optimizavimo algoritimą.

Mėlynos spalvos kreivė rodo, kaip vyksta x koordinatės paieška, o raudonos spalvos kreivė – y koordinatės paieška pagal 3.2 paveiksle pateiktą optimizavimo strategiją. Rudos spalvos kreivė iliustruoja funkcionalo reikšmės kitimą.

Modeliavimo rezultatai (3.7 pav.) parodė, kad mobiliojo roboto x ir y koordinatės, skenuojant aplinką kas 1 laipsnį, rastos su 0,1 mm paklaida. Tokiu tikslumu vykdyta koordinačių paieška norint pademonstruoti, jog profilių sutapatavimo metodo algoritmas funkcionuoja ir leidžia pasiekti 0,1 mm koordinačių nustatymo paklaidą.



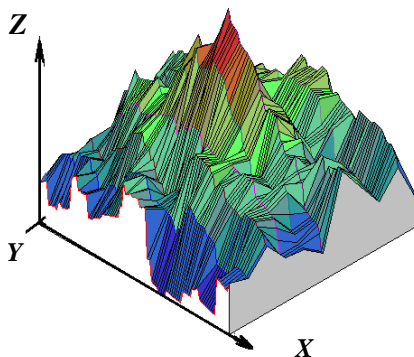
3.7 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinačių apskritame profilyje nustatymas taikant Rosenbroko optimizavimo algoritimą (x , y koordinačių ir funkcionalo reikšmių kitimas), kai nurodytas 1 laipsnio aplinkos skenavimo žingsnis

Kiek kitaip yra realizuojamas Rosenbroko optimizavimo algoritmas, jeigu patalpoje atsiranda papildomų statinių kliūčių, t. y. patalpa nėra visiškai tuščia (realiose gamybinėse patalpose taip ir yra). Tokiu atveju funkcionalo paviršius atrodo komplikuočiai su daugybe lokaliųjų ekstremumų (3.8 pav.), atvaizdavimui paimtas plotas 10×10 m, kurio viduje yra funkcionalo minimumas.

Norint, kad optimizavimo algoritmas veiktų efektyviai, turi būti parinktas

didesnis (10 % startinės koordinatės) pradinis paieškos žingsnis.

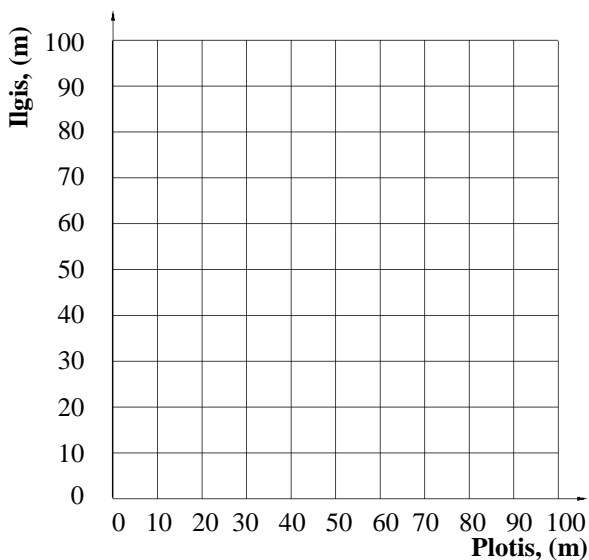
Todėl metodo veikimas patikrintas analizuojant kvadratinį ir daugiakampį profilius, esant tam pačiam kaip ir apskrito profilio atveju nurodytam aplinkos skenavimo žingsniui.



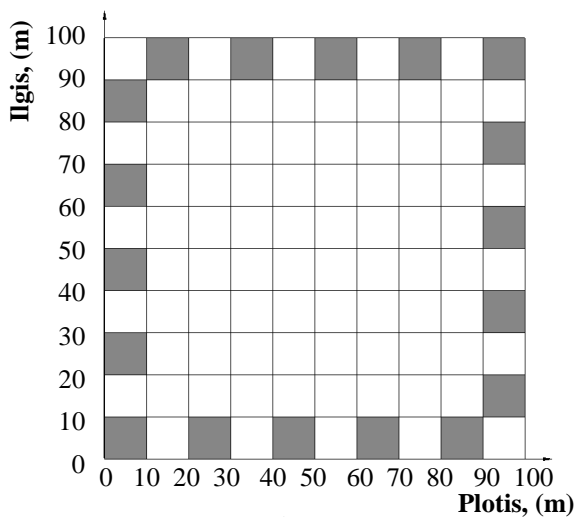
3.8 pav. Gamybinės patalpos (su kliūtimis) funkcionalo atvirkštinės reikšmės paviršius su vienu globaliuoju ekstremumu ir daugeliu lokaliųjų ekstremumų, kurie aiškiai matomi paviršiaus pjūviuose

Kvadratinis ir daugiakampis patalpos profiliai (3.9 pav., a) pasirinkti tam, kad būtų galima ištirti, kaip skenavimas vyksta profiliuose, kuriuose yra kampų bei kaip patalpos konfigūracija veikia koordinatinių nustatymo paklaidos dydį.

3.10–3.11 paveiksluose parodyta, kaip vyksta mobiliojo roboto padėties koordinatinių kvadratiname ir daugiakampiame profiliuose paieška realizavus Rosenbroko optimizavimo algoritmą (3.2 pav.), kai aplinkos skenuojamos kas 1 laipsnį. 3.9 paveiksle pateiktuose profiliuose padėties koordinatės nustatytos su 0,1 mm paklaida. Taigi metodas veikia esant nesudėtingos konfigūracijos profiliams.

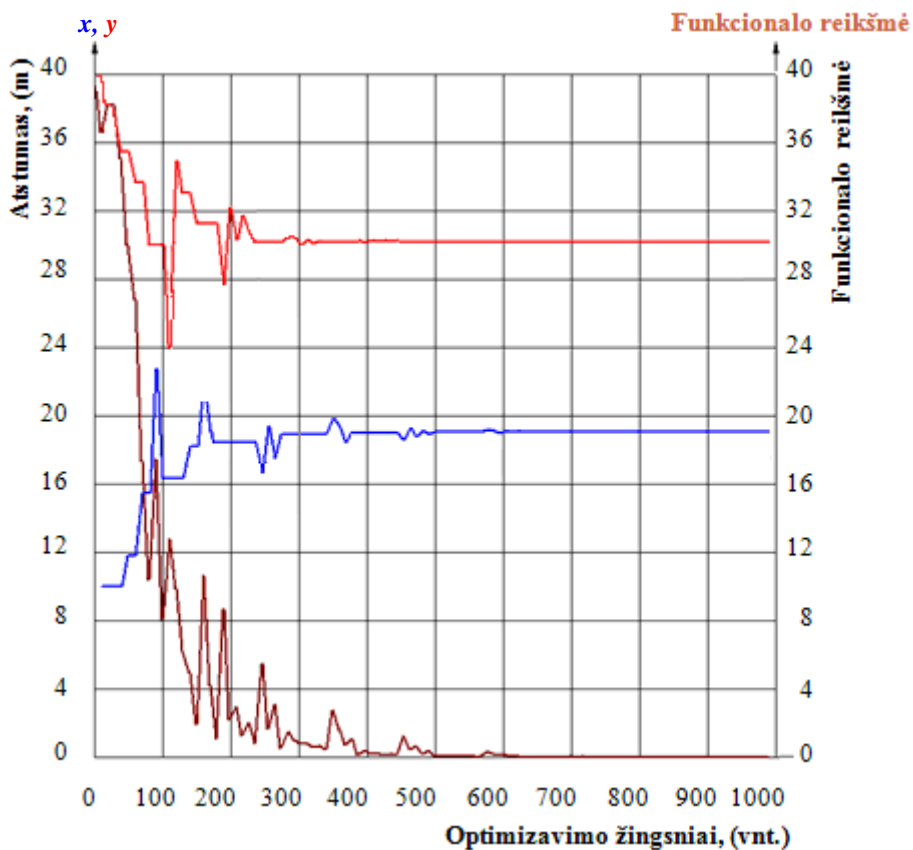


a)

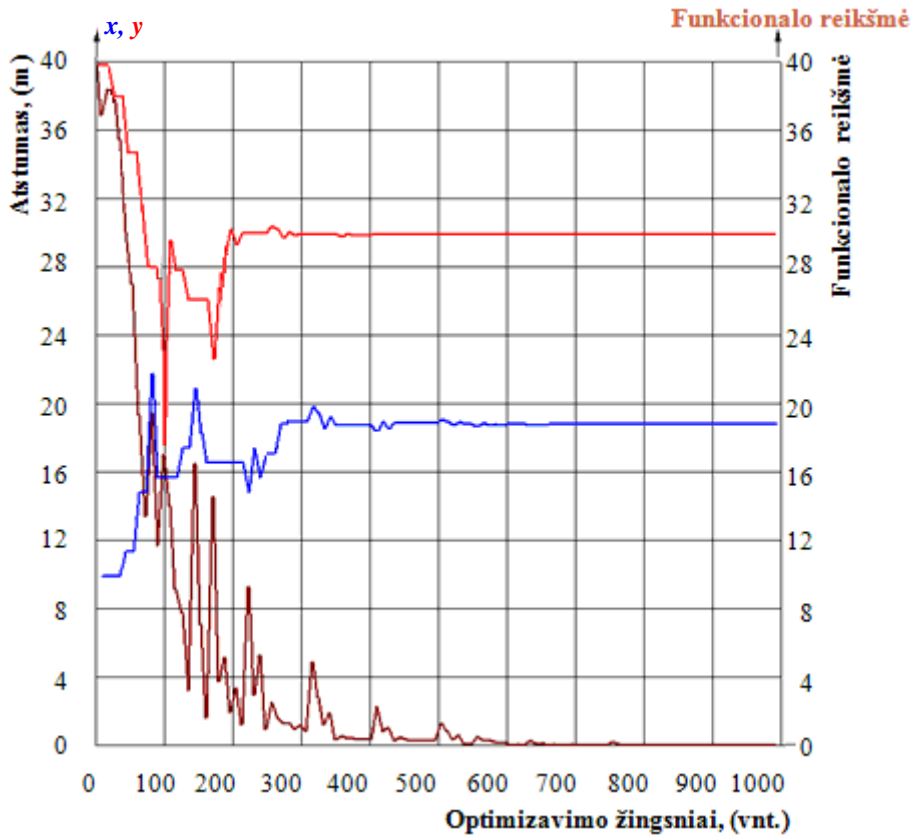


b)

3.9 pav. Tyrimuose naudojami profiliai: a) kvadratinis; b) daugiakampis



3.10 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinačių kvadratiniam profilyje paieška taikant Rosenbroko optimizavimo algoritmą (x ir y koordinačių bei funkcionalo reikšmės kitimas), kai nurodytas 1 laipsnio aplinkos skenavimo žingsnis



3.11 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatų daugiakampiame profilyje paieška taikant Rosenbroko optimizavimo algoritmą (x ir y koordinatų bei funkcionalo reikšmės kitimas), kai nurodytas 1 laipsnio aplinkos skenavimo žingsnis

3.12–3.14 paveiksluose parodyta, kaip vyksta profilių (mobiliojo roboto ir supervizoriaus) sutapatinimas ir atvaizdavimas analizuojant 3.4 ir 3.9 paveiksluose parodytų profilių konfigūracijas.

3.12–3.14 paveiksluose pavaizduoti atvejai, kai mobiliojo roboto ir supervizoriaus pozicijos patalpos atžvilgiu yra tokios, kaip parodyta 3.6 paveiksle (t. y. mobiliojo roboto pozicija $[19,3 \ 30,2]$, supervizoriaus pozicija $[10,0 \ 40,0]$), o analizuojamų patalpų profiliai (3.4 ir 3.9 pav.) skenuojami 1, 5, 6, 8, 10, 36 laipsnių skenavimo žingsniu.

Tiek mobilusis robotas, tiek supervizorius formuodami aplinkos informaciją iš tam tikros pozicijos priima, kad yra nulinėse koordinatėse. Šiuo atveju jų skenerių spindulių padėtis yra perskaičiuojama patalpos atžvilgiu, tai priklauso nuo skenerio spindulio krypties. Kaip rezultatas gaunamas patalpos profilis. 3.12–3.14 paveiksluose pateikti profiliai yra perstumti vienas kito atžvilgiu, kadangi supervizoriaus ir mobiliojo roboto pradinės (nulinės) koordinatės yra skirtingose vietose.

Skenuojant įvairias patalpas (3.12–3.14 pav.) matomi pradiniai roboto ir supervizoriaus profiliai bei supervizoriaus priartėjimo profiliai. Supervizoriaus

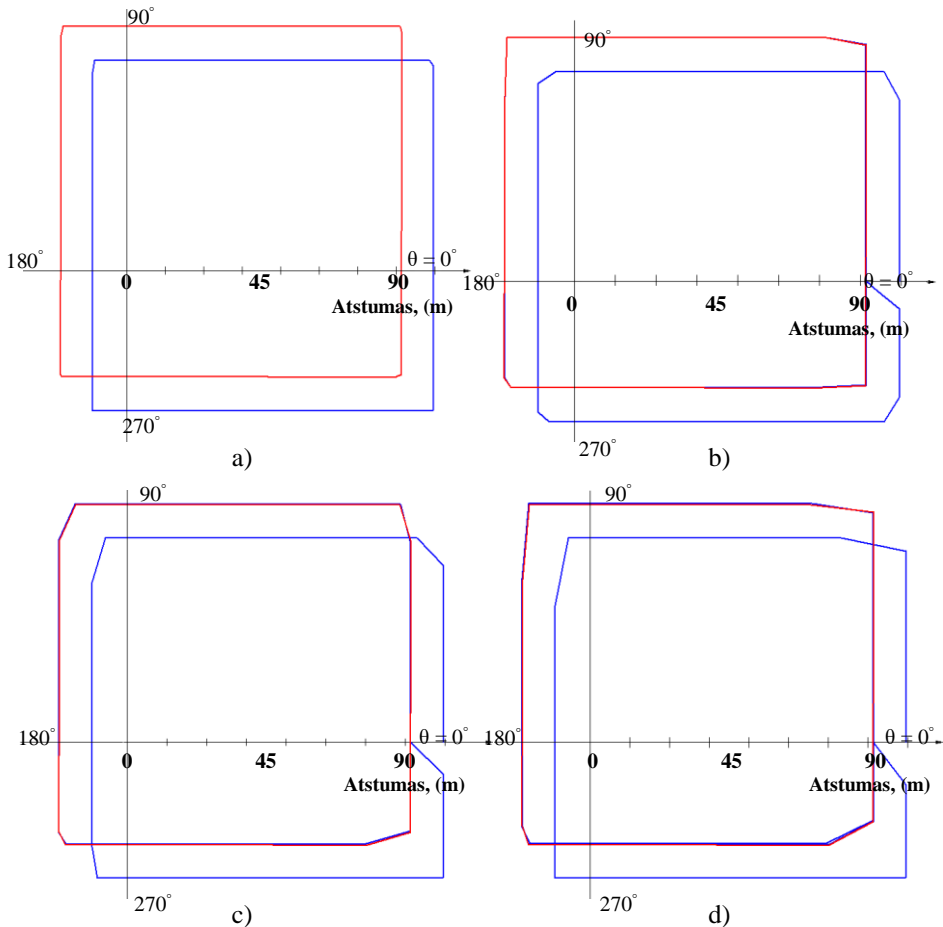
pirmo profilio paskutinis taškas yra sujungiamas su jo antro profilio pirmu tašku ir t. t., kol roboto pradinis profilis nesutaps su supervizoriaus galiniu profilu.

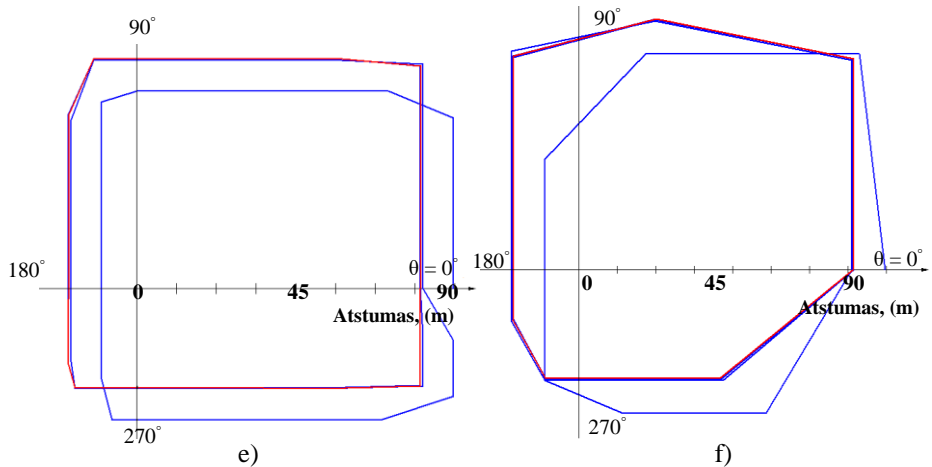
Iš 3.12–3.14 paveiksluose (a–d) pateiktų profilių matyti, kad nagrinėjamų patalpų profiliai (3.4, 3.9 pav.), skenuojami įvairiu žingsniu, keičia savo vaizdą, ir kuo didesnis yra skenavimo žingsnis, tuo labiau tolstama nuo tikrosios profilio išvaizdos.

Skenuojant 3.4 ir 3.9 paveiksluose pateiktas patalpas diapazone kas 12–36 laipsnius matyti, kad realios patalpos konfigūracija ir profilių (3.12–3.14 pav., e–f), kuriuos sudarė mobilusis robotas ir supervizorius, formos išsikraipo, todėl padėties koordinatės nustatomos su didesne paklaida.

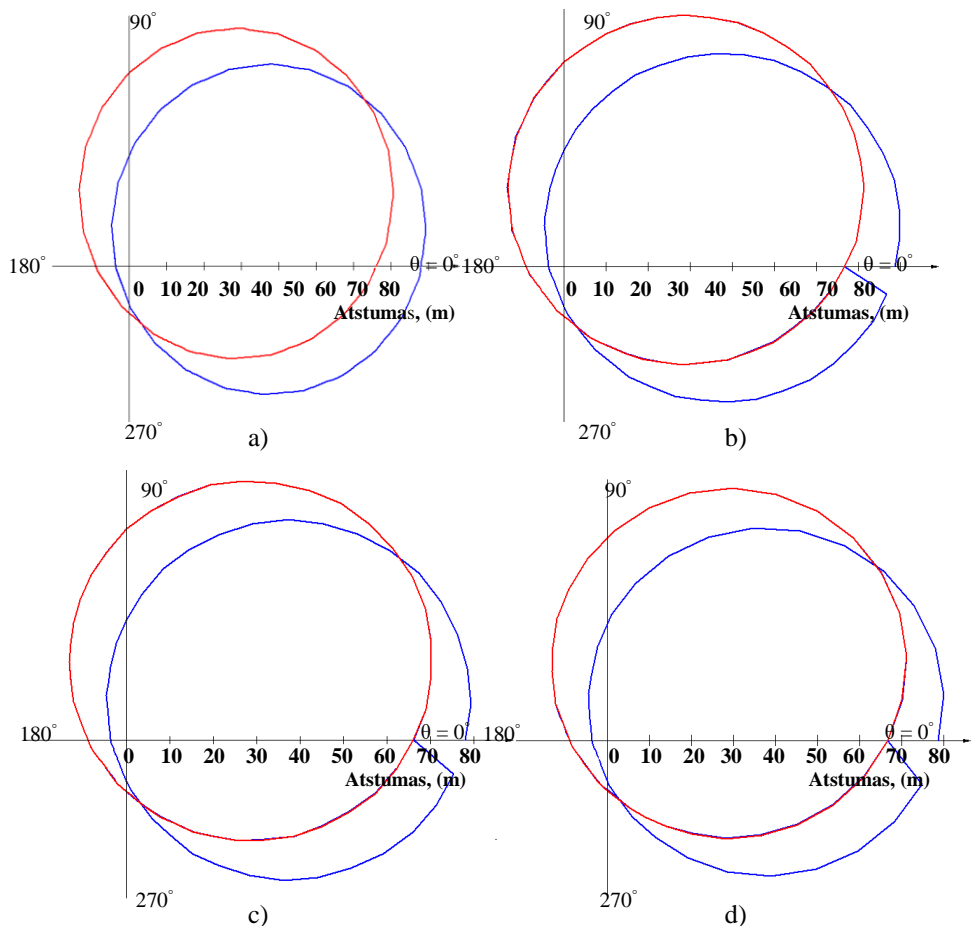
Esant didesniems (>1 laipsnis) skenavimo žingsniams ir sudėtingesniems profiliams (3.12, 3.14 pav.) atsiranda galinių profilių nesutapimas. Elementariuose profiliuose (3.13 pav.) skenavimo žingsnis profilių sutapatinimui įtakos neturi.

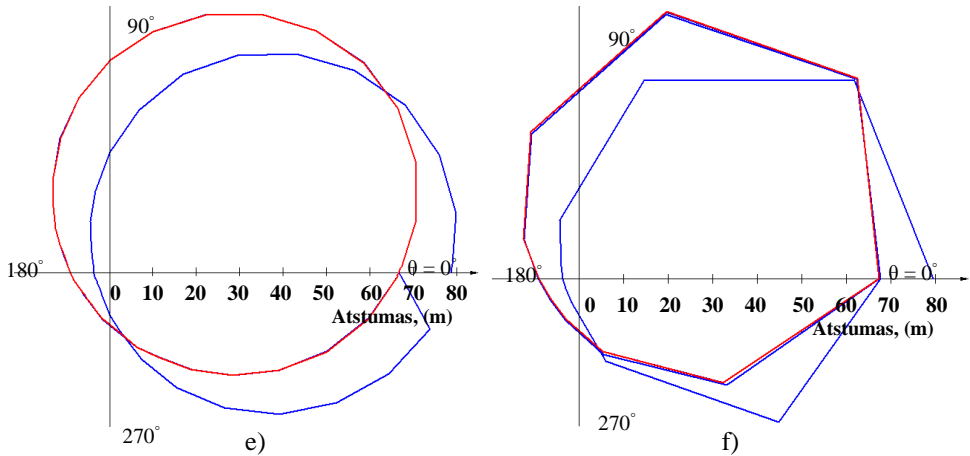
Tačiau reikia pažymėti, kad taikant profilių sutapatinimo metodą ir nurodžius smulkesnį (1–4 laipsnių) skenavimo žingsnį, ilgėja padėties koordinatčių nustatymo trukmė.



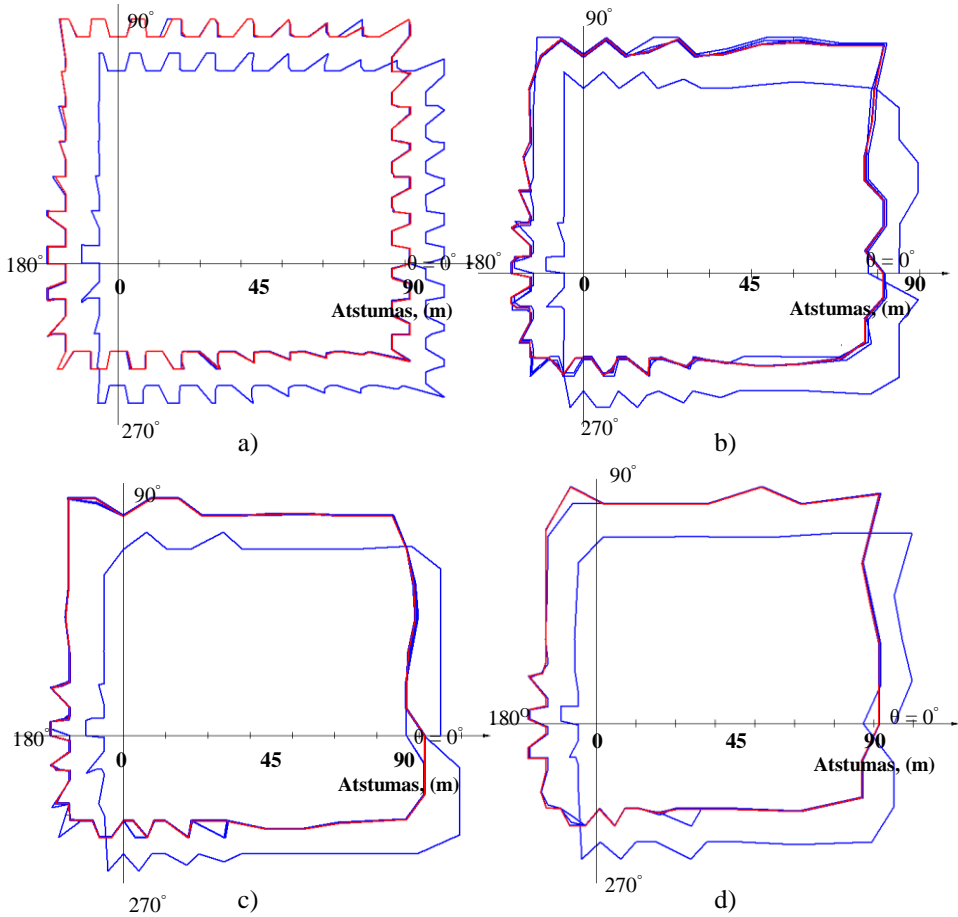


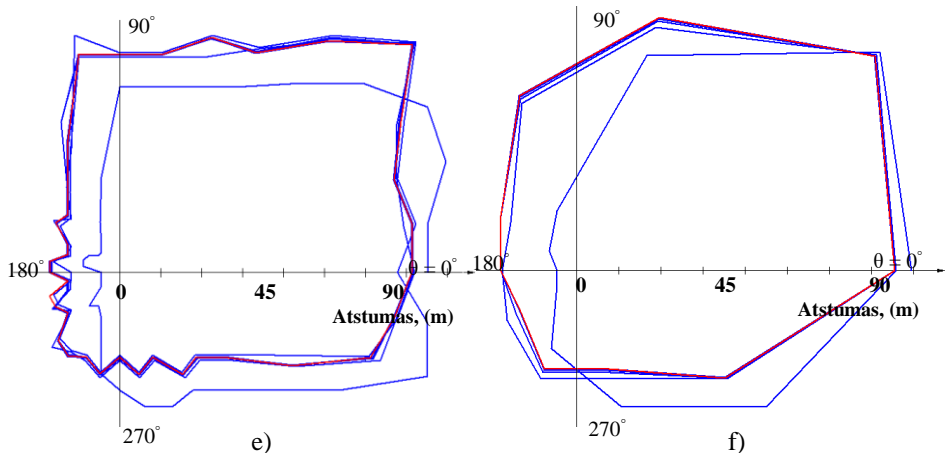
3.12 pav. Mobiliojo roboto (raudona linija) ir supervizoriaus (mėlyna linija) gautų profilių palyginimai, kai kvadratinės figūros skenavimas vyksta kas: a) 1 laipsnių; b) 5 laipsnių; c) 6 laipsnių; d) 8 laipsnių; e) 10 laipsnių; f) 36 laipsnių





3.13 pav. Mobiliojo roboto (raudona linija) ir supervizoriaus (mėlyna linija) gautų profilių palyginimai, kai apskritos figūros skenavimas vyksta kas: a) 1 laipsnių; b) 5 laipsnius; c) 6 laipsnius; d) 8 laipsnius; e) 10 laipsnių; f) 36 laipsnius



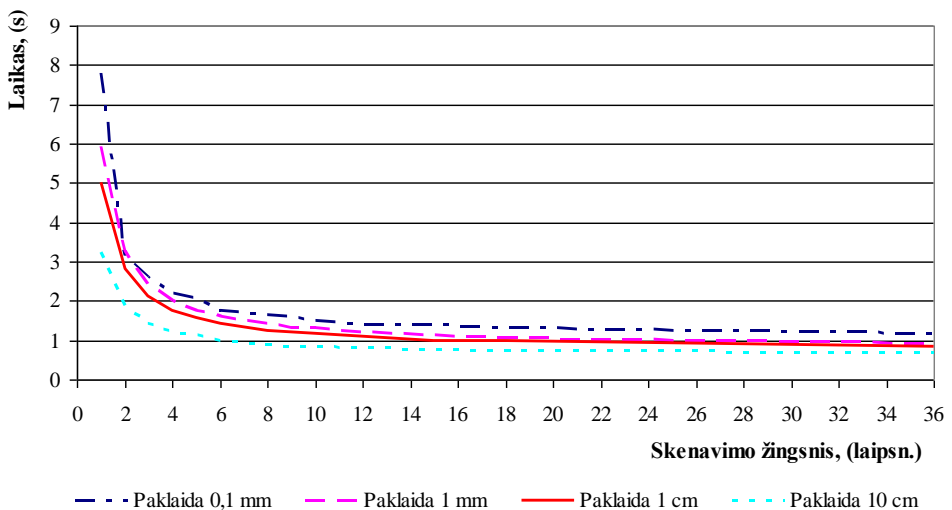


3.14 pav. Mobiliojo roboto (raudona linija) ir supervizoriaus (mėlyna linija) gautų profilių palyginimai, kai daugiakampės figūros skenavimas vyksta kas: a) 1 laipsnį; b) 5 laipsnius; c) 6 laipsnius; d) 8 laipsnius; e) 10 laipsnių; f) 36 laipsnius

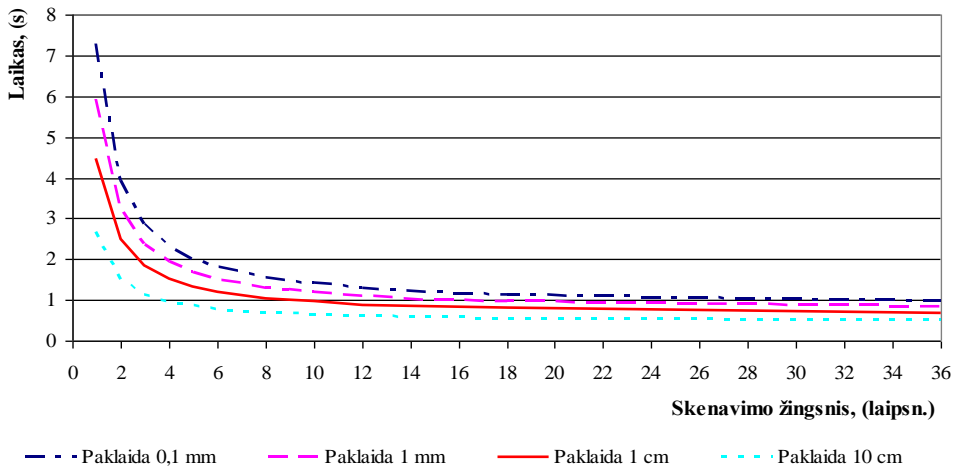
Tiriant metodo funkcionalumą papildomai buvo ištirti reikalavimai įvairiems profilio parametrams (skenavimo žingsniui, profilio sudėtingumui, koordinatų suradimo laiko trukmei ir tikslumui) analizuojant nesudėtingus profilius: apvalų (3.4 pav.), kvadratinį ir daugiakampį (3.9 pav.).

Mobiliojo roboto padėties koordinatų nustatymo greitaveika tirta esant 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 36 laipsnių profilių skenavimo žingsniui ir nurodytai skirtingai koordinatų nustatymo paklaidai: 0,1 mm, 1 mm, 1 cm, 10 cm. Rezultatai, gauti analizuojant tris profilius, pateikti 3.15–3.17 paveiksluose.

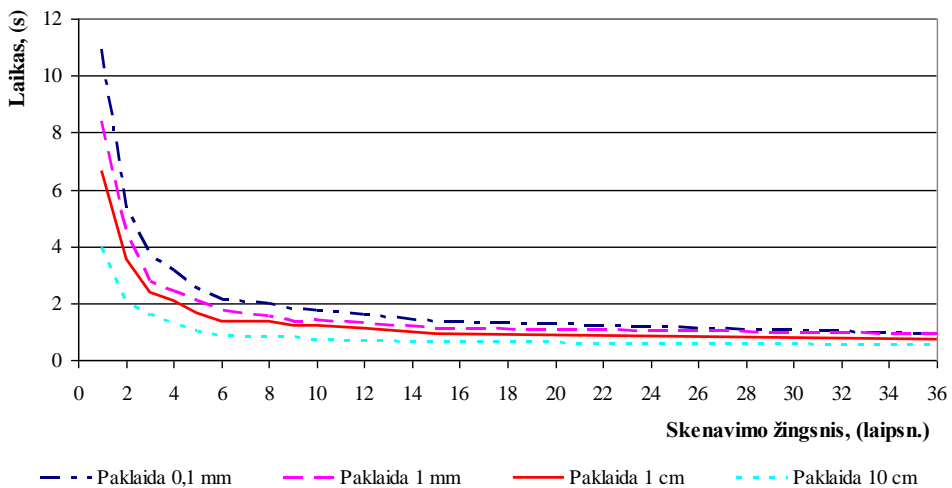
Tyrimai parodė (3.15–3.17 pav.), kad kvadratinio profilio atveju koordinatės nustatomos per 7,79 s, apskrito – per 7,29 s, daugiakampio – per 10,92 s (skenuojant aplinką kas vieną laipsnį).



3.15 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatų paieškos laiko priklausomybė nuo skenavimo žingsnio (kvadratinis profilis) taikant profilių sutapatavimo metodą



3.16 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatinių paieškos laiko priklausomybė nuo skenavimo žingsnio (apskritas profilis) taikant profilių sutapatinimo metodą



3.17 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatinių paieškos laiko priklausomybė nuo skenavimo žingsnio (daugiakampis profilis) taikant profilių sutapatinimo metodą

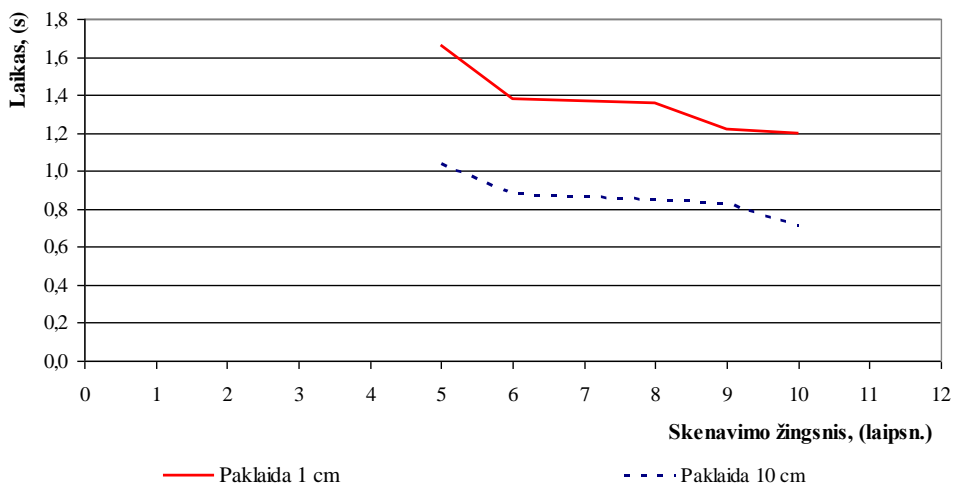
Mobiliojo roboto padėties koordinatinių nustatymo trukmė priklauso nuo pasirinkto skenavimo žingsnio. Kuo smulkesnis aplinkos skenavimo žingsnis, tuo daugiau laiko yra sugaištama koordinatėms nustatyti (3.15–3.17 pav.).

Laikas, sugaištas padėties koordinatėms nustatyti, skiriasi pagal profilio sudėtingumą (3.15–3.17 pav.). Greičiausiai rezultatai pasiekiami tose aplinkose, kuriose matomos patalpos profiliai neiškraipomi lyginant su originalu. Nesudėtingos konfigūracijos patalpose galima didinti skenavimo intervalą norint minimizuoti koordinatinių paieškos trukmę.

Esant labai paprastais ir simetriškiems profiliams (apskritimui ir kvadratui) padėties koordinatės nustatomos su 0,1 mm paklaida skenuojant 36 laipsnių skenavimo žingsniu, tačiau sudėtingėjant profiliui (atsirandant statinėms kliūtims) toks skenavimo žingsnis tampa per stambus, ir padėties koordinatės su 0,1 mm arba 1 m paklaidomis gali būti nerastos.

Atsižvelgus į tyrimo metu gautus duomenis (3.15–3.17 pav.) nustatyta, kad taikant profilių sutapatavimo metodą, kai turime nesudėtingos konfigūracijos profilis, skenavimo žingsnį galima imti diapazone tarp 5–10 laipsnių.

3.18 pav. parodyta, kaip daugiakampiame profilyje atrodo mobiliojo roboto padėties koordinatė paieškos laiko priklausomybė, kai skenavimo žingsnis imamas nuo 5 laipsnių esant 1 ir 10 cm koordinatė nustatymo paklaidai.



3.18 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatė paieškos laiko priklausomybė, kai aplinkos skenavimo žingsnis imamas ribose nuo 5 iki 10 laipsnių (daugiakampis profilis) taikant profilių sutapatavimo metodą

Šiame darbe priimta, kad mobilusis robotas juda 1 m/s greičiu. Dėl to nustatyti padėties koordinatės su milimetro ar dešimtąja milimetro paklaidomis yra netikslinga, kadangi robotas per vieną sekundę nuvažiuoja atstumą, lygų 1 m, o koordinatė nustatymo laikas esant bet kokiam skenavimo žingsniui yra apie 1 s ar ją viršija, tad kol bus nustatytos roboto koordinatės, jis nuvažiuos 1 m ar didesnį atstumą.

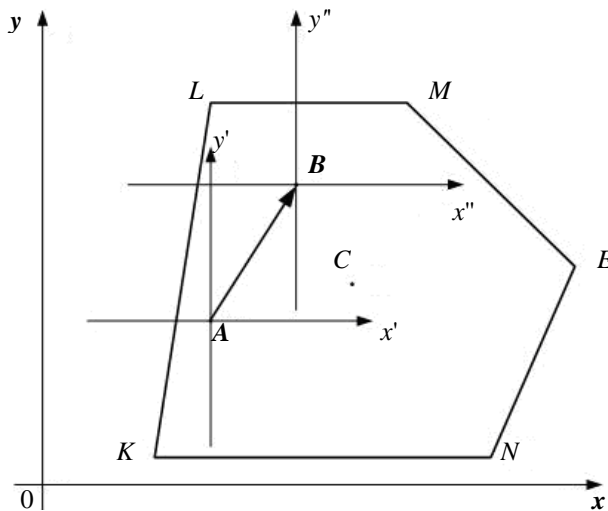
Apibendrinus gautus rezultatus galima teigti, kad mobiliojo roboto koordinatė paieška naudojant matomos patalpos profilį, pritaikant vieną ar kitą optimizavimo metodą yra iteracinio pobūdžio. Būtent dėl šios priežasties mobiliojo roboto koordinatė paieška taikant profilių sutapatavimo metodą užtrunka nuo 0,8–11 s.

3.2. Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo pagal žinomos patalpos svorio centrą metodo realizavimas ir tyrimas

3.2.1. Metodo matematinis pagrindimas

Tarkime, kad yra žinomas profiliu apibrėžtos patalpos svorio centras, o „matoma“ patalpa ribojama kontūru, sudarančiu iškilųjų daugiakampį (3.19 pav.) [8, 68].

Mobiliojo roboto padėčiai keičiantis iš taško A į tašką B , kinta ir jo „matomos“ patalpos profilis, tačiau daugiakampės figūros svorio centras C profilio atžvilgiu lieka toje pačioje vietoje. Šis taškas (C) yra patalpos profilio svorio centro absoliučiosios koordinatės, kurios supervizoriui yra žinomos iš anksto. 3.19 paveiksle parodyta situacija, kai mobilusis robotas nukrypo nuo nurodytų koordinačių iš taško A į tašką B .



3.19 pav. Keičiantis mobiliojo roboto padėčiai (taškai A ir B), kinta jo „matomos“ patalpos profilis, tačiau figūros ENKLM svorio centras C profilio atžvilgiu yra ten pat [8]

Taškas A – tai pozicija, kurioje turi būti mobilusis robotas ir kurioje yra supervizorius, taškas B – tai pozicija, kurioje yra mobilusis robotas. Tiek supervizorius, tiek mobilusis robotas, formuodami patalpos profilį iš skirtingų pozicijų priima, kad yra nulinėse koordinatėse (supervizoriaus – $[x' y']$, o mobilusis robotas – $[x'' y'']$), t. y. jie apskaičiuoja santykinės patalpos profilio svorio centro koordinatės. Supervizorius, žinodamas absoliučiąsias svorio centro koordinatės ir turėdamas savo bei roboto santykinės svorio centro koordinatės, gali apskaičiuoti absoliučiąsias mobiliojo roboto padėties koordinačių (3.19 pav.).

Iš 2 skyriaus žinome, kad plokščios figūros svorio centro koordinatės (x_C ir y_C) apskaičiuojamos taip [8]:

$$x_C = \frac{1}{M} \iint_S x \cdot dx dy; \quad (3.2)$$

ir

$$y_C = \frac{1}{M} \iint_S y \cdot dx dy. \quad (3.3)$$

Judantis mobilusis robotas „mato“ patalpą iš kintančios pozicijos $(x_R; y_R)$. Jeigu profilio koordinatės $(x'; y')$ atskaitomos nuo roboto (skenerio) pozicijos, tada patalpos kontūro koordinatės atskaitomos nejudančioje koordinatinių sistemoje $(x; y)$:

$$x = x' + x_R, \quad y = y' + y_R. \quad (3.4)$$

Žinant, kad $\sigma = const = 1$, daugiakampio, kurio viršūnių skaičius yra n , svorio centro koordinatės apskaičiuojamos taip [8]:

$$M = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x'_i y'_{i+1} - x'_{i+1} y'_i); \quad (3.5)$$

$$x_C - x_R = \frac{1}{6M} \sum_{i=0}^{n-1} (x'_i + x'_{i+1})(x'_i y'_{i+1} - x'_{i+1} y'_i); \quad (3.6)$$

$$y_C - y_R = \frac{1}{6M} \sum_{i=0}^{n-1} (y'_i + y'_{i+1})(x'_i y'_{i+1} - x'_{i+1} y'_i). \quad (3.7)$$

Mobiliojo roboto padėties koordinatės K_R galima pavaizduoti stulpelio matrica:

$$K_R = \begin{bmatrix} X_{CS} - X_{CR} + X_S \\ Y_{CS} - Y_{CR} + Y_S \end{bmatrix}; \quad (3.8)$$

čia X_{CS} ir Y_{CS} – supervizoriaus nulinių koordinatinių atžvilgiu profilio svorio centro koordinatės, X_{CR} ir Y_{CR} – mobiliojo roboto nulinių koordinatinių atžvilgiu profilio svorio centro koordinatės, o X_S ir Y_S – supervizoriaus padėties taškas koordinatinių plokštumoje [8].

Nesvarbu, kokių kampų pradeda skenavimą mobiliojo roboto skeneris, svorio centro atstumas nuo mobiliojo roboto esamų koordinatinių yra tas pats, tad, žinant roboto posūkio kampo nuokrypį nuo pradinės padėties, jo rastas svorio centras C_α gali būti transformuotas pagal tokią išraišką:

$$C_\alpha = \begin{bmatrix} \sqrt{X_{CR}^2 + Y_{CR}^2} \times \cos(\arctg\left(\frac{Y_{CR}}{X_{CR}}\right) - \alpha) \\ \sqrt{X_{CR}^2 + Y_{CR}^2} \times \sin(\arctg\left(\frac{Y_{CR}}{X_{CR}}\right) - \alpha) \end{bmatrix}; \quad (3.9)$$

čia α – kampas, kuriuo robotas nusisuko nuo nurodytos krypties.

Norint išvengti nereikalingų skaičiavimų (3.9) ir tiesiogiai nustatyti koordinates pagal priklausomybę (3.8), reikia, kad mobilusis robotas turėtų padėties orientavimosi aparatūrą, kuria galima fiksuoti skenavimo pradinį kampą.

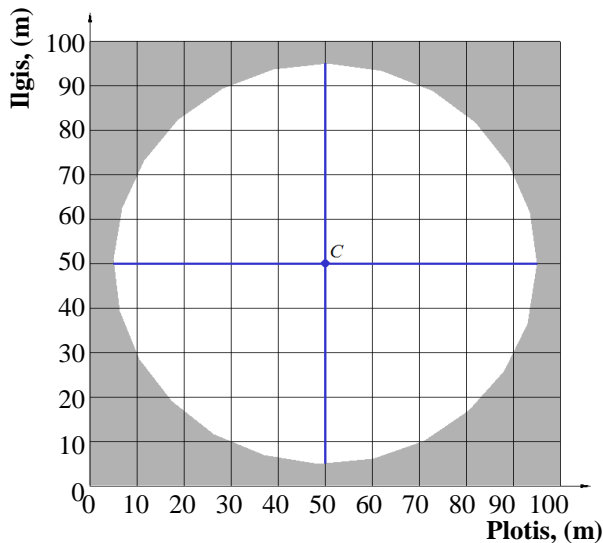
Taigi tiek taikant padėties koordinačių pagal žinomos patalpos profilį, tiek pagal žinomos patalpos svorio centrą nustatymo metodus reikia būtinai įvertinti tai, kad mobilusis robotas ir išorinė valdymo sistema turi turėti tą patį patalpos profilio pradžios tašką (būti abu suderinti ta pačia kryptimi).

3.2.2. Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo, naudojant žinomos patalpos profilio svorio centrą, metodo realizacija

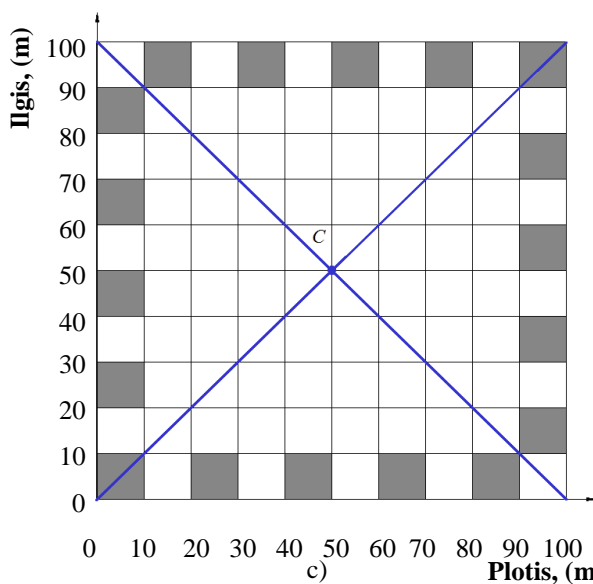
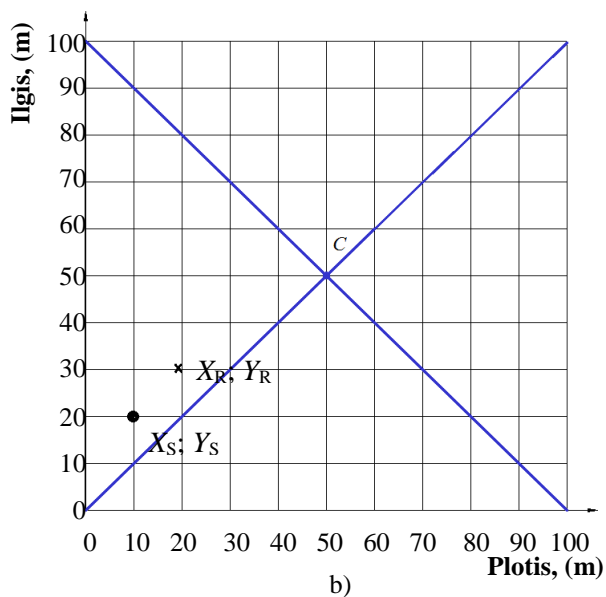
Mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo naudojant žinomos patalpos profilio svorio centrą metodo realizavimo algoritmas pateiktas 2.10 paveiksle (2 skyrius). Šio metodo veikimas, kaip ir metodo, pagrįsto patalpos profilių sutapatiniu, analizuotas trijuose skirtinguose patalpos profiliuose: apskritame, kvadratiname ir daugiakampiame (3.20 pav.).

Šie profiliai pasirinkti dėl to, kad juose galima nesudėtingai rasti svorio centro C koordinates. Tai leidžia patikrinti metodo funkcionavimo korektiškumą be papildomų skaičiavimų.

Kvadratinio profilio atveju seka būtų tokia: žinome, kad kvadratinės figūros svorio centro koordinatės yra taškuose $x_C = 50,00$ ir $y_C = 50,00$ (jei figūros matmenys yra 100×100 m). Priimame, kad supervizorius mobiliam robotui yra nustatęs šiuos koordinačių plokštumos taškus $X_S = 10,00$ m ir $Y_S = 20,00$ m, o mobilusis robotas realiai yra koordinačių plokštumos taške su tokiais koordinatėmis $X_R = 19,00$ m ir $Y_R = 30,00$ m (3.20 pav., *b*). Šiuo atveju supervizoriaus koordinačių sistemos atžvilgiu kvadratinio profilio svorio centro koordinatės yra taškuose $X_{CS} = 40,00$ m ir $Y_{CS} = 30,00$ m, o mobiliojo roboto nustatyto svorio centro koordinatės jo koordinačių sistemos atžvilgiu atitinkamai yra taškuose $X_{CR} = 31,00$ m ir $Y_{CR} = 20,00$ m.



a)



3.20 pav. Tiriama profiliai: a) apskritas; b) kvadratinis; c) daugiakampis

Turint visus šiuos duomenis, mobiliojo roboto padėties taško koordinatės K_R galima apskaičiuoti taip:

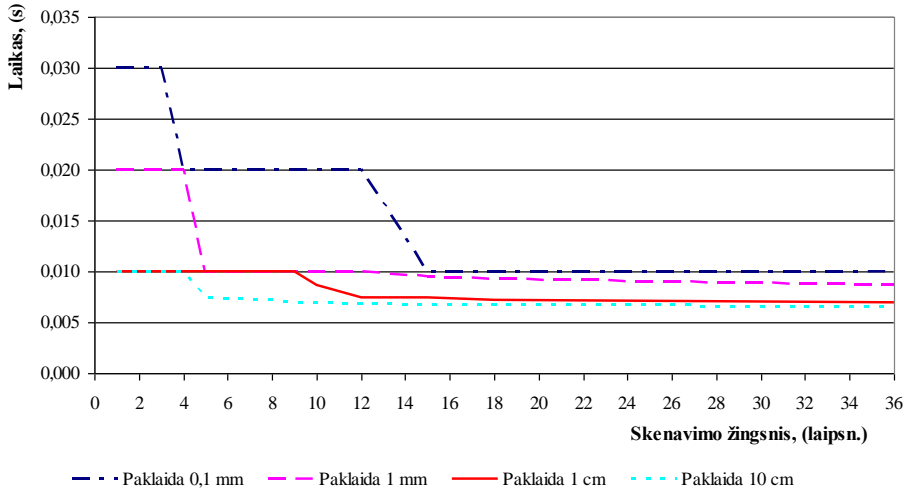
$$K_R = \begin{bmatrix} X_{CS} - X_{CR} + X_S \\ Y_{CS} - Y_{CR} + Y_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40,00 - 31,00 + 10,00 \\ 30,00 - 20,00 + 20,00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19,00 \\ 30,00 \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Analogiškai skaičiuojamos mobiliojo roboto padėties koordinatės esant apskritam ir daugiakampiam profiliams.

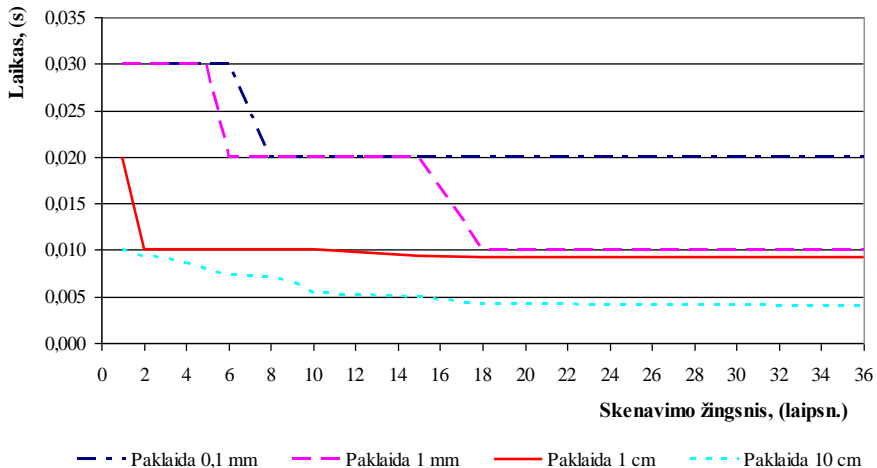
Metodo funkcionavimas analizuojant 3.20 paveiksle pavaizduotus profilius patikrintas esant 3.6 paveiksle pavaizduotai situacijai. Pirmiausia 3.20 paveiksle pateikti profiliai tirti skenuojant aplinką kas 1 laipsnį. Roboto padėties koordinatės buvo nustatytos su 0,1 mm paklaida.

Šiam metodui taip pat buvo ištirti papildomi reikalavimai įvairiems profilio parametrams analizuojant nesudėtingos konfiguracijos profilius (3.20 pav.).

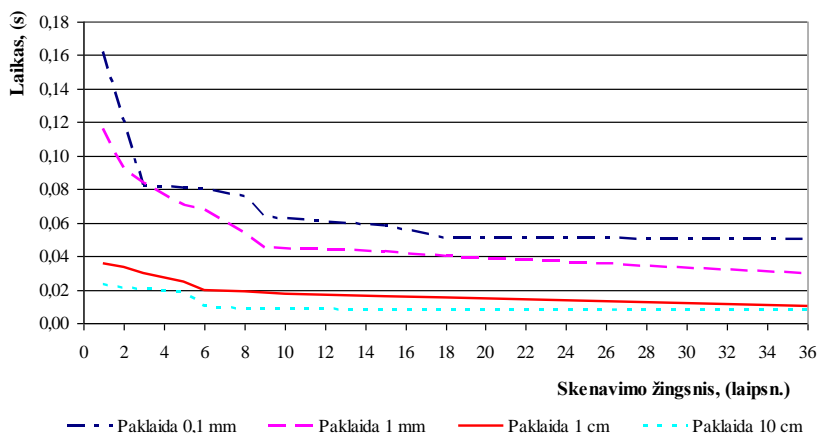
Mobiliojo roboto koordinatinių nustatymo greitaveika tirta esant 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 36 laipsnių profilių skenavimo žingsniui ir nurodytai skirtingai koordinatinių nustatymo paklaidai: 0,1 mm, 1 mm, 1 cm, 10 cm (3.21–3.23 pav.).



3.21 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatinių paieškos laiko priklausomybė nuo skenavimo žingsnio (kvadratinis profilis) taikant svorio centro metodą



3.22 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatinių paieškos laiko priklausomybė nuo skenavimo žingsnio (apskritas profilis) taikant svorio centro metodą



3.23 pav. Mobiliojo roboto padėties koordinatų paieškos laiko priklausomybė nuo skenavimo žingsnio (daugiakampis profilis) taikant svorio centro metodą

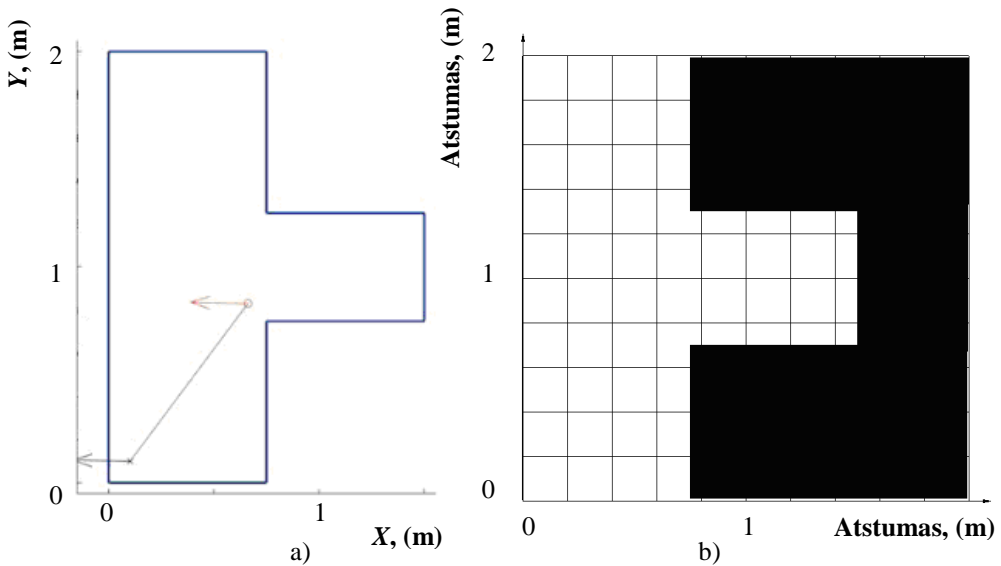
Nustatyta, kad laikas, sugaištas koordinatų paieškai, keičiant skenavimo žingsnį ir taikant svorio centro metodą kinta ribose nuo 0,01 s iki 0,162 s (3.21–3.23 pav.). Iš gautų grafikų (3.15–3.17 ir 3.21–3.23 pav.) matyti, kad mobiliojo roboto padėties koordinatų nustatymo naudojant žinomos patalpos profilio svorio centrą metodas duoda didesnę greitaveiką negu metodas, pagrįstas profilių sutapatinimu. Taikant šį metodą galima išvengti iteravimo procedūrų ir pagerinti koordinatų nustatymo greitaveiką.

Taikant profilių sutapatinimo metodą, mobiliojo roboto padėties koordinatėms nustatyti sugaištama nuo 0,8 s iki 11 s (3.15–3.18 pav.), trukmė priklauso nuo pasirinkto skenavimo žingsnio. Įvertinus tai, kad koordinatės yra nustatomos dinaminio proceso metu (robotas juda 1 m/s greičiu), nesutapimas tarp supervizoriaus surastų koordinatų ir koordinatų, kurias įgis robotas per laiką, kol jos bus nustatytos taikant profilių sutapatinimo metodą, yra neleistinai didelis. Todėl toliau darbe bus nagrinėjamas tik mobiliojo roboto padėties koordinatų nustatymo pagal svorio centrą metodas.

3.3. Mobiliojo roboto padėties koordinatų nustatymas skirtingose konfigūracijos aplinkose

Literatūroje [65] pateiktas padėties koordinatų nustatymo metodas, naudojant kooperacinį ir nuoseklųjį skenavimus. Straipsnio autoriai [65] eksperimentams pasirinko *T* formos uždara aplinką. Tiriamosios erdvės matmenys $2 \times 1,5$ metro (3.24 pav., *a*). Autoriai [65] nurodė, kad naudojant aplinkos skenavimą mobiliojo roboto padėties koordinatės nustatomos su 1 cm paklaida.

Virtualioje erdvėje buvo sudarytas analogiškos konfigūracijos patalpos modelis (3.24 pav., *b*). Gauti rezultatai rodo, kad tos pačios konfigūracijos profilyje, taikant padėties koordinatų nustatymo pagal svorio centrą metodą, koordinatės rastos su 0,1 mm paklaida.



3.24 pav. Eksperimentinė aplinka: a) pateikta [65] literatūroje; b) sudaryta CENTAURUS CPN virtualioje aplinkoje

Sudėtingėjant aplinkos konfigūracijai, reikalingas skenavimas smulkesniu žingsniu, todėl toliau darbe tiriant įvairios konfigūracijos gamybinės patalpas skenavimas bus atliekamas kas 1 laipsnį.

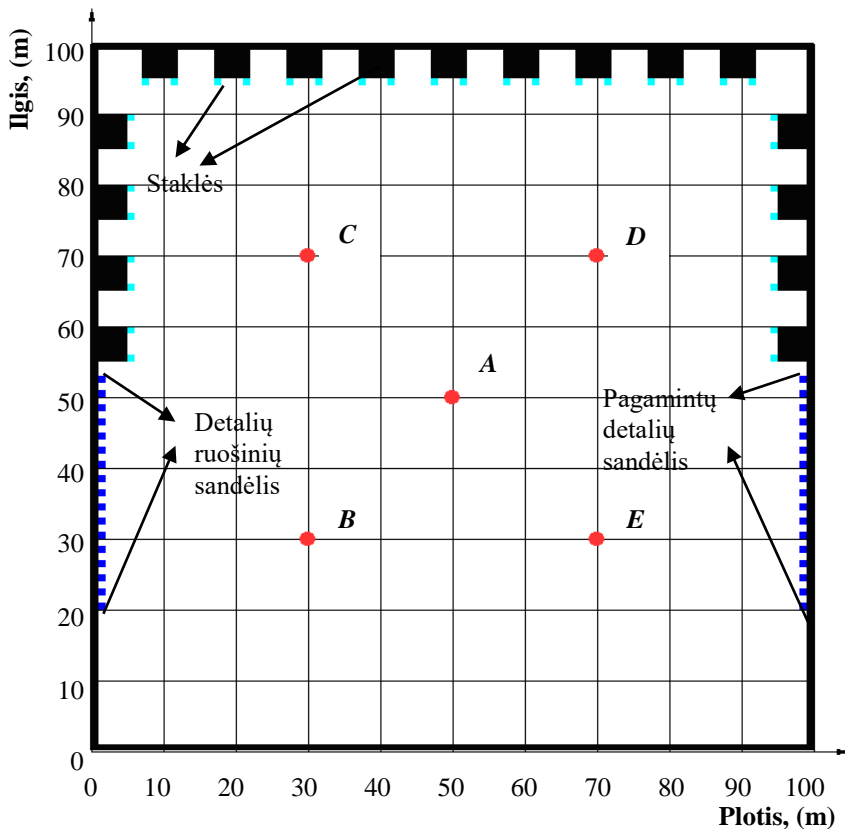
Lanksčioje automatizuotoje gamyboje atsisakius konvejerio mobilieji robotai naudojami detalėms ir kitiems gaminiams transportuoti iš vienos vietos į kitą. Mobilieji įrenginiai, atlikdami įvairias gamybines užduotis, transportuoja gaminius į įprastos konstrukcijos programinio valdymo stakles, todėl jų manipulatoriai turi aptarnauti 1–1,5 m aukščio erdvę.

Pavyzdžiui, robotas „Seekur Jr“ [75] sveria 77 kg, gali transportuoti 40 kg svorį, jo platformos, kurioje talpinami manipulatoriai, aukštis yra 494 mm, plotis 835 mm ir ilgis 1051 mm, o įvertinus talpinimo į doką įrangą ilgis padidėja iki 1198 mm. Šio roboto maksimalus judėjimo greitis 1,2 m/s.

Mobilusis robotas, transportuojantis detales į gamybinius mechanizmus, transportuojamą gaminį programinio valdymo staklėms gali perduoti dviem būdais. Pirmasis – labai tikslus mobiliojo roboto pozicionavimas į mainų poziciją; tai priimtina fiksuotiems pagal poziciją robotams. Tačiau šiuo atveju brangsta mobiliojo roboto aparatūrinė dalis, nes reikalingas preciziškas pozicionavimas. Antrasis – visi autonominiai mobilieji robotai turi statymo į doką aparatūrą, kuri reikalinga tam, kad mobilieji robotai galėtų automatiškai pasikrauti darbinius maitinimo šaltinius. Pagal robotų dydžius ir jų paskirtį yra sukurta daug įvairių statymo į doką techninių sprendimų, pradedant doko paieškos sistema ir baigiant pozicionavimo bei fiksavimo doko sistemomis. Nedidelių gabaritų robotams yra sukurtos įvairios statymo į doką sistemos pradedant mechaninėmis konstrukcijomis (piltuvo formos, roboto korpuso formos ir pan.) ir baigiant infraraudonųjų spindulių sistemomis su pradinio pozicionavimo tikslumu 1,5–3,5 cm [67–70]. Darbe iškeltiems tikslams pasiekti tinkamiausi yra robotų statymo į doką įrenginiai, kuriuose naudojamos

infraraudonųjų spindulių pozicionavimo sistemos su mechaninėmis krepiamosiomis galiniame taške; jos pozicionuoja robotą tiek į akumuliatorių pakrovimo, tiek į manipuliatorių darbinę poziciją prie staklių. Pradinio pozicionavimo sistemos tokiems robotams yra tarp 7–15 cm [71–74]. Priartėjęs prie staklių mobilusis robotas krepiamosiomis yra nukreipiamas į doką ir su staklių įranga tiksliai pozicionuojamas į mainų poziciją. Tokiose sistemose mobilusis robotas turi būti pozicionuojamas ne tik pagal koordinačių padėtį, bet ir pagal kryptį, nes roboto konstrukcija su manipulatoriais yra susieta vienareikšmiškai. Krepiamosiomis yra kompensuojamos krypties deviacijos (nuokrypiai), taip gerokai supaprastinant bendrą mobiliojo roboto valdymo sistemos aparatūrinę dalį. Tuo yra grindžiama toliau darbe akcentuojama 6 cm koordinačių nustatymo paklaida. Mobiliam robotui atvykus į mainų poziciją bus užtikrintas tinkamas pozicionavimas. Gamybinių patalpų, kuriose vykstančiam gamybiniam procesui naudojami mobilieji robotai, profiliai yra sudėtingesni, negu gali pasirodyti iš pirmo žvilgsnio. Idealiai apvalių arba kvadratinių patalpų retai būna. Dažniau pasitaiko atvejų, kai gamybinėse patalpose gausų kampų arba kitokių išsikišančių statinių kliūčių, pavyzdžiui, kolonų.

Tarkime, kad uždaroje erdvėje (patalpoje), kurios išmatavimai yra 100×100 metrų, vyksta gamybos procesas (3.25 pav.).



3.25 pav. Gamybinės patalpos Nr. 1 konfigūracija su žymėmis, kuriose vyksta skenavimas

Staklės (dideli juodos spalvos kvadratai, išdėstyti 3.25 paveikslo dešinėje, kairėje pusėje ir per vidurį iš viršaus) gamina įvairios paskirties atskiras detales. Sandėlyje yra detalių ruošiniai ir jau pagamintos detalės. Detalių ruošiniai yra įvairių tipų: pirmas ruošinys pirmai detalei, antras – antrai, trečias – trečia ir t. t. Visų staklių gamybos proceso trukmės yra skirtingos. Mobilieji robotai nuo staklių paima pagamintas detales ir perneša į sandėlį, o reikalingus ruošinius iš sandėlių gabena į staklių darbinę zoną. Pirmo tipo ruošinys dedamas tik į pirmas stakles, antro tipo – į antras, trečio tipo – į trečias ir t. t. Pagamintas detales robotas perneša į sandėlį. Pirmo tipo detalę deda į pirmai detalei sandėlyje skirtą vietą, antro tipo detalę – į antrai sandėlyje skirtą vietą ir trečio tipo detalę – į trečia detalei skirtą vietą. Detalių ir ruošinių sandėlius prižiūri kitos sistemos, užtikrinančios ruošinių buvimą ir detalių transportavimą taip, kad sandėlių pozicijos, prieinamos robotui, visada būtų paruoštos darbui.

Mėlynos spalvos mažais kvadratėliais dešinėje vaizduojami sandėlių lizdai, į kuriuos transportuojamos pagamintos detalės, o kairėje – lizdai, iš kurių paimami detalių ruošiniai (3.25 pav.).

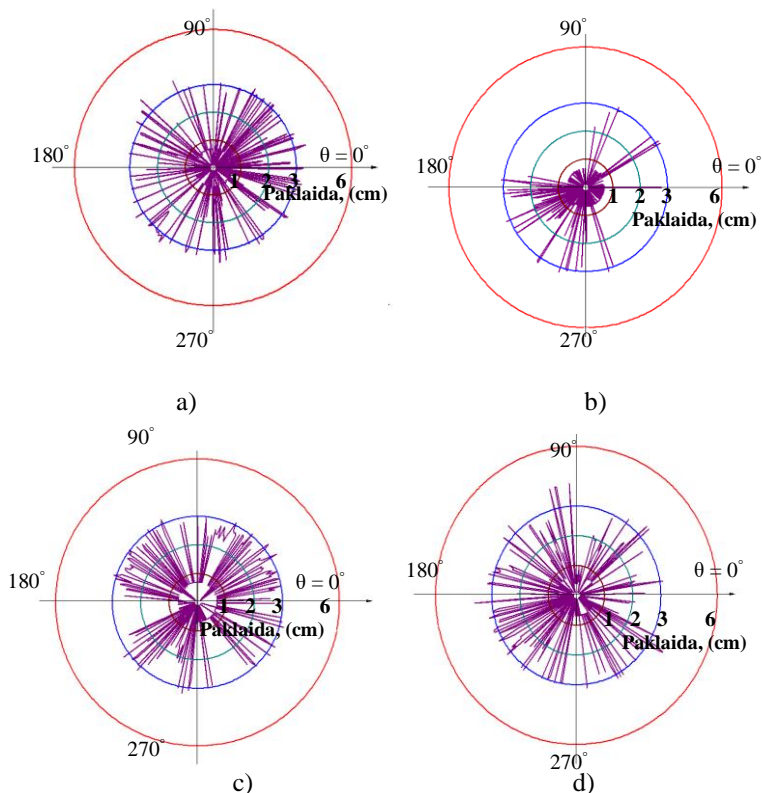
Vykstant gamybos procesui, staklės pagamina detales, kurias arčiausiai gamybinių staklių esantis mobilusis robotas turi nugabenti į detalių sandėlį arba į kitas gamybinės stakles. Mobilusis robotas turi vykdyti ir priešingą komandą – tiesiogiai iš sandėlio atgabenti reikiamą tolesniam gamybos procesui ruošinį.

Robotas, vykdydamas užduotį, privalo tiksliai ir operatyviai nuo savo pradinių koordinacių nuvažiuoti iki užduoties tikslo, pavyzdžiui, gamybinių staklių, neatsitrenkdamas į statines kliūtis (stakles, sienas) ir nesusidurdamas su dinaminėmis kliūtimis (kitais robotais ar žmonėmis, atsiradusiais gamybiniame patalpoje). Taip pat turi orientuotis aplinkoje tam, kad dėl techninių ir aplinkos sudarytų kliūčių nukrypęs nuo nurodytų koordinacių grįžtų į savo maršrutą arba surastų naują trumpiausią kelią. Šioje situacijoje labai aktuali yra roboto atliekamų operacijų greitimeika, kuri užtikrina nepertraukiamą gamybos procesą, kadangi bet koks netikėtas įvykis gali sutrikdyti normalų cecho darbą.

Tyrimo algoritmas toks: kadangi mobilusis robotas gali bet kurioje patalpos vietoje nukrypti į bet kurią pusę, padėties koordinatės nustatomos įvairiuose taškuose esant net maksimaliems nukrypimo atstumams. Šiuo atveju nustatant mobiliojo roboto padėties koordinates priimta, kad robotas visada nuo savo nurodytų koordinacių yra nukrypęs į tą patį tašką, o supervizoriaus nurodytos roboto padėties koordinatės yra išsidėsčiusios tuo pat atstumu visomis kryptimis nuo realios roboto pozicijos, pavyzdžiui, 10, 20 ir daugiau metrų. Tokie dideli atstumai imami tam, kad pirmiausia būtų galima sužinoti, ar esant dideliems nuokrypimams padėties koordinatės yra tinkamai nustatomos, o antra, tam, kad būtų galima išsiaiškinti, kiek laiko sugaištama koordinacių paieškai. Pradiniame modeliavimo ir tyrimų etape supervizoriaus padėties taškas buvo pasirenkamas tam tikru atstumu atsitiktinai, ir buvo stebima, su kokia paklaida nustatoma reali mobiliojo roboto padėtis. Pastebėta, kad pagal tai, į kurią pusę yra nuklydęs nuo supervizoriaus nurodytų koordinacių mobilusis robotas, net kelis kartus skiriasi paklaidos dydis, tad nutarta tyrimus atlikti su nurodytuoju tašku visose įmanomose situacijose. Todėl tolimesni tyrimai buvo atliekami taip: laikoma, kad mobilusis robotas į esamą (realią) koordinatę nukrypo iš

supervizoriaus nurodytų ir vienodu atstumu nutolusių pozicijų, išdėsčiusių 360 laipsnių kampu esamos roboto padėties atžvilgiu. Pagal aplinkos profilio konfigūraciją, kitų kliūčių išsidėstymą aplinkoje ir supervizoriaus nurodytą roboto poziciją paklaida gali svyruoti, todėl buvo priimta, kad supervizoriaus nurodytos roboto padėties koordinatės tyrimo metu bus išsidėsčiusios visomis kryptimis tam tikru atstumu. Vaizduojant paklaidos kitimą polinėje koordinatinių sistemoje galima stebėti, kaip esant skirtingai skenavimo kampo kryptims keičiasi padėties koordinatinių nustatymo paklaida.

Pirmiausia buvo analizuojama situacija, kai robotas nuo nurodytų koordinatinių nukrypo į tašką $[50,0 \ 50,0]$ (3.25 pav., taškas A), o supervizoriaus nurodytos roboto padėties koordinatės yra išsidėsčiusios visomis kryptimis 10, 20, 30, 40 metrų atstumais. Aplinkos skenavimas atliekamas kas 1 laipsnį. Visuose paveikluose, kuriuose pateikti mobiliojo roboto padėties koordinatinių nustatymo paklaidos kitimo grafikai, vidinio apskritimo, esančio arčiau centro, spindulys lygus 1 cm, kito apskritimo (judant nuo vidinio apskritimo link išorinio) spindulys lygus 2 cm, trečio apskritimo – 3 cm, o išorinio apskritimo – 6 cm. Rezultatai rodo (3.26 pav.), kad mobiliojo roboto padėties koordinatinių nustatymo paklaida neviršija 4 cm.

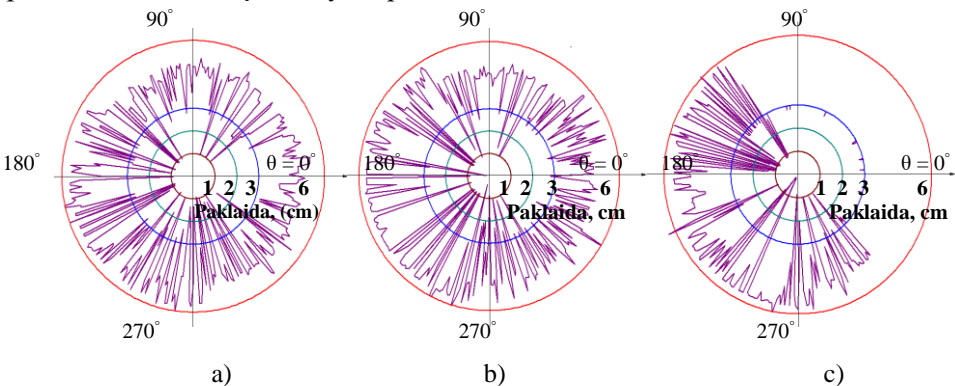


3.26 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse $[50,0 \ 50,0]$ (3.25 pav., taškas A), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) yra išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 10 metrų; b) 20 metrų; c) 30 metrų; d) 40 metrų atstumais

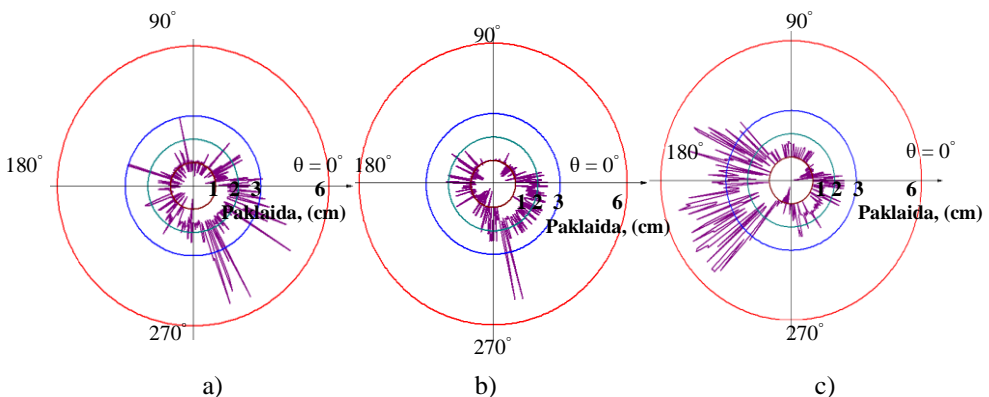
Nors realioje aplinkoje išorinė valdymo sistema niekada neleis mobiliam robotui nuklysti nuo nurodytų koordinatų 20–40 ir daugiau metrų, tačiau 3.26 paveiksle pateikti rezultatai rodo, kad ir tuo atveju metodas veikia bei nustato mobiliojo roboto padėties vietą.

Toliau buvo analizuojama, kaip kinta mobiliojo roboto koordinatų nustatymo paklaida jam esant kraštinėse 3.26 paveiksle pavaizduotos patalpos padėtyse.

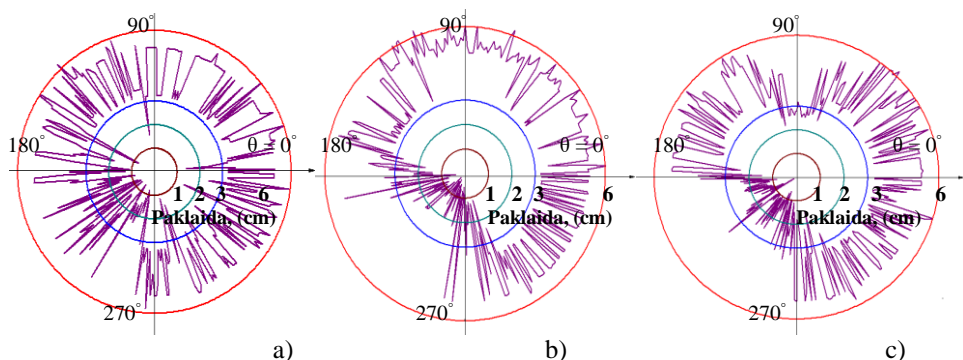
Buvo tiriama, kaip keičiasi mobiliojo roboto koordinatų nustatymo paklaida, kai robotas yra taške $[30,0 \ 30,0]$ (3.25 pav., taškas B), antra, kai yra taške $[30,0 \ 70,0]$ (3.25 pav., taškas C), trečia, kai yra taške $[70,0 \ 70,0]$ (3.25 pav., taškas D) ir ketvirta, kai yra taške $[70,0 \ 30,0]$ (3.25 pav., taškas E), o išorinės valdymo sistemos nurodytos roboto padėties koordinatės yra išsidėsčiusios visomis kryptimis 5, 10 ir 20 metrų atstumais. Gauti rezultatai pateikti 3.27–3.30 paveiksluose. Rezultatai rodo, kad patalpos, kurioje dirba mobilusis robotas, konfigūracija daro didelę įtaką padėties koordinatų nustatymo paklaidai.



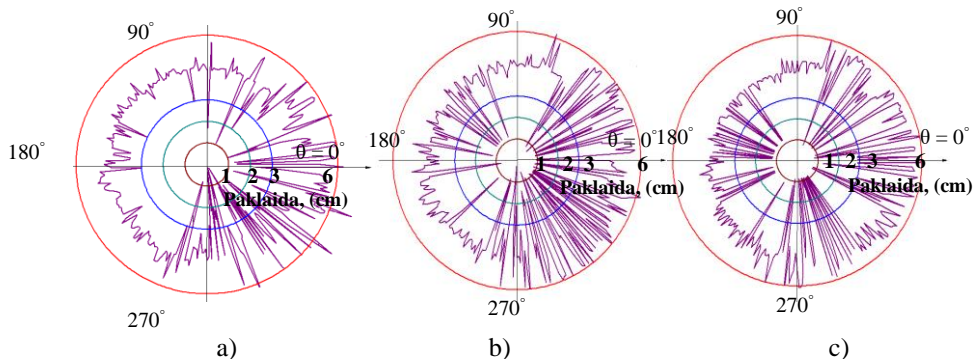
3.27 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse $[30,0 \ 30,0]$ (3.25 pav., taškas B), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) yra išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų; c) 20 metrų atstumais



3.28 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse $[30,0 \ 70,0]$ (3.25 pav., taškas C), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) yra išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų; c) 20 metrų atstumais



3.29 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [70,0 70,0] (3.25 pav., taškas D), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) yra išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų; c) 20 metrų atstumais



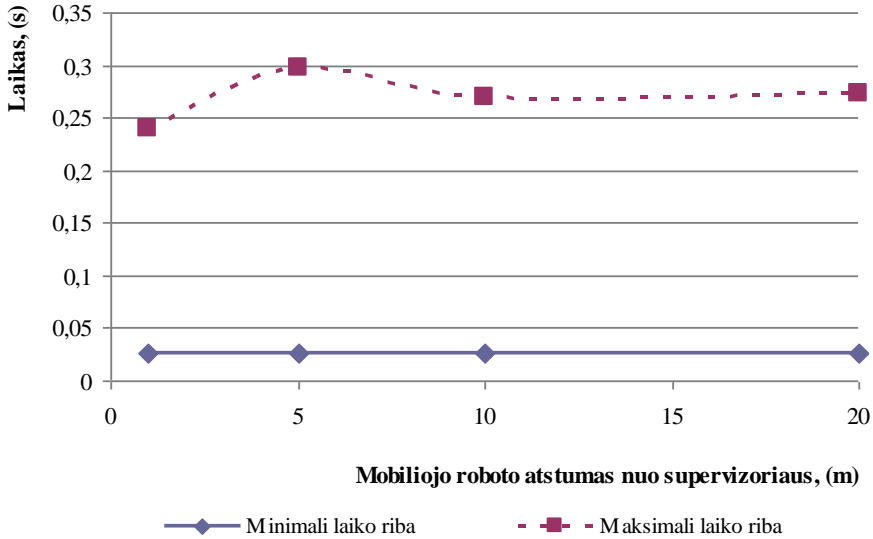
3.30 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [70,0 30,0] (3.25 pav., taškas E), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) yra išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų; c) 20 metrų atstumais

Matyti, kad kuo toliau nuo kliūčių yra mobilusis robotas, tuo su mažesne paklaida yra nustatomos jo padėties koordinatės. Ir atvirkščiai, kuo arčiau kliūčių juda mobilusis robotas, tuo su didesne paklaida nustatomos koordinatės. Iš 3.27–3.30 paveikslų taip pat matyti, kad net tais atvejais, kai mobilusis robotas nuo nurodytų koordinačių yra nuklydęs dideliu atstumu, atliekant aplinkos skenavimą iš bet kurios padėties mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo paklaida neviršija 6 cm.

Nepriklausomai nuo atstumo tarp mobiliojo roboto ir supervizoriaus pozicijų, taikant žinomos patalpos profilio svorio centro panaudojimo metodą, padėties koordinatėms nustatyti buvo sugaišta nuo 0,026 s iki 0,298 s (3.31 pav.).

Toks laiko išsibarstymas gaunamas dėl to, kad esant arti sienų ir kitų kliūčių reikia tikslinti svorio centro koordinatės, atliekant pakartotinius perskaičiavimus. Pakartotinis koordinačių perskaičiavimas vykdomas užsidavus koordinatės pozicijos, kurioje buvo nustatytos roboto koordinatės. Dėl to pakinta profilio forma, tapdama artimesnė roboto nustatytajai, ir jo padėties koordinatės apskaičiuojamos

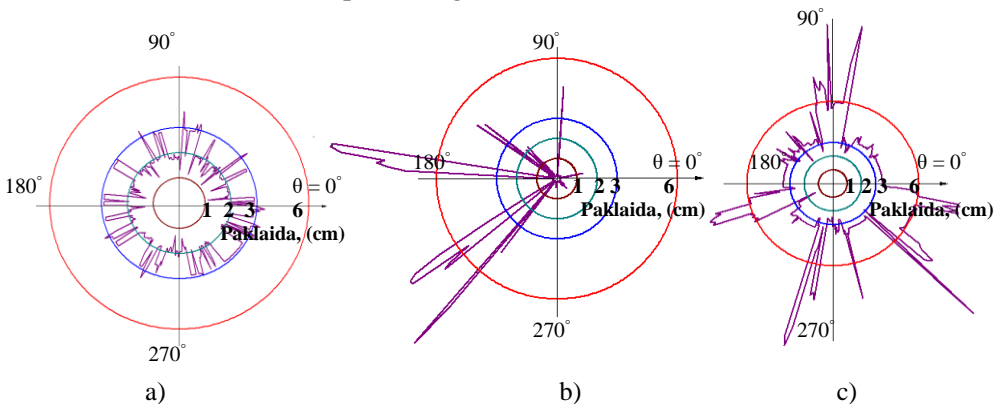
tiksliu. Tokį tikslinimą galima nutraukti tada, kai naujai gautos koordinatės nesiskiria nuo ankstesnių daugiau nei 6 cm.



3.31 pav. Laiko intervalas, kuriame nustatomos mobiliojo roboto padėties koordinatės gamybinės patalpos Nr. 1 aplinkoje

Papildomai buvo ištirta, kaip keičiasi padėties koordinačių nustatymo paklaida, kai aplinka (3.25 pav.) skenuojama kas 5–10 laipsnių. Gauti rezultatai pateikti 3.32 paveiksle.

Dar kartą įsitikinta, kad toks skenavimo žingsnis sudėtingos konfigūracijos patalpoje, kurioje daug išsikišusių dalių, yra per stambus ir padėties koordinatės nustatomos su didesne paklaida, todėl bet kokios konfigūracijos patalpos n atveju skenavimą reikia atlikti 1 laipsnio žingsniu.



3.32 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [50,0 50,0] (3.25 pav., taškas A), tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) yra išsidėsčiusios visomis kryptimis 10 metrų atstumu, o aplinka yra skenuojama kas: a) 5 laipsnius; b) 8 laipsnių; c) 10 laipsnių

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Ištirti du mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo metodai, paremti žinomos patalpos profilio informacijos panaudojimu.
2. Nustatyta, kad mobiliojo roboto koordinačių paieška, taikant žinomos patalpos profilio sutapatinimo metodą ir taikant vieną iš optimizavimo metodų, yra iteracinio pobūdžio.
3. Atlikta abiejų metodų analizė parodė, kad mobilusis robotas ir išorinio valdymo sistema (supervizorius) turi turėti tą patį gaunamo patalpos profilio pradžios tašką.
4. Ištirta, kad laikas, sugaištas mobiliojo roboto padėties koordinatėms nustatyti, priklauso nuo aplinkos skenavimo žingsnio, statinių kliūčių išsidėstymo konfigūracijos ir mobiliojo roboto nuokrypio nuo nurodytų koordinačių. Kuo mažesnis nuokrypis, tuo greičiau nustatomos padėties koordinatės.
5. Nustatyta, kad taikant profilių sutapatinimo metodą (apskritam, kvadratiniam ir daugiakampiam profiliams) mobiliojo roboto koordinačių paieškos trukmė, kai nuokrypis siekia 10 m, o skenavimo žingsnis yra 1 laipsnis, trunka nuo 4,48 s iki 6,65 s, esant 1 cm koordinačių nustatymo paklaidai.
6. Nustatyta, kad taikant svorio centro metodą (apskritam, kvadratiniam ir daugiakampiam profiliams) mobiliojo roboto koordinačių paieškos trukmė, kai nuokrypis siekia 10 m, o skenavimo žingsnis yra 1 laipsnis, trunka nuo 0,01 s iki 0,072 s, esant 1 cm koordinačių nustatymo paklaidai.
7. Modeliuojant ištirta, kad mobiliojo roboto padėtis taikant svorio centro metodą yra nustatoma ir tuo atveju, kai skirtumas tarp realios roboto buvimo vietos ir pozicijos, kurioje jis turi būti, yra iki 40 m. Šiuo atveju padėties koordinačių nustatymo paklaida neviršija 6 cm, o paieškos trukmė pagal profilio konfigūraciją kinta nuo 0,05 s iki 0,256 s.
8. Įvertinus tai, kad mobiliojo roboto padėties koordinatės turi būti nustatomos jam judant, koordinačių paieškai reikia taikyti žinomos patalpos profilio svorio centro metodą. Atlikta lyginamoji dviejų metodų analizė parodė, kad esant įvairioms nesudėtingų profilių (kvadrato, apskritimo) konfigūracijoms, kai aplinka skenuojama kas 1 laipsnį, roboto padėtis taikant svorio centro metodą nustatoma vidutiniškai apie 250 kartų greičiau, o esant daugiakampiam profiliui – apie 68 kartus greičiau, negu taikant mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo pagal žinomos patalpos profilį metodą. Metodas, pagrįstas profilių sutapatinimu, tinka nustatyti mobiliojo roboto padėtį tik tuo atveju, kai greitaveika nėra vienas pagrindinių sistemos aspektų.

4. REIKALAVIMAI MOBILIOJO ROBOTO PADĖTIES KOORDINAČIŲ NUSTATYMO SISTEMAI

4.1. Gamybinės patalpos konfigūracijos įtaka mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo paklaidai ir laikui

Trečiame skyriuje nustatyta, kaip 3.25 paveiksle pavaizduotos patalpos konfigūracija paveikia mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo paklaidą. Kyla klausimas, kaip elgsis koordinačių nustatymo sistema, kai gamybinėje patalpoje atsiras dar didesnių išsikišusių dalių?

Kliūtytys, atsiradusios mobiliojo roboto judėjimo kelyje, iškraipo patalpos, kurioje gamybinę užduotį atlieka robotas, profilį, dėl to gali komplikotis padėties koordinačių nustatymo galimybė.

Kadangi mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo paklaida kinta pagal kliūčių dydį ir jų kiekio gamybinėje patalpoje atsiradimą, ištirtas sudėtingesnės konfigūracijos patalpos profilis, kuris pavaizduotas 4.1 paveiksle.

Gamybinėse patalpose, kuriose vyksta gamybos procesas, panaudojant mobiliuosius robotus, turi būti zonos, kur gali netrukdomai judėti ar dirbti gamybą prižiūrintys operatoriai. Todėl 3.26 paveiksle pavaizduotas profilis papildytas keliomis zonomis: geltonos spalvos zona (4.1 pav.) – tai sritis, kuri skirta žmonėms, mobiliesiems robotams į ją įvažiuoti draudžiama, o pilkos spalvos zona (4.1 pav.) – sritis, kurioje vyksta detalių surinkimo procesas.

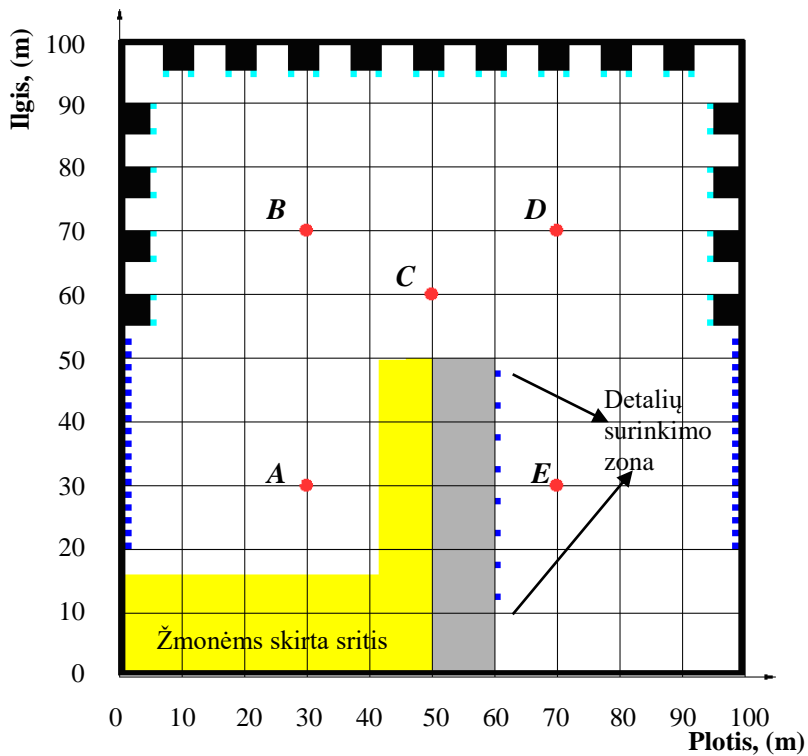
Tam, kad būtų galima palyginti, kaip papildomų zonų atsiradimas gamybinėje patalpoje paveikia mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo trukmę ir paklaidą, 4.1 paveiksle pavaizduotas profilis tirtas keliais aspektais.

Pirmiausia buvo ištirta, kaip keičiasi padėties koordinačių nustatymo paklaida, kai mobilusis robotas yra taške $[50,0 \ 60,0]$ (4.1 pav., taškas *C*), o supervizoriaus nurodytos roboto padėties koordinatės yra išsidėsčiusios apskritimu visomis kryptimis 10 metrų atstumu. Gauti rezultatai pavaizduoti 4.2 paveiksle.

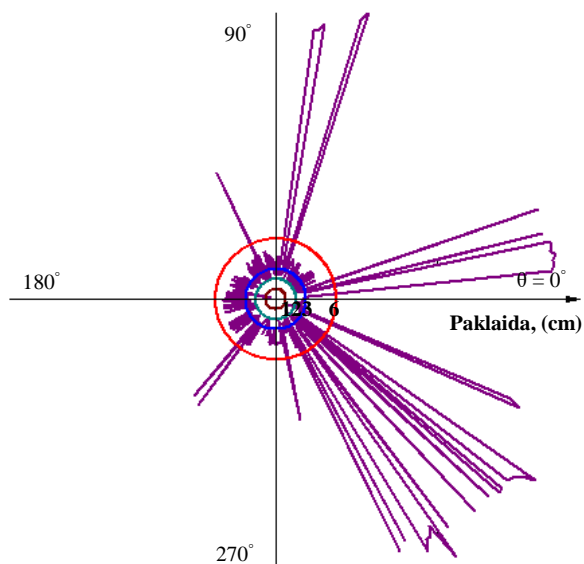
Antra, paklaidos kitimas buvo analizuojamas robotui būnant kraštinėse 4.1 paveiksle pavaizduotos aplinkos padėtyse, t. y. taškuose: $[30,0 \ 30,0]$ (4.1 pav., taškas *A*), $[30,0 \ 70,0]$ (4.1 pav., taškas *B*), $[70,0 \ 70,0]$ (4.1 pav., taškas *D*) ir $[70,0 \ 30,0]$ (4.1 pav., taškas *E*), o išorinės valdymo sistemos nurodytos roboto padėties koordinatės yra išsidėsčiusios visomis kryptimis 5 ir 10 metrų atstumais.

Tiriant gamybinės patalpos konfigūracijos ir papildomų kliūčių aplinkoje atsiradimo įtaką mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo trukmei ir paklaidai priimta, kad visuose paveiksluose, kuriuose pateikti mobiliojo roboto padėties koordinačių nustatymo paklaidos kitimo grafikai, vidinio apskritimo (esančio arčiau centro) spindulys lygus 1 cm, kito apskritimo (judant nuo vidinio apskritimo link išorinio) spindulys lygus 2 cm, trečio apskritimo – 3 cm, o išorinio apskritimo – 6 cm.

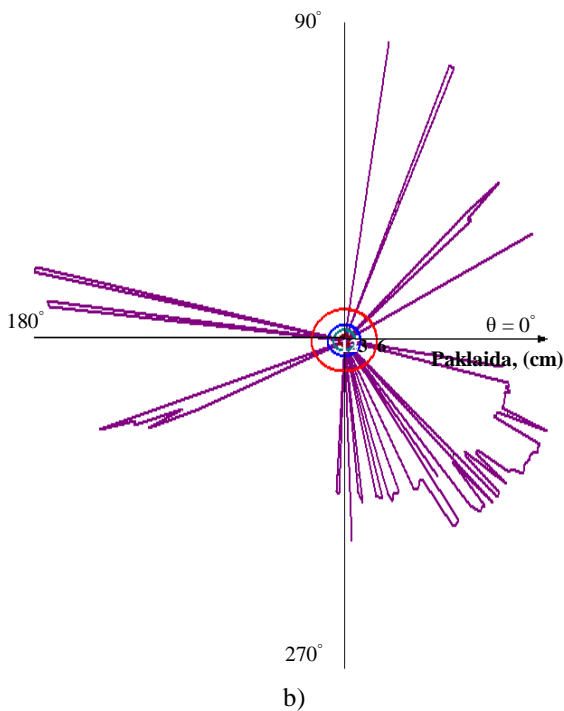
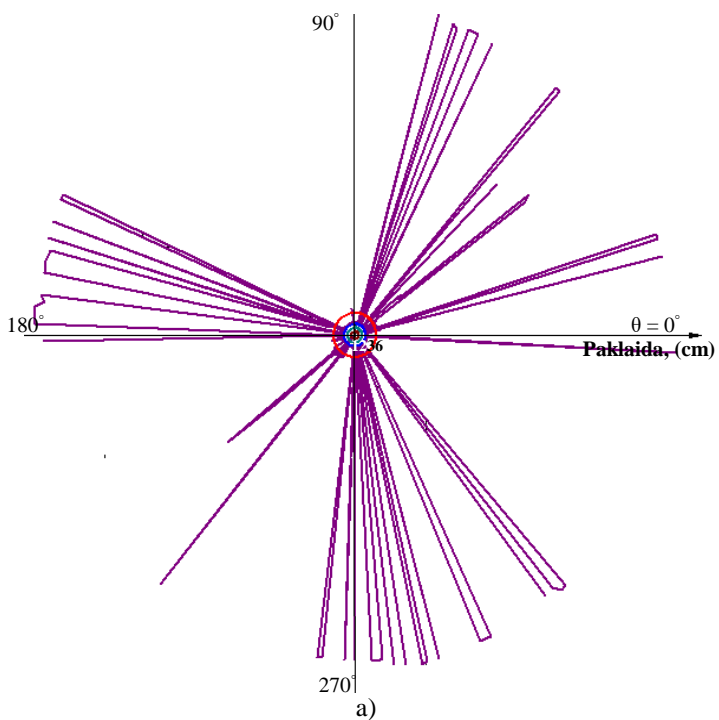
Gauti rezultatai pateikti 4.2–4.6 paveiksluose. Šiuose paveiksluose didžiausiu apskritimu yra pažymėta 6 cm koordinačių nustatymo paklaida.



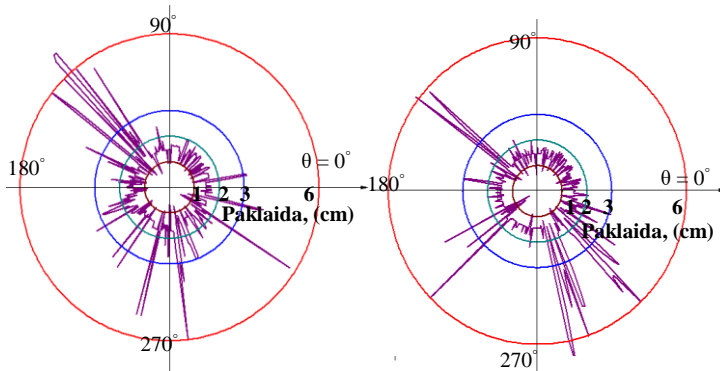
4.1 pav. Gamybinės patalpos Nr. 2 konfigūracija su žymėmis, kuriose vyksta skenavimas



4.2 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [50,0 60,0] (4.1 pav., taškas C), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) išsidėsčiusios visomis kryptimis 10 metrų atstumu



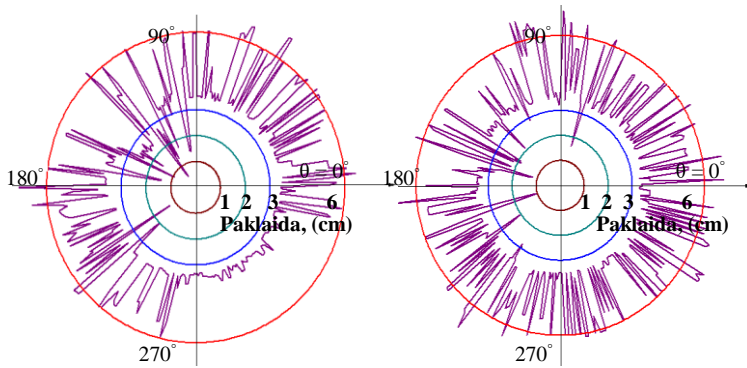
4.3 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [30,0 30,0] (4.1 pav., taškas A), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų atstumais



a)

b)

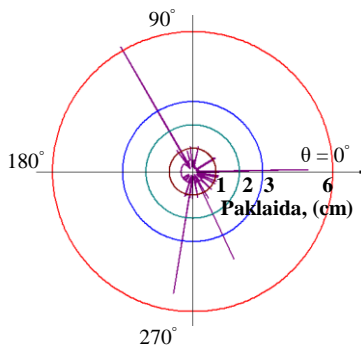
4.4 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [30,0 70,0] (4.1 pav., taškas B), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų atstumais



a)

b)

4.5 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [70,0 70,0] (4.1 pav., taškas D), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų atstumais

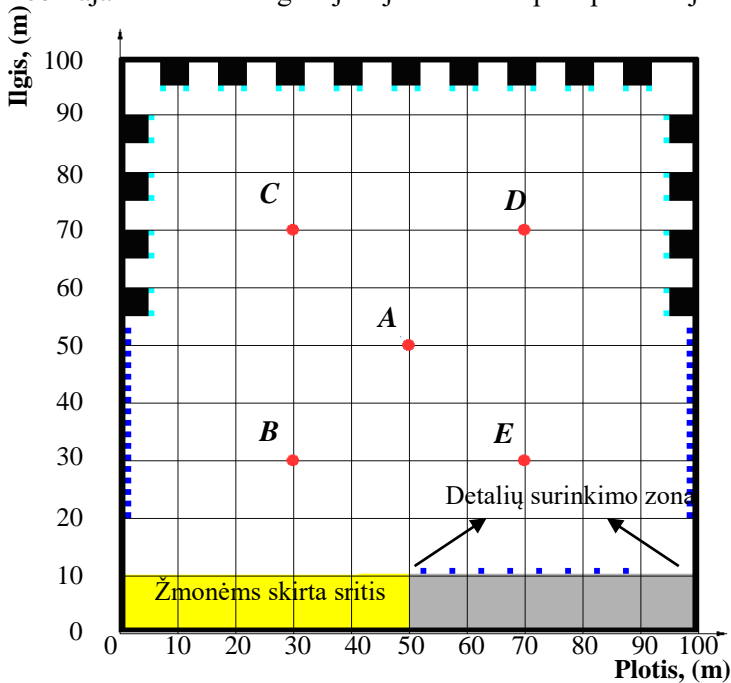


4.6 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [70,0 30,0] (4.1 pav., taškas E), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) išsidėsčiusios visomis kryptimis 5 metrų atstumu

Įvairiuose gamybinės patalpos Nr. 2 (4.1 pav.) taškuose atlikti tyrimai parodė, kad esant skirtingoms roboto pozicijoms profilio atžvilgiu kai kurie pasiekti rezultatai netenkina reikalavimų, keliamų padėties koordinatinių nustatymo sistemai.

4.2–4.6 paveiksluose pateikti duomenys rodo, kad atsiradus aplinkoje labai išsikišančioms dalims, padidėja mobiliojo roboto padėties koordinatinių nustatymo paklaida. Dėl išsikišusių kliūčių mobilusis robotas ir supervizorius apskaičiuoja skirtingo profilio svorio centrus, kurių taip ir nepavyksta sutapatinti. Taigi patalpai esant (4.1 pav.) su tokiais profilio ypatumais, kai labai išsikišusios tam tikros gamybinės patalpos dalys, gaunami rezultatai yra nepriimtini, ir arba turi būti apribotos robotų judėjimo zonos tokioje patalpoje, arba pakeista gamybinės patalpos konfigūracija.

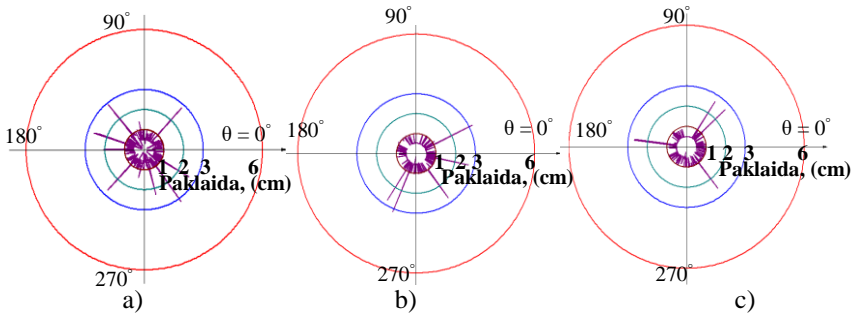
Koordinatinių paieškos trukmei minimizuoti ir paklaidai sumažinti gamybinę patalpą, pavaizduotą 4.1 paveiksle, galima suprojektuoti taip, kaip parodyta 4.7 paveiksle, t. y. išdėstyti visus įrenginius, pagalbinę zoną žmonėms, į kurią neįvažiuoja mobilieji robotai, ir atskirą zoną surinkimo mazgui palei sienas, paliekant mobiliam robotui daugiau judėjimo laisvės patalpos viduje.



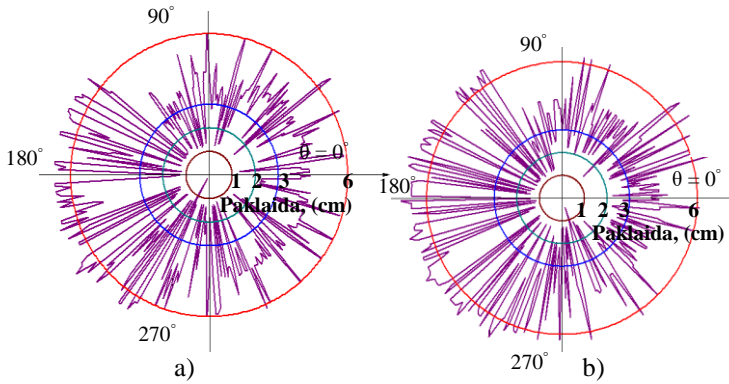
4.7 pav. Gamybinės patalpos Nr. 3 konfigūracija su žymėmis, kuriose vyksta skenavimas

4.7 paveiksle pateiktoje patalpoje, kaip ir 3.25 paveikslo patalpoje, ištirti tie patys taškai, t. y. paklaida ir greitaveika analizuotos bei lygintos mobiliam robotui nuo nurodytų koordinatinių nukrypimų į taškus $[50,0 \ 50,0]$ (4.7 pav., taškas A), $[30,0 \ 30,0]$ (4.7 pav., taškas B), $[30,0 \ 70,0]$ (4.7 pav., taškas C), $[70,0 \ 70,0]$ (4.7 pav., taškas D) ir $[70,0 \ 30,0]$ (4.7 pav., taškas E), o supervizoriaus nurodytos roboto padėties koordinatės yra išsidėsčiusios visomis kryptimis 10, 20 ir 30 metrų atstumais, kai mobilusis robotas yra patalpos centre, bei 5 ir 10 metrų atstumais, kai

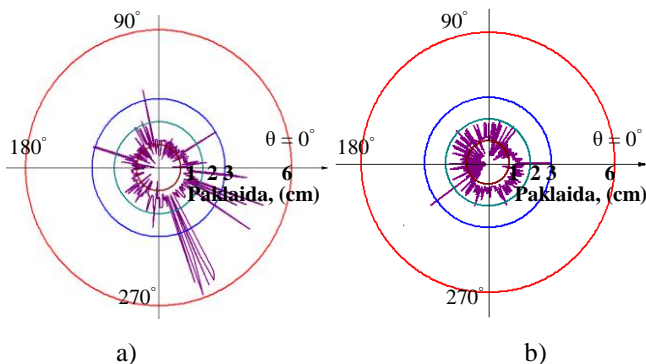
robotas yra kraštinėse patalpos (4.7 pav.) padėtyse. Gauti rezultatai pateikti 4.8–4.12 paveiksluose.



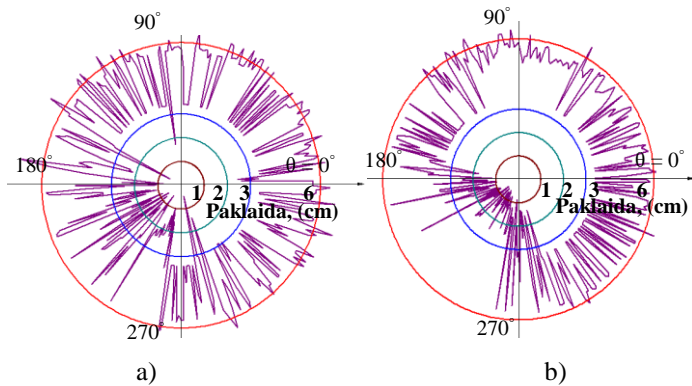
4.8 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [50,0 50,0] (4.7 pav., taškas A), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 10 metrų; b) 20 metrų; c) 30 metrų atstumais



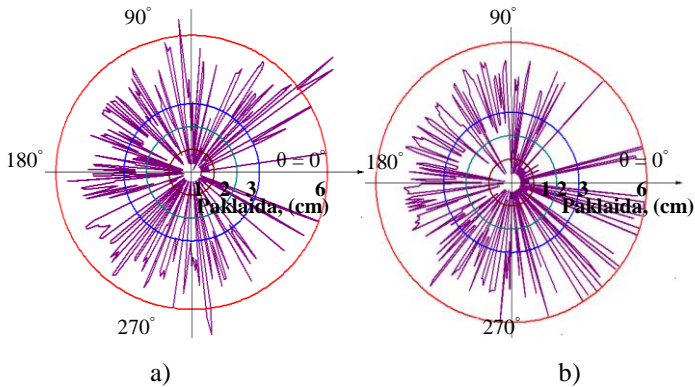
4.9 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [30,0 30,0] (4.7 pav., taškas B), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų atstumais



4.10 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [30,0 70,0] (4.7 pav., taškas C), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų atstumais



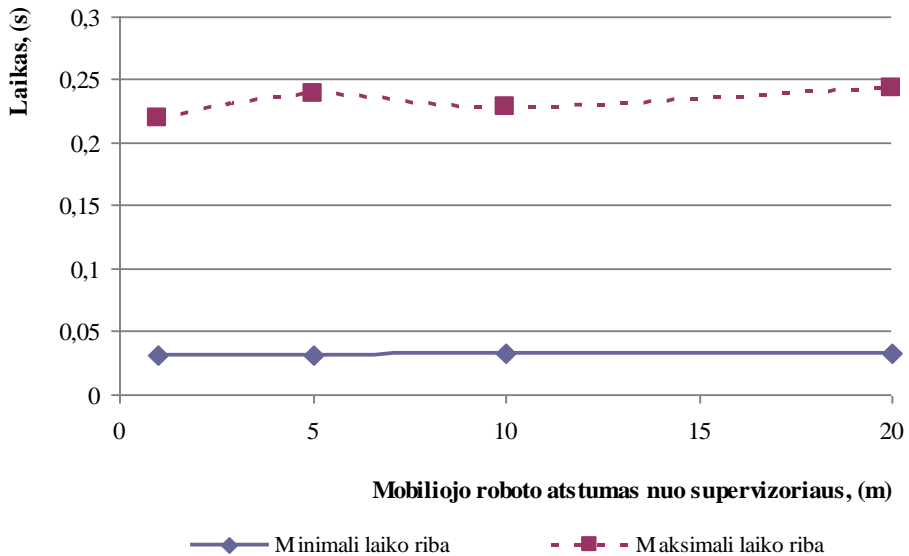
4.11 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [70,0 70,0] (4.7 pav., taškas *D*), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų atstumais



4.12 pav. Gauta paklaida, kai mobilusis robotas yra koordinatėse [70,0 30,0] (4.7 pav., taškas *E*), o tikrosios koordinatės (supervizoriaus nurodytos) išsidėsčiusios visomis kryptimis: a) 5 metrų; b) 10 metrų atstumais

4.8–4.12 paveiksluose pateikti duomenys rodo, kad suprojektavus gamybinę patalpą taip, kaip parodyta 4.7 paveiksle, galima pasiekti 6 cm padėties koordinatžių nustatymo paklaidą.

4.13 paveiksle pavaizduotoje laiko priklausomybėje nuo atstumo tarp mobiliojo roboto ir supervizoriaus matyti, kad padėties koordinatės nustatomos per 0,031–0,243 s.



4.13 pav. Laiko intervalas, kuriame esant net dideliam nuokrypiui nustatomos mobiliojo roboto padėties koordinatės gamybinės patalpos Nr. 3 aplinkoje

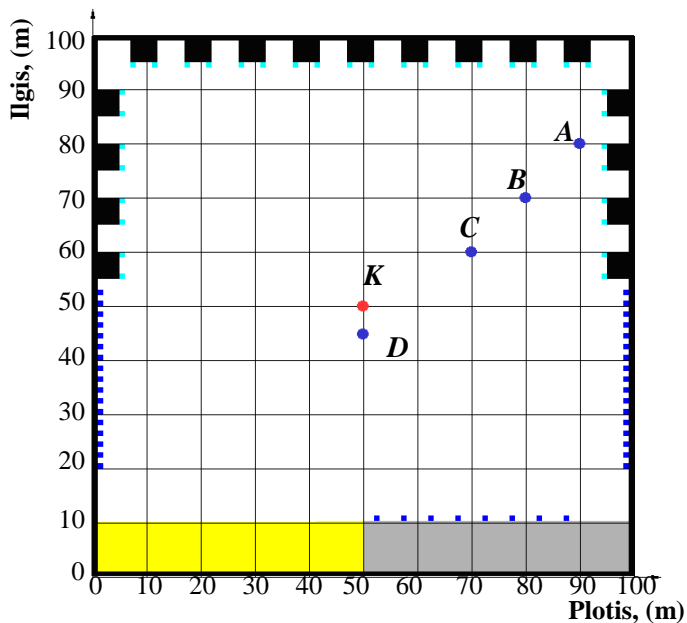
4.2. Papildomų kliūčių gamybinėje patalpoje atsiradimo įtaka mobiliojo roboto padėties koordinatėms nustatymo laikui ir paklaidai

Gamybinėje patalpoje kurioje vyksta gamybos procesas dalyvaujant mobiliesiems robotams, be statinių kliūčių (įrengimai, staklės ir kt.) visada atsiranda dinaminės (mobilijų robotų). Nuo dinaminės kliūčių atsiradimo ir skirtingo išsidėstymo gamybinėje patalpoje priklauso tiek gaunamo patalpos profilio vaizdas, tiek koordinatėms paieškos paklaida ir greitaveika.

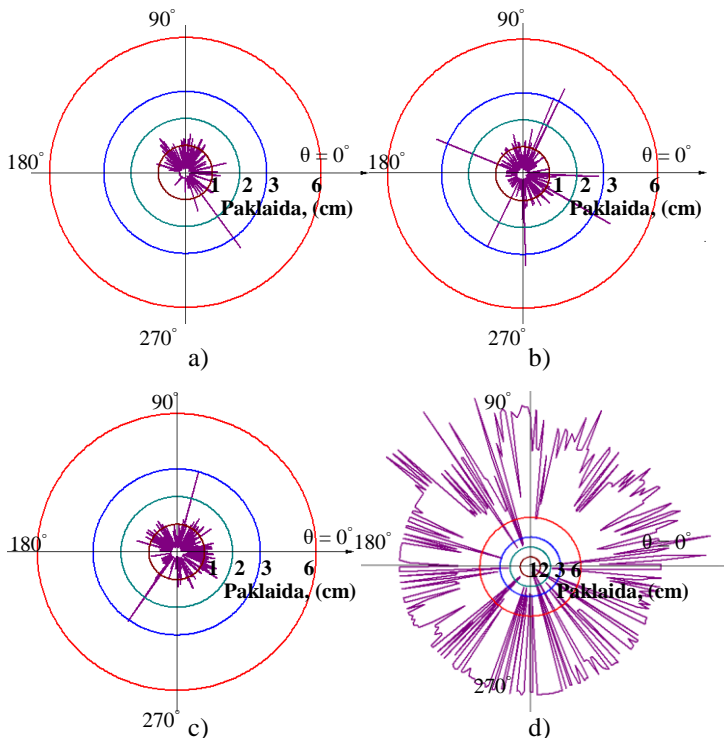
Mobiliojo roboto padėties koordinatėms nustatymo paklaida pirmiausia buvo ištyrta, kai gamybinėje patalpoje Nr. 3 yra viena dinaminė kliūtis.

Nustatyta, kokią įtaką padėties koordinatėms nustatymo paklaidai turi atstumas tarp dinaminės kliūties ir mobiliojo roboto, kurio koordinatėms yra ieškoma. Mobiliojo roboto padėties patalpoje taškas, kuriame jis buvo tyrimo metu [50,0 50,0] (4.14 pav., taškas *K*), o išorinės valdymo sistemos nurodytos mobiliojo roboto padėties koordinatės buvo išdėstytos visomis kryptimis 3 metrų atstumu. Dinaminė kliūtis mobiliojo roboto atžvilgiu buvo nuolat artinama (4.14 pav., taškai *A–D*), kiekvieną kartą apskaičiuojant kliūties blokuojamą skenerio spindulio kampą.

Gauti rezultatai pateikti 4.15 paveiksle. Iš 4.15 (*d*) paveiksle pateiktų rezultatų matosi, kad dinaminiam objektui priartėjus prie mobiliojo roboto tokiu atstumu, kai kliūtis užstoja 11,3 laipsnio skenuojamo profilio, dar pavyksta rasti mobiliojo roboto padėties koordinates ne daugiau kaip su 6 cm paklaida. Įvertinus tai, kad darbe priimtas mobiliojo roboto dydis siekia 1 m skersmens, jo koordinatės yra nustatomos su 6 cm paklaida, jei kitas robotas yra ne arčiau kaip 5 m atstumu, nes skeneriui tada jis užima mažesnę nei 11,3 laipsnio kampo erdvę ir neblokuoja patalpos profilio. Tas pats galioja ir statinėms kliūtims – įvairioms patalpos konstrukcijoms ir objektams.



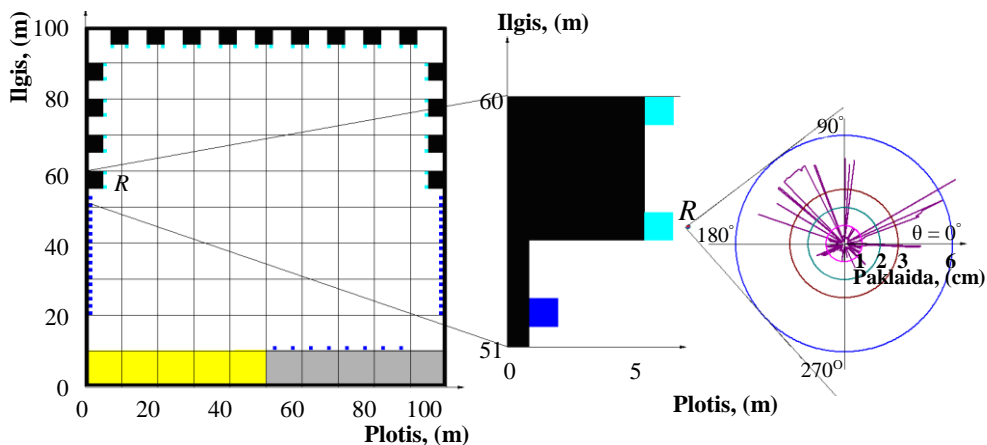
4.14 pav. Gamybinės patalpos konfigūracija su dinaminės kliūtis žymėmis



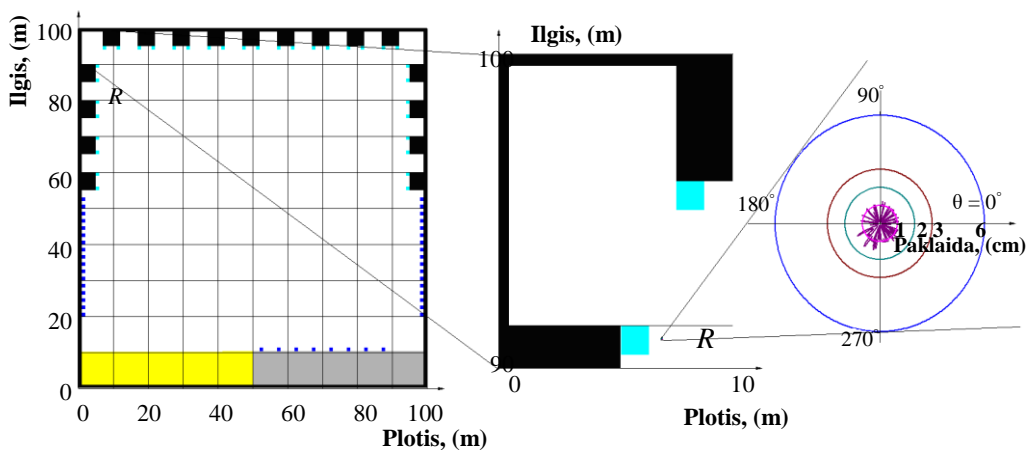
4.15 pav. Gauta paklaida, kai patalpoje (4.15 pav.) yra viena dinaminė kliūtis, kurios pozicija mobiliojo roboto [50,0 50,0] (taškas *K*), atžvilgiu yra taškuose: a) [90,0 80,0], 1,14° (taškas *A*); b) [80,0 70,0], 1,5° (taškas *B*); c) [70,0 60,0], 2,5° (taškas *C*); d) [50,0; 45,0], 11,3° (taškas *D*)

Kadangi išorinė valdymo sistema žino, kur kiekvienu laiko momentu turi būti kiekvienas mobilusis robotas, ji gali paveikti ir koordinacių nustatymo sistemos darbą. Mobiliojo roboto padėties koordinatės reikia tikrinti esant ne mažesniai, negu leidžia koordinacių nustatymo sistemos apribojimai, atstumui tarp jo ir artimiausios dinaminės ar statinės kliūtis.

Visi ankstesni tyrimai nustatant mobiliojo roboto padėties koordinatės buvo vykdomi, kai mobilusis robotas nuo nagrinėjamo profilio krašto yra nutolęs ne mažesniu kaip 20 % maksimalaus patalpos dydžio atstumu. Tai leido įvertinti, kokią įtaką turi profilio konfigūracija ir įrenginių išdėstymas patalpoje. Tačiau egzistuoja situacijos, kai mobilusis robotas turi priartėti prie paskirties pozicijos gaminiui paimti ar padėti, o atstumas tarp jo ir sienos sumažėja iki minimumo. Iki to momento roboto koordinatės turi būti patikrintos, kad pozicionavimo veiksmas būtų atliekamas be klaidų. 4.16–4.17 paveiksluose pavaizduotos situacijos, kai mobilusis robotas turi būti tiesiai prieš pozicionavimo įrenginį ir nuo jo nutolęs 1 m atstumu (priimta, kad roboto skersmuo yra 1 m).



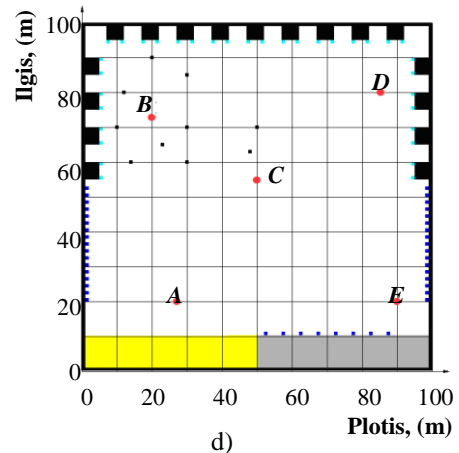
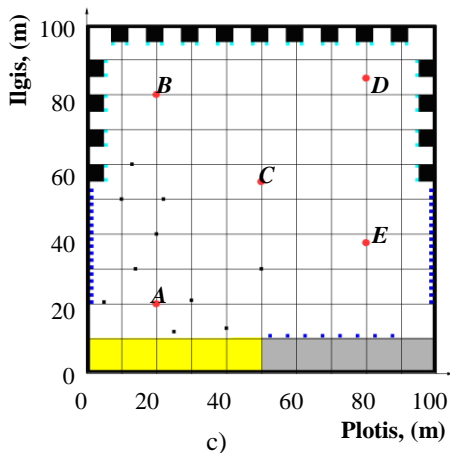
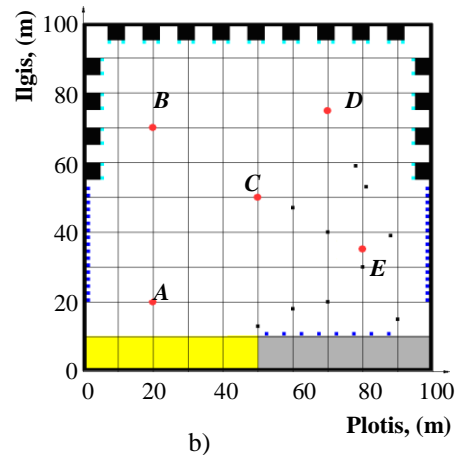
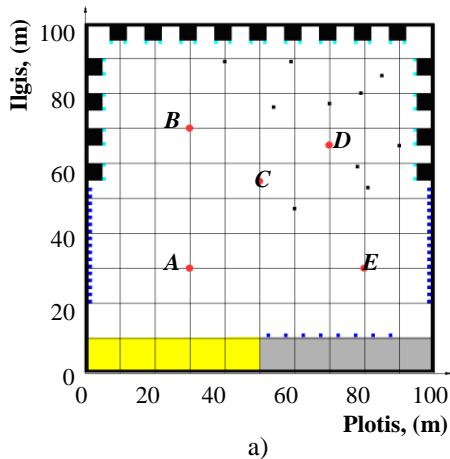
4.16 pav. Koordinacių nustatymo galimybės padėtyje Nr. 1 (R – vieta, kur yra robotas)

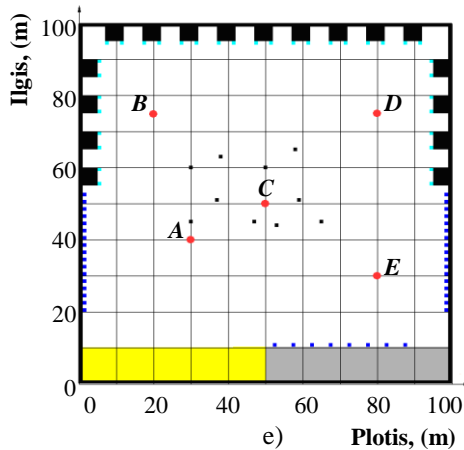


4.17 pav. Koordinacių nustatymo galimybės padėtyje Nr. 2 (R – vieta, kur yra robotas)

Gauti rezultatai parodė (4.16–4.17), kad tuo atveju, kai mobilusis robotas nuo pozicionavimo taško yra nukrypęs 0,5 m atstumu visomis galimomis kryptimis, padėties koordinatės nustatomos neviršijant 6 cm paklaidos. Buvo tirta daug taškų, o pačios neparankiausios padėties koordinatinių nustatymo vietos pavaizduotos 4.16–4.17 paveiksluose, kuriuose pateikti eksperimento rezultatai, kai patalpos artimasis profilis duoda didžiausius profilio skirtumus tarp supervizoriaus teikiamos ir mobiliojo roboto skenerio gautos informacijos. 4.16–4.17 paveiksluose pavaizduotas žydros spalvos plotas rodo roboto pozicionavimo tašką, o atstumas tarp roboto centro ir pozicijos centro yra 1 m. Gauti koordinatinių nustatymo paklaidų rezultatai (4.16 pav.) rodo, kad yra tik viena roboto pozicija, kurioje paklaida viršija 6 cm, o 4.17 paveiksle parodytoje situacijoje koordinatinių nustatymo paklaida neviršija 2 cm.

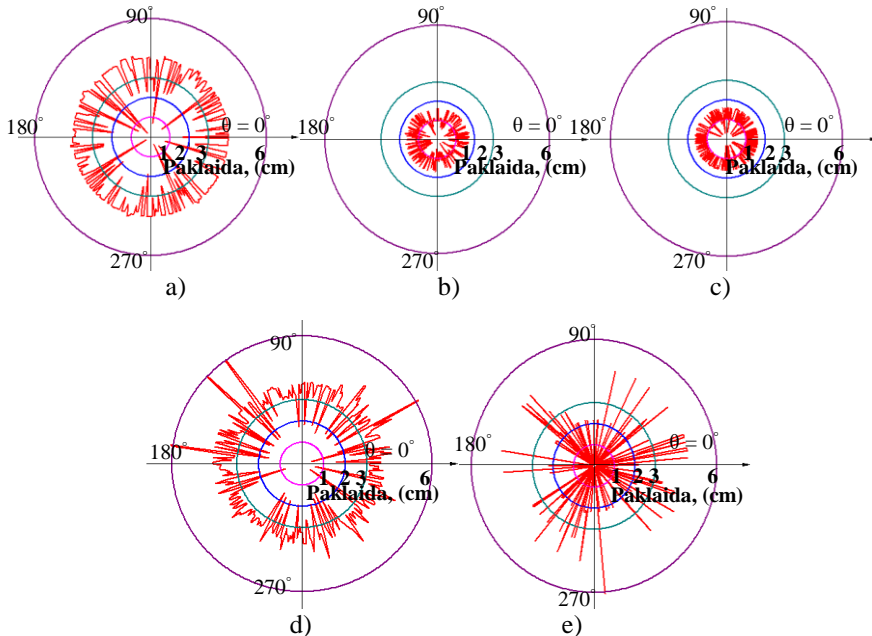
Įvertinus anksčiau gautus rezultatus buvo iširta, kaip kinta padėties koordinatinių nustatymo paklaida, kai gamybinėje patalpoje vienu metu skirtingose vietose juda 11 mobiliųjų robotų. 4.18 paveiksle (a) pavaizduota situacija, kai 10 mobiliųjų robotų yra susikoncentravę gamybinės patalpos viršuje dešinėje, paveiksle (b) – kai jie yra apačioje dešinėje, paveiksle (c) – kai jie yra apačioje kairėje, paveiksle (d) – kai visi jie yra viršuje kairėje, paveiksle (e) – kai jie viduryje.





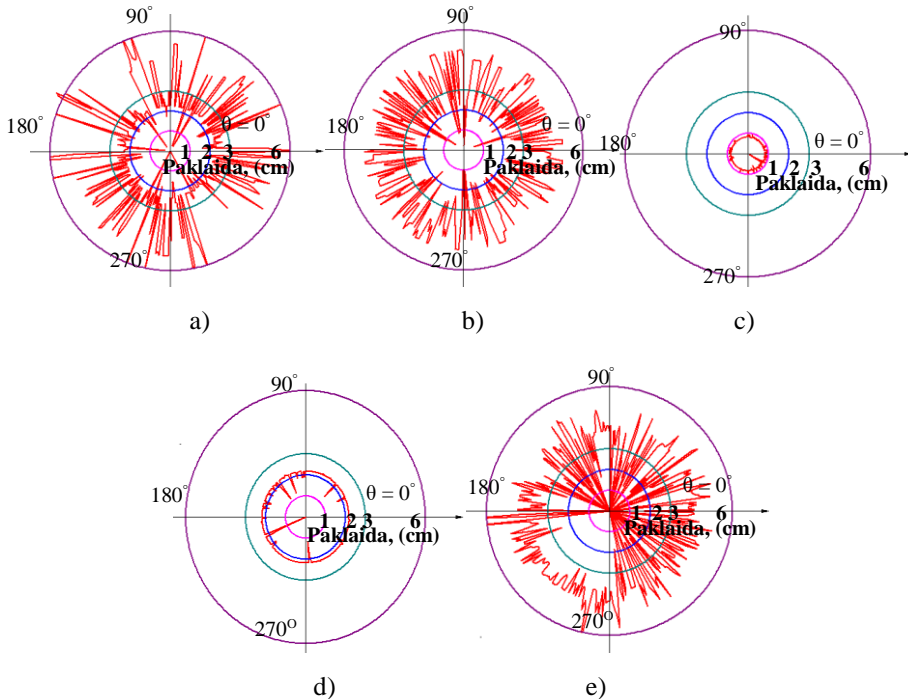
4.18 pav. Gamybinė patalpa Nr. 3 su kliūtimis, kurios susikongravusios: a) viršuje dešinėje; b) apačioje dešinėje; c) apačioje kairėje; d) viršuje kairėje; e) viduryje

11-ojo roboto padėties koordinatinių paieškos paklaida buvo analizuojama penkiuose kiekvienu atveju (4.18 pav.) skirtinguose patalpos taškuose: kraštinėse padėtyse, centre ir netoli kitų 10 mobiliųjų robotų. Išorinės valdymo sistemos nurodytos 11-ojo mobiliojo roboto padėties koordinatės buvo išdėstytos visomis kryptimis 3 metrų atstumu. 4.19 paveiksle parodyta, kaip kinta mobiliojo roboto padėties koordinatinių nustatymo paklaida, kai dinaminės kliūtys koncentruojasi gamybinės patalpos viršuje dešinėje (4.18 pav., a).



4.19 pav. Gauta paklaida 4.19 paveiksle (a) pavaizduotai situacijai, kai mobilusis robotas yra koordinatėse: a) [30,0 30,0] (taškas A); b) [30,0 70,0] (taškas B); c) [50,0 55,0] (taškas C); d) [70,0 66,0] (taškas D); e) [80,0 30,0] (taškas E)

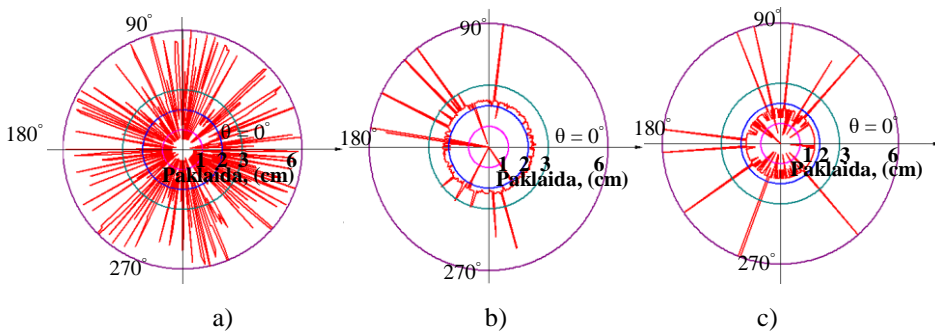
4.20 paveiksle parodyta, kaip kinta mobiliojo roboto padėties koordinatinių nustatymo paklaida, kai dinaminės kliūtys koncentruojasi gamybinės patalpos apačioje, dešinėje (4.18, b).

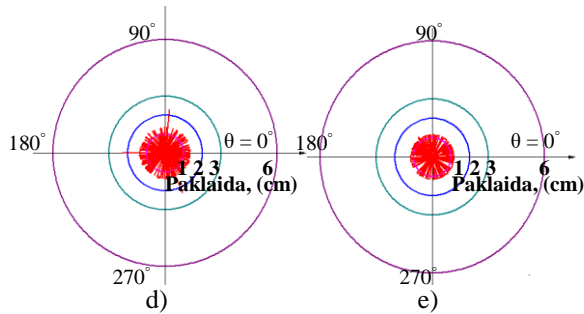


4.20 pav. Gauta paklaida 4.19 paveiksle (b) pavaizduotai situacijai, kai mobilusis robotas yra koordinatėse: a) [20,0 20,0] (taškas A); b) [20,0 70,0] (taškas B); c) [50,0 50,0] (taškas C); d) [70,0 75,0] (taškas D); e) [80,0 35,0] (taškas E)

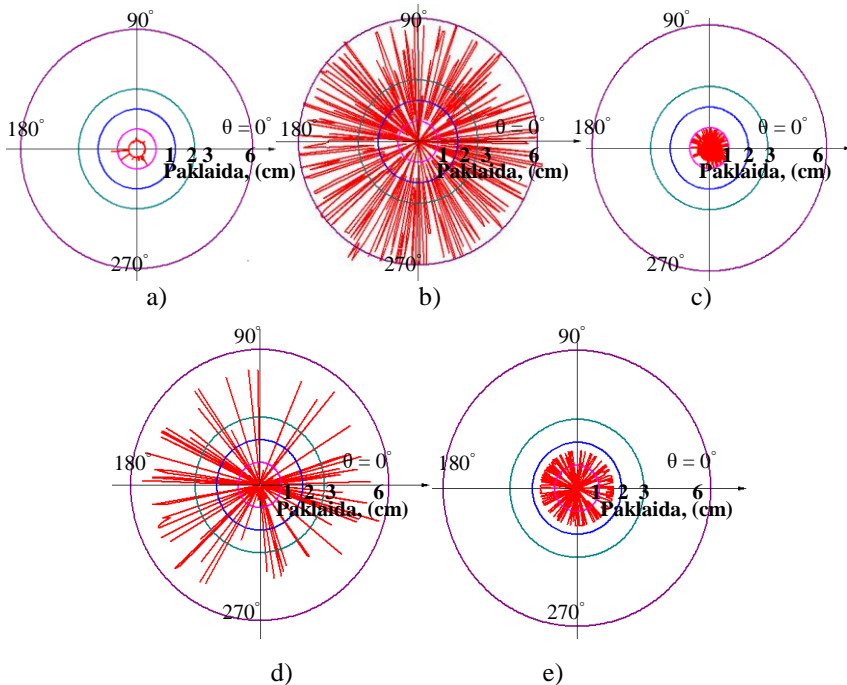
4.21 paveiksle parodyta, kaip kinta mobiliojo roboto padėties koordinatinių nustatymo paklaida, kai dinaminės kliūtys koncentruojasi gamybinės patalpos apačioje, kairėje (4.18 pav., c).

4.22 paveiksle parodyta, kaip kinta mobiliojo roboto padėties koordinatinių nustatymo paklaida, kai dinaminės kliūtys koncentruojasi gamybinės patalpos viršuje, kairėje (4.18 pav., d).





4.21 pav. Gauta paklaida 4.19 paveiksle (c) pavaizduotai situacijai, kai mobilusis robotas yra koordinatėse: a) [20,0 20,0] (taškas A); b) [20,0 80,0] (taškas B); c) [50,0 55,0] (taškas C); d) [80,0 85,0] (taškas D); e) [80,0 38,0] (taškas E)



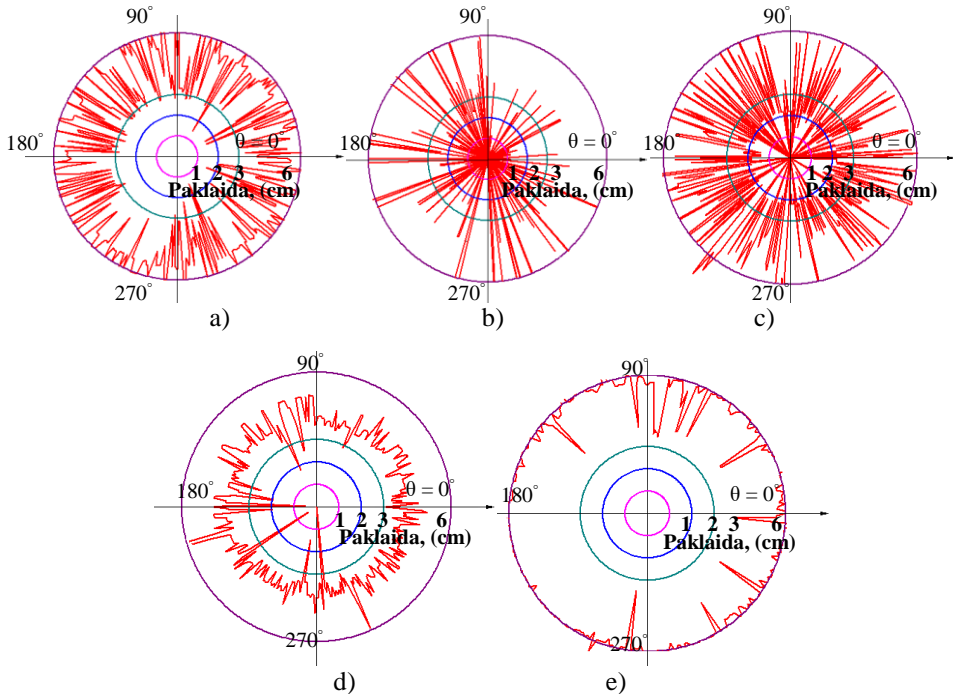
4.22 pav. Gauta paklaida 4.19 paveiksle (d) pavaizduotai situacijai, kai mobilusis robotas yra koordinatėse: a) [27,0 20,0] (taškas A); b) [20,0 73,0] (taškas B); c) [50,0 55,0] (taškas C); d) [85,0 80,0] (taškas D); e) [90,0 20,0] (taškas E)

4.23 paveiksle parodyta, kaip kinta mobiliojo roboto padėties koordinatėių nustatymo paklaida, kai dinaminės kliūtys koncentruojasi gamybinės patalpos viduryje (4.18 pav., e).

Iš 4.19–4.23 paveiksluose pateiktų paklaidos grafikų matyti, kad kuo didesnė dinaminė kliūčių koncentracija tam tikroje patalpos vietoje, tuo su didesne paklaida yra nustatomos mobiliojo roboto padėties koordinatės.

Didžiausia paklaida gaunama tose vietose, kur mobilusis robotas yra kitų judančių transporto priemonių apsuptyje; tačiau ši paklaida neviršija 6 cm. Tose

pozicijose, kuriose atstumas tarp roboto ir dinaminių kliūčių didesnis, padėties koordinatės nustatomos su 1 cm paklaida.



4.23 pav. Gauta paklaida 4.19 paveiksle (e) pavaizduotai situacijai, kai mobilusis robotas yra koordinatėse: a) [30,0 40,0] (taškas A); b) [20,0 75,0] (taškas B); c) [50,0 50,0] (taškas C); d) [80,0 75,0] (taškas D); e) [80,0 30,0] (taškas E)

Paveiksluose taip pat matyti, kad yra tokių pozicijų ir taškų, kuriuose koordinatės nustatytos mažesniu negu 6 cm tikslumu. Šiose vietose koordinatžių nustatymo tikslumas siekia 7 cm ribas, nes kai kurie robotai yra netoli nustatytos kritinės atstumo ribos.

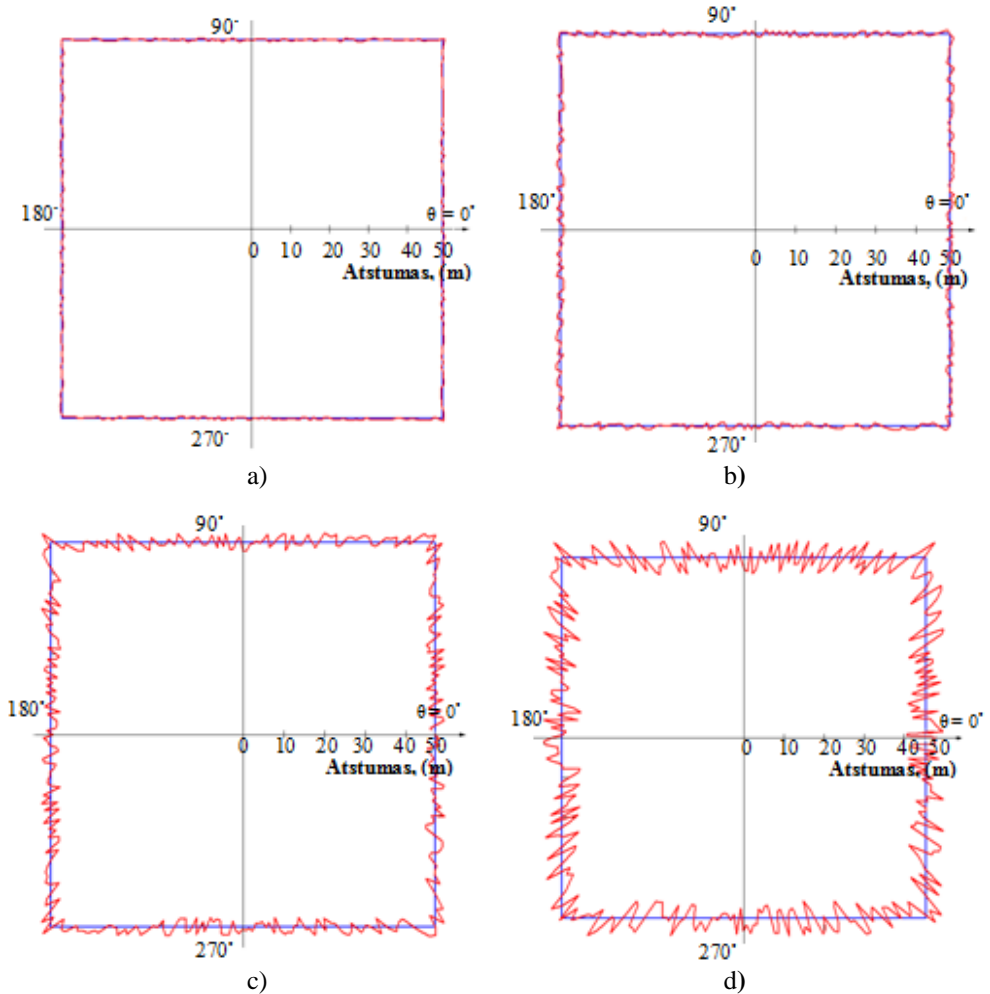
Atlikti tyrimai rodo, kad mobiliojo roboto padėties koordinatės patartina tikrinti ne rečiau kaip kas 1 s, kad net ir blogiausiu atveju robotas nuo nurodytų koordinatžių nenukryptų daugiau nei 1 m.

4.3. Mobiliojo roboto skenerio paklaidos įtakos įvertinimas

Mobiliojo roboto skenavimo sistema, dirbdama su tam tikra paklaida, padėties koordinatžių nustatymo tikslumui turi mažesnę įtaką negu naudojamo skenerio gaunama matavimo paklaida. Taip atsitinka dėl to, kad taikant metodus, kuriais yra nustatomos mobiliojo roboto koordinatės, vykdomas skenavimo sistemų gaunamų duomenų integravimas, tad galutinis rezultatas įvertinant skenerio spindulių paklaidos ženklus duoda mažesnę paklaidą.

Modeliuojant buvo iširta, kaip skenerio gaunama paklaida veikia mobiliojo roboto padėties koordinatžių nustatymo tikslumą. Buvo analizuojami trys atvejai: kai skenerio gaunama paklaida yra $\pm 1\%$, $\pm 2\%$ ir $\pm 5\%$, esant maksimaliam 70 metrų skenavimo spinduliui. Tiriamos gamybinės patalpos (4.7 pav.) dydis yra 100 m×100

m. Skenuojant tokią patalpą (4.7 pav.) iš taško A [50,0 50,0], didžiausias galimas skenerio spindulio ilgis yra 70 metrų. 4.24 paveiksle matote, kaip atrodo mobiliojo roboto (raudonos spalvos linija) ir supervizoriaus (mėlynos spalvos linija) profiliai, kai yra įvertinta skenerio gaunama paklaida. Mobiliojo roboto sudaryto profilio iškraipymus sąlygoja skenerio matavimo paklaida.



4.24 pav. Mobiliojo roboto (raudona linija) ir supervizoriaus (mėlyna linija) gauti profilių palyginimai, kai skenerio gaunama paklaida yra ribose: a) $\pm 1\%$ (70 cm); b) $\pm 2\%$ (1,4 m); c) $\pm 5\%$ (3,5 m); d) $\pm 10\%$ (7,0 m)

Tarus, kad skenerio gaunama paklaida yra ribose $\pm 1\%$ (70 cm), mobiliojo roboto padėties koordinatčių pagal žinomos patalpos profilio svorio centrą metodu koordinatės nustatomos su 0,03 % (2 cm) paklaida.

Mobiliojo roboto padėties koordinatčių nustatymo naudojant žinomos patalpos profilio svorio centrą metodo privalumas yra tas, kad kai skenerio gaunama paklaida yra ribose $\pm 2\%$ (1,4 m), padėties koordinatės nustatomos su 0,09 % (6 cm) paklaida, kai paklaida $\pm 5\%$ (3,5 m), padėties koordinatės nustatomos su 0,16 %

paklaida (11 cm), o kai paklaida $\pm 10\%$ (7,0 m), padėties koordinatės nustatomos su 0,7 % (50 cm) paklaida. Šio metodo duodama paklaida nustatant svorio centro koordinates yra vidutiniškai 25 kartus mažesnė negu skenerio gaunama paklaida.

4.4. Rekomendacijos lanksčios automatizuotos gamybos sistemai, naudojančiai mobiliuosius robotus detalėms transportuoti

Įvertinus tyrimų metu gautus duomenis, galima apibrėžti pagrindinius mobiliojo roboto padėties koordinacių nustatymo sistemos reikalavimus ir rekomendacijas.

Pirmiausia reikia pažymėti, kad mobiliojo roboto padėties koordinatėms nustatyti turi būti taikomas metodas, pagrįstas svorio centro panaudojimu.

Reikalavimai ir rekomendacijos gamybinei patalpai. Kadangi koordinacių paieškos trukmė priklauso nuo statinių kliūčių išsidėstymo konfigūracijos, todėl gamybinę patalpą reikia organizuoti taip, kad įrenginiai (staklės ir kt.) bei kitos zonos būtų išdėstytos palei sienas.

Reikalavimai ir rekomendacijos gamybinių įrenginių pozicionavimo sistemai. Gamybinių įrenginių pozicionavimo sistemos turi fiksuoti mobilųjį robotą taip, kad jo manipuliacinė sistema visada būtų tiksliai nustatytoje padėtyje, arba pačios atlikti tikslų iš mobiliojo roboto perimto daikto pozicionavimą. Patartina roboto pozicionavimui naudoti pastatymo į doką akumuliatorių pakrovimui sistemą. Leistinos paklaidos nuo tikslios vietos yra labai įvairios ir priklauso nuo pačių gamybinių mechanizmų konstrukcijos bei nuo to, kokio tikslumo reikia perduodant krovinius iš roboto – staklėms ir iš staklių – robotui.

Reikalavimai ir rekomendacijos lanksčios automatizuotos gamybos sistemai:

1. Būtina, kad mobilusis robotas ir išorinė valdymo sistema (supervizorius) turėtų tą pačią patalpos profilio skenavimo pradžios kryptį.
2. Patartina, kad skenerio gaunama paklaida neviršytų $\pm 2\%$.
3. Mobiliojo roboto padėties koordinacių tikrinimo intervalas turėtų būti tuo dažnesnis, kuo didesnis roboto greitis. Patartina, kad maksimalus intervalas tarp matavimų intervalų neviršytų laiko, kol robotas nueina 1 metrą.
4. Mobilusis robotas prie doko turi priartėti priekiu, kad pastatymo į doką ir manipuliatorių pozicionavimas būtų atliktas tinkamai.

Reikalavimai ir rekomendacijos mobiliųjų robotų parametrų, naudojamiems lanksčioje automatizuotoje gamyboje:

1. Aplinkos skenavimas turi būti vykdomas kas 1 laipsnį.
2. Mobiliojo roboto koordinatės tikrinti reikia pozicionavimo pradžios taške. Į šią poziciją mobilusis robotas gali atvykti bet koku kampu ir esant skirtingai jo krypties orientacijai. Tačiau šiame taške būtina tinkamai pakeisti roboto kryptį, tad roboto važiuoklės konstrukcija turi būti tokia, kad jis galėtų pasisukti apie savo ašį nekeisdamas savo koordinacių, kad link pozicionavimo įrenginio jis judėtų priekiu ir sulėtinęs greitį.
3. Patartina padėties koordinatės tikrinti ne rečiau nei robotas įveikia 1 m atstumą, supervizoriui atsižvelgiant į roboto trasos posūkio momentus ir susidariusią aplinkos situaciją kitų judančių robotų atžvilgiu.

Reikalavimai ir rekomendacijos išorinei valdymo sistemai. Pageidautina, kad išorinė valdymo sistema tik perduotų reikiamą informaciją apie profilį, kur konkrečiu laiko momentu turi būti robotas, roboto išorinei valdymo sistemai. Tada robotas pats vykdytų esamų koordinačių nustatymo procedūrą ir jas perduotų supervizoriui tolimesniems sprendimams priimti. Supervizorius, planuodamas mobiliųjų robotų judėjimo trajektorijas, turi užtikrinti, kad roboto padėties koordinačių paieška būtų vykdoma tik tuo atveju, kai bet kokia kliūtis užstoja roboto skeneriui mažesnę negu $11,3^\circ$ profilio kampą.

4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad koordinačių paieškos trukmė ir nustatymo paklaida priklauso nuo kliūčių (tiek statinių, tiek dinaminių) išsidėstymo konfigūracijos.
2. Nustatyta, kad gamybinėje patalpoje, kurioje profilis sudaro neiškilaus daugiakampio pavidalą, yra pozicijų, kuriose nepavyksta apskaičiuoti roboto koordinatės reikiamu tikslumu.
3. Nustatyta, kad jei bet kokia patalpoje esanti statinė arba dinaminė kliūtis skenuojant aplinką skeneriui užstoja ne daugiau kaip $11,3^\circ$ skenuojamo profilio, pavyksta rasti mobiliojo roboto padėties koordinatės ne daugiau kaip su 6 cm paklaida.
4. Nustatyta, kad mobiliojo roboto padėties koordinatės turi būti tikrinamos tik tuo atveju, kai atstumas tarp jo ir kito artimiausio judančio objekto yra didesnis, negu skenuojant patalpą jis užstos $11,3^\circ$ aplinkos profilio.
5. Įvertinus tai, kad mobiliųjų robotų gamybinėje patalpoje yra daug, o supervizorius turi spręsti ne tik robotų navigacijos, bet ir užduočių skirstymo uždavinius, tikslinga mobiliojo roboto koordinačių apskaičiavimą pavesti atlikti pačiai roboto valdymo sistemai, o gautą rezultatą perduoti išorinei valdymo sistemai, kuri pasinaudodama gautais rezultatais toliau valdytų mobiliųjų robotą.
6. Eksperimentiškai nustatyta, kad mobilijam robotui esant prieš pozicionavimo įrenginį ir judant jo link padėties koordinatės nustatomos su 6 cm paklaida, net kai atstumas tarp roboto ir statinės kliūtis yra mažesnis negu 1 metras.

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad judančių objektų koordinacių nustatymo metodai, kurie yra taikomi praktikoje, ir jiems naudojami įvairūs algoritmai reikalauja papildomos išorinės aparatūros (žymės, švyturiai ir kt.). Vienintelis metodas, kuriame naudojamas skeneris aplinkai analizuoti, taip pat neužtikrina darbe iškelto tikslo pasiekimo, kadangi nustato kitų objektų padėtį žinomoje aplinkoje naudodamasis aplinkos charakteringaisiais taškais, esant nesudėtingos konfigūracijos patalpos profiliams.
2. Išplėtoti du mobiliojo roboto padėties koordinacių žinomoje aplinkoje nustatymo metodai, pagal kuriuos informacijai rinkti naudojamas tik roboto skeneris. Taikant pirmąjį metodą, kuris yra pagrįstas patalpos profilių sutapatinimu, sudarytas koordinacių paieškos algoritmas, nustatyta optimizavimo strategija, apskaičiuota koordinacių nustatymo trukmė įvairiems profiliams ir skenavimo žingsniui. Antruoju mobiliojo roboto padėties koordinacių žinomoje aplinkoje nustatymo metodu, kuris yra pagrįstas patalpos svorio centro panaudojimu, nustatyta, kad skenavimą reikia vykdyti žingsniu 1° , skenavimą vykdyti tik tada, kai dinaminės kliūtys neužstoja daugiau nei $11,3^\circ$ patalpos profilio, taip pat nustatyti reikalavimai patalpos profiliui.
3. Eksperimentiškai apskaičiuota, kad mobiliojo roboto padėties koordinatės yra nustatomos vidutiniškai 50 kartų greičiau taikant svorio centro metodą, o profilių sutapatinimo metodas taikytinas tik tuo atveju, kai robotai juda lėtai ar stovi vietoje. Nustatyta, kad jei tarp roboto ir kito artimiausio judančio objekto atstumas yra didesnis, negu skenuojant patalpą jis užstos $11,3^\circ$ patalpos profilio, padėties koordinatės nustatomos su ne didesne nei 6 cm paklaida. Nustatyta, kad patalpos profilio forma turi būti iškiliojo daugiakampio, atitinkamai joje išdėstant įrenginius.
4. Mobilųjų robotų, naudojamų lanksčioje automatizuotoje gamyboje, padėties koordinacių tikrinimo intervalas turėtų būti tuo tankesnis, kuo didesnis yra robotų judėjimo greitis. Patartina, kad maksimalus intervalas tarp matavimų neviršytų laiko, kol robotas nueina 1 metrą. Norint gauti patikimus rezultatus reikia, kad skenerio paklaida neviršytų $\pm 2-3\%$.

LITERATŪRA

1. JIANG L., NAM HOE L., LOON L. Integrated UWB and GPS Location Sensing System in Hospital Environment. *5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Application (ICIEA)*, June 15–17, 2010, Taichung. P. 286–289.
2. XU R., et al. A New Indoor Positioning System Architecture Using GPS Signals. *Open Access Journal of Sensors*, 2015, 15. P. 10074–10087. ISSN 1424-8220.
3. MULLONI A., WAGNER D., SCHMALSTIEG D., BARAKONYI I. Indoor Positioning and Navigation with Camera Phones. *Journal of Pervasive Computing*, April-June 2009, IEEE. Vol. 8, Issue 2. P. 22–31. ISBN 1536-1268.
4. URENA J., et al. Ultrasonic Local Positioning System for Mobile Robot Navigation: from Low to High Level Processing. *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, March 17–19, 2015, Seville, Spain, 2015. P. 3440–3445.
5. BISWAS J., VELOSO M. Wi-Fi Localization and Navigation for Autonomous Indoor Mobile Robots. *2010 IEEE International Conference on Robotic and Automation (ICRA)*, May, 2010. P. 4379–4384.
6. FISCHER G., DIETRICH B., WINKLER F. Bluetooth Indoor Localization System. *Proceeding of the 1st Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'04)*, 2004. P. 147–156.
7. BARANAUSKAS V., DERVINIENĖ A., ŠARKAUSKAS K. K., BARTKEVIČIUS S. Evaluation of the Mobile Robot Position According to the Profile of Known Environment. *Journal of Electronics and Electrical Engineering*, Kaunas: KTU, 2011, Vol. 109, No. 7. P. 85–88. ISSN 1392-1215.
8. BARANAUSKAS V., DERVINIENĖ A., ŠARKAUSKAS K. K., BARTKEVIČIUS S. Localization of a Robot According to the Centre of Mass an Environment Profile. *Journal of Electronics and Electrical Engineering*, Kaunas: KTU, 2011, Vol. 115, No. 9. P. 63–66. ISSN 1392-1215.
9. DISHA A. A Comparative Analysis on Indoor Positioning Techniques and Systems. *International Journal of Engineering Research and Applications, IJERA*, March-April 2013. Vol. 3, Issue 2. P. 1790–1796. ISSN 2248-9622.
10. EVENNOU F., MARX F. Advanced Integration of WiFi and Inertial Navigation Systems for Indoor Mobile Positioning. *Journal on Applied Signal Processing, 2006*, Hindawi Publishing Corporation EURASIP, Vol. 2006. P. 1–11.
11. ZHANG R., et al. The Indoor Localization Method Based on the Integration of RSSI and Inertial Sensor. *2014 IEE3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, October, 2014, Tokyo. P. 332–336.
12. FABIAN J. CLAYTON G. M. Error Analysis for Visual Odometry on Indoor, Wheeled Mobile Robots with 3D Sensors. *Journal of IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, Vol. 19, Issue. 6. P. 1896–1906. ISSN 1083-4435.
13. KREJSA J., VECHET S. Infrared Beacons Based Localization of Mobile Robot. *Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 2012, Vol. 117, No. 1. ISSN 1392-1215.
14. KIML S., LEE 1 J., LEE 2 I. O. Precise Indoor Localization System for a Mobile Robot Using Auto Calibration Algorithm. *13th International Conference on Advanced Robotics ICAR 2007*, August 21–24, Korea, 2007.
15. CANEDO-RODRIGUEZ A., et al. Particle Filter Robot Localization through Robust Fusion of Laser, Wi-Fi, Compass and a Network of External Cameras. *Journal of Information Fusion*, Elsevier, 2015, Vol. 27. P. 170–188.

16. AL NUAIMI K., KEMEL H. A Survey of Indoor Positioning Systems and Algorithms. *2011 International Conference on Innovations in Information Technology*. April, 2011, Abu Dhabi. P. 185–190. ISBN 978-1-4577-0311-9.
17. HAZAS M., HOPPER A., NOVEL A. Broadband Ultrasonic Location System for Improved Indoor Positioning. *Journal of Transactions on Mobile Computing*. Vol. 5, No. 5, May 2006. IEEE, 2006. Pp. 536–547. ISBN 1536-1233.
18. MEDINA C., SEGURA J. C., DEE la TORRE A. Ultrasound Indoor Positioning System Based on a Low-Power Wireless Sensor Network Providing Sub-Centimeter Accuracy. *Journal of Sensors*, 2013, 13(3). P. 3501–3526.
19. VORST P., et al. Indoor Positioning via Three Different RF Technologies. *2008 4th European Workshop on RFID Systems and Technologies (RFID SysTech)*, June, 2008, Germany. P. 1–10. ISBN 978-3-8007-3106-0.
20. MAO G., FIDAN B., ANDERSON B. Wireless Sensor Network Localization Techniques. *Journal of Computer Networks*, July, 2007. Vol. 51, No. 10. P. 2529–2553.
21. BOUET M., dos SANTOS A. L. RFID Tags: Positioning Principles and Localization Techniques. *1st IFIP Conference Wireless Days*, November, 2008, Dubai. P. 1–5. ISBN 978-1-4244-2829-8.
22. SAYRAFIAN-POUR K., PEREZ J. Robust Indoor Positioning Based on Received Signal Strength. In the *2nd International Conference on Pervasive Computing and Application*, 2007, July, 2007, Birmingham. P. 693–698. ISBN 978-1-4244-0971-6.
23. FENG C., TAN Z., et al. Received-Signal-Strength-Based Indoor Positioning Using Compressive Sensing. *Journal of Transaction on Mobile Computing*, 2012, Vol. 11, Issue 12. P. 1983–1993. ISBN 1536-1233.
24. SAFAK I. RFID-Based Indoor Localization Using Angle-of-Arrival and Return Time. *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, April, 2014, Trabzon. P. 100–103.
25. OMAR S., et al. Time of Arrival Estimation for WLAN Indoor Positioning Systems Using Matrix Pencil Super Resolution Algorithm. *Proceedings of the 2nd Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, 2005. P. 11–20.
26. WINKLER F., FISCHER E., et al. An Indoor Localization System Based on DTDOA for Different Wireless LAN Systems. *Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC06)*, 2006. P. 117–122.
27. CHIN-DE W., et al. Hybrid TDOA/AOA Indoor Positioning and Tracking Using Extended Kalman Filters. *63rd Vehicular Technology Conference*, 2006. P. 1058–1062.
28. POVALAČ A., ŠEBESTA J. Phase of Arrival Ranging Method for UHF RFID Tags Using Instantaneous Frequency Measurement. *2010 Conference Proceedings of ICECom*, September, 2010, Dubrovnik. P. 1–4. ISBN 978-1-61284-998-0.
29. CHEN Z., ZOU H., JIANG H., et al. Fusion of Wi-Fi, Smartphone Sensor and Landmarks Using the Kalman Filter for Indoor Localization. *Journal of Sensors*, 2015, Vol. 15, No. 1. P. 715–732.
30. CHEN X., JIA Y. Indoor Localization for Mobile Robots Using Lampshade Corners as Landmarks: Visual System Calibration, Feature Extraction and Experiments. *Journal of Control, Automation and Systems*, December, 2014, Vol. 12, Issue 6. P. 1313–1322.
31. DEAK G., CURRAN K., CONDELL J. A Survey of Active and Passive Indoor Localization Systems. *Computer Communication*. *Journal of Computer Communication*, September 15, 2012, Vol. 35, Issue 16. Elsevier, 2012. P. 1939–1954.

32. BORENSTEIN J., EVERETT H. R., FENG L., WEHE D. Mobile Robot Positioning: Sensors and Techniques. *Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots*, April, 1997, Vol. 14, No. 4. P. 231–249.
33. GRANADOS-CRUZ M., et al. Triangulation Based Indoor Robot Localization Using Extended FIR/Kalman Filtering. *2014 11th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, September–October, 2014. P. 1–5. ISBN 978-1-4799-6228-0.
34. FARID Z., NORDIN R., ISMAIL M. Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2013, Vol. 2013. ISSN 2090-7141.
35. PIERLOT V., et al. A New Three-Object Triangulation Algorithm Based on the Power Center of Three Circles. *Journal of Communications in Computer and Information Science*, 2011, Vol. 161. P. 248–262.
36. DEJEAN G., et al. COIN-GPS: Indoor Localization from Direct GPS Receiving. *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 2014, New York. P. 301–314. ISBN 978-1-4503-2793-0.
37. NI L. M., et al. Landmark: Indoor Location Sensing Using Active RFID. *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2003, March, 2003, Fort Worth, TX. P. 407–415. ISBN 0-7695-1893-1.
38. WEEKLY K., ZOU H., et al. Indoor Occupant Positioning System Using Active RFID Deployment and Particle Filters. *2014 IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, May, 2014, Marina Del Ray, CA. P. 35–42.
39. RÖHRIG C., HEß D., FRANK K. Constrained Kalman Filtering for Indoor Localization of Transport Vehicles Using Floor-Installed HF RFID Transponders. *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2015)*, April, 2015. P. 113–120.
40. TING S. L., KOWOK S. K., ALBERT H. C. The Study on Using Passive RFID Tags for Indoor Positioning. *International Journal of Engineering Business Management*, February, 2011, Vol. 3, No. 1. P. 9–15. ISBN 1847-9790.
41. MONTASER A., MOSELHI O. RFID Indoor Location Identification for Construction Projects. *Journal of Automation in Construction*, April, 2014, Vol. 39, Elsevier. P. 167–179.
42. KOYUNCU H., YANG S. A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2010, Vol. 10, No 4. P. 121–128. ISSN 1738-7906.
43. ILKOVIČOVA L. Barcode Based Localization System in Indoor Environment. *Journal of Geoinformatics FCE CTU*, 2013, Vol. 13. P. 31–36. ISSN 1802-2669.
44. LIN G., CHEN X. A Robot Indoor Position and Orientation Method Based on 2D Barcode Landmark. *Journal of Computers*, June 2011, Vol. 6, No. 6. P. 1191–1197. ISSN 1796-203X.
45. CHEN W., et al. Precise Localization of Mobile Robots via Odometry and Wireless Sensor Network. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, Vol. 10. P. 1–13.
46. DUDEK G., JENKIN M. Inertial Sensors, GPS and Odometry. *Springer Handbook of Robotics*, 2008, Springer Berlin Heidelberg, 2008. P. 477–580.

47. EU K. S., YAP K. M., TEE T. H. Single Beacon Indoor Localization System Based on Counter-Synchronized Compass and RSSI. *Journal of Applied Mechanics and Materials*, September, 2014. Vol. 627. P. 217–222.
48. SHIMSHONI I. On Mobile Robot Localization from Landmark Bearings. *International Conference on Robotics and Automation*, 2001, Vol. 4. P. 3605–3611. ISBN 0-7803-6576-3.
49. SE S., LOWE D., LITTLE J. Mobile Robot Localization and Mapping with Uncertainty Using Scale-Invariant Visual Landmarks. *International Journal of Robotics Research*, 2002, Vol. 21, No. 8. P. 735–758.
50. OHM C., et al. Where is the Landmark? Eye Tracking Studies in Large-Scale Indoor Environments. *2nd International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research Co-located with the 8th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2014)*, September 2014, Vienna, Austria. P. 47–51.
51. LI Y., GRANDALL D., HUTTENLOCHER D. Landmark Classification in Large-Scale Image Collections. *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision*, September, 2009. P. 1957–1964. ISBN 1550-5499.
52. ANGERMANN M. FootSLAM: Pedestrian Simultaneous Localization and Mapping without Exteroceptive Sensors Hitchhiking on Human Perception and Cognition. *Proceedings of the IEEE*, May, 2012, Vol. 100. P. 1840–1848.
53. GONG J., et al. A Reliable and Accurate Indoor Localization Method Using Phone Inertial Sensors. *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*, New York, 2012. P. 421–430.
54. BIBER P., ANDREASSON H., DUCKETT T., SCHILLING A. 3D Modelling of Indoor Environments by a Mobile Robot with a Laser Scanner and Panoramic Camera. *2004 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004, Vol. 4. P. 3430–3435. ISBN. 0-7803-8463-6.
55. HENRY P., KRAININ M., et al. RGB-D Mapping: Using Depth Cameras for Dense 3D Modelling of Indoor Environments. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2013, Vol. 79. P. 477–491.
56. CHOU Y., LIU J. A Robotic Indoor 3D Mapping System Using 2D Laser Range Finder Mounted on a Rotating Four-Bar Linkage of a Mobile Platform. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2012, Vol. 10. P. 1–10.
57. HADIJ S., KAZI S., et al. Simultaneous Localization and Mapping Algorithms. *Journal of Technology*, December 2014, Vol. 73, No. 2. P. 25–29.
58. TOSCHI I., RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ P., REMONDINO F., MINTO S., ORLANDINI S., FULLER A. Accuracy Evaluation of a Mobile Mapping System with Advanced Statistical Methods. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, February, 2015, Vol. XL-5/W4. P. 245–253.
59. ZIKOS N., PETRIDIS V. 6-Dof Low Dimensionality SLAM (L-SLAM). *Journal of Intelligent Robot System*, 2014, Vol. 79. P. 55–72.
60. ENGEL J., SCHOPS T., CREMERS D. LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2014. Vol. 8690, P. 834–849.
61. MUR-ARTAL R., MONTIEL M. M., TARDOS J. ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System. *Journal of Computer Vision and Recognition*, 2015. P. 1147–1163. ISBN 1552-3098.
62. BOURMAUD G., MEGRET R. Robust Large Scale Monocular Visual SLAM. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015. P. 1638–1647.

63. LEE S., et al. DV-SLAM (Dual-Sensor-Based Vector-FieldSLAM) and Observability Analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, February, 2015, Vol. 62, No. 2. P. 1101–1112. ISBN 0278-0046.
64. SAITO T., KURODA Y. Mobile Robot Localization Using Multiple Observations Based on Place Recognition and GPS. *2013 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May, 2013. P. 1548–1553. ISBN 1050-4729.
65. LEE S., SONG J.-B. Mobile Robot Localization Using Range Sensors: Consecutive Scanning and Cooperative Scanning. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, March 2005, Vol. 3, No. 1. P. 1–14.
66. HIMMELBLAU D. M. Applied Nonlinear Programming. The University of Texas, Austin: Texas McGraw-Hill Book Company, 1972.
67. SILVERMAN M. C., NIES D., JUNG B., SUKHATME S. Staying Alive: A Docking Station for Autonomous Robot Recharging. *2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May, 2002, Washington. P. 1050–1055.
68. KIM K.H., et al. Development of Docking System for Mobile Robots Using Cheap Infrared Sensors. *1st International Conference on Sensing Technology*, November 21–23, 2005, Palmerston North, New Zealand. P. 287–291.
69. VARUN RAJ K., et al. A Beacon-Based Docking System for an Autonomous Mobile Robot. *13th National Conference on Mechanisms and Machines (NaCoMM07)*, December 12–13, 2007, IISc, Bangalore, India. P. 1–7.
70. DRENNER A., PAPANIKOLOPOULOS N. Autonomous Multi-Robot Docking. *1st Workshop on Modelling and Control of Complex Systems*, June, Cyprus, 2005.
71. MORE. G., ROOT T., JOHNSTON D., WOLBER B. Method and Apparatus for Docking a Robotic Device with Charging Station. *United States Patent*, No. US8.352.114 B2, January 8, 2013.
72. ABRAMSON S. Robot Docking Station and Robot for Use Therewith. *United States Patent*, No. US 2011/0130875 A1, June 2, 2011.
73. GEORGE R., et al. W Recharge Docking System for Mobile Robot. *United States Patent*, No. 4.777.416, October 11, 1988.
74. WANG W., YU W., ZHANG J. A Mobile Multi-robot System with Docking and Manipulating Capabilities. *Open Access International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 7, No. 1, 2010. P. 9–18. ISSN 1729-8806.
75. ADEPT MOBILE ROBOTS. Seekur Jr Research Platform. Specification. [žiūrėta 2015-11-20]. Prieiga per internetą <http://www.mobilerobots.com/Libraries/Downloads/SeekurJr-SKRJ-RevA.sflb.ashx>
76. BARTKEVIČIUS S. K., ŠARKAUSKAS K. K. Programų paketas CENTAURUS: modeliavimas, identifikavimas, optimizavimas: mokomoji knyga. Kaunas: Technologija, 2004. P. 95. ISBN 9955-09-568-7.
77. BARTKEVIČIUS S. K., ŠARKAUSKAS K. K. Spalvoti Petri tinklai. Programų paketas CENTAURUS CPN: mokomoji knyga. Kaunas: Technologija, 2008. P. 59. ISBN 9789955254317.
78. SKEIVALAS J., DARGIS R. Erdvinių koordinačių, nustatytų trilateracijos metodu, tikslumas. *Žurnalas Geodezija ir kartografija*, 2006, XXXII t., Nr. 4, P. 92–96.
79. KAŽYS R., MAŽEIKA L., TUMŠYS O. Ultrasonic Method for Measurement of Mobile Object Coordinates. *Journal of Ultrasound*, Vol. 63, No. 4, 2008. P. 20–24. ISSN 1392-2114.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Tarptautinėse duomenų bazėse esančiuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

1. Baranauskas V., Bartkevičius S. K., Fiodorova O., Šarkauskas K. K. Detecting the Mobile Robot Position Using the Profile of Known Environment. *Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering*. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1215. 2013, Vol. 19, No. 7. P. 7–10. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Computers & Applied Sciences Complete; Central & Eastern European Academic Source]. [IF (E): 0,445 (2013)].

Kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose

1. Bartkevičius S. K., Dervinienė A., Fiodorova O., Šarkauskas K. K. Mobile Robot Coordinates Detection Problems Using Centre of Gravity of Visible Environment. *Electrical and Control Technologies: Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2012 / Kaunas University of Technology, IFAC Committee of National Lithuanian Organisation, Lithuanian Electricity Association*. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-5934. 2012, P. 131–134. [Conference Proceedings Citation Index].
2. Bartkevičius S. K., Fiodorova O., Plerpa E., Šarkauskas K. K. Localization of a Mobile Robot According to the Centre of Gravity of Known Environment. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS'2012: proceedings of the 7th international conference, May 03–04, 2012, Panevėžys, Lithuania / Kaunas University of Technology Panevezys Institute, Panevezys Technology and Science Park, Intelligent Transport Systems, Poland, Tallin University of Technology, Riga Technical University*. Kaunas: Technologija, 2012, ISBN 9786090205716. P. 38–43. [Conference Proceedings Citation Index].

SL344. 2016-07-19, 11,25 leidyb. apsk. l. Tiražas 10 egz. Užsakymas 283.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas