

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

ILZE ANDERSONE

**HIBRĪDAS KARŠU APVIENOŠANAS METODES
IZSTRĀDĀŠANA UN REALIZĒŠANA**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Rīga 2014

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte

Lietišķo datorsistēmu institūts

ILZE ANDERSONE

Doktora studiju programmas „Datorsistēmas” doktorante

**HIBRĪDAS KARŠU APVIENOŠANAS METODES
IZSTRĀDĀŠANA UN REALIZĒŠANA**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Zinātniskais vadītājs

Dr.sc.ing., asoc. profesors

A. NIKITENKO

Rīga 2014

UDK 004.414.2(043)

An 138

Andersone I. Hibrīdas karšu apvienošanas metodes izstrādāšana un realizēšana. Promocijas darba kopsavilkums. -R.:RTU, 2014.-58 lpp.

Iespiests saskaņā ar DITF LDI padomes 2013. gada 12. septembra lēmumu, protokols Nr. 87.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

ISBN 978-9934-507-67-0

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014.gada 8. septembrī Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Meža ielā 1/3, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE OPONENTI:

Profesors, Dr.habil.sc.comp. Valērijs Zagurskis
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Pēteris Rivža
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Profesors, PhD, Mart Tamre
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

APSTIPRINĀJUMS

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Ilze Andersone (paraksts)

Datums: 04.04.2014.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus un bibliogrāfiju. Promocijas darbā ir 75 attēli un 18 tabulas, un pamattekstis ir 156 lapaspuses. Bibliogrāfiskais saraksts satur 91 avotu nosaukumus. Darbam pievienoti 3 pielikumi.

SATURS

IEVADS	6
1. KARŠU SASTĀDĪŠANA DAUDZU ROBOTU SISTĒMĀS	10
1.1. KARŠU SASTĀDĪŠANAS AR DAUDZU ROBOTU SISTĒMĀM PAMATOJUMS	10
1.2. ROBOTU KARŠU APVIENOŠANA	11
1.3. KARŠU APVIENOŠANAS ĪPAŠĪBAS	11
1.4. KARŠU APVIENOŠANAS METOŽU APSKATS	12
1.5. KOPSAVILKUMS	14
2. KARŠU APVIENOŠANA PIE NEZINĀMĀM ROBOTU POZĪCIJĀM.....	15
2.1. LOKĀLĀ KARŠU APVIENOŠANA	15
2.2. GLOBĀLĀ KARŠU APVIENOŠANA	17
2.3. KOPSAVILKUMS	18
3. REMMERC – METODEDE UZTICAMAI KARŠU APVIENOŠANAI.....	19
3.1. KARŠU APVIENOŠANAS HIPOTĒZES UN TO ATSPUGUĻOŠANA	20
3.2. GLOBĀLĀ KARŠU APVIENOŠANA	21
3.3. LOKĀLĀ KARŠU APVIENOŠANA	26
3.4. KOPSAVILKUMS	30
4. KARŠU SASTĀDĪŠANAS SISTĒMAS REALIZĀCIJA	31
4.1. DAUDZU ROBOTU SISTĒMAS APRAKSTS	31
4.2. BINĀRĀ BEIESA FILTRA KARŠU SASTĀDĪŠANA	32
4.3. MODIFICĒTA BINĀRĀ BEIESA FILTRA KARŠU SASTĀDĪŠANA	33
4.4. KARŠU SASTĀDĪŠANAS SISTĒMAS DARBĪBAS TESTS	34
4.5. KOPSAVILKUMS	35
5. KARŠU APVIENOŠANAS METODEDES REALIZĀCIJA	36
5.1. EKSPERIMENTĀLĀS SISTĒMAS APRAKSTS	36
5.2. KARŠU APVIENOŠANAS HIPOTĒZES NOVĒRTĒJUMA PARAMETRU IZVĒLĒŠANĀS	36
5.3. IZSTRĀDĀTĀS METODEDES REMMERC DARBĪBAS NOVĒRTĒŠANA.....	39
5.4. KOPSAVILKUMS	50
6. SECINĀJUMI UN REZULTĀTI	51
6.1. REMMERC METODEDES DARBĪBAS NOVĒRTĒJUMS	51
6.2. DARBA TEORĒTISKIE REZULTĀTI	54
6.3. DARBA PRAKTISKIE REZULTĀTI	55
6.4. TURPMĀKO PĒTĪJUMU VIRZIENI	55
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	56

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Autonomu mobilo robotu izstrāde ir aktuāls pētījumu apgabals mākslīgajā intelektā jau kopš 1980.-ajiem gadiem [Thr 2002]. Pētījumu motivācija ir daudzie autonomu mobilo robotu potenciālie pielietojuma veidi, kas iekļauj precīzo lauksaimniecību, telpu tīrīšanu, zāles pļaušanu u.c. Viena no fundamentālām problēmām mobilajā robotikā, kas vēl arvien tiek risināta, ir apkārtējās vides **kartes sastādīšanas** problēma [Thr 2005].

Karšu sastādīšanai ar vairākiem robotiem ir vairākas priekšrocības, kuras to padara par pievilcīgu alternatīvu kartes sastādīšanai ar vienu robotu: ātrāka telpas izpēte, precīzāka kartes sastādīšanas iespēja, augstāka bojājumpiecietība. Tomēr šajā gadījumā rodas vairākas jaunas problēmas, kas ir specifiskas tieši vairāku robotu karšu sastādīšanai. Viena no šīm problēmām ir karšu apvienošana – vairāku robotu lokālo karšu sapludināšana globālajā kartē.

Eksistējošās karšu apvienošanas metodes piedāvā dažādus risinājumus gadījumam, kad ir zināms robotu karšu savstarpējais novietojums [Thr 1998, Sim 2000, Bur 2002, Ko 2003]. Karšu apvienošana pie nezināmām robotu savstarpējām pozīcijām līdz šim ir aplūkota galvenokārt no divu karšu savstarpējās transformācijas aspekta (lokālā karšu apvienošana) [Ami 2005, Bir 2006, Car 2008, Adl 2008], bet, atbilstoši literatūras analīzes rezultātiem, neeksistē karšu apvienošanas metodes, kas risinātu atgriezeniskas un uzticamas karšu apvienošanas problēmu vairāk kā divu robotu gadījumā (globālā karšu apvienošana).

Promocijas darbā tiek aplūkota karšu sastādīšana un apvienošana autonomā daudzu robotu sistēmā, kas ņem vērā gan lokālo, gan globālo karšu apvienošanas aspektu. Uzmanība tiek pievērsta gan karšu savstarpējās transformācijas meklēšanai, gan arī karšu apvienošanas procesam karšu sastādīšanas laikā, īpaši padziļināti pievēršoties karšu apvienošanas atgriezeniskuma nodrošināšanai.

Darba mērķis

Promocijas **darba mērķis** ir izstrādāt un realizēt metodi globālās kartes iegūšanai daudzu robotu sistēmās, kas spēj nodrošināt robotu karšu apvienošanas atgriezeniskumu un dinamiskumu karšu sastādīšanas laikā.

Promocijas darbā izstrādātā metode piedāvā alternatīvu risinājumu, kā apvienot metriskas robotu sastādītas kartes un kā rīkoties kļūdainas karšu apvienošanas gadījumā. Izstrādājamā metode risina karšu apvienošanas problēmu gan lokālā (divu metrisku karšu apvienošana bez

informācijas par to savstarpējo novietojumu), gan globālā (rezultāta pārbaude un karšu apvienošanas atgriezeniskums) līmenī. Izstrādātā metode ir praktiski realizēta programmatūrā, un tās darbība pārbaudīta ar kartēm, kuras ir sastādītas reālā Rīgas Tehniskajā universitātē izstrādātā autonomu robotu sistēmā.

Darba uzdevumi

Lai sasniegtu mērķi, darbā izvirzīti šādi uzdevumi:

- Jāanalizē esošā situācija karšu sastādīšanā ar robotu komandām un jāidentificē esošie daļējie risinājumi promocijas darbā aplūkotajā problēmsfērā – metrisku karšu sastādīšanā un apvienošanā.
- Jādefinē promocijas darbā aplūkotā problēma un prasības pret izstrādājamo karšu apvienošanas metodi.
- Jāizstrādā metode daudzu robotu karšu apvienošanai, kura risinātu gan lokāla, gan globāla līmeņa karšu apvienošanas problēmu pie nezināma robotu relatīvā novietojuma .
- Jāizstrādā karšu sastādīšanas metode eksistējošai daudzu robotu sistēmai, kura spēj sastādīt apkārtējās vides karti.
- Jārealizē izstrādātā karšu apvienošanas metode programmatūrā un jāveic ar to praktiski eksperimenti, lai novērtētu metodes priekšrocības un trūkumus, kā arī analizētu tās praktiskā pielietojuma iespējas.
- Jāsniedz izstrādātās metodes darbības un iespējamā praktiskā pielietojuma novērtējums.

Zinātniskais jauninājums un praktiskā vērtība

Darba **zinātniskais jauninājums** ir metode uzticamai karšu apvienošanai, kuras pamatā ir hipotēžu koka datu struktūras izmantošana karšu apvienošanā, kā arī hipotēžu apstrādes algoritmi, kas ļauj manipulēt ar hipotēžu koku. Metodes nepieciešamība ir pamatota ar eksistējošo karšu apvienošanas metožu analīzi un tajā konstatēto metožu nespēju karšu sastādīšanas laikā atgriezeniski un dinamiski apvienot vairāk kā divas robotu lokālās kartes, ja robotu savstarpējās pozīcijas nav zināmas..

Darba **praktiskā vērtība** ir izstrādātā uzticamas karšu apvienošanas metode, kas kombinē un īsteno gan karšu apvienošanas lokālo, gan globālo aspektus. Abu aspektu realizēšana ļauj metodei gan atrast ticamus apvienojumus divu robotu karšu starpā, gan arī autonomi sastādīt visu sistēmā darbojošos robotu globālo karti ar iespēju kļūdas gadījumā,

nezaudējot jaunākos karšu datus, atcelt karšu apvienošanu. Izstrādājot darbu, ir iegūti šādi **praktiski rezultāti**:

- Ir apkopota un analizēta esošā situācija karšu apvienošanas jomā;
- Balstoties uz karšu apvienošanas metožu analīzi, ir identificēti un definēti divi karšu apvienošanas aspekti – lokālā karšu apvienošana un globālā karšu apvienošana;
- Ir izstrādāta daudzu robotu karšu apvienošanas metode uzticamai karšu apvienošanai, kura risina lokālas un globālas karšu apvienošanas problēmu pie nezināma robotu relatīvā novietojuma, ļaujot veikt atgriezenisku karšu apvienošanu;
- Ir izstrādāts karšu apvienošanas hipotēžu novērtējums, kas dod iespēju novērtēt divu karšu kopīgā apgabala līdzību pie zināmās transformācijas, ņemot vērā to, ka kartes ir lokāli neprecīzas, kā arī sniegtas rekomendācijas novērtējuma izmantošanai;
- Ir izstrādāts algoritms daudzu robotu karšu sastādīšanai vidē, kurā robotiem ir pieejami tikai tuva attāluma sensori, bet ir zināmas to atrašanās vietas neatkarīgi no sastādītās kartes.
- Eksperimentāli ir pierādīts, ka izstrādātā karšu apvienošanas metode spēj autonomi sastādīt vismaz daļēju globālo karti daudzu robotu sistēmā ar vairāk kā diviem robotiem, identificēt konfliktus izvirzītās karšu apvienošanas hipotēzēs, izslēgt šādas hipotēzes bez datu zudumiem un sastādīt jaunu globālo karti, ņemot vērā iepriekšējo pieredzi.

Darba aprobācija

1. Andersone I. The Characteristics of the Map Merging Methods: A Survey // Scientific Journal of Riga Technical University. Computer Sciences. - Applied Computer Systems, 2010, 113.-121. lpp. Iekļauts De Gruyter (agrāk Versita), DBLP, io-port.net datu bāzēs.
2. Andersone I. Multi-Robot Map Merging in the Context of Image Processing // Scientific Journal of Riga Technical University. Computer Sciences. - 43. (2011) pp 124-130. Iekļauts De Gruyter (agrāk Versita), DBLP, io-port.net datu bāzēs.
3. Andersone I. The Conceptual Model for reliable Multi-Robot Map Merging // Proceedings of Baltic Conference „Human-Computer Interaction”, Latvia, Riga, 23.-25. August, 2011.

4. Andersone I. The Influence of the Map Merging Order on the Resulting Global Map in Multi-Robot Mapping // Scientific Journal of Riga Technical University. Computer Sciences. - 44., 2012. Iekļauts De Gruyter (agrāk Versita) datu bāzē.
5. Andersone I., Liekna A., Nikitenko A. Mapping Implementation for Multi-Robot System with Glyph Localization // Scientific Journal of Riga Technical University, Computer Sciences, 2013. Iekļauts De Gruyter (agrāk Versita) datu bāzēs.
6. Andersone I., Liekna A. Robot Map Similarity Metric for Non-identical Maps // 12th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development, Jelgava, May 2013. Iekļauts Scopus, EBSCO datu bāzēs.
7. Andersone I., Nikitenko A. Reliable Multi Robot Map Merging for Inaccurate Maps // 12th Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems PAAMS'14 Salamanca, 4th-6th June, 2014 Iekļauts SpringerLink datu bāzē.

Darba struktūra un galvenie rezultāti

Promocijas darbs sastāv no ievada, piecām nodaļām, secinājumiem, literatūras avotu saraksta, terminu vārdnīcas un saīsinājumu saraksta.

Ievadā ir pamatota veikto pētījumu aktualitāte, formulēts darba mērķis un uzdevumi, uzskaitītas pētījumu veikšanai izmantotās zinātniskās metodes, aprakstīts darba zinātniskais jauninājums un praktiskā vērtība, kā arī raksturota darba aprobācija.

Pirmā nodaļa ir veltīta karšu sastādīšanas daudzu robotu sistēmās teorētiskajam apskatam, padziļināti aplūkojot karšu apvienošanas problēmai. Tajā ir aprakstīta daudzu robotu karšu sastādīšanas motivācija, definēta karšu apvienošanas problēma, identificēti karšu apvienošanas aspekti un analizēti esošie karšu apvienošanas risinājumi. Otrajā nodaļā ir aplūkota karšu apvienošana pie nezināma robotu relatīvā novietojuma. Ir definēta lokālā un globālā karšu apvienošana, analizēta esošā situācija lokālajā un globālajā karšu apvienošanā. Nodaļā tiek demonstrēts, ka karšu apvienošanas secība var būtiski ietekmēt globālās kartes iegūšanu vai neiegūšanu, kas norāda uz nepieciešamību tās sastādīšanai izmantot metodi, kas pieļauj globālās kartes sastādīšanu dažādos veidos, balstoties uz iepriekšējo pieredzi. Trešajā nodaļā ir aprakstīta autores piedāvātā karšu apvienošanas metode, kas realizē abus karšu apvienošanas aspektus – lokālo karšu apvienošanu un globālo karšu apvienošanu. Ceturtnā nodaļa ir veltīta karšu sastādīšanas sistēmas, kuras sastādītās kartes ir izmantotas izstrādātās karšu apvienošanas metodes novērtēšanai, aprakstam un autores izstrādātajai karšu sastādīšanas metodei. Piektajā nodaļā ir aprakstīta karšu apvienošanai izstrādātā sistēma un ar to iegūtie eksperimentālie rezultāti. Darbs noslēdzas ar secinājumiem.

1. KARŠU SASTĀDĪŠANA DAUDZU ROBOTU SISTĒMĀS

Autonomu mobilo robotu izstrāde ir aktuāls pētījumu apgabals mākslīgajā intelektā jau kopš 1980.-ajiem gadiem [Thr 2002]. Pētījumu motivācija ir daudzie autonomu mobilo robotu potenciālie pielietojuma veidi, kas iekļauj precīzo lauksaimniecību, telpu tīrīšanu, zāles pļaušanu u.c. Viena no fundamentālām problēmām mobilajā robotikā, kas vēl arvien tiek risināta, ir apkārtējās vides **kartes sastādīšanas** problēma [Thr 2005]. Ne vienmēr videi ir pieejama jau gatava karte, kuru roboti var izmantot. Bieži ēku rasējumi neatbilst reālajai situācijai, un, pat ja rasējumi ir precīzi, tie nesatur mēbeles un citus objektus, kas robotam ir jāņem vērā, pārvietojoties telpā. Spēja patstāvīgi sastādīt vides karti būtiski atvieglo robota ieviešanu jaunās telpās, kā arī ļauj robotam pielāgoties izmaiņām vidē. [Thr 2005].

Viena robota karšu sastādīšana ir daudz pētīta joma, tomēr vēl arvien eksistē līdz galam neatrisinātas problēmas, no kurām literatūrā biežāk minētās ir [Thr 2002]:

- a) Mērījumu kļūdas,
- b) Vienlaicīga pašlokalizācija un kartes sastādīšana,
- c) Datu atbilstības problēma,
- d) Robota pārvietošanās ceļa izvēle,
- e) Karšu sastādīšanas daudzdimensionalitāte,
- f) Dinamiska vide.

1.1. Karšu sastādīšanas ar daudzu robotu sistēmām pamatojums

Karšu sastādīšana ar vairākiem robotiem atsevišķos gadījumos var risināt dažas no iepriekš uzskaitītajām problēmām – mērījumu kļūdas un datu atbilstību [And 2009]. Tomēr kopumā karšu sastādīšanas sarežģītība, salīdzinot ar telpas izpēti ar vienu robotu, pieaug. Bet ir vairākas priekšrocības, kuras padara kartes sastādīšanu ar vairākiem robotiem par pievilcīgu alternatīvu kartes sastādīšanai ar vienu robotu [Bur 2005, Thr 2002]:

- a) Vairāki roboti telpu var izpētīt ātrāk nekā viens robots.
- b) Vairāki roboti nodrošina sistēmas funkciju pārklāšanos (redundanci), tāpēc sistēma ir vairāk noturīga pret bojājumiem.
- c) Ja roboti spēj viens otru telpā atpazīt un noteikt to savstarpējās atrašanās vietas, tad ar vairākiem robotiem ir iespējams sastādīt precīzāku karti [Fox 2000, Mar 2005].

1.2. Robotu karšu apvienošana

Robotu komandas koncepta izcelsme ir meklējama vēlīnajos 1980.-ajos gados [Par 2000], tomēr tikai pēdējo piecpadsmit gadu laikā ir veikts intensīvs darbs vairāku robotu karšu sastādīšanas jomā. Iemesls varētu būt tas, ka, kaut arī robotu komandas piedāvā vairākas priekšrocības pār viena robota platformām, rodas vairākas jaunas problēmas, kas ir specifiskas tieši vairāku robotu karšu sastādīšanas gadījumam [And 2009].

No visām vairāku robotu karšu sastādīšanas problēmām šis promocijas darbs risina karšu apvienošanas problēmu. Kad robots izpēta telpu, tas ievāc informāciju par vidi ar sensoru palīdzību. Ja vides izpētei izmanto vairākus robotus, to savāktā informācija ir jāsapludina vienā kopīgā globālā kartē. **Karšu apvienošana** ir karšu informācijas no vairākiem robotiem sapludināšana vienā globālā kartē [Ko 2003].

1.3. Karšu apvienošanas īpašības

Lai noskaidrotu aktuālās tendences un problēmas vairāku robotu karšu apvienošanā, tika analizētas līdz šim izstrādātās karšu apvienošanas metodes [Ish 1993, Thr 1998, Sim 2000, Roy 2000, Ded 2000, Thr 2001, Bur 2002, Rou 2002, Wil 2002, Ko 2003, Kon 2003, Thr 2002, Rod 2004, Hua 2005, Lak 2005, Ho 2005, Ami 2005, Car 2005, Bir 2006, Adl 2008, Car 2008, Guo 2008, Aln 2010, Bal 2010, Top 2010]. Analīzes rezultātā tika identificētas vairākas īpašības, kuras ir jāņem vērā, risinot karšu apvienošanas problēmu daudzu robotu sistēmā:

- a) **Robotu relatīvās koordināšu sistēmas.** Visas karšu apvienošanas metodes var iedalīt trīs dažādās grupās, atkarībā no brīža, kad tiek iegūtas lokālo karšu relatīvās koordināšu sistēmas un kartes tiek apvienotas: 1) Robotu relatīvās sākuma pozīcijas ir zināmas; 2) Sākotnējās robotu relatīvās pozīcijas ir nezināmas, bet kādā telpas izpētes brīdī roboti satiekas un noskaidro savstarpējās pozīcijas; 3) Sākotnējās robotu relatīvās pozīcijas nav zināmas, un roboti telpas izpētes laikā tās nenoskaidro.
- b) **Karšu tips.** Robotu sastādītās kartes var būt ļoti dažādas: aplūkotajā literatūrā visbiežāk ir sastopamas metriskas aizņemtības režģu kartes [Bir 2006, Top 2010, Guo 2008], bet daži pētnieki izmanto cita veida metriskas kartes [Adl 2008, Aln 2010] vai topoloģiskas kartes [Hua 2005].

- c) **Karšu apvienošanā izmantotā informācija.** Karšu apvienošana tiek veikta, izmantojot sākotnēji zināmu vai telpas izpētes laikā noskaidrotu robotu karšu relatīvo novietojumu vai arī izsakot hipotēzi par karšu relatīvo novietojumu, pārmeklējot karšu savstarpējo transformāciju telpu - visas iespējamās vienas kartes rotācijas un translāciju (nobīžu) kombinācijas attiecībā pret otru karti.
- d) **Karšu apvienošanai nepieciešamais laiks.** Nepieciešamais laiks raksturo, vai karšu apvienošana var tikt veikta karšu sastādīšanas laikā, būtiski nekavējot robotu sistēmas darbu.
- e) **Sastādīto karšu precizitāte.** Robotu kartes var būt precīzas, lokāli neprecīzas un globāli neprecīzas. Lokālas neprecizitātes atspoguļo robota sensoru kļūdas un lokālas novirzes no reālās robota atrašanās vietas. Globālas neprecizitātes atspoguļo kartes nobīdes, kuras rodas kartes sastādīšanas laikā uzkrājoties robota atrašanās vietas kļūdai.

1.4. Karšu apvienošanas metožu apskats

Literatūrā ir sastopamas vairākas karšu apvienošanas metožu klasifikācijas. No iepriekšējā apakšnodaļā aplūkotajām karšu apvienošanas īpašībām visbiežāk literatūrā pieminētais metožu iedalījums ir pēc robotu rīcībā esošās informācijas par savstarpējām pozīcijām jeb to karšu relatīvajām koordināšu sistēmām [Ko 2003, Hua 2005, Ami 2005, Ho 2005, Bir 2006] un karšu apvienošanā izmantotā karšu tipa [Hua 2005, Bir 2006]. Šajā promocijas darbā aplūkotās karšu apvienošanas metodes ir iedalītas pēc robotu rīcībā esošās informācijas par savstarpējām pozīcijām.

Sākotnēji daudzu robotu karšu sastādīšanas metodes bija tikai paplašinātas viena robota karšu sastādīšanas metodes (tas ir, eksistējošas metodes tika pielāgotas izmantošanai daudzu robotu sistēmās, nevis izstrādātas jaunas metodes, kas būtu īpaši piemērotas daudzu robotu sistēmām) [Par 2000]. Līdz ar to arī karšu apvienošanas problēma tika vienkāršota, pieņemot, ka roboti sastāda savas kartes kopīgā koordināšu sistēmā. Lai šī pieeja darbotos, robotiem ir jābūt pieejamai informācijai par to relatīvajām sākotnējām pozīcijām. Vairāki autori ir izstrādājuši karšu sastādīšanas metodes, balstoties uz šo pieņēmumu [Thr 2001, How 2006, Cec 2006]. Zināmu relatīvo pozīciju gadījumā roboti kartes apvieno jau karšu sastādīšanas laikā, sapludinot savus sensoru datus vienā kopīgā globālā kartē.

Robotu karšu sastādīšanai ir iespējams izmantot dažādus algoritmus, tomēr lielākā daļa karšu sastādīšanas metožu, kad robotu savstarpējās pozīcijas ir zināmas, izmanto vienu no četrām pieejām [Che 2007]:

- Cerību maksimizācijas metodes (angliski *expectation maximization*) – balstoties uz sensoru datiem, tiek sastādīta viena karte, kurai ir vislielākā ticamība [Thr 2002].
- Kalmana filtra metodes – signālu apstrādes metodes, kuras sekmīgi tiek izmantotas arī robotikā karšu sastādīšanā, pašlokalizācijā un citos pielietojumos [Thr 2006]. Balstoties uz robotu sensoru datiem, tiek sastādīta karte, kura satur aposteriorās varbūtības par apkārtējās vides iezīmju atrašanās vietām [Thr 2002].
- Daļiņu filtra metodes, kas attēlo iespējamās robotu un objektu atrašanās vietas kartē kā daļiņu kopas.
- Uz kopu piederības (angliski *set membership*) balstītas metodes. Robotu un apkārtējās vides iezīmju atrašanās vietas tiek definētas kā apgabali, kuros tie, balstoties uz pieejamo informāciju, noteikti atrodas.

Visas augstāk aprakstītās vairāku robotu karšu sastādīšanas pieejas pieņem, ka robotu relatīvās pozīcijas ir zināmas sākotnēji vai arī tiek iegūtas karšu sastādīšanas laikā. Bez informācijas par robotu savstarpējo novietojumu šīs pieejas nespēj apvienot kartes. Karšu apvienošana pie nezināmām robotu savstarpējām pozīcijām ir sarežģītākais karšu apvienošanas gadījums. Šīs grupas karšu apvienošanas metodes izmanto transformāciju pieeju – tās rotē un pārbīda vienu no kartēm attiecībā pret otru, lai atrastu labāko iespējamo apvienojumu.

Karšu apvienošanas, kad robotu relatīvās pozīcijas nav zināmas, sarežģītība var ļoti atšķirties atkarībā no tā, kāda tipa kartes tiek izmantotas. Visbiežāk karšu sastādīšanā tiek izmantotas metriskas kartes vai topoloģiskas kartes.

Topoloģisku karšu apvienošana ir vienkāršāka nekā metrisku karšu apvienošana, jo karšu kopīgo daļu meklēšanai ir pieejama strukturēta informācija – grafi [Hua 2005]. Vairāki pētnieki ir pievērsušies šai problēmai un piedāvājuši praksē izmantojamus risinājumus [Hua 2005, Ded 2000].

Metrisku karšu apvienošana ir sarežģītāka problēma par topoloģisku karšu apvienošana, jo ir pieejama tikai metriskā informācija un nav iespējams pielietot grafu salīdzināšanas pieejas. Lai šo problēmu risinātu, daudzi pētnieki izmanto metriskas kartes, kurām ir pievienota papildus informācija [Kon 2003, Adl 2008, Ami 2005, Lak 2005, Ho 2005].

Tikai neliels skaits pētnieku ir pievērsušies šai problēmai, ja ir pieejama tikai ģeometriskā informācija. Vienu no pirmajām šāda tipa karšu apvienošanas metodēm izstrādāja Carpin un Birk [Car 2005]. Metode izmanto adaptīvu nejaušu izvēles algoritmu, kas rotē un pārbīda daļējas aizņemtības režģu kartes labākās transformācijas atrašanai. Labākā transformācija tiek noteikta, izmantojot attēlu līdzības metriku. Publikācijā [Bir 2006] šī karšu apvienošanas pieeja ir papildināta ar karšu līdzības novērtēšanu, kura nosaka karšu apvienošanas rezultāta uzticamību. Labākā transformācija ir transformācija ar viszemāko attēlu līdzības metrikas funkcijas vērtību [Bir 2005]. Tā tiek aprēķināta katrā pārmeklēšanas algoritma solī.

Cita karšu apvienošanas pieeja, kuru ir izstrādājis Carpin, izmanto Hjū Transformāciju [Car 2008]. Šai metodei veiksmīgai darbībai pašreizējā attīstības stadijā ir nepieciešamas lokālās kartes, kuras satur taisnas līnijas. Metodes galvenā ideja ir Hjū spektru [Car 2008] izgūšana no robotu lokālajām kartēm un savstarpējo korelāciju meklēšana starp diviem spektriem. Hjū spektri attēlo visbiežāk sastopamos taisnu līniju virzienus kartēs. Savstarpējo korelāciju maksimumi attēlo karšu transformācijas hipotēžu rotācijas daļu. Lai atrastu translācijas uz X un Y asīm, no katras kartes tiek izgūti divi papildus spektri – X un Y spektri.

1.5. Kopsavilkums

Lielākā daļa karšu apvienošanas metožu aplūko gadījumu, kad robotiem ir sākotnēji zināmas savstarpējās pozīcijas vai arī pozīcijas tiek noskaidrotas telpas izpētes laikā, kaut arī šī nosacījuma izpildīšanai ir nepieciešama īpaša robotu izvietošana pirms telpas izpētes vai robotiem jāspēj vienam otru atpazīt un novērtēt savstarpējās pozīcijas.

Nezināmu robotu savstarpējo pozīciju gadījumā karšu apvienošanas hipotēzi var iegūt ar heuristikas palīdzību. Cilvēks heuristiku definē, balstoties uz savu pieredzi, tāpēc labākā heuristika ne vienmēr garantē pareizo rezultātu. Turklāt, tā kā parasti nav iespējams pārmeklēt visu karšu savstarpējo transformāciju telpu, pastāv iespēja, ka netiks atrasta hipotēze ar augstāko heuristisko novērtējumu. Tāpēc, salīdzinot ar karšu apvienošanu, kas izmanto robotu pozicionālo informāciju, karšu apvienošanā ar heuristikām ir daudz lielāka iespēja, ka tiks izvirzīta nepatiesa karšu apvienošanas hipotēze.

No tā var secināt, ka karšu apvienošanas lēmumam ir jābūt atceļamam, un īpaši svarīgi tas ir pie nezināmām robotu savstarpējām pozīcijām. Par spīti tam, praktiski visas aplūkotās karšu apvienošanas metodes apskata karšu apvienošanu pie nezināmām pozīcijām tikai kā divu robotu lokālo karšu transformācijas meklēšanu.

2. KARŠU APVIEŅOŠANA PIE NEZINĀMĀM ROBOTU POZĪCIJĀM

Karšu apvienošanas lēmumam ir jābūt viegli atceļamam, un īpaši svarīgi tas ir pie nezināmām robotu savstarpējām pozīcijām. Attiecīgi darba autore argumentē, ka karšu apvienošanā ir jāņem vērā divi karšu apvienošanas aspekti:

- **Lokāla karšu apvienošana.** Par karšu apvienošanu tiek uzskatīta **tikai vienreizēja divu robotu lokālo karšu apvienošana**, tas ir, savstarpējā novietojuma meklēšana, karšu apvienošana, izmantojot atrasto transformāciju, un rezultāta novērtēšana. Pirms transformācijas meklēšanas var tikt veikta arī karšu iepriekšēja apstrāde.
- **Globāla karšu apvienošana.** Par karšu apvienošanu tiek uzskatīta **karšu apvienošana karšu sastādīšanas kontekstā**. Šajā gadījumā rodas iespēja turpmākā telpas izpētē noraidīt karšu apvienošanas hipotēzi un apvienot kartes vairākas reizes, balstoties uz iepriekšējo pieredzi. Ir svarīgi nodrošināt iespēju atkārtoti apvienot kartes.

Tālāk šajā nodaļā ir aplūkota esošā situācija lokālās un globālās karšu apvienošanas jomā.

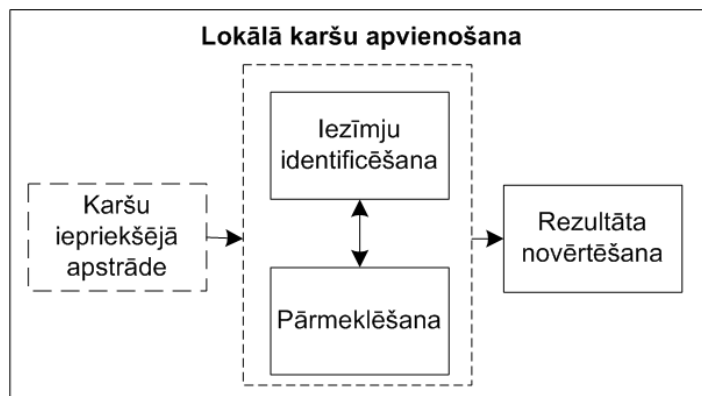
2.1. Lokālā karšu apvienošana

Šī darba kontekstā lokālā karšu apvienošana ir **vienreizēja divu robotu lokālo karšu apvienošana** – savstarpējā novietojuma meklēšana, karšu apvienošana, izmantojot atrasto transformāciju, un rezultāta novērtēšana.

Vispārīgs lokālās karšu apvienošanas process, kas atbilst literatūrā apskatītajām karšu apvienošanas metodēm, ir redzams 2.1. attēlā. Karšu apvienošanas metodes sastāv no trīs galvenajiem soļiem:

- **Iezīmju identificēšana.** Kartei specifisko iezīmju izgūšana.
- **Pārmeklēšana.** Karšu savstarpējās transformācijas meklēšana, kas ir balstīta uz identificētajām iezīmēm. Iezīmju identificēšana un pārmeklēšana vienas metodes ietvaros nereti ir cieši savstarpēji saistītas.

- **Karšu līdzības novērtēšana.** Karšu līdzības novērtēšana ir neatkarīgs solis, kuru var pielāgot jebkurai karšu apvienošanas metodei.



2.1. att. Vispārīgs karšu apvienošanas process

Karšu apvienošanā izmantotajām pārmeklēšanas stratēģijām ir raksturīgs tas, ka tās tiek balstītas uz iegūtajām iezīmju telpām. Piemēram, [Car 2008] izmantotā pārmeklēšanas stratēģija balstās uz no kartēm iegūtajiem Hjū spektriem. Starp šiem spektriem tiek meklēta korelācija, tādējādi iegūstot potenciālās rotācijas. [Lak 2005] aprakstītā stratēģija balstās uz specifisku līniju salīdzināšanu.

Dažādām iezīmju telpām pielietotās atšķirīgās pārmeklēšanas stratēģijas nozīmē to, ka iezīmju telpas un pārmeklēšanas stratēģijas dažādu metožu starpā visbiežāk nav savstarpēji savietojamas. Tomēr ir gadījumi, kad tas ir iespējams, piemēram, kopā ar [Bir 2006] piedāvāto karšu līdzības metriku var izmantot dažādas pārmeklēšanas stratēģijas.

Lai novērtētu izvirzītās karšu apvienošanas hipotēzes ticamību, ir jāievieš skaitlisks karšu apvienošanas hipotēzes novērtējums. Kaut arī novērtējuma ieviešana nenodrošina pilnīgi drošu karšu apvienošanas rezultātu, tomēr ar tās palīdzību ir iespējams atnest acīmredzami nederīgas transformācijas. Karšu apvienošanas hipotēžu noraidīšanai ir jānotiek automātiski bez cilvēka iejaukšanās – lai to panāktu, divu karšu salīdzināšanai ir nepieciešamas divi skaitliski rādītāji [Bir 2006]:

- Novērtējums, kas apraksta divu karšu kopīgā apgabala līdzību pie konkrētās transformācijas hipotēzes – **karšu apvienošanas hipotēzes novērtējums**.
- Rādītājs jeb sliekšnis, kuru pārsniedzot, divas robotu kartes tiek atzītas par līdzīgām, un attiecīgi karšu apvienošanas hipotēze tiek apstiprināta – **karšu apvienošanas hipotēzes apstiprināšanas sliekšnis**.

Ievērojamāko ieguldījumu aizņemtības režģu apvienojumu novērtēšanā ir devuši *Birk* un *Carpin* [Birk 2006], un viņu piedāvāto metodi karšu līdzības novērtēšanai – tiešu šūnu salīdzināšanu – ir izmantojuši arī vairāki citi vēlāki karšu apvienošanas pētījumi [Guo 2008, AIn 2010]. Metode [Bir 2006] aprēķina attiecību starp šūnu skaitu ar vienādām vērtībām un šūnu skaitu, kuras nevienā kartē nav ar nezināmu vērtību.

2.2. Globālā karšu apvienošana

Lielākā daļa pētījumu karšu apvienošanas pie nezināmām pozīcijām jomā pievērš uzmanību tikai karšu lokālajai apvienošanai [Bir 2006, Car 2008, Lak 2005, Top 2010]. Globālas karšu apvienošanas problēmu ir aplūkojuši vairāki pētnieki [Kon 2003, Hua 2005], bet neviens nav piedāvājis reālus risinājumus globālai karšu apvienošanai.

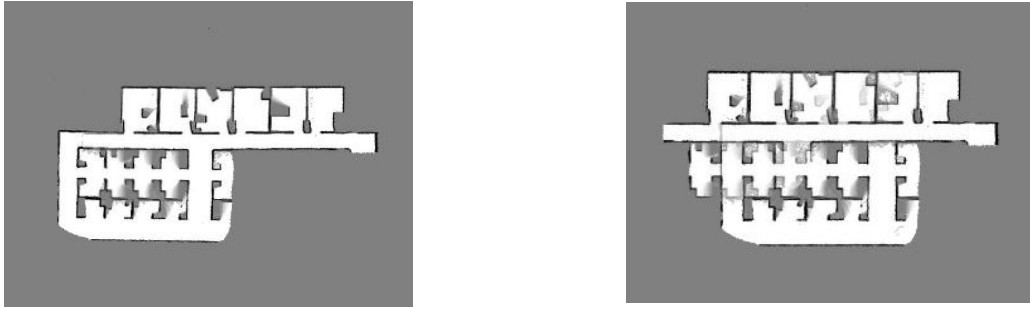
Globālā karšu apvienošana apskata problēmu, kā iegūt globālo karti karšu sastādīšanas laikā, nezaudējot informāciju arī, ja tiek veikti kļūdaini apvienojumi. Šajā gadījumā ir jāņem vērā tas, cik bieži kartes tiks apvienotas un kādā veidā tiks izvēlētas apvienojamās kartes.

Tālāk šajā nodaļā ir eksperimentāli pierādīts, ka karšu apvienošanas secība var būtiski ietekmēt globālo karti un var tikt izvirzītas nepatiesas karšu apvienošanas hipotēzes, kas norāda uz nepieciešamību karšu apvienošanas metodē īstenot globālās karšu apvienošanas aspektu. Eksperimentiem ir izmantotas trīs kartes map_1 , map_2 un map_3 (skatīt 2.2. attēlu). Visām šīm kartēm ir savstarpējs pārklājums.



2.2. att. Eksperimentiem izmantotie kartes fragmenti map_1 , map_2 un map_3 .

2.3 attēlā ir redzami divi karšu apvienošanas rezultāti, kas iegūti apvienojot kartes dažādā secībā (katrā apvienojumā izvēloties hipotēzi ar augstāko novērtējumu).



2.3. att. Eksperimentiem izmantotie kartes fragmenti map₁, map₂ un map₃.

No šī rezultāta var secināt, ka karšu apvienošanai ir jāizvirza ticamas hipotēzes un ka karšu apvienošanai ir jābūt dinamiskai.

2.3. Kopsavilkums

Šajā nodaļā autore argumentē, ka karšu apvienošanas lēmumam ir jābūt viegli atceļamam, un īpaši svarīgi tas ir pie nezināmām robotu savstarpējām pozīcijām. Attiecīgi karšu apvienošanā ir jāņem vērā divi karšu apvienošanas aspekti: lokālā karšu apvienošana un globālā karšu apvienošana.

Eksistē dažādas metodes, kā veikt lokālo karšu apvienošanu dažādiem karšu veidiem, bet gandrīz neskarts karšu apvienošanas literatūrā ir jautājums, kā īstenot globālu karšu apvienošanu pie nezināmām robotu relatīvajām pozīcijām.

Dažreiz roboti savā starpā karšu sastādīšanas laikā sazinās, bet nespēj noteikt savstarpējās pozīcijas. Šādā gadījumā bez jebkādas informācijas par karšu pārklājuma eksistenci ir iespējams tikai izvirzīt karšu apvienošanas hipotēzi un turpmākā telpas izpētes laikā pārbaudīt šīs hipotēzes atbilstību realitātei. Hipotēzes noraidīšanas gadījumā ir jābūt iespējai saglabāt robota oriģinālo karti, lai netiktu zaudēta būtiska informācija.

Ja karšu apvienošanas hipotēzes vienmēr būtu pareizas un apvienošanas secība neietekmētu rezultātu, tad robotu lokālās kartes varētu apvienot jebkādā secībā un tiktu iegūta patiesībai atbilstoša globālā karte. Šajā nodaļā ir eksperimentāli parādīts, ka karšu apvienošanas secība būtiski ietekmē globālo karti un var tikt izvirzītas nepatiesas karšu apvienošanas hipotēzes, kas norāda uz nepieciešamību karšu apvienošanas metodē īstenot globālās karšu apvienošanas aspektu, kā arī tikai ticamu karšu izvirzīšanu.

3. REMMERC – METODE UZTICAMAI KARŠU APVIENOŠANAI

Šajā nodaļā ir piedāvāta un aprakstīta karšu apvienošanas metode, kas ir paredzēta uzticamas karšu apvienošanas īstenošanai – ReMMerg (no angļu valodas **Reliable Map Merging**).

Divu robotu lokālo karšu pareizas apvienošanas varbūtība nekad nav vienāda ar '1.0' (vienmēr pastāv kļūdas iespēja), un no tā izriet, ka viens no karšu apvienošanas metodes uzdevumiem ir nodrošināt iespēju kartes apvienot **atgriezeniski**. It sevišķi atgriezeniska karšu apvienošana ir aktuāla, ja nav pieejamas robotu savstarpējās pozīcijas, jo nav zināms karšu pārklājums. Tādā gadījumā ir iespējams tikai izvirzīt karšu apvienošanas hipotēzi un turpmākā telpas izpētes laikā pārbaudīt šīs hipotēzes atbilstību realitātei. Lai hipotēzes noraidīšanas gadījumā netiktu zaudēta informācija, kas iegūta pēc karšu apvienošanas, ir jābūt iespējai saglabāt robota lokālo karti.

Ja karšu apvienošanas lēmumu var atcelt, tad rodas iespēja globālās kartes sastādīšanai izmēģināt dažādus variantus un karšu apvienošanas secības, balstoties uz iepriekšējo pieredzi – kartes apvienot **dinamiski**.

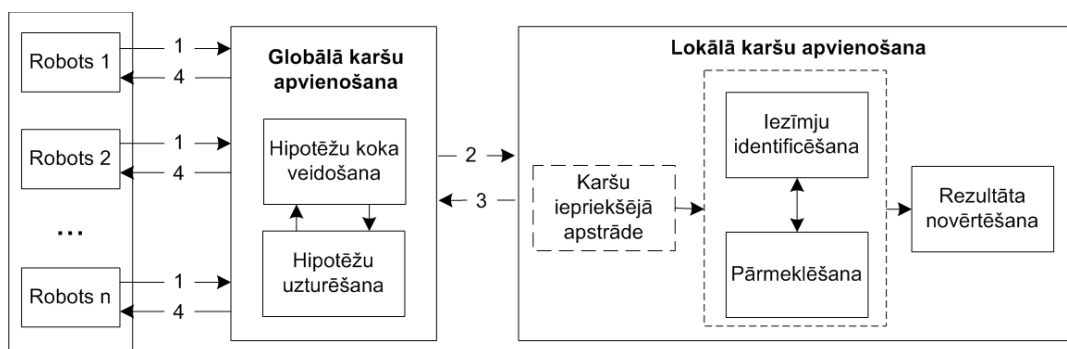
Cits būtisks karšu apvienošanas uzdevums ir lēmuma pieņemšana par brīdi, kad var uzskatīt, ka izvirzītā karšu apvienošanas hipotēze ir ticama [Kon 2003]. Par **ticamu karšu apvienošanas hipotēzi** šajā darbā tiek uzskatīta tāda hipotēze, kuras karšu apvienošanas hipotēzes novērtējums pārsniedz iepriekš empīriski noteiktu sliekšni. **Karšu apvienošanas hipotēzes novērtējums** ir skaitlis robežās [0; 1], kas raksturo divu karšu kopīgās daļas līdzību pie izvirzītās karšu apvienošanas hipotēzes.

Atbilstoši iepriekšējās nodaļās veiktās analīzes rezultātā izdarītajiem secinājumiem, par **uzticamu karšu apvienošanu** šajā promocijas darbā tiek saukta karšu apvienošana, kura atbilst trim kritērijiem:

- Tā nodrošina karšu apvienošanas atgriezeniskumu – jebkurā brīdī ir iespējams atgriezties stāvoklī pirms karšu apvienošanas, nezaudējot pēc karšu apvienošanas iegūto informāciju par apkārtējo vidi robotu lokālajās kartēs (tiek atbalstīts karšu apvienošanas globālais aspekts).

- Tā nodrošina karšu apvienošanas dinamiskumu - spēju piedāvāt dažādus karšu apvienošanas secības variantus globālās kartes iegūšanai, balstoties uz iepriekšējo apvienošanas pieredzi.
- Divu robotu lokālo karšu apvienošanas lēmums tiek pieņemts tikai tādā gadījumā, ja karšu apvienošanas hipotēzes novērtējums pārsniedz iepriekš empīriski noteiktu sliekšni jeb ja karšu apvienošanas hipotēze ir ticama (tiek atbalstīts karšu apvienošanas lokālais aspekts).

ReMMerg metodes vispārīga struktūra ir attēlota 3.1. attēlā.



3.1. att. Autores piedāvātās ReMMerg metodes vispārīga struktūra

Informācijas plūsmas 3.1. attēlā: 1) robotu lokālās kartes; 2) apvienojamo karšu pāri un noraidīto hipotēžu saraksts; 3) karšu apvienošanas hipotēzes un ziņojumi par karšu apvienošanas izdošanos/neizdošanos; 4) hipotēžu koks un visu robotu lokālās kartes.

ReMMerg metodei ir divas galvenās daļas, kas katra realizē savu karšu apvienošanas aspektu: Globālā karšu apvienošana un Lokālā karšu apvienošana. Lokālās karšu apvienošanas daļa ir atbildīga par karšu savstarpējā novietojuma meklēšanu, karšu apvienošanu, izmantojot atrasto transformāciju, un rezultāta novērtēšanu. Globālā karšu apvienošana īsteno hipotēžu koka veidošanas un hipotēžu uzturēšanas funkcijas.

3.1. Karšu apvienošanas hipotēzes un to atspoguļošana

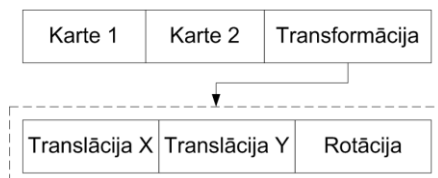
Lai nodrošinātu karšu apvienošanas atgriezeniskumu, ir svarīgi izvēlēties atbilstošu lokālo un globālo karšu glabāšanas struktūru. Pretējā gadījumā, kā minēts [Kon 2003], ja roboti apvieno savas lokālās kartes un turpina karšu sastādīšanu, izmantojot kopīgu karti, var būt sarežģīti nošķirt kartes, nezaudējot informāciju, kas iegūta pēc apvienošanas.

No tēzes, ka karšu apvienošana nedrīkst būt neatgriezeniska darbība, izriet, ka karšu apvienošanas rezultāts nav globālā karte, bet gan karšu apvienošanas hipotēze. **Karšu**

apvienošanas hipotēze ir trīsvietīgs kortežs, kura elementi ir divas apvienojamās kartes vai karšu apvienošanas hipotēzes un to savstarpējā transformācija (3.1. formula):

$$\langle \text{karte} \vee \text{hipotēze}, \text{karte} \vee \text{hipotēze}, \text{transformācija} \rangle \quad (3.1.)$$

Hipotēzes formāts grafiskā veidā ir attēlots 3.2. attēlā. Hipotēze satur informāciju par divām apvienotajām kartēm un transformāciju starp tām. Transformācija ir otrās kartes pozīcija attiecībā pret pirmo karti – translācijas pa X un Y asīm un rotācija.

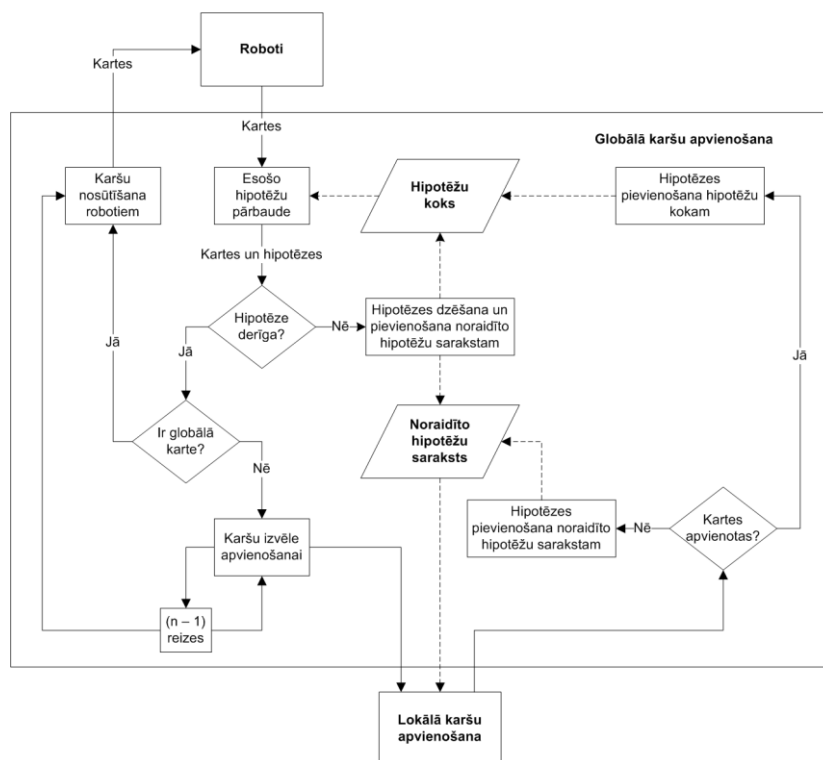


3.2. att. Karšu apvienošanas hipotēzes atspoguļojums

Šāds hipotēzes atspoguļojums ļauj izmantot lokālās kartes globālās kartes sastādīšanā un noraidīt hipotēzes jebkurā laikā bez nepieciešamības atjaunot visu izvīrzi hipotēžu kartes.

3.2. Globālā karšu apvienošana

ReMMerg metodes globālās karšu apvienošanas daļa ir atbildīga par hipotēžu koka uzturēšanu un globālās kartes izveidi. Balstoties uz līdzšinējiem apvienojumiem, tiek nolemts, kuras kartes ir jāapvieno. 3.3. attēlā ir redzama globālās karšu apvienošanas norise.



3.3. att. Globālā karšu apvienošana

Vispārīgs globālās kartes sastādīšanas process, kas attēlots 3.3. attēlā, ir sekojošs:

1. Robots saņem vienu vai vairākas citu robotu lokālās kartes un hipotēžu kokus.
2. Tiek pārbaudītas visas robota lokālā hipotēžu koka hipotēzes. Ja tiek noteikts, ka kāda no tām ir kļūdaina, tad tā un no tās atkarīgās hipotēzes tiek dzēstas no hipotēžu koka, un tiek atjaunots noraidīto hipotēžu saraksts.
3. Ja hipotēžu kokā ir vairākas augstākā līmeņa kartes vai arī augstākā līmeņa karte nesatur visas pieejamās robotu kartes, tad tiek veikta lokālā karšu apvienošana.
 - a. Veiksmīgas lokālās karšu apvienošanas gadījumā tiek papildināts lokālais hipotēžu koks.
 - b. Neveiksmīgas lokālās karšu apvienošanas gadījumā izvirzītā hipotēze tiek pievienota noraidīto hipotēžu sarakstam.

3.2.1. Datu struktūras

ReMMerg metodē tiek izmantotas trīs specifiskas datu struktūras, katra no kurām pilda būtisku lomu karšu apvienošanā:

1. Hipotēžu koks

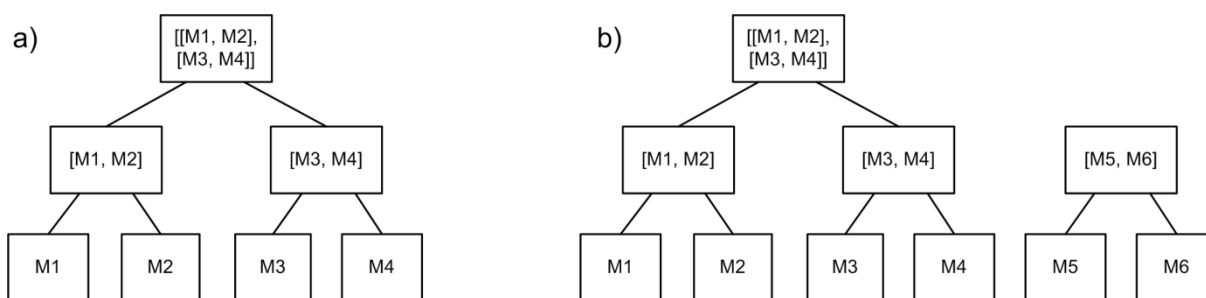
Ar vienu karšu apvienošanas hipotēzi nepietiek, ja telpu pēta vienlaicīgi vairāk kā divi roboti. Aplūkotajā literatūrā autore nav saskārusies ne ar vienu karšu apvienošanas metodi, kas spētu bez pozīciju informācijas apvienot vairāk kā divas kartes vienlaicīgi. Tāpēc globālās kartes sastādīšanai ir nepieciešama pakāpeniska karšu apvienošana. Ideālā gadījumā globālo karti ir iespējams iegūt, veicot $n-1$ karšu apvienojumus (kur n ir robotu lokālo karšu skaits). Šādā gadījumā katra karte apvienošanai tiek izmantota precīzi vienu reizi.

Struktūra, kas atspoguļo karšu apvienojuma hipotēžu savstarpējās atkarības, darba ietvaros tiek saukta par hipotēžu koku. Formāli **hipotēžu koks** ir pilnu bināru koku kopa, kura atbilst sekojošiem nosacījumiem:

- Koka lapas ir robotu sastādītās lokālās kartes, un šīs lapas visā koku kopā ir unikālas, tas ir, katra lokālā karte parādās koku kopā kā lapa tieši vienu reizi;

- Katrs koka mezgls, kurš nav koka lapa, atspoguļo vienu karšu apvienošanas hipotēzi, un šī mezgla bērni ir lokālās kartes un/vai hipotēzes, kuru apvienojumam šī hipotēze ir izvirzīta;
- Katra koka sakne ir augstākā līmeņa karšu apvienošanas hipotēze.

Augstākā līmeņa karšu apvienošanas hipotēze ir hipotēze, kura nav iesaistīta nevienas citas hipotēzes tapšanā jeb tai atbilstošais mezgls nav bērns nevienam citam koka mezglam. Ja hipotēžu koka kopā ir tikai viens binārais koks, tad tā sakne jeb augstākā līmeņa karšu apvienošanas hipotēze ir **globālās kartes hipotēze**. 3.4. attēlā ir attēloti hipotēžu koku piemēri kopām ar vienu un diviem kokiem.



3.4. att. Hipotēžu koka piemēri: a) viena koka kopa, b) divu koku kopa

2. Karšu apvienošanas vēsture

ReMMerg metode izmanto karšu apvienošanas vēsturi, lai nodrošinātu pēc iespējas dažādus karšu apvienojumus. **Karšu apvienošanas vēsture** ir saraksts, kurā katrs saraksta elements ir kortežs, kas sastāv no trīs elementiem: (formula 3.2.): pirmās kartes, otrās kartes un abu karšu apvienojumu mēģinājumu skaita. Karšu secība nav būtiska, un katrs karšu pāris parādās sarakstā tikai vienu reizi.

$$\langle \text{karte1}, \text{karte2}, \text{karšu pāra apvienojumu skaits} \rangle \quad (3.2.)$$

3. Noraidīto hipotēžu saraksts

Lai atkārtoti netiktu izvirzītas hipotēzes, kuras iepriekš ir atzītas par nederīgām, ReMMerg metodē tiek sastādīts noraidīto hipotēžu saraksts. **Noraidīto hipotēžu saraksts** ir saraksts, kurā tiek glabātas hipotēzes, kuru novērtējums ir zemāks par karšu apvienošanas hipotēzes apstiprināšanas sliekšni. Šīs hipotēzes atkārtoti vairs netiek izvirzītas.

3.2.2. Esošo hipotēžu pārbaude un hipotēžu dzēšana

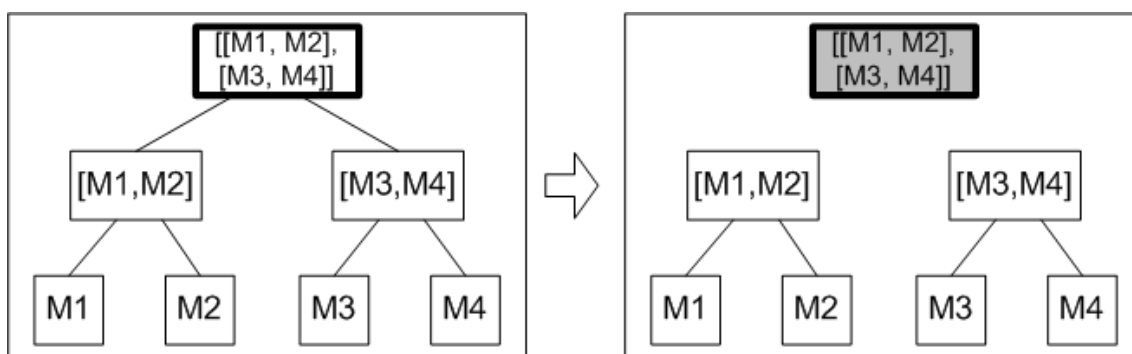
Robotu sastādītās lokālās kartes laika gaitā tiek papildinātas, un hipotēzes, kas agrākā telpas izpētes stadijā ir ticamas, vēlāk var izrādīties kļūdainas. Lai novērstu uz kļūdainām

hipotēzēm balstītu jaunu hipotēžu izvirzīšanu, ReMMerg metodē pirms katras karšu apvienošanas tiek pārbaudītas esošās hipotēzes. Hipotēžu novērtēšanai var izmantot to pašu algoritmu, kurš tiek lietots lokālās karšu apvienošanas rezultātā izvirzīto hipotēžu pārbaudei.

Ja pārbaudāmās karšu apvienošanas hipotēzes novērtējums ir mazāks par noteikto hipotēzes apstiprināšanas sliekšni, tad hipotēze tiek noraidīta un pievienota noraidīto hipotēžu sarakstam. Hipotēžu dzēšana var notikt pēc viena no vairākiem scenārijiem.

1. Augstākā līmeņa hipotēzes dzēšana

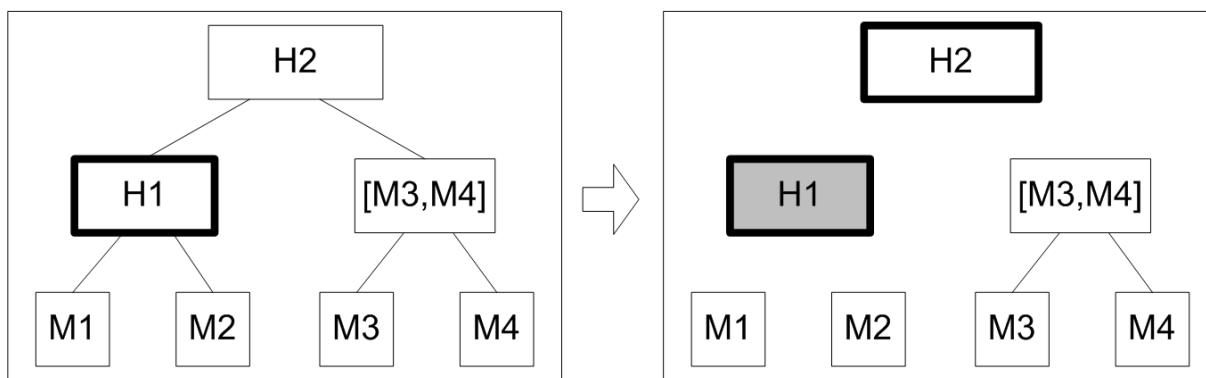
Augstākā līmeņa hipotēze ir tāda, no kuras nav atkarīga neviena cita hipotēze. Šajā scenārijā hipotēze tiek dzēsta un pievienota noraidīto hipotēžu sarakstam. 3.5. attēlā (un tālāk 3.6. un 3.7. attēlos) ar trekno līniju ir apzīmēta dzēstā hipotēze, un ar pelēku krāsu iekrāsotas hipotēzes, kuras atrodas/tiek ievietotas noraidīto hipotēžu sarakstā.



3.5. att. Augstākā līmeņa hipotēzes dzēšanas piemērs.

2. Hipotēzes ar atkarībām hipotēžu kokā dzēšana

Ja noraidīta un dzēsta tiek hipotēze, piemēram, $H1 = \langle M1, M2 \rangle$, kura nepieder augstākajam līmenim un ir kaut vienas citas hipotēzes (piemēram, $H2 = \langle \langle M1, M2 \rangle, \langle M3, M4 \rangle \rangle$) sastāvdaļa, tad dzēstas tiek arī visas no tās atkarīgās hipotēzes. Piemērā, kas redzams, 3.10. attēlā, noraidīto hipotēžu sarakstā saglabāta tikai hipotēze H1, jo karšu apvienošanas hipotēze H2 atkārtoti netiks izvirzīta tā iemesla dēļ, ka vairs nav iespējama hipotēze H1.



3.6. att. Hipotēzes ar atkarībām dzēšanas piemērs

3. Hipotēzes ar atkarībām noraidīto hipotēžu sarakstā dzēšana

Ja tiek dzēsta hipotēze, no kuras ir atkarīgas noraidīto hipotēžu sarakstā saglabātas hipotēzes, tad noraidītā hipotēze tiek pievienota noraidīto hipotēžu sarakstam, bet visas no tās atkarīgās hipotēzes no saraksta tiek izņemtas. No dzēstās hipotēzes atkarīgās hipotēzes atkārtoti nevarēs tikt izvirzītas, jo vairs nav iespējams izvirzīt to sastāvā esošo hipotēzi.

3.2.3. Apvienojamo karšu izvēlēšanās

Pirmais jautājums globālajā karšu apvienošanā ir, cik karšu apvienojumi ir jāveic pašreizējā iterācijā. Tas tiek risināts, aprēķinot augstākā līmeņa hipotēžu skaitu pašreizējā hipotēžu kokā. Ja augstākajā līmenī ir n hipotēzes, tad minimālais apvienojumu skaits, ar kādu ir iespējams iegūt globālo karti, ir vienāds ar $n - 1$, bet maksimālais – C_n^2 (pārbaudot visas iespējamās karšu kombinācijas). Formula 3.3. attēlo iespējamo karšu apvienojumu skaita intervālu.

$$s \in [n - 1; C_n^2] \quad (3.3.)$$

s – nepieciešamais karšu apvienojumu skaits, n – augstākā līmeņa hipotēžu skaits hipotēžu kokā, C_n^2 – kombinācijas no n pa 2.

Konkrētā lietojumā karšu apvienojumu skaitu var izvēlēties, balstoties uz iepriekš zināmu informāciju par robotu sistēmu. Piemēram, ja ir zināms vidējais lokālo karšu apvienošanas ilgums un maksimālais laiks, ko robots var atļauties pavadīt, apvienojot kartes, tad apvienojumu skaitu var iegūt pēc formulām 3.4. un 3.5.:

$$s = t_{\max} / t_{\text{lok}} \quad (3.4.)$$

$$s = \begin{cases} n - 1, & \text{if } s < n - 1 \\ C_n^2, & \text{if } s > C_n^2 \\ s, & \text{if } s \in [n - 1; C_n^2] \end{cases} \quad (3.5.)$$

s – nepieciešamais karšu apvienojumu skaits, t_{\max} – maksimālais pieļaujamais laiks karšu apvienošanai, t_{lok} – vidējais lokālo karšu apvienošanas ilgums, n – augstākā līmeņa hipotēžu skaits hipotēžu kokā, C_n^2 – kombinācijas no n pa 2.

Kad ir zināms karšu apvienošanas mēģinājumu skaits, ir jāizvēlas, kuri karšu pāri tiks apvienoti. Apvienošanai var tikt izvēlētas gan robotu lokālās kartes, gan karšu apvienošanas hipotēzes. Karšu pāru izvēle tiek veikta secīgi, un katrs nākamais pāris tiek izvēlēts tikai tad, kad ir pabeigts iepriekšējais karšu apvienošanas mēģinājums. Tādējādi nākamā apvienošanas

mēģinājuma izvēlē tiek ņemti vērā iepriekšējo apvienojumu rezultāti, un tas dod iespēju apvienošanai izvēlēties arī pašreizējā iterācijā izvirzītas karšu apvienošanas hipotēzes.

Karšu pāru izvēlē tiek izmantota karšu apvienošanas vēsture, kura attēlo katra iespējamā karšu pāra apvienošanas mēģinājumu skaitu. Karšu apvienošanas vēsturē glabājas visas iespējamās lokālo karšu un hipotēžu kombinācijas.

3.2.4. Hipotēžu koka uzturēšana

Hipotēžu koks tiek atjaunots divos gadījumos:

1. Hipotēžu pievienošana

Jauna hipotēze aktuālajam karšu apvienošanas hipotēžu kokam tiek pievienota gadījumā, kad ir veikts lokālās karšu apvienošanas mēģinājums un hipotēzes novērtējums ir lielāks vai vienāds ar izvēlēto karšu apvienošanas hipotēzes apstiprināšanas sliekšni.

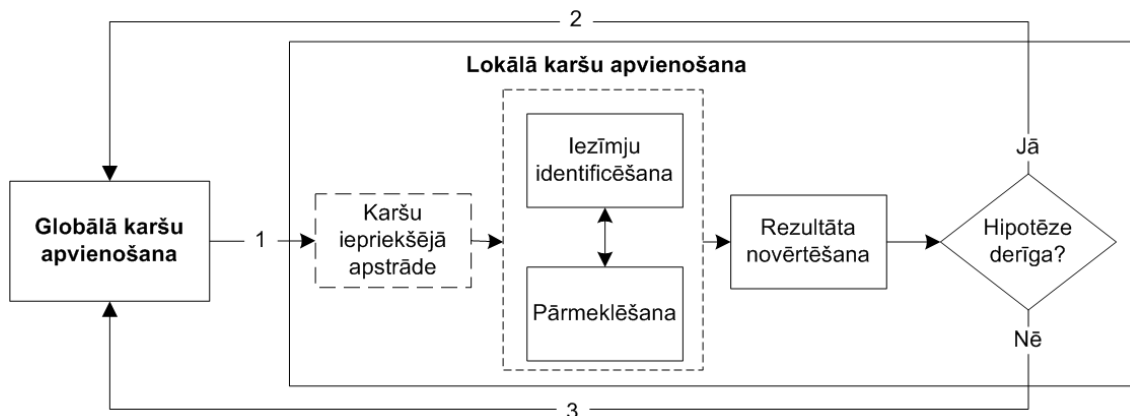
2. Hipotēžu dzēšana

Hipotēze no hipotēžu koka tiek dzēsta, kad koka pārbaudes laikā atklājas, ka izvirzītā hipotēze vairs nav ticama, tas ir, tās novērtējums vairs nepārsniedz hipotēzes apstiprināšanas sliekšni. Ja hipotēze tiek dzēsta, tad, lai tā netiktu neizvirzītu atkārtoti, to saglabā noraidīto hipotēžu sarakstā.

3.3. Lokālā karšu apvienošana

Lokālā karšu apvienošanas daļa ReMMerg metodē realizē lokālās karšu apvienošanas aspektu – karšu savstarpējā novietojuma meklēšanu, karšu apvienošanu, izmantojot atrasto transformāciju, un rezultāta novērtēšanu. Lokālās karšu apvienošanas rezultātā tiek izvirzīta **karšu apvienošanas hipotēze**.

Lokālās karšu apvienošanas process ReMMerg metodē ir attēlots 3.7. attēlā. No globālās karšu apvienošanas daļas tiek saņemts apvienojamo karšu pāris, kā arī noraidīto hipotēžu saraksts. Pēc lokālās karšu apvienošanas rezultāts ir karšu apvienošanas hipotēze vai arī ziņojums par neveiksmīgu apvienošanas mēģinājumu.



3.7. att. Lokālās karšu apvienošanas process

Informācijas plūsmas 3.7. attēlā: 1) apvienojamo karšu pāris un noraidīto hipotēžu saraksts; 2) karšu apvienošanas hipotēze; 3) ziņojums par karšu apvienošanas neizdošanos.

3.3.1. Lokālo karšu apvienošana, izmantojot Hjū Transformāciju

Promocijas darba ietvaros ReMMerg metode izmanto karšu apvienošanu, izmantojot Hjū Transformāciju (angliski *Hough Transformation*) [Car 2008]. Šī metode atbilst ReMMerg darbības videi: tā ir paredzēta aizņemtības režģu karšu apvienošanai ar nezināmām relatīvajām koordinātu sistēmām daudzu robotu sistēmās, kurās karšu apvienošana ir tikai viens no uzdevumiem, un attiecīgi veicams ātri [Car 2008]. Kā demonstrēts tālāk 5. nodaļā, šī lokālās karšu apvienošanas metode ir spējīga apvienot lokāli neprecīzas kartes. Turklāt tā ļauj iegūt vairākas karšu apvienošanas hipotēzes [Car 2008].

Izmantotās lokālo karšu apvienošanas metodes galvenā ideja ir Hjū spektru izgūšana no robotu lokālajām kartēm un savstarpējo korelāciju meklēšana starp diviem spektriem [Car 2008]. Iezīmju telpa un pārmeklēšanas stratēģija ir savā starpā cieši saistītas, un pārmeklēšana izpaužas tikai kā lokālo maksimumu meklēšana iezīmju telpās – sastādītajos spektros. Hjū spektra izgūšanai tiek izmantota Hjū Transformācija, kas pārveido katru attēla punktu (jeb karšu apvienošanas gadījumā aizņemtības režģa šūnu), kas atspoguļots Dekarta koordinātu sistēmā, par taisnēm polārajā koordinātu sistēmā.

3.3.2. EvalIM – Hipotēzes novērtējums lokāli neprecīzām kartēm

Veiksmīgai izmantošanai daudzu robotu sistēmās karšu sastādīšanas laikā karšu apvienošanas hipotēzes novērtējumam ir jābūt noturīgam pret karšu lokālām neprecīzītātēm. Lokālas neprecīzītātes atspoguļo robota sensoru kļūdas un lokālas novirzes no reālās robota atrašanās vietas. Robotu sensoru un efektoru nepilnības neļauj sastādīt pilnīgi precīzas kartes

[Thr 2006], tāpēc visas reālās robotu sistēmās sastādītās kartes ir vai nu lokāli vai globāli neprecīzas.

Promocijas darba ietvaros ir izstrādāts un piedāvāts karšu apvienošanas hipotēzes novērtējums EvaLIM (saīsinājums no **E**valuation of Map Merging Hypothesis for **L**ocally **I**naccurate **M**aps), kas spēj novērtēt lokāli neprecīzu karšu līdzību, kā arī ļauj mainīt konkrētu šūnu tipa ietekmi uz rezultātu. EvaLIM vērtība tiek aprēķināta, izmantojot formulu 3.6.

$$SM_{m_1, m_2} = w_{occ} * s_{occ} + (1 - w_{occ}) * s_{free} \quad (3.6.)$$

w_{occ} – ‘aizņemto’ šūnu svars, s_{occ} – ‘aizņemto’ šūnu līdzības novērtējums, s_{free} – ‘brīvo’ šūnu līdzības novērtējums

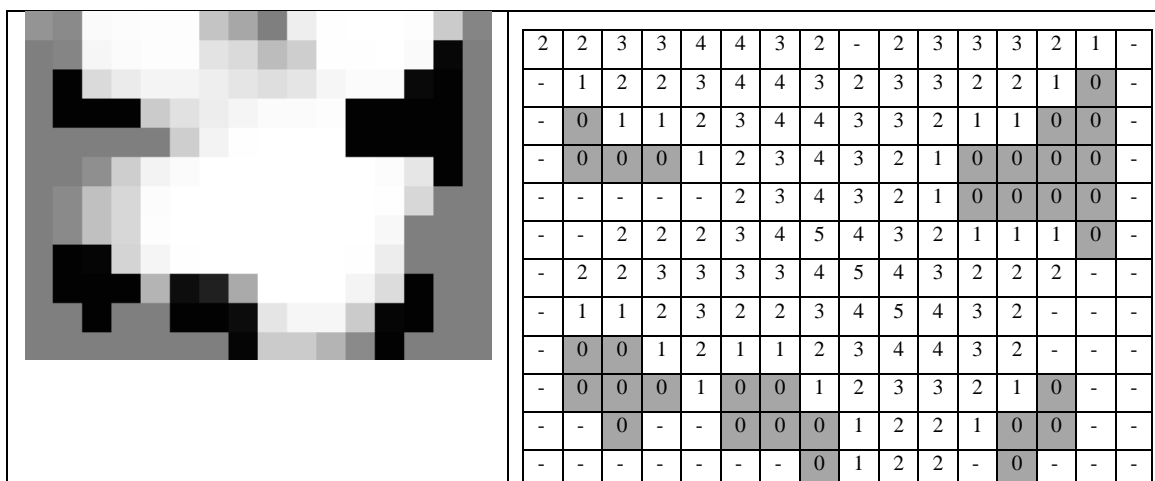
‘Aizņemto’ šūnu svars var pieņemt jebkuru vērtību no 0 līdz 1. Ja šī vērtība ir lielāka par 0.5, tad ‘aizņemto’ šūnu līdzība tiek uzskatīta par svarīgāku nekā ‘brīvo’ šūnu līdzība.

Aprēķinot šūnu līdzību, ir nepieciešams viens parametrs – sliekšnis d_{max} , kas raksturo, cik tālu var sniegties karšu sastādīšanas kļūda konkrētajās kartēs. Šis sliekšnis definē Manhetenas attālumu, kurā divas šūnas tiek uzskatītas ‘sasniedzamas’ – pietiekami tuvu, lai tās varētu atainot vienu un to pašu šķērsli.

Šūnu līdzība tiek aprēķināta, sastādot un izmantojot karšu **attāluma režģus**. Kartes attāluma režģis attēlo katras šūnas Manhetenas attālumu līdz tuvākajai šūnai ar iepriekš noteiktu mērķa vērtību (šūna ar vērtību ‘aizņemts’ vai ‘brīvs’) [Bir 2006].

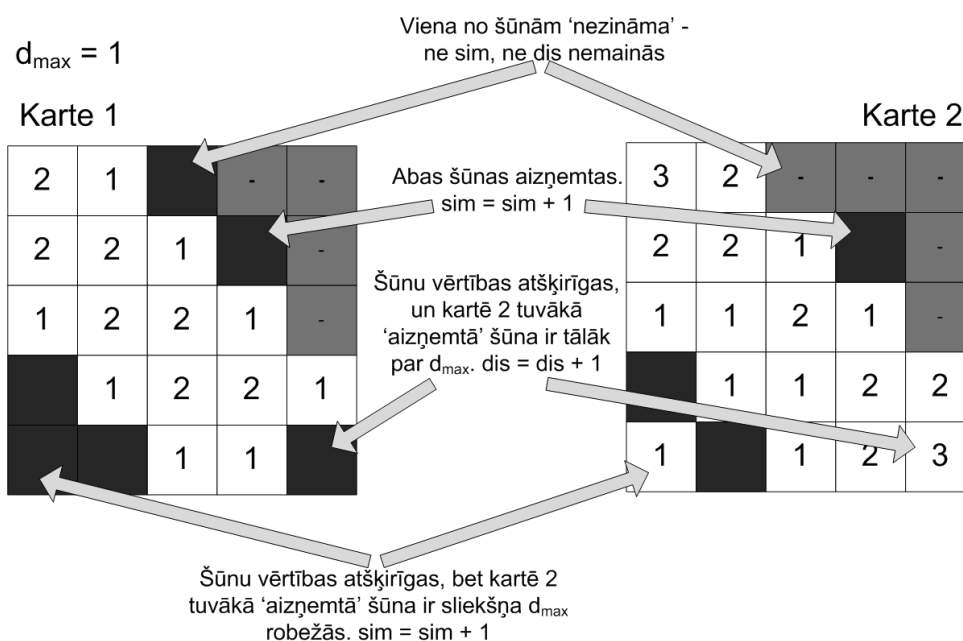
Lai pielāgotu attālumu kartes robotu karšu sastādīšanas specifikai, attālumu kartēs ir veiktas vairākas modifikācijas (3.8. attēls) :

- ‘Nezināmas’ šūnas tiek uzskatītas par ‘aizņemtām’ attālumu aprēķinu nolūkos ar to atšķirību, ka to bāzes vērtība ir ‘0’ nevis ‘1’. Šī modifikācija ir nepieciešama, jo ‘nezināmas’ šūnas var būt ‘aizņemtas’, un atšķirības starp robežšūnām (šūnas, kuras atrodas blakus ‘nezināmām’ šūnām divās kartēs var būt arī lokālas neprecizitātes. Bāzes vērtība tiek uzstādīta ‘1’ nevis ‘0’ kā kompensācija par patieso šūnas vērtības nenoteiktību.
- Kad attāluma režģis ir iegūts, ‘nezināmām’ šūnām tiek piešķirta vērtība ‘-1’. Tas tiek darīts, lai divas šūnas netiktu novērtētas kā vienādas vai atšķirīgas gadījumā, kad vienas šūnas vērtība patiesībā nav zināma.



3.8. att. Karšu apvienošanai piemērota attāluma režģa piemērs

Kad attāluma režģi ir aprēķināti, ‘aizņemto’ šūnu līdzība tiek aprēķināta, izmantojot divus skaitītājus – ‘sim’ vienādām šūnām un ‘dis’ atšķirīgām šūnām (3.9. attēls). Līdzīgi tiek aprēķināta ‘brīvo’ šūnu līdzība.



3.9. att. ‘Aizņemto’ šūnu līdzības aprēķināšana

Kad visas šūnas ir salīdzinātas, ‘aizņemto’ šūnu līdzība tiek aprēķināta kā attiecība starp vienādajām šūnām un visām salīdzinātajām šūnām, kurām nevienā kartē nav bijusi vērtība ‘nezināms’ (formula 3.7.):

$$s_{occ} = \frac{sim}{sim + dis} \quad (3.7.)$$

s_{occ} - ‘aizņemto’ šūnu līdzība, sim – līdzīgo šūnu skaits, dis – atšķirīgo šūnu skaits

Formula 3.13. ļauj iegūt tikai vienas kartes līdzību attiecībā pret otru karti. Lai iegūtu pilnu ‘aizņemto’ šūnu līdzību, tiek aprēķināta kartes M_1 līdzība attiecībā pret karti M_2 , un otrādi, un tad tiek aprēķināta abu iegūto skaitļu vidējā vērtība (formula 3.14.).

$$S_{occ_tot} = \frac{S_{occ_M1_M2} + S_{occ_M2_M1}}{2} \quad (3.14.)$$

S_{occ_tot} – kopējā ‘aizņemto’ šūnu līdzība, $S_{occ_M1_M2}$ – kartes M_1 pret karti M_2 ‘aizņemto’ šūnu līdzība, $S_{occ_M2_M1}$ – kartes M_2 pret karti M_1 ‘aizņemto’ šūnu līdzība

3.4. Kopsavilkums

Šajā nodaļā ir aprakstīta darba autores izstrādātā vairāku robotu karšu apvienošanas metode uzticamai karšu apvienošanai. Šo metodi var izmantot dinamiskai karšu apvienošanas hipotēžu izvirzīšanai un noraidīšanai, nezaudējot informāciju, kas ir iegūta pēc karšu apvienošanas. Hipotēžu atspoguļojums hierarhiskā hipotēžu kokā samazina skaitļošanas un atmiņas resursus, kas ir nepieciešami karšu apvienošanas procesam. Izmantojot šo atspoguļojumu, nav obligāti uzturēt vienlaicīgi lokālās kartes un visu līmeņu globālās kartes. Tā vietā jebkurā laikā ir iespējams iegūt globālo karti, izmantojot hipotēžu koku un lokālās kartes.

Piedāvātā metode sastāv no divām daļām, katra no kurām pilda būtisku lomu hipotēžu koka izveidē un uzturēšanā. Globālā karšu apvienošanas un hipotēžu uzturēšanas daļa pārbauda globālās kartes izveidi un pārbauda, vai hipotēžu koks dotajā laika momentā ir pareizs. Lokālā karšu apvienošana nodarbojas ar divu karšu hipotēzes meklēšanu, ņemot vērā iepriekšējo neveiksmīgo karšu apvienojumu pieredzi.

Kaut arī izstrādātā karšu apvienošanas metode ir izstrādāta un pārbaudīta (skatīt 5. nodaļu) konkrētam karšu tipam – metriskām aizņemtības režģu kartēm –, to teorētiski ir iespējams pielāgot un pielietot arī citiem karšu veidiem ar nosacījumu, ka karšu relatīvo novietojumu ir iespējams attēlot 3.1. apakšnodaļā definētajā formā. Lai tas būtu iespējams, ir atbilstoši karšu tipam jāmaina sekojošas karšu apvienošanas metodes komponentes: lokālās karšu apvienošanas algoritms un karšu apvienojuma hipotēzes novērtējuma aprēķināšanas algoritms.

Citas karšu apvienošanas metodes komponentes (hipotēžu koka, noraidīto hipotēžu saraksta un karšu apvienošanas vēstures uzturēšanas algoritmi) var palikt nemainīgas, arī mainoties karšu tipam.

4. KARŠU SASTĀDĪŠANAS SISTĒMAS REALIZĀCIJA

Šajā nodaļā ir aprakstīta promocijas darba ietvaros izstrādāta karšu sastādīšanas pieeja 4.1. apakšnodaļā aprakstītajai daudzu robotu sistēmai. Karšu sastādīšanas pieeja ir balstīta uz bināro Beiesa filtra karšu sastādīšanu [Thr 2005] (formula 4.1.). Algoritma modifikācija atbalsta tuva attāluma sensoru izmantošanu.

$$l_t = l_{t-1} + \log \frac{p(x|z_t)}{(1 - p(x|z_t))} - \log \frac{p(x)}{1 - p(x)} \quad (4.1.)$$

l_t – pēckeksperimentu pārliecības logaritmiskās atšķirības binārā stāvokļa mainīgajam, l_{t-1} – iepriekšējā šūnas logaritmiskās atšķirības vērtība, z_t – sensoru mērījuma vērtība (vai nu *aizņemts* vai *brīvs*), $p(x|z_t)$ – varbūtība, ka šūnas vērtība ir ‘aizņemts’, balstoties uz pašreizējo mērījumu, $p(x)$ – iepriekšējā šūnas aizņemības varbūtība.

4.1. Daudzu robotu sistēmas apraksts

Daudzu robotu sistēmas realizācijai tiek izmantoti iRobot Roomba560 putekļusūcēju roboti [iRo 2012], kas ir papildus aprīkoti ar uz Intel Atom CPU balstītu iebūvētu skaitļošanas ierīci, kā arī ar WiFi un video kameru [RTU 2013]. Robotu sistēmas mērķis ir piedāvāt tādu daudzu robotu sistēmu, kas realizē efektīvu koordināciju robotu starpā, lai sasniegtu augstu darba efektivitāti uzdevumu plānošanā un piešķiršanā un trajektoriju plānošanā. Koordinācijai un pārvietošanās plānošanai robotiem ir nepieciešams WiFi un papildus skaitļošanas resursi, savukārt atrašanās vietas noteikšanai roboti izmanto video kameras [RTU 2013].

Roboti ir spējīgi noteikt savu atrašanās vietu telpā, izmantojot mākslīgas vides iezīmes. Šķēršļu identificēšanai ir pieejami tikai iRoomba iebūvētie sadursmes un tuva attāluma sensori, kas ļauj identificēt šķēršļus dažādu centimetru attālumā [iRo 2012].

Sistēma ir paredzēta lietošanai iekštelpu vidēs ar zināmām telpu dimensijām. Iekštelpu vidēm ir augsta varbūtība mainīties (piemēram, mēbeļu izvietošana maiņā), un autonomai sistēmas darbībai ir nepieciešama automātiska kartes sastādīšana, izvairoties no manuālas kartes pārzīmēšanas katru reizi, kad telpas izkārtojums mainās.

Problēma, kas ir tiek aplūkota šajā nodaļā, ir kartes sastādīšana ar primitīviem sensoriem – sadursmes sensoriem. Izstrādātajā daudzu robotu sistēmā video kamera ir vērsta uz griestiem un tiek izmantota tikai robotu pašlokālizācijai vidē. Bez kameras ir pieejami tikai

tuva attāluma sensori, un tie tiek izmantoti šķēršļu uztveršanai. Vienīgais veids, kā ar šādiem sensoriem ir iespējams iegūt informāciju par apkārtējo vidi, ir pastāvīgi aprēķināt telpu, kuru aizņem robots, un reģistrēt sadursmes ar šķēršļiem.

4.1.1. Marķieru pašlokalizācija

Daudzu robotu sistēma izmanto integrētu iekštelpu robotu pašlokalizācijas pieeju, kas ir balstīta uz mākslīgu vides iezīmju – marķieru – izmantošanu [Nik 2013]. Roboti ir spējīgi šīs vides iezīmes vizuāli izsekot.

Lai nodrošinātu robotu spēju noteikt to precīzu atrašanās vietu, marķieri tiek uzstādīti uz griestiem, un roboti izmanto kameras, lai noteiktu savu atrašanās vietu attiecībā pret šiem marķieriem. Katrs marķieris ir unikāls un atpazīstams no jebkuras puses. Izmantojot šādu risinājumu, vienmēr, kad ir redzami marķieri, ir pieejamas gan robota koordinātes, gan tā virziens.

Tomēr vides konfigurācijas dēļ roboti ne vienmēr redz marķierus. Tāpēc otrs svarīgs pozīcijas un kustības informācijas avots ir odometrija, un situācijās, kad nav redzami marķieri, pozīcijas noteikšanai tiek izmantota tā.

4.1.2. Kartes atspoguļojums

Kartes vairāku robotu sistēmā tiek attēlotas, izmantojot aizņemtības režģus. Katra robota pozīcija tiek atspoguļota ar trīsvietīgu kortežu $\langle x, y, \text{virziens} \rangle$, kur x ir robota X koordināte, y ir robota Y koordināte, un virziens ir robota rotācija.

4.2. Binārā Beiesa filtra karšu sastādīšana

Vienkāršs, bet efektīvs kartes šūnu aizņemtības vērtību atjaunošanas algoritms ir binārais Beiesa filtrs (formula 4.1.) [Thr 2005]. Tas tiek pielietots karšu sastādīšanā, lai novērtētu šūnu bināro stāvokli laika gaitā, kur binārais stāvoklis ir šūnas stāvoklis ('aizņemts' = 1, un 'brīvs' = 0). Neatkarīgi no uz doto brīdi aprēķinātās šūnas aizņemtības varbūtības, tiek pieņemts, ka šūnai ir tikai viens iespējamais pareizais stāvoklis un tas laika gaitā nemainās – tas ir, vide ir statiska. Binārais Beiesa filtrs ļauj uzturēt 'atmiņu' par iepriekšējiem sensoru mērījumiem un vienlaicīgi nodrošina, ka šūnas vērtība vienmēr ir intervālā $[0; 1]$, kas atbilst darbā pieņemtajam aizņemtības režģa atspoguļojumam.

4.3. Modificēta binārā Beiesa filtra karšu sastādīšana

Diemžēl praktiskas dabas problēmas neļauj bināro Beiesa filtru piemērot konkrētajai daudzu robotu sistēmai, tāpēc šajā apakšnodaļā tiek piedāvāta modificēta binārā Beiesa filtra karšu sastādīšana.

Roboti kartes sastādīšanas sistēmā sazinās ar serveri, izmantojot bezvadu tīklu, un uz servera tiek apvienotas to kartes. Bezvadu tīkla noslodzes un nepieciešamo skaitļošanas resursu samazināšanai kartes izšķirtspēja ir samazināta līdz 10×10 centimetri katrai šūnai. Šāds šūnas izmērs nozīmē mazāku kartes izmēru baitos, kā arī mazāk aprēķinus karšu sastādīšanai, karšu apvienošanai un robota ceļa plānošanai.

Lielā šūnu izmēra un robotu sensoru ekipējuma dēļ ir nepieciešamas modifikācijas binārajā Beiesa filtrā. Normālā gadījumā binārais Beiesa filtrs izmaina aizņemtības varbūtības vienlīdz strauji gan mērījumiem 'aizņemts', gan mērījumiem 'brīvs'. Šī situācija ir nevēlama piedāvātajā karšu sastādīšanas sistēmā robotu informācijas iegūšanas par apkārtējo vidi dēļ – tie atjauno karti gan reģistrējot sadursmes ar objektiem, gan arī pastāvīgi aprēķinot laukumu, kuru robots aizņem bez sadursmēm. Parasti sensoru mērījumi atzīmē šūnas kā 'aizņemtas' tikai dažas reizes – brīdī, kad robots saduras ar šķērslī un tiek aktivizēti trieciena sensori. Savukārt šūnas tiek atzīmētas kā brīvas katrā pozīcijas atjaunošanas reizē, kad netiek fiksēts robota tiešs kontakts ar šķērslī.

Ja oriģinālais Beiesa filtrs tiek atstāts nemodificēts, tad šūnu sensora rādījumi 'brīvs' ātri var pārrakstīt šūnas ar vērtību 'aizņemts'. Gala rezultātā daudzas šūnas, kas patiesībā atbilst aizņemtiem apgabaliem, tiks atzīmētas kā 'brīvas', kas neatbilst īstenībai.

Lai no tā izvairītos, šūnu aizņemtības vērtības tiek atjaunotas, izmantojot bināro Beiesa filtra algoritmu tikai tajos gadījumos, kad sensora rādījums ir 'aizņemts'. Ja šūna pašreizējā sensora mērījumā ir atzīmēta kā 'brīva', tad logaritmisko atšķirību vērtība tiek samazināta par konstantu vērtību. Šūnas vērtības atjaunošanas pseidokodu var redzēt 4.1. attēlā.

Cell value update (l_{t-1}, z_t):

$$l_t = \begin{cases} l_t = l_{t-1} + \log \frac{p(x|z_t)}{(1 - p(x|z_t))} - \log \frac{p(x)}{1 - p(x)}, & \text{ja } z_t \text{ ir aizņemts} \\ l_t = l_{t-1} - \text{LogOddsDecrease}, & \text{ja } z_t \text{ ir brīvs} \end{cases}$$

$$p(x) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(l_t)}$$

$l_{t-1} = l_t$

return $p(x)$

4.1. att. Modificēts binārā Beiesa filtra karšu sastādīšanas algoritms

l_t attēlo pēceksperimentu pārlicības (angliski *posterior belief*) logaritmiskās atšķirības binārā stāvokļa mainīgajam. l_{t-1} ir iepriekšējā šūnas logaritmiskās atšķirības vērtība. z_t ir sensoru mērījuma vērtība (vai nu ‘aizņemts’ vai ‘brīvs’). $p(x/z_t)$ ir varbūtība, ka šūnas vērtība ir *aizņemts*, balstoties uz pašreizējo mērījumu. $p(x)$ ir iepriekšējā šūnas aizņemības varbūtība.

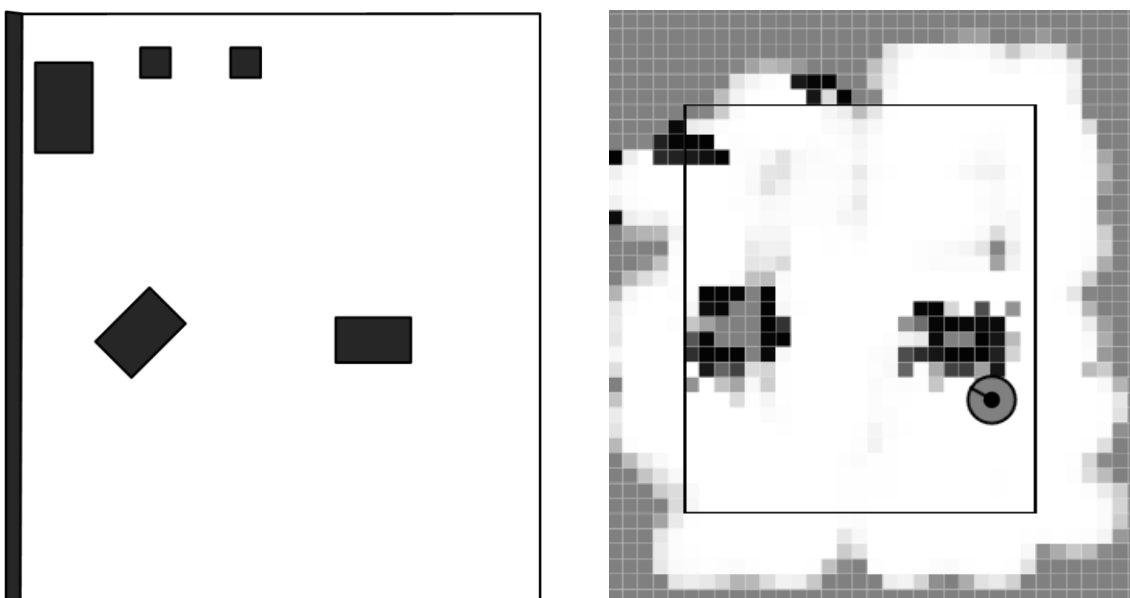
LogOddsDecrease ir šūnas logaritmiskās atšķirības samazināšanās ātrums, un tās vērtība ir atkarīga no sensora mērījumu biežuma. Konkrētajā robotu sistēmā laiks, kurā šūnas vērtībai vajadzētu mainīties no ‘aizņemts’ līdz ‘brīvs’, eksperimentāli ir noteikts vienāds ar aptuveni 2,5 sekundēm, sensoru mērījumu frekvence ir 50 reizes sekundē, un no šiem parametriem aprēķinātā *LogOddsDecrease* konstante ir 0.008 (formula 4.2).

$$\text{LogOddsDecrease} = \frac{1}{t * f} \quad (4.2.)$$

t – laiks, kurā šūnas vērtībai jāmainās no ‘aizņemts’ līdz ‘brīvs’ (sekundēs), f – sensoru mērījumu frekvence (reizes/sekundē)

4.4. Karšu sastādīšanas sistēmas darbības tests

Lai testētu izstrādātās karšu sastādīšanas sistēmas spēju sastādīt apkārtējās vides karti, tika veikts eksperiments iekštelpas vidē. Vides izmērs ir 3.5×3.5 metri, kas atbilst 35×35 šūnām aizņemības režģī. Vide satur piecus šķēršļus – trīs kastes un divas galda kājas.



4.2. att. Eksperimenta vides konfigurācija

Ar izstrādāto daudzu robotu sistēmu tika izpētīta vide un sastādīta 4.2. attēlā redzamā karte. Melnais taisnstūris attēlo virtuālo sienu, kura tiek izmantota, lai ierobežotu robotu eksperimentālajā vidē. Ja robots cenšas atstāt iezīmēto reģionu, tas saņem signālu atgriezties. 4.2. attēlā var redzēt, ka robots ir sastādījis reālajai situācijai tuvu vides karti, un visi vides objekti, izņemot vienu galda kāju, ir identificēti.

4.5. Kopsavilkums

Problēma, kas ir tiek aplūkota šajā nodaļā, ir kartes sastādīšana ar primitīviem sensoriem – sadursmes sensoriem. Vienīgais veids, kā ar šādiem sensoriem ir iespējams iegūt informāciju par apkārtējo vidi, ir pastāvīgi aprēķināt telpu, kuru aizņem robots, un reģistrēt sadursmes ar šķēršļiem.

Pateicoties marķieru pašlokālizācijai, robotu koordinātes vienmēr ir zināmas, un, balstoties uz to, kartes šūnām var piešķirt vērtības, atbilstoši sensoru mērījumiem. Vienkāršs, bet efektīvs kartes šūnu aizņemtības vērtību atjaunošanas algoritms ir binārais Beiesa filtrs [Thr 2005]. Binārais Beiesa filtrs ļauj uzturēt ‘atmiņu’ par iepriekšējiem sensoru mērījumiem un vienlaicīgi nodrošina, ka šūnas vērtība vienmēr ir intervālā $[0; 1]$, kas atbilst darbā pieņemtajam aizņemtības režģa atspoguļojumam.

Diemžēl praktiskas dabas problēmas neļauj bināro Beiesa filtru piemērot konkrētajai daudzu robotu sistēmai. Ja oriģinālais Beiesa filtrs tiek atstāts nemodificēts, tad šūnu sensora rādījumi ‘brīvs’ ātri var pārrakstīt šūnas ar vērtību ‘aizņemts’. Gala rezultātā daudzas šūnas, kas patiesībā atbilst aizņemtiem apgabaliem, tiks atzīmētas kā ‘brīvas’, kas neatbilst īstenībai.

Tāpēc šajā nodaļā ir piedāvāta modificēta binārā Beiesa filtra karšu sastādīšana. Šūnu aizņemtības vērtības tiek atjaunotas, izmantojot bināro Beiesa filtra algoritmu tikai tajos gadījumos, kad sensora rādījums ir ‘aizņemts’. Ja šūna pašreizējā sensora mērījumā ir atzīmēta kā ‘brīva’, tad logaritmisko atšķirību vērtība tiek samazināta par konstantu vērtību, kas ir funkcija no sensoru mērījumu biežuma un nepieciešamā šūnas izmaiņas laika.

Ekspierimenta rezultāti parāda, ka piedāvātā pieeja ir spējīga sastādīt robotu kartes, kuras roboti var izmantot, lai pārvietotos vidē un izpildītu uzdevumus specifiskās vides vietās.

5. KARŠU APVIENOŠANAS METODES REALIZĀCIJA

Šajā nodaļā ir aprakstīta izstrādātā eksperimentālā sistēma, veiktie eksperimenti, un to rezultāti, kas ļauj spriest par izstrādātās karšu apvienošanas metodes darbību, kā arī tās efektivitāti un praktisko pielietojumu.

5.1. Eksperimentālās sistēmas apraksts

Izstrādātā karšu apvienošanas metode ReMMerg ir realizēta programmatūras sistēmā, un kā eksperimentu ieejas dati ir izmantotas 4. nodaļā aprakstītās daudzu robotu sistēmas sastādītās kartes, kuras ir atbilstošas metodes pielietojuma videi – lokāli neprecīzas aizņemības režģu kartes.

Izstrādātā programmatūras sistēma pilnībā realizē visas 3. nodaļā aprakstītās datu struktūras un procesus. Papildus ir izveidots arī karšu apvienošanas darbību žurnāls, kas ļauj sekot notikumiem, kas norisinās izstrādātajā sistēmā.

5.2. Karšu apvienošanas hipotēzes novērtējuma parametru izvēlēšanās

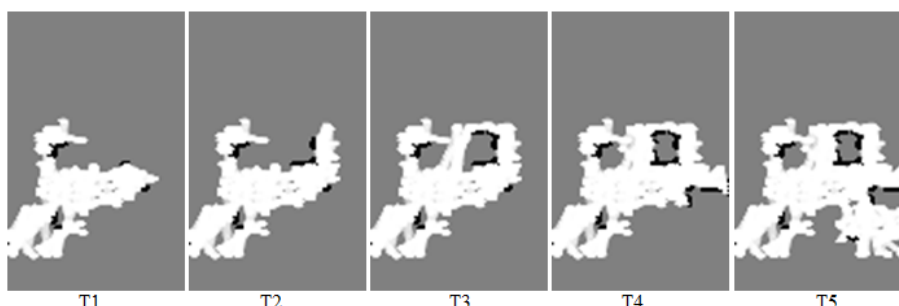
Eksperimenta mērķis:

Eksperimenta mērķis ir noteikt izstrādātās karšu apvienošanas hipotēzes novērtējuma EvaLIM piemērotākos parametrus eksperimentos izmantotajai daudzu robotu sistēmai. Papildus EvaLIM darbība tiek salīdzināta ar literatūrā visplašāk izmantoto novērtēšanas metodi – tiešo šūnu salīdzināšanu [Bir 2006], kura ir EvaLIM speciālgadījums pie attāluma sliekšņa $d_{\max}=0$.

Eksperimenta realizācija:

Abas karšu apvienošanas hipotēzes novērtējuma metodes tika salīdzinātas, sastādot kartes trīs dažādās vides konfigurācijās. Vides konfigurācijā nr.1 roboti sastādīja astoņas daļējas kartes. Pārējās divās vides konfigurācijās (nr.2 un nr.3) tika sastādītas deviņas daļējas kartes.

Karšu sastādīšanas process tika fiksēts, secīgi saglabājot daļēji sastādītas kartes. Eksperimentiem ir izmantotas katras daļējās kartes piecas sastādīšanas stadijas. Vienas kartes sastādīšanas piemērs ir redzams 5.1 attēlā.



5.1. att. Eksperimentos izmantotās daļējās kartes sastādīšanas secības piemērs

Ar katru karšu kopu tika veikti 36 globālās kartes sastādīšanas mēģinājumi (pavisam kopā 104 globālās kartes sastādīšanas mēģinājumi) – kombinācijas no trīs parametriem:

- Trīs hipotēžu apstiprināšanas sliekšņi $h_{val_{min}}$ [0,93, 0,95, 0,97].
- Četri hipotēžu novērtēšanas attāluma sliekšņi d_{max} [0, 1, 2, 3]. Pie attāluma sliekšņa $d_{max}=0$ EvaLIM metodes rezultāti ir identiski tiešajai šūnu salīdzināšanai.
- Trīs lokālās apvienošanas hipotēžu kopas h_{set} [8, 16, 24], kas raksturo, cik daudz transformācijas aprēķina lokālās karšu apvienošanas metode katrā apvienošanas mēģinājumā.

Visām karšu apvienošanas konfigurācijām ir aplūkoti pirmie 10 karšu apvienošanas soļi. Katra soļa apvienojumu skaits ir $[n - 1]$, kur n ir augstākā līmeņa hipotēžu skaits.

Eksperimenta rezultāti:

Rezultāti 5.1. tabulā atspoguļo vidējo karšu skaitu katras konfigurācijas lielākajā hipotēzē procentos. Jo vairāk kartes ir iekļautas lielākajā hipotēzē, jo labāks rezultāts ir iegūts.

5.1. tabula. Karšu skaits lielākajā hipotēzē (vidējā vērtība procentos) visām konfigurācijām

		Attāluma sliekšnis d_{max}											
		0			1			2			3		
		Hipotēžu apstiprināšanas sliekšnis $h_{val_{min}}$											
		0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97
Lok. hipotēžu kopa h_{set}	8	0	0	0	45,37	18,51	7,4	49,07	52,77	45,37	45,83	45,37	37,96
	16	0	0	0	60,18	18,51	7,4	64,81	64,81	37,96	68,05	68,05	56,48
	24	0	0	0	49,07	25,92	7,4	68,51	68,51	60,18	60,64	79,16	71,29

Pie attāluma sliekšņa $d_{max}=0$ visās konfigurācijās un karšu kopās netiek iegūta neviena hipotēze. Pie attāluma sliekšņa $d_{max}=0$ EvaLIM metodes rezultāti ir identiski tiešajai šūnu salīdzināšanai, un hipotēžu neiegūšana demonstrē, ka tiešā šūnu salīdzināšana nav piemērota

lokāli neprecīzu karšu apvienojumu novērtēšanai un tās vietā ir labāk izmantot EvaLIM novērtējumu ar attāluma sliekšni d_{max} , kas ir augstāks par 0. Vislabākie rezultāti tika iegūti pie attāluma sliekšņiem $d_{max}=2$ un $d_{max}=3$ (attiecīgi vidēji 68,51% un 79,16% kartes ir iekļautas lielākajā hipotēzē pie konfigurācijas ar augstākajiem rezultātiem).

Tomēr 5.2. tabulā var redzēt, ka attāluma sliekšnis $d_{max}=3$ nespēj identificēt kļūdainus apvienojumus. Kopā 62.96% hipotēžu pie attāluma sliekšņa $d_{max}=3$ satur vismaz vienu nepareizu hipotēzi. No tā var secināt, ka ar augstākiem attāluma sliekšņiem karšu apvienošanā var iegūt lielākas globālās kartes, bet arī kļūdainu apvienojumu risks ir augstāks.

5.2. tabula. Kļūdaini apvienojumi (procentos no apvienojumu skaita) visām konfigurācijām

		Attāluma sliekšnis d_{max}											
		0			1			2			3		
		Hipotēžu apstiprināšanas sliekšnis											
		0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97
Lok. hipotēžu kopa	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66,66	66,66	33,33
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	33,33
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66,66	66,66	33,33

Lai uzstādītu piemērotāko attāluma sliekšni d_{max} , ir jāņem vērā divas vērtības: a) troksnis kartēs – cik ļoti var atšķirties šķēršļa novietojums kartē un realitātē un b) kartes šūnu izmērs. d_{max} vērtībai ir jābūt aptuveni vienādai ar attālumu, kurā ir lielākā daļa kļūdu, atbilstoši šūnu izmēriem. No vairākām iespējamām vērtībām rekomendācija ir izmantot augstāko attāluma sliekšni, kas nodrošina konkrētajai sistēmai pieņemami zemu nepareizu apvienojumu skaitu. Aplūkotajā robotu sistēmā ir jāizmanto attāluma sliekšnis $d_{max}=2$.

Rezultātu interpretācija un secinājumi:

Eksperimentu rezultāti demonstrē, ka piedāvātā globālās kartes apvienošanas metode spēj sastādīt daļējas globālās kartes un daļā gadījumu pilnas globālās kartes, bet labāko rezultātu sasniegšanai ir rūpīgi jāizvēlas metodes parametri. Augstāku attāluma sliekšņu d_{max} izmantošana iegūst lielākas globālās kartes hipotēzes, bet arī nepareizu apvienojumu risks ir augstāks.

Balstoties uz eksperimenta rezultātiem, tālāk promocijas darbā kā karšu apvienošanas metodes parametri ir izvēlēti: Attāluma sliekšnis $d_{max}=2$; Karšu apvienošanas hipotēzes apstiprināšanas sliekšnis $h_{val_{min}}=0.95$; Lokālās apvienošanas hipotēžu kopas izmērs $h_{set}=16$.

5.3. Izstrādātās metodes ReMMerg darbības novērtēšana

5.3.1. Globālās kartes sastādīšana

Eksperimenta mērķis:

Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt metodes spēju sastādīt globālo karti, neizmantojot informāciju par karšu relatīvajām koordināšu sistēmām un savstarpēju pārklājumu esamību.

Eksperimenta realizācija:

Eksperimenta ieejas dati ir iegūti no 5.2. apakšnodaļā aprakstītajiem eksperimentiem. Šajā eksperimentā ir aplūkoti tikai rezultāti ar iepriekš izvēlētajiem metodes parametriem. Individuāli ir analizēti rezultāti katrai no trim vides konfigurācijām.

Katrai vides konfigurācijai tika sastādītas lokālo apvienojumu iespējamības kopas. Lokālo apvienojumu iespējamības kopas attēlo, kuras lokālo karšu kombinācijas izmantotā lokālā karšu apvienošanas metode patstāvīgi spēj apvienot – tas ir, atrast transformāciju karšu starpā tā, lai šī apvienojuma novērtējums pārsniegtu hipotēžu apstiprināšanas sliekšni.

Eksperimenta rezultāti (vides konfigurācija nr.1):

Īstenojot karšu apvienošanu, ReMMerg ir izvirzījusi divas augstākā līmeņa hipotēzes (to vizuālais salīdzinājums ar pilnu globālo karti 5.2. attēlā) - $[[M3+M6]+[M1+M2]]$ un $[M4+M7]$. Divas kartes (**M5** un **M8**) nav iekļautas nevienā no hipotēzēm. Nav arī iegūta viena globālās kartes hipotēze, bet tikai divas augstākā līmeņa hipotēzes, no kurām lielākā satur 4 lokālās kartes, bet mazākā – 2 lokālās kartes.

Lielākā augstākā līmeņa hipotēze iekļauj tikai 50% no lokālajām kartēm, kas ir vājš rezultāts, tomēr ir vairāki no globālās karšu apvienošanas metodes neatkarīgi faktori, kas neļauj sasniegt labākus rezultātus:

1. **Lokālās karšu apvienošanas metodes ierobežojumi.** Neviena no eksistējošā lokālo karšu apvienošanas metodēm nespēj atrast karšu kopīgos apgabalus visos gadījumos.
2. **Globālas neprecizitātes vienā no kartēm.** Kaut arī, balstoties uz lokālo apvienojumu kopām (5.3.att.), vienā apvienojumu kopā iekļaujas kartes **M1**, **M2**, **M3**, **M5**, **M6**, tomēr no šīm kartēm tiek sastādīta hipotēze no 4 kartēm – $[[M3+M6]+[M1+M2]]$. Tas ir izskaidrojams ar to, ka lokālās kartes **M3** fragments ir globāli neprecīzs, kas neļauj hipotēzi $[[M3+M6]+[M1+M2]]$, kurā ir iekļauta **M3**, apvienot ar karti **M5**, jo to kopīgajā daļā ir pārāk lielas nesakritības.

Pilna globālā karte



ReMMerg hipotēze nr.1



[[M3+M6]+[M1+M2]]

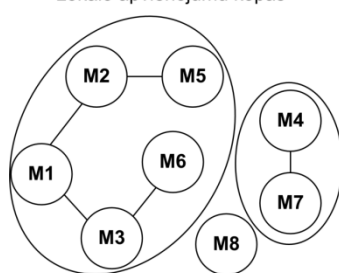
ReMMerg hipotēze nr.2



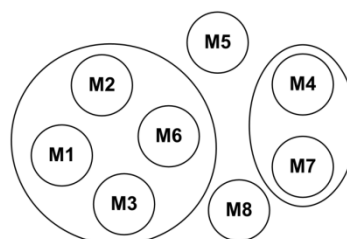
[M4+M7]

5.2. att. Vides konfigurācija nr.1: manuāli sastādīta pilna globālā karte (kreisajā pusē) un ReMMerg sastādītās augstākā līmeņa hipotēzes (labajā pusē)

Lokālo apvienojumu kopas



ReMMerg metodes iegūtās apvienojumu kopas



5.3. att. Vides konfigurācija nr.1: apvienojumu kopas.

Ņemot vērā minētos faktorus, ir jāsecina, ka, sastādot globālo karti vides konfigurācijai nr.1, ReMMerg metodei ir sasniegusi labākos rezultātus, kas ir iespējami pie esošās daļējo karšu precizitātes un lokālās karšu apvienošanas metodes ierobežojumiem.

Eksperimenta rezultāti (vides konfigurācija nr.2):

Globālās karšu apvienošanas rezultātā ReMMerg ir izvirzījusi vienu globālās kartes hipotēzi (tās salīdzinājums ar pilnu globālo karti ir redzams 5.4. attēlā) - [M9+[[M2+[M4+M8]]+[M7+[M6+[M1+M5]]]]. M3 nav iekļauta globālās kartes hipotēzē.

Pilna globālā karte

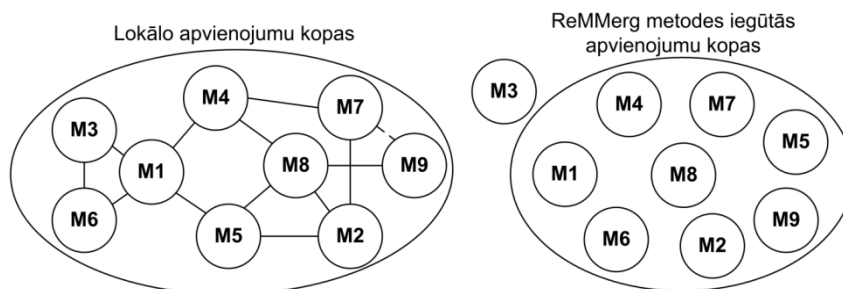


ReMMerg hipotēze



5.4. att. Vides konfigurācija nr.2: manuāli sastādīta pilna globālā karte (kreisajā pusē) un ReMMerg sastādītā augstākā līmeņa hipotēze (labajā pusē)

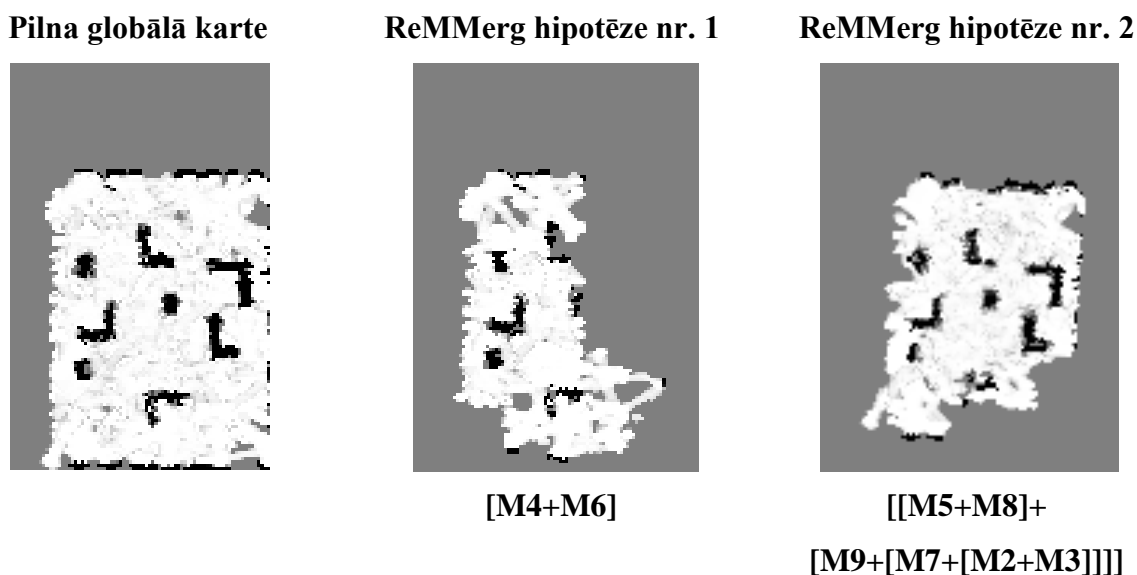
Vienīgā karte, kas nav iekļauta globālās kartes hipotēzē, ir **M3**. Karte **M3**, kā attēlo lokālo apvienojumu kopa (5.5. attēls), ir apvienojama ar divām citām kartēm – **M1** un **M6**. Arī globālās neprecizitātes nevienā no vides konfigurācijas nr.2 lokālajām kartēm nav sastopamas.



5.5. att. Vides konfigurācija nr.2: apvienojumu kopas

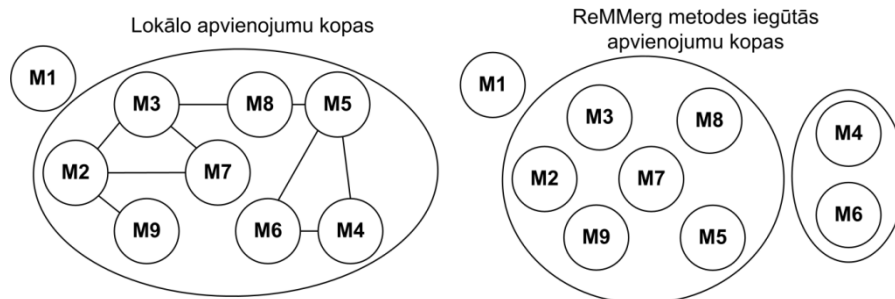
Eksperimenta rezultāti (vides konfigurācija nr.3):

ReMMerg metode ir izvirzījusi divas augstākā līmeņa hipotēzes (tās un pilna globālā karte ir redzamas 5.6. attēlā) – $[M4+M6]$ un $[[M5+M8]+[M9+[M7+[M2+M3]]]]$. Karte **M1** nav iekļauta nevienā no hipotēzēm. Nav arī iegūta viena globālās kartes hipotēze, bet divas augstākā līmeņa hipotēzes, no kurām lielākā satur 6 lokālās kartes, bet mazākā – 2 kartes.



5.6. att. Vides konfigurācija nr.3: manuāli sastādīta pilna globālā karte (kreisajā pusē) un ReMMerg sastādītās augstākā līmeņa hipotēzes (labajā pusē)

Lokālo un ReMMerg metodes iegūto apvienojumu kopu salīdzinājums (5.7. attēls) demonstrē, ka izvirzītās divas augstākā līmeņa hipotēzes $[M4+M6]$ un $[[M5+M8]+[M9+[M7+[M2+M3]]]]$ ir iespējamās lokālo apvienojumu kopas divas daļas. Karte **M1** nevienā hipotēzē nav iekļauta, jo tā nav apvienojama ne ar vienu citu lokālo karti.



5.7. att. Vides konfigurācija nr.3: apvienojumu kopas

Rezultātu interpretācija un secinājumi:

Nevienā no trim aplūkotajiem globālās kartes sastādīšanas gadījumiem netiek sastādīta pilna globālā karte. Visās vides konfigurācijās, spriežot pēc lokālo apvienojumu iespējamības tabulām, ir iespējams iegūt globālās kartes, kurās ir iekļauts lielāks skaits lokālo karšu, bet tikai vides konfigurācijai nr.1 šo rezultātu traucē sasniegt viena globāli neprecīza lokālā karte.

5.3.2. Globālās kartes hipotēžu izvirzīšana

Eksperimenta mērķis:

Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt, vai izstrādātā metode ReMMerg izvirza maksimāli lielākās iespējamās hipotēzes pie esošajiem karšu neprecizitāšu un lokālās karšu apvienošanas metodes ierobežojumiem.

Eksperimenta realizācija:

Lai pārbaudītu, vai ReMMerg metode sastāda lielākās iespējamās hipotēzes, visām trim vides konfigurācijām tika iegūtas visas iespējamās karšu apvienošanas hipotēzes.

Eksperimenta rezultāti (vides konfigurācija nr.1):

5.3. tabula atspoguļo, cik bieži konkrētas lokālās kartes ir sastopamas dažādos hipotēžu līmeņos, kur hipotēžu līmeņi ir hipotēzēs iekļauto lokālo karšu skaits.

5.3. tabula. Vides konfigurācija nr.1: Karšu skaits hipotēzēs (%)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
2	40	40	40	20	20	20	20	0
3	0	100	100	0	0	100	0	0
4	100	100	100	0	0	100	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0
Kopā	42,86	57,14	57,14	14,28	14,28	42,86	14,28	0

Kā liecina iegūtie dati, lielākā hipotēze, kuru ir iespējams sastādīt vides konfigurācijā nr.1, izmantojot lokālo karšu apvienošanu ar Hjū transformāciju [Car 2008], sastāv no četrām lokālajām kartēm – **M1**, **M2**, **M3** un **M6**. Karte **M8** nav iekļauta nevienā hipotēzē, bet kartes **M4**, **M5** un **M7** parādās tikai hipotēzēs, kas sastāv no divām lokālajām kartēm.

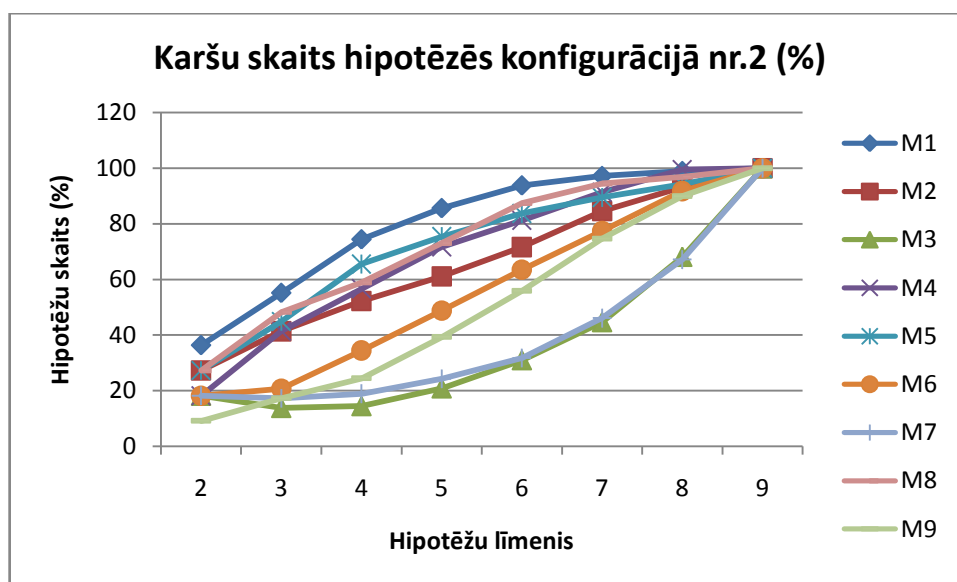
Var secināt, ka vides konfigurācijā nr.1 ir iegūtas pie izmantotās lokālo karšu apvienošanas metodes un izvēlētajiem metodes parametriem labākie iespējamie rezultāti, kas ir divas augstākā līmeņa hipotēzes $[[M3+M6]+[M1+M2]]$ un $[M4+M7]$.

Eksperimenta rezultāti (vides konfigurācija nr.2):

Visu iespējamo karšu apvienošanas hipotēžu apkopojums vides konfigurācijā nr.2 ir redzams 5.4. tabulā un 5.8. attēlā, kas atspoguļo, cik bieži konkrētas lokālās kartes ir sastopamas dažādos hipotēžu līmeņos.

5.4. tabula. Vides konfigurācija nr.2: Karšu skaits hipotēzēs (%)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
2	36,36	27,27	18,18	18,18	27,27	18,18	18,18	27,27	9,09
3	55,17	41,37	13,79	41,38	44,83	20,69	17,24	48,27	17,24
4	74,44	52,22	14,44	56,67	65,55	34,44	18,89	58,89	24,44
5	85,66	61,09	20,82	71,67	75,43	48,8	24,23	73,04	39,25
6	93,83	71,65	30,97	81,23	83,73	63,52	31,76	87,4	55,9
7	97,2	84,59	44,65	91,41	89,5	77,44	46,08	94,48	74,64
8	98,98	93,22	68,16	99,52	94,24	91,78	67,15	96,94	89,99
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Kopā	96,40	86,02	58,04	91,94	90,49	81,28	58,52	93,04	78,09



5.8. att. Vides konfigurācija nr.2: Karšu skaits hipotēzēs (%)

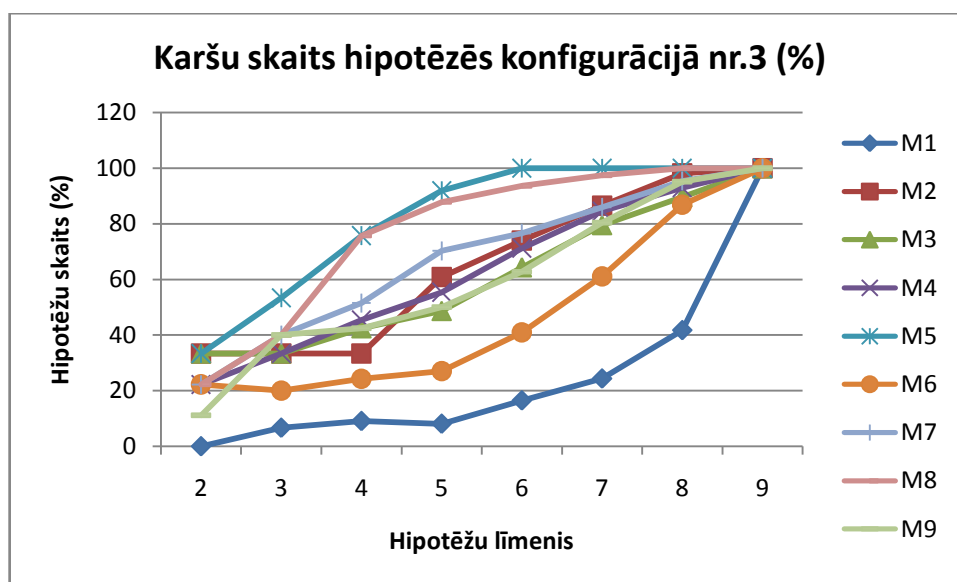
Kaut arī eksistē ceļi, kā iegūt hipotēzes no 9 lokālajām kartēm, ReMMerg ir izvirzījusi hipotēzi, kas sastāv no 8 kartēm – $[M9+[[M2+[M4+M8]]+[M7+[M6+[M1+M5]]]]$ un kura nesatur karti **M3**. Tieši lokālā karte **M3** hipotēzēs tiek iekļauta visretāk (tā ir sastopama tikai 58,04% hipotēžu).

Eksperimenta rezultāti (vides konfigurācija nr.3):

Visu iespējamo karšu apvienošanas hipotēžu apkopojums vides konfigurācijā nr.2 ir redzams 5.5. tabulā un 5.9. attēlā. Kā liecina iegūtie dati, vides konfigurācijā nr.3 ir iespējams iegūt globālās kartes hipotēzes, kuras sastāv no visām deviņām lokālajām kartēm. ReMMerg metode ir izvirzījusi hipotēzes, kas sastāv no 2 un 6 lokālajām kartēm – $[M4+M6]$ un $[[M5+M8]+[M9+[M7+[M2+M3]]]]$. Neviena no hipotēzēm nesatur karti **M1**, kura ir visretāk sastopamā karte hipotēzēs (to satur tikai 32.01% hipotēžu).

5.5. tabula. Vides konfigurācija nr.3: Karšu skaits hipotēzēs (%)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
2	0	33,33	33,33	22,22	33,33	22,22	22,22	22,22	11,11
3	6,67	33,33	33,33	33,33	53,33	20	40	40	40
4	9,09	33,33	42,42	45,45	75,76	24,24	51,51	75,75	42,42
5	8,11	60,81	48,65	55,4	91,89	27,03	70,27	87,84	50
6	16,49	73,94	64,36	71,28	100	40,96	76,59	93,62	62,76
7	24,37	86,55	79,55	84,59	100	61,06	85,99	97,48	80,39
8	41,77	98,17	89,63	92,99	100	86,89	95,43	100	95,12
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Kopā	32,01	84,36	77,28	81,60	97,52	64,03	85,00	95,03	78,93



5.9. att. Vides konfigurācija nr.3: Karšu skaits hipotēzēs

Rezultātu interpretācija un secinājumi:

Salīdzinot ReMMerg iegūtos rezultātus ar visu iespējamo hipotēžu kopu katrā konfigurācijā, tika secināts, ka ne visos gadījumos ir izvirzītas maksimāli lielākās iespējamās hipotēzes. Vides konfigurācijās nr.2 un nr.3 globālā karšu apvienošanas metode ReMMerg nonāk strupceļā izvēlēta karšu apvienojuma ceļa dēļ – visas izvirzītās hipotēzes ir pieņemamas, bet tās savā starpā vairs neizdodas apvienot. Tam ir divi izskaidrojumi:

- Lokālo karšu apvienošanas metode spēj savā starpā apvienot lokālās kartes, bet nespēj apvienot visas augstākā līmeņa hipotēzes, kas ir sastādītas no šīm kartēm.
- Lokālo karšu apvienošanas metode spēj atrast pareizo transformāciju starp augstākā līmeņa hipotēzēm, bet lielāka trokšņu līmeņa dēļ izvirzītajai hipotēzei ir pārāk zems novērtējums un tā netiek pieņemta.

5.3.3. Hipotēžu izvirzīšana ar adaptīvu hipotēžu apstiprināšanas sliekšni

Eksperimenta mērķis:

Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt, vai izstrādātā metode ReMMerg spēj izvirzīt maksimāli lielākās iespējamās hipotēzes vai vismaz uzlabot iepriekš uzrādītos rezultātus, veicot izmaiņas hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa pielietošanā.

Eksperimenta realizācija:

Eksperimenta īstenošanai tika modificēta programmatūras sistēma, ieviešot izmaiņas hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa $h_{val_{min}}$ pielietojumā. Divu lokālo karšu apvienojuma apstiprināšanai kā sliekšnis ir izmantots uzstādītais sliekšnis $h_{val_{min}}=0.95$, bet apvienojot hipotēzes, kas sastāv no vairākām kartēm, hipotēžu apstiprināšanas sliekšnis ir samazināts atbilstoši lokālo karšu skaita summai abās hipotēzēs (5.6. tabula).

5.6. tabula. Hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa izmaiņas atbilstoši lokālo karšu skaitam hipotēzēs

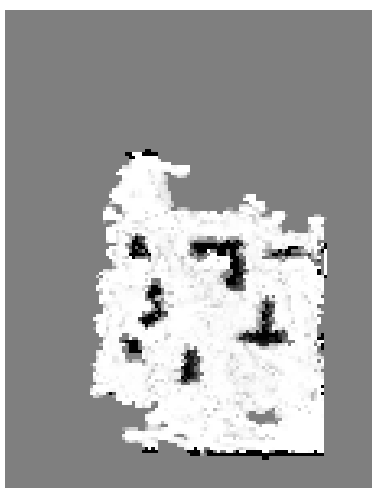
Lokālo karšu skaits hipotēzēs	Hipotēžu apstiprināšanas sliekšnis $h_{val_{min}}$	Piemērs
2	0.95	M1 un M2
3	0.948	M1+2 un M3
4	0.946	M1+2 un M3+4 M1 un M2+M3+M4
5	0.944	M1+2 un M3+M4+M5
6	0.942	M1+M2+M3 un M4+M5+M6
7	0.940	M1+M2+M3 un M4+M5+M6+M7
8	0.938	M1+M2+M3 un M4+M5+M6+M7+M8
9	0.936	M1+M2+M3+M4+M5 un M6+M7+M8+M9

Ar šīm izmaiņām hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa $hval_{min}$ pielietojumā tika veikta atkārtota globālās kartes sastādīšana visām trim vides konfigurācijām pie metodes parametriem [$d_{max}=2$; $hval_{min}=0.95$; $hset=16$].

Eksperimenta rezultāti:

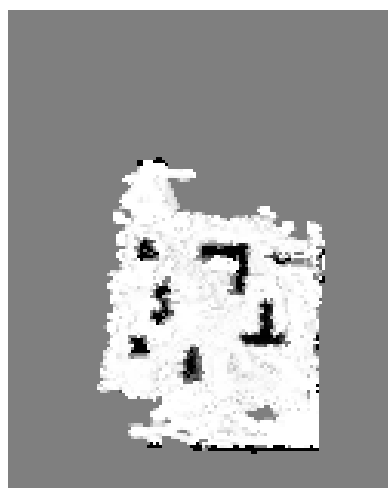
Veicot atkārtotu globālās kartes sastādīšanu vides konfigurācijā nr.1, hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa pielietošanas izmaiņas nemaina iegūto rezultātu – izvirzītās hipotēzes. Atkārtota globālās kartes sastādīšana vides konfigurācijā nr.2 atgriež atšķirīgu hipotēžu koku (hipotēzes un tām atbilstošās kartes redzamas 5.10. attēlā), tomēr vēl arvien globālās kartes hipotēzē ir iekļautas tikai 8 no 9 robotu lokālajām kartēm (abos gadījumos nav iekļauta karte M3).

Sākotnējā hipotēze



[M9+[[M2+[M4+M8]]+
[M7+[M6+[M1+M5]]]]]

Hipotēze pēc izmaiņām



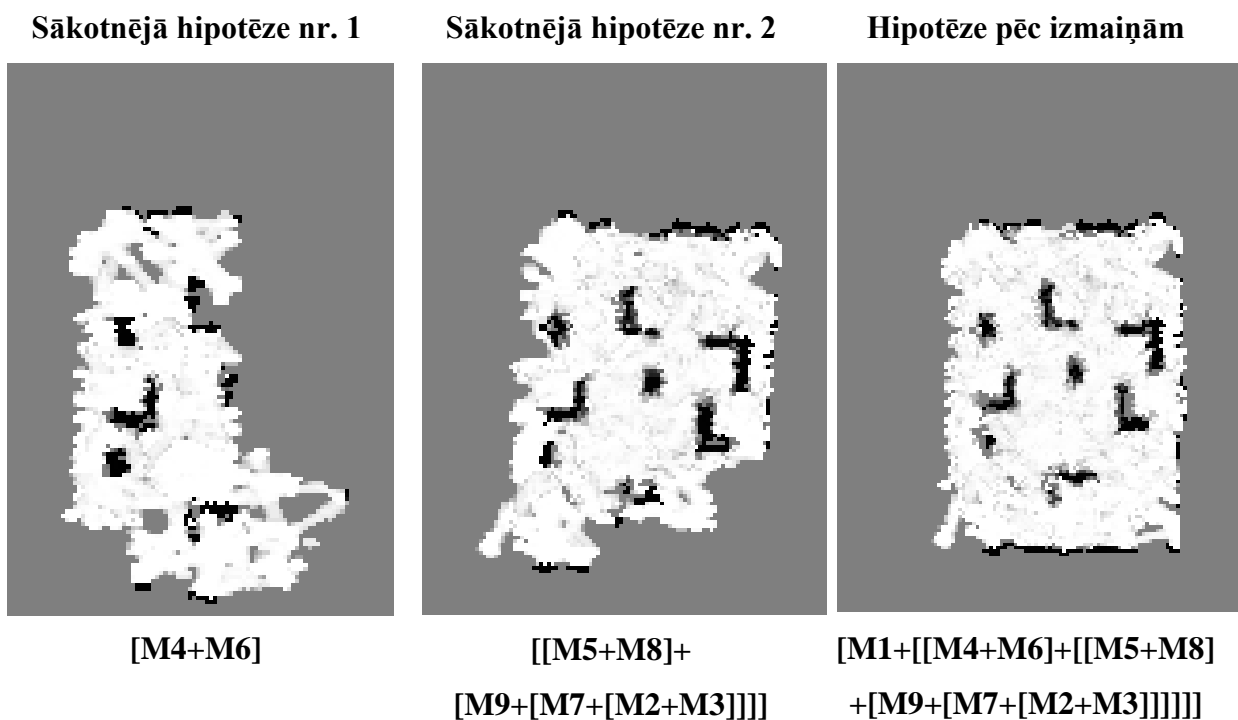
[M9+[[M6+[M1+M5]]+
[M7+[M2+[M4+M8]]]]]

5.10. att. Vides konfigurācija nr.2: Sākotnēji sastādītā hipotēze (kreisajā pusē) un pēc hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa pielietošanā veiktajām izmaiņām (labajā pusē)

Atšķirībā no pirmajām divām vides konfigurācijām, hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa samazināšana atkarībā no apvienošanā iesaistītā lokālo karšu skaita vides konfigurācijā nr.3 palielina lokālo karšu skaitu globālās kartes hipotēzē līdz maksimāli iespējamām 9 lokālajām kartēm (5.11. attēls), kas ir ievērojams uzlabojums, salīdzinot ar sākotnējiem rezultātiem – hipotēzēm, kas satur 2 un 6 lokālās kartes.

Šie rezultāti liecina, ka adaptīva hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa ieviešana uzlabo globālās kartes sastādīšanas rezultātus vienā konkrētā gadījumā – vides konfigurācijā nr.3.

Lai novērtētu to, vai tā ir likumsakarība vai nejaušs gadījums, tika analizēti dati par visām iespējamām derīgajām hipotēzēm visās vides konfigurācijās.



5.11. att. Vides konfigurācija nr.3: Sākotnēji sastādītā hipotēze (divas hipotēzes kreisajā pusē) un pēc hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa pielietošanā veiktajām izmaiņām (hipotēze labajā pusē)

Tabula 5.7. atspoguļo hipotēžu skaitu un strupceļu skaitu/biežumu dažādos hipotēžu līmeņos vides konfigurācijā nr.1, kur hipotēžu līmeņi nozīmē hipotēzēs iekļauto lokālo karšu skaitu. Strupceļi atspoguļo to hipotēžu skaitu/biežumu, kuras nav iekļautas nevienā globālās kartes hipotēzē – hipotēzē, kas sastāv no visām lokālajām kartēm. Kā redzams, vides konfigurācijā nr.1 pēc adaptīva hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa ieviešanas nav notikušas nekādas izmaiņas hipotēžu un strupceļu skaitā.

5.7. tabula. Vides konfigurācija nr.1: Strupceļi pirms un pēc izmaiņām

Karšu skaits hipotēzē	Hipotēzes sākotnēji	Strupceļi sākotnēji	Strupceļi sākotnēji (%)	Hipotēzes pēc izmaiņām	Strupceļi pēc izmaiņām	Strupceļi pēc izmaiņām (%)
2	5	5	100	5	5	100
3	1	1	100	1	1	100
4	1	1	100	1	1	100
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
Kopā	7	7	100	7	7	100

Cita situācija ir novērojama 5.8. tabulā, kura atspoguļo hipotēžu skaitu un strupceļu skaitu/biezumu dažādos hipotēžu līmeņos vides konfigurācijā nr.2. Hipotēžu skaits ir palielinājies no 4320 līdz 5046 (šajā skaitā nav iekļautas globālās kartes hipotēzes, kuras satur visas 9 lokālās kartes). Ir palielinājies arī kopējais strupceļu skaits, tomēr to attiecība pret kopējo hipotēžu skaitu ir samazinājusies par 4.51%, kas nozīmē, ka varbūtība nonākt līdz globālās kartes hipotēzei, kas satur visas 9 lokālās kartes, ir palielinājusies.

5.8. tabula. Vides konfigurācija nr.2: Strupceļi pirms un pēc izmaiņām

Karšu skaits hipotēzē	Hipotēzes sākotnēji	Strupceļi sākotnēji	Strupceļi sākotnēji (%)	Hipotēzes pēc izmaiņām	Strupceļi pēc izmaiņām	Strupceļi pēc izmaiņām (%)
2	11	0	0	11	0	0
3	29	5	17,24	29	2	6,90
4	90	38	42,22	93	27	29,03
5	293	199	67,92	311	182	58,52
6	762	590	77,43	836	593	70,93
7	1467	1125	76,69	1719	1231	71,61
8	1668	1141	68,40	2047	1356	66,24
Kopā	4320	3098	71,71	5046	3391	67,20

Vēl uzskatāmāks adaptīva hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa ieguvums ir vides konfigurācijā nr.3. 5.9. tabulā, kas atspoguļo hipotēžu skaitu un strupceļu skaitu/biezumu dažādos hipotēžu līmeņos vides konfigurācijā nr.3. Ir redzams, ka hipotēžu skaits ir palielinājies no 1004 līdz 1053 un ir palielinājies arī kopējais strupceļu skaits, bet to attiecība pret kopējo hipotēžu skaitu ir samazinājusies par 33.96%, kas nozīmē, ka varbūtība nonākt līdz globālās kartes hipotēzei, kas satur visas 9 lokālās kartes, ir ievērojami palielinājusies.

5.9. tabula. Vides konfigurācija nr.3: Strupceļi pirms un pēc izmaiņām

Karšu skaits hipotēzē	Hipotēzes sākotnēji	Strupceļi sākotnēji	Strupceļi sākotnēji (%)	Hipotēzes pēc izmaiņām	Strupceļi pēc izmaiņām	Strupceļi pēc izmaiņām (%)
2	9	2	22,22	9	0	0
3	15	5	33,33	15	0	0
4	33	19	57,57	33	3	9,09
5	74	59	79,73	74	27	36,49
6	188	157	83,51	192	98	51,04
7	357	310	86,83	375	232	61,87
8	328	258	78,66	355	132	37,18
Kopā	1004	810	80,68	1053	492	46,72

Rezultātu interpretācija un secinājumi:

Liels skaits potenciāli derīgu hipotēžu ir noraidītas pārāk zema hipotēzes novērtējuma dēļ, tomēr daudzos gadījumos šis novērtējums ir tikai nedaudz zemāks nekā uzstādītais hipotēžu

apstiprināšanas sliekšnis $h_{val_{min}}=0.95$. Iegūtie rezultāti demonstrē, ka adaptīva hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa izmantošana uzlabo iegūtos rezultātus (lielākajā globālās kartes hipotēzē iekļauto lokālo karšu skaitu) un samazina iespēju nonākt strupceļos (vides konfigurācijā nr.3 strupceļa hipotēžu skaits samazinās pat par 33.96%), bet vēl arvien var būt gadījumi, kuros neizdodas sastādīt lielāko iespējamo globālās kartes hipotēzi. Reālās dzīves situācijās, kad roboti kopīgi pēta vidi, autore iesaka šo problēmu risināt kādā no sekojošiem veidiem: turpināt telpas izpēti vai veikt papildus karšu apvienošanas mēģinājumus.

5.3.4. Karšu apvienošanas atgriezeniskums

Eksperimenta mērķis:

Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt metodes spēju turpināt globālo kartes sastādīšanu pēc kļūdainas hipotēzes izvirzīšanas.

Eksperimenta realizācija:

Eksperimentam ir izmantoti dati, kas tika iegūti 5.2. apakšnodaļā, veicot 108 globālās kartes sastādīšanas mēģinājumus 36 dažādām karšu apvienošanas metodes parametru kombinācijām trīs vides konfigurācijās.

Eksperimenta rezultāti:

Tā kā karšu apvienošanā nav izslēgta kļūdainas hipotēzes izvirzīšana, karšu sastādīšanas laikā var atklāties, ka līdz šim korekta hipotēze ir nepareiza. Šādā situācijā karšu apvienošanas metodei ir jāizvirza jaunas hipotēzes, ņemot vērā iepriekš uzkrāto pieredzi.

Eksperimentos izmantotās kartes atspoguļo tikai pēdējos 20-40% no karšu sastādīšanas procesa, bet, kā redzams 5.10. tabulā, noraidīto hipotēžu daudzums ir ievērojams (vienā konfigurācijā ir noraidītas pat 50.43% hipotēzes, bet 0% noraidīto hipotēžu ir tikai parametru konfigurācijās, kurās nav izdevies izvirzīt nevienu hipotēzi).

5.10. tabula. Vidējais noraidīto hipotēžu skaits (%)

		Attāluma sliekšnis d_{max}											
		0			1			2			3		
		0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97
Lok. hipotēžu kopa	8	0	0	0	7,41	0	0	15	13,89	35,55	40,47	27,38	35,08
	16	0	0	0	7,41	11,11	16,67	26,67	11,43	36,9	38,65	36,41	23,61
	24	0	0	0	9,52	11,11	16,67	32,94	11,43	25,83	50,43	38,89	19,44

Viens veids, kā risināt kļūdainu hipotēžu problēmu, ir apvienot kartes tikai, kad vides izpēte ir beigusies. Tomēr šāda pieeja liedz iespēju izmantot citu robotu iegūto informāciju par vidi jau telpas izpētes laikā. 5.11. tabula (atspoguļo hipotēžu skaitu procentos, kas ir izvirzītas pirms un saglabātas līdz telpas izpētes beigām) liecina, ka arī agrākās vides izpētes stadijās ir iespējams izvirzīt hipotēzes, kuru novērtējums pārsniedz hipotēžu novērtēšanas sliekšni arī telpas izpētes beigās.

5.11. tabula. Vidējais saglabāto apvienojumu skaits pirms karšu sastādīšanas beigām (%)

		Attāluma sliekšnis d_{\max}											
		0			1			2			3		
		0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97
Lok. hipotēžu kopa	8	0	0	0	26,19	16,67	0	68,25	54,92	50	51,67	58,33	80
	16	0	0	0	26,19	33,33	0	39,05	48,81	44,44	68,33	77,38	80,16
	24	0	0	0	68,89	27,78	0	50,79	50,79	68,25	30	79,17	82,74

Rezultātu interpretācija un secinājumi:

Visi 5. nodaļā aprakstītie eksperimenti ir īstenoti, izmantojot laikā mainīgas robotu lokālās kartes, un iepriekš iegūtie rezultāti liecina, ka, izvēloties atbilstošus ReMMerg metodes parametrus, ir iespējams iegūt vismaz daļējas globālās kartes hipotēzes, kurās nav iekļauti kļūdaini apvienojumi, kaut arī agrākās karšu apvienošanas stadijās tādi ir bijuši.

Šajā apakšnodaļā iegūtie rezultāti demonstrē, ka lielākajā daļā metodes parametru konfigurāciju ir noraidīta vismaz daļa no hipotēzēm, kas nozīmē, ka kļūdainu apvienojumu risks pastāv, un šajos gadījumos ir nepieciešams atgriezties iepriekšējā stāvoklī.

Kaut arī apvienot kartes pirms telpas izpētes beigām ir sarežģītāk, jo jāņem vērā kļūdas iespēja, eksperimentu rezultāti liecina, ka ieguvums ir ievērojams – daudzos gadījumos ir iespējams iegūt pareizas karšu apvienošanas hipotēzes vēl pirms karšu sastādīšanas beigām.

5.4. Kopsavilkums

Šajā nodaļā ir aprakstīta izstrādātā eksperimentālā sistēma, veiktie eksperimenti, un to rezultāti, kas ļauj spriest par izstrādātās karšu apvienošanas metodes darbību, kā arī tās efektivitāti un praktisko pielietojumu.

6. SECINĀJUMI UN REZULTĀTI

Promocijas darbā tika izvirzīts **mērķis** izstrādāt un realizēt robotu karšu apvienošanas metodi, kas ņem vērā, ka robotu karšu relatīvās koordināšu sistēmas var nebūt zināmas, un spēj nodrošināt karšu apvienošanas atgriezeniskumu karšu sastādīšanas laikā.

Lai risinātu dinamiskas un atgriezeniskas karšu apvienošanas problēmu, autore promocijas darba ietvaros ir izstrādājusi vairāku robotu karšu apvienošanas metodi ReMMerg. Šo metodi var izmantot dinamiskai karšu apvienošanas hipotēžu izvirzīšanai un noraidīšanai, nezaudējot informāciju, kas ir iegūta pēc karšu apvienošanas. Metode nodrošina arī tikai tādu hipotēžu izvirzīšanu, kuras ir ticamas (to novērtējums ir augstāks par iepriekš noteiktu sliekšni).

6.1. ReMMerg metodes darbības novērtējums

Novērtējot izstrādātās metodes darbību ar Rīgas Tehniskajā universitātē izstrādātas daudzu robotu sistēmas sastādītām kartēm, ir secināts, ka metode spēj sastādīt vismaz daļējas globālas kartes, kad robotu relatīvās koordināšu sistēmas ir nezināmas un kā kartes tiek izmantoti lokāli neprecīzi aizņemtības režģi. Metode ir spējīga atkopties no kļūdainiem karšu apvienojumiem, noraidot kļūdaino karšu apvienošanas hipotēzi un sastādīt jaunu globālo karti, balstoties uz iepriekšējo karšu apvienošanas pieredzi.

Hipotēžu novērtēšanas metode EvaLIM

Eksperimentu rezultāti liecina, ka piedāvātā globālās kartes apvienošanas metode spēj sastādīt daļējas globālās kartes un daļā gadījumu pilnas globālās kartes, bet labāko rezultātu sasniegšanai ir rūpīgi jāizvēlas metodes parametri. Salīdzinot izstrādāto hipotēžu novērtēšanas metodi EvaLIM ar literatūrā biežāk izmantotot metodi – tiešo šūnu salīdzināšanu [Bir 2006], kas ir EvaLIM speciālgadījums pie attāluma sliekšņa $d_{max}=0$, ir secināts, ka EvaLIM darbojas ievērojami labāk trokšņainu karšu gadījumā, ja attāluma sliekšnis ir izvēlēts atbilstošs izmantotās robotu sistēmas īpašībām. Lai uzstādītu piemērotāko attāluma sliekšni d_{max} daudzu robotu sistēmā, ir jāņem vērā divas vērtības: a) troksnis kartēs – cik ļoti var atšķirties šķēršļa novietojums kartē un realitātē un b) kartes šūnu izmērs. d_{max} vērtībai ir jābūt aptuveni vienādai ar attālumu, kurā ir lielākā daļa kļūdu, atbilstoši šūnu izmēriem. No vairākām iespējamām vērtībām rekomendācija ir izmantot augstāko attāluma sliekšni, kas nodrošina konkrētajai daudzu robotu sistēmai pieņemami zemu nepareizu apvienojumu skaitu.

ReMMerg spēja dinamiski sastādīt globālo karti

Novērtējot ReMMerg metodes spēju patstāvīgi un dinamiski sastādīt globālo karti pie izvēlētiem parametriem [$d_{\max}=2$; $hval_{\min}=0.95$; $hset=16$], sākotnēji nevienā no aplūkotajiem globālās kartes sastādīšanas gadījumiem netika sastādīta pilna globālā karte. Salīdzinot rezultātus ar pilnu iespējamo hipotēžu kopu visās vides konfigurācijās, tika noskaidrots, ka globālās kartes hipotēzes ir iespējams iegūt divos gadījumos, bet vienā gadījumā ir iegūts labākais rezultāts, kas iespējams, izmantojot lokālo karšu apvienošanu ar Hjū transformāciju [Car 2008].

Galvenais iemesls, kas var traucēt izvirzīt lielākās iespējamās hipotēzes, ir globālās karšu apvienošanas metodes nonākšana strupceļā izvēlētajā karšu apvienojuma ceļa dēļ – visas izvirzītās hipotēzes ir derīgas, bet tās savā starpā vairs neizdodas apvienot. Tam ir divi izskaidrojumi:

- Lokālo karšu apvienošanas metode spēj savā starpā apvienot lokālās kartes, bet nespēj apvienot visas augstākā līmeņa hipotēzes, kas ir sastādītas no šīm kartēm.
- Lokālo karšu apvienošanas metode spēj atrast pareizo transformāciju starp augstākā līmeņa hipotēzēm, bet lielāka trokšņu līmeņa dēļ izvirzītajai hipotēzei ir pārāk zems novērtējums un tā netiek pieņemta.

Ar mērķi uzlabot metodes darbību tika veiktas izmaiņas hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa pielietošanā. Eksperimentu rezultāti liecina, ka adaptīva hipotēžu apstiprināšanas sliekšņa izmantošana uzlabo iegūtos rezultātus (lielākajā globālās kartes hipotēzē iekļauto lokālo karšu skaitu), bet vēl arvien var būt gadījumi, kuros neizdodas sastādīt lielāko iespējamo globālās kartes hipotēzi. Reālās dzīves situācijās, kad roboti kopīgi pēta vidi, autore iesaka šo problēmu risināt kādā no sekojošiem veidiem: turpināt telpas izpēti vai veikt papildus karšu apvienošanas mēģinājumus.

Karšu apvienošanas atgriezeniskums:

Tā kā karšu apvienošanā nav izslēgta kļūdainas hipotēzes izvirzīšana, karšu sastādīšanas laikā var atklāties, ka līdz šim korekta hipotēze ir nepareiza. Šādā situācijā karšu apvienošanas metodei ir jāizvirza jaunas hipotēzes, ņemot vērā iepriekš uzkrāto pieredzi. Eksperimentālie rezultāti liecina, ka, izvēloties atbilstošus ReMMerg metodes parametrus, ir iespējams iegūt vismaz daļējas globālās kartes hipotēzes, kurās nav iekļauti kļūdaini apvienojumi, kaut arī agrākās karšu apvienošanas stadijās tādi ir bijuši.

Ja robotu lokālās kartes tiek apvienotas agrā vides izpētes stadijā, tad kļūdainas karšu apvienošanas hipotēzes ir gandrīz neizbēgamas – jo agrāka ir apvienošana, jo lielāka ir varbūtība, ka hipotēze būs nepareiza. Eksperimenti apstiprina, ka noraidīto hipotēžu daudzums ir ievērojams (no 7.41% līdz pat 50.43% noraidītām hipotēzēm; 0% noraidītu hipotēžu ir tikai gadījumos, kad neviena hipotēze nav izvirzīta). Tomēr karšu apvienošana tikai telpas izpētes beigās, kas nodrošinātu tikai pareizu hipotēžu izvirzīšanu (pie pieņēmuma, ka nepareizas hipotēzes ir identificējamās), nav labs risinājums, jo tas izslēdz iespēju izmantot citu robotu iegūto informāciju par vidi jau telpas izpētes laikā. Daudzos gadījumos ir iespējams iegūt pareizas karšu apvienošanas hipotēzes vēl pirms karšu sastādīšanas beigām. Piemēram, konfigurācijā [$d_{\max}=2$; $hval_{\min}=0.95$; $hset=16$], kas ir eksperimentāli atzīta par vienu no labākajām metodes parametru konfigurācijām, 48.81% no visām hipotēzēm, kuras eksperimenta beigās nav noraidītas, ir izvirzītas pirms karšu sastādīšanas beigām – tas ir, apvienojumi ir bijuši veiksmīgi, izmantojot daļēji sastādītas lokālās kartes.

Vispārīgie secinājumi par ReMMerg metodi:

Piedāvātā globālās kartes apvienošanas metode ReMMerg spēj sastādīt daļējas globālās kartes un daļā gadījumu pilnas globālās kartes, bet labāko rezultātu sasniegšanai ir rūpīgi jāizvēlas metodes parametri. Jo ilgāk tiek veikta telpas izpēte, jo lielāka ir iespēja, ka tiks sastādīta pilna globālā karte.

ReMMerg metodes darbības efektivitāte ir cieši saistīta ar izmantoto lokālo karšu apvienošanas metodi. Ja lokālās karšu apvienošanas metode nespēj apvienot atsevišķas robotu lokālās kartes, tad izstrādātā metode nespēs iegūt globālo karti. Darba ietvaros metodē realizētā lokālo karšu apvienošana, izmantojot Hjū transformāciju, ir paredzēta tādu karšu apvienošanai, kurās ir sastopamas taisnas līnijas. Attiecīgi lokālā karšu apvienošana un arī izstrādātā metode vājāk darbojas gadījumos, ja robotu sastādītās kartes nesatur izteiktas taisnas līnijas. Darbā izmantotās lokālo karšu apvienošanas metodes vietā [Car 2008] var izmantot jebkuru citu aizņemtības režģu karšu lokālo karšu apvienošanas metodi, nemainot ReMMerg darbības principus.

ReMMerg metode spēj identificēt kļūdainus karšu apvienojumus un atgriezties iepriekšējā stāvoklī, noraidot visas nepareizas hipotēzes, ja ir izvēlēti atbilstoši metodes parametri. Attiecīgi ir iespējams iegūt vismaz daļējas globālās kartes hipotēzes, kurās nav iekļauti kļūdaini apvienojumi, kaut arī agrākās karšu apvienošanas stadijās tādi ir bijuši.

Uz doto brīdi ReMMerg metode ir paredzēta robotu sistēmām, kurās ir viens centrālais skaitļotājs, kas veiktu globālās kartes sastādīšanu. Tomēr, ja metode tiktu papildināta ar robotu lokālu hipotēžu koku apvienošanas komponenti, kas risinātu konfliktus starp atšķirīgiem hipotēžu kokiem, to varētu izmantot arī decentralizētās daudzu robotu sistēmās.

6.2. Darba teorētiskie rezultāti

Darba izstrādes gaitā ir sasniegti sekojoši teorētiskie rezultāti:

- Apkopotas un analizētas karšu apvienošanas metodes daudzu robotu sistēmās, un, balstoties uz analīzi, definētas karšu apvienošanas metožu īpašības, kas jāņem vērā karšu apvienošanas metodes izstrādē: robotu relatīvās koordināšu sistēmas, karšu tips, karšu apvienošanā izmantotā informācija, karšu apvienošanai nepieciešamais laiks un sastādīto karšu precizitāte.
- Balstoties uz karšu apvienošanas metožu analīzi, ir identificēti un definēti divi karšu apvienošanas aspekti – lokālā karšu apvienošana un globālā karšu apvienošana -, un pamatota abu nozīmība karšu sastādīšanas sistēmā. Lokālā karšu apvienošana risina savstarpējā novietojuma meklēšanas, karšu apvienošanas, izmantojot atrasto transformāciju, un rezultāta novērtēšanas problēmas. Globālā karšu apvienošanā jāņem vērā arī tas, cik bieži kartes tiks apvienotas un kādā veidā tiks izvēlētas apvienojamās kartes. Šajā gadījumā rodas iespēja turpmākā telpas izpētē noraidīt karšu apvienošanas hipotēzi un apvienot kartes vairākas reizes, balstoties uz iepriekšējo pieredzi.
- Pamatota un eksperimentāli pierādīta globālās karšu apvienošanas nepieciešamība karšu apvienošanā pie nezināmām robotu savstarpējām pozīcijām.
- Uz lokālās un globālās karšu apvienošanas jēdzienu pamata ir definēts uzticamas karšu apvienošanas jēdziens. Uzticama karšu apvienošana ir tāda karšu apvienošana, kura nodrošina karšu apvienošanas atgriezeniskumu – jebkurā brīdī ir iespējams atgriezties stāvoklī pirms karšu apvienošanas, nezaudējot pēc karšu apvienošanas iegūto informāciju par apkārtējo vidi robotu lokālajās kartēs un kurā divu robotu lokālo karšu apvienošanas lēmums tiek pieņemts tikai tādā gadījumā, ja karšu apvienošanas hipotēzes novērtējums pārsniedz iepriekš empīriski noteiktu sliekšni jeb ja karšu apvienošanas hipotēze ir ticama.
- Ir izstrādāts aizņemtības režģu karšu apvienošanas hipotēzes novērtējums, kas ņem vērā to, ka robotu kartes ir lokāli neprecīzas.

- Galvenais teorētiskais rezultāts ir karšu apvienošanas metode, kas ir veidota, pamatojoties uz uzticamas karšu apvienošanas kritērijiem. Metode citu vidū izceļas ar to, ka tās ietvaros ir definētas struktūras karšu apvienošanas atgriezeniskuma nodrošināšanai – hipotēžu atspoguļojums, hipotēžu koki, noraidīto hipotēžu saraksts, karšu apvienošanas vēsture -, kā arī ir definēti procesi, kā šīs struktūras uzturēt. Rezultātā izstrādātā metode ir atgriezeniska un dinamiska karšu apvienošanas metode.

6.3. Darba praktiskie rezultāti

Darba izstrādes gaitā ir sasniegti sekojoši praktiskie rezultāti:

- Izstrādāta karšu apvienošanas programmatūras sistēma, kas ir balstīta uz izstrādāto karšu apvienošanas metodi un realizē visas tās datu struktūras un procesus. Ir eksperimentāli pierādīta tās spēja sastādīt vismaz daļēju globālo karti, ja visām kartēm ir kopīgs apgabals ar vismaz vienu citu karti, un lokālās karšu apvienošanas metode spēj šo kopīgo apgabalu atrast.
- Izstrādāta karšu sastādīšanas metode, kura sastāda kartes ar robotiem, kam ir pieejami tikai tuva attāluma sensori pie nosacījuma, ka robotam ir zināma tā globālā pozīcija.
- Ir izstrādāts aizņemtības režģu karšu apvienošanas hipotēzes novērtēšanas veids EvaLIM, kas ņem vērā to, ka robotu kartes ir lokāli neprecīzas. Salīdzinājums ar tiešo šūnu salīdzināšanu liecina, ka korektas parametra d_{max} uzstādīšanas gadījumā EvaLIM labāk strādā situācijās, kad kartes ir lokāli neprecīzas.

6.4. Turpmāko pētījumu virzieni

Iespējamie turpmāko pētījumu virzieni ir:

- Individuālu hipotēžu koku sastādīšana katram robotam. Šobrīd metode ir paredzēta karšu apvienošanai, kur apvienošanu veic viens centrālais aģents (robots vai programmatūras aģents). Lai metodi varētu izmantot decentralizētā veidā, ir nepieciešams izstrādāt divu dažādu robotu hipotēžu koku apvienošanas algoritmu.
- Vairāku lokālo karšu apvienošanas metožu izmantošana karšu apvienošanā. ReMMerg lokālā karšu apvienošanas daļa ir nodalīta no globālās karšu apvienošanas daļas. Ja nepieciešams, lokālajai karšu apvienošanai var izmantot citas metodes. Ja metode spētu automātiski noteikt, kāda lokālo karšu apvienošanas metode ir piemērota konkrētajām kartēm, tas varētu nozīmīgi uzlabot karšu apvienošanas metodes efektivitāti.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [Adl 2008] Adluru N. et. al. Merging maps of multiple robots. 19th International Conference on Pattern Recognition, IEEE, 2008, pp. 1-4.
- [Aln 2010] G. Alnounou; Hudas, J. Overholt, and M. Krishnan, "Occupancy Grid Map Merging Using Feature Maps," 2010.
- [Ami 2005] Amigoni F., Gasparini S., Gini M. Merging Partial Maps Without Using Odometry. Multi-Robot Systems. From Swarms to Intelligent Automata. – Netherlands: Springer, 2005, III vol., pp. 133-144.
- [And 2009] Andersone I. Exploration with multiple agents. Master's thesis. – Riga, 2009, 83 p.
- [Bal 2010] Ballesta M., Gil A., Reinoso O., Julia M., Jimenez L.M., „Multi-robot Map Alignment in Visual SLAM”, WSEAS Transactions on Systems, Volume 9, Issue 2, 2010, pp. 213-222.
- [Bir 1996] Birk A. „Learning Geometric Concepts with an Evolutionary Algorithm”, Evolutionary programming V, The MIT Press, 1996
- [Bir 2006] Birk A., Carpin S. Merging Occupancy Grid Maps From Multiple Robots. Proceedings of the IEEE. – IEEE, 2006, 94. vol., pp. 1384-1397.
- [Bur 2002] Burgard W., Moors M., Schneider F. Collaborative Exploration of Unknown Environments with Teams of Mobile Robots. Lecture Notes in Computer Science. – Berlin/Heidelberg: Springer, 2002, 2466. vol., pp. 187-215.
- [Bur 2005] Burgard W., Moors M., Stachniss C., Schneider F. Coordinated Multi-Robot Exploration // In IEEE Transactions on Robotics, vol.21, 2005, pp. 376-386.
- [Car 2005] Carpin S., Birk A. Stochastic Map Merging in Rescue Environments. Lecture Notes in Computer Science. – Berlin/Heidelberg: Springer, 2005, 3276. vol., pp. 483-490.
- [Car 2008] Carpin S. Fast and accurate map merging for multi-robot systems. Autonomous Robots. – USA: Kluwer Academic Publishers, 2008, 25. vol., pp. 305-316.
- [Cec 2006] Ceccarelli N. et. al. Set Membership Localization and Map Building for Mobile Robots. Systems & Control: Foundations & Applications. – Boston: Birkhauser, 2006, Part III, pp. 289-308.
- [Che 2007] Chen Z., Samarabandu J., Rodrigo R. Recent advances in simultaneous localization and map-building using computer vision, Advanced Robotics, Vol. 21, No. 3-4, 2007, pp. 233-265

- [Ded 2000] Dedeoglu G., Sukhatme G. Landmark-based Matching Algorithm for Cooperative Mapping by Autonomous Robots. Distributed Autonomous Robotics Systems, October 2000. – USA: Springer, 2000, pp. 251-260.
- [Fox 2000] D. Fox, W. Burgard, and H. Kruppa, “A probabilistic approach to collaborative multi-robot localization,” *Autonomous Robots*, vol. 8, no. 3, 2000.
- [Guo 2008] R. Guo, Y. Li, and W. Chen, “Adaptive genetic algorithm for occupancy grid maps merging,” 2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 5716–5720, 2008.
- [Ho 2005] Ho K., Newman P. Multiple Map Intersection Detection using Visual Appearance. 3rd International Conference on Computational Intelligence, December 2005. – Singapore, 2005
- [How 2006] Howard A. Multi-Robot Simultaneous Localization and Mapping using Particle Filters. *The International Journal on Robotics Research*. – Sage science press, 2006, 25. vol., No. 12, pp. 1243-1256.
- [Hua 2005] Huang W., Beevers K. Topological Map Merging. *The International Journal on Robotics Research*. – Sage science press, 2005, 24. vol. 8, pp. 601-613.
- [iRo 2012] iRobot. Internets: <http://www.irobot.com/us/robots/home/roomba.aspx>, aplūkots: 16.08.2012.
- [Ish 1993] Ishioka K., Hiraki K., Anzai Y. Cooperative Map Generation by Heterogeneous Autonomous Mobile Robots. IJCAI’93 Workshop on Dynamically Interacting Robots, august 1993. – Chambery, 1993, pp. 57-67.
- [Ko 2003] Ko J. et. al. A practical decision-theoretic approach to multi-robot mapping and exploration. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2003. – Nevada, 2003, pp. 3232-3238.
- [Kon 2003] Konolige K. et. al. Map merging for distributed robot navigation. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2003. – Nevada, 2003, pp. 212-217.
- [Lak 2005] Lakaemper R., Latecki L. J., Wolter D. Incremental multi-robot mapping. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, august 2005. – Edmonton, 2005, pp. 3846-3851.
- [Mar 2005] Martinelli, A.; Pont, F.; Siegwart, R., "Multi-Robot Localization Using Relative Observations," *Robotics and Automation*, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on , vol., no., pp.2797,2802, 18-22 April 2005

- [Nik 2013] Nikitenko A., Liekna A., Ekmanis M., Kulikovskis G., Andersone I. Single Robot Localisation Approach for Indoor Robotic Systems through Integration of Odometry and Artificial Landmarks. *Scientific Journal of Riga Technical University, Computer Sciences*, 2013
- [Par 2000] Parker L. E. Current State of the Art in Distributed Autonomous Mobile Robotics. 5th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, October 2000. – Knoxville: Springer, 2000, pp. 3-12.
- [Rou 2002] S. Roumeliotis and G. Bekey, “Distributed multirobot localization,” *Robotics and Automation, IEEE*, vol. 18, no. 5, pp. 781–795, 2002.
- [Roy 2000] Roy N., Dudek G. Collaborative Robot Exploration and Rendezvous: Algorithms, Performance Bounds and Observations. *Autonomous Robots*. – US: Springer, 2000, 11. vol., pp. 117-136.
- [RTU 2013] Par projektu „Daudzaģentu robotizētas intelektuālas sistēmas tehnoloģijas izstrāde”, Internets: <http://www.rtu.lv/content/view/5226/1867/lang.lv/>, pēdējoreiz aplūkots 01.09.2013.
- [Sim 2000] Simmons R. et. al. Coordination for Multi-Robot Exploration and Mapping. *AAAI National Conference on Artificial Intelligence*, 2000
- [Thr 1998] S. Thrun and W. Burgard, A. probabilistic approach to concurrent mapping and localization for mobile robots. *Autonomous Robots*, 25, pp. 1–25, 1998
- [Thr 2001] Thrun S. A Probabilistic Online Mapping Algorithm for Teams of Mobile Robots. *International Journal of Robotics Research*. - Sage science press, 2001, 20. vol., pp. 335-363.
- [Thr 2002] Thrun S. *Robotic Mapping: A Survey*. Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium. – Morgan Kaufmann, 2002, pp. 1-35.
- [Thr 2005] Thrun S. *Probabilistic robotics*. The MIT Press, 2005
- [Top 2010] Topal S., Erkmen E., Erkmen A. M.: A Novel Map Merging Methodology for Multi-Robot Systems. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, Vol I, 2010, pp. 383-387.
- [Wil 2002] Williams S. B., Dissanayake G., Durrant-Whyte H. Towards Multi-Vehicle Simultaneous Localisation and Mapping. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2002. – Washington: IEEE, 2002, pp. 27-43.