

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Leslie Robert ADRIAN

Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**MOBILO ROBOTU ŠĶĒRŠĻU APIEŠANAS
SEKOŠANAS SISTĒMU IZPĒTE UN IZSTRĀDE**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs:
Profesors *Dr. habil. sc. ing.*
L. RIBICKIS

**RTU Izdevniecība
Rīga 2016**

Adrian L. R. Mobilo robotu šķēršļu apiešanas sekošanas sistēmu izpēte un izstrāde. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga, RTU Izdevniecība, 2016, 25 lpp.

Šis darbs daļēji, ieskaitot komandējumu līdzekļus un dalības maksājumus, izstrādāts ar valsts pētniecības programmas LATENERGI atbalstu (Latvija).



Materiālu un tehniskās iekārtas nodrošināja: *ROBOTRAX Limited (United Kingdom)*.



Komandējumu izdevumi daļēji atbalstīti ar Eiropas Reģionālās attīstības fondu līdzekļiem.



PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 20. jūnijā plkst. 16 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212 auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Profesors *Dr. sc. ing.* Oskars Krievs
Rīgas Tehniskā universitāte, EEF, IEEI

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Gasparjans
Latvijas Jūras akadēmija

Assoc. Prof. Dr. Phil. Statistics Said El Hajjar
Ahlia Universitāte, Bahreina

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Leslie Robert ADRIAN

Datums:

Promocijas darbā ir septiņas nodaļas, 77 attēli, 10 tabulu, 22 vienādojumi, 55 literatūras avoti, anotācijas angļu un latviešu valodā, ievads un saturs, kopā — 125 lapaspuses.

Anotācija

Šis promocijas darbs ir veltīts robotu šķēršļu apiešanas sekošanas sistēmas izpētei un izstrādei izmantošanai autonomās mobilās robotizētās sistēmās, īpaši — mobila robotizēta transporta līdzekļa izstrādei ar mērķi radīt platformu turpmākiem pētījumiem saistībā ar pasīvām vai tikai nolasāmām robotu sensoru sistēmām.

Šķēršļu apiešanas sekošanas sistēma vispirms ietver sevī piroelektriskos, modificētus piroelektriskos un infrasarkanos sensorus, kā arī fotodiodes sprostvirziena konfigurācijā, kas veido pasīvu Rx sistēmu, kuras darbība atkarīga tikai no ārējā elektromagnētiskā lauka iedarbības.

Sistēmas izstrāde, konfrontējot esošās, plaši izmantotās robotizētu sistēmu manevrēšanas un kustības vadības metodes, ir saistīta ar būtiskiem sarežģījumiem. Šādas sistēmas darbā ir aplūkotas īsi, tomēr tās izmanto tikai raidītāja/uztvērēja konfigurāciju, reti — nolasāmās sistēmas konfigurāciju. Nolasāmo sistēmu izveidošana ļauj izpētīt dažādas metodes, lai izmantotu iegūtos datus no vides un īpaši no dinamiskajām izmaiņām, kas ir neizbēgamas šādās vidēs. Augsta līmeņa robotizēto sistēmu rašanās prasa esošo sistēmu uzlabošanu, veco sistēmu adaptāciju un jaunu sistēmu attīstīšanu ar pieņemamiem rezultātiem. Autonomas robotizētas tehnoloģijas moduļiem jābūt brīviem un neatkarīgiem no ārējās vadības, lai izpildītu pilnīgi autonomas sistēmas prasības. Tomēr pilnīgi autonomām sistēmām ir nopietns trūkums — pēc izgatavošanas un ieprogrammēšanas tās var gan sekmīgi strādāt, gan nedarboties bez ārējas iejaukšanās. Nosacījumi veiksmīgam darbam vai neveiksmēm tomēr ir izstrādes inženieru un programmētāju rokās, kā arī apkārtējās vides ietekmē, kas ir izvēlēta kā darbības vieta. Sākotnējos kapitālieguldījumus ir jākompensē ar zemākiem ekspluatācijas izdevumiem un mazāku enerģijas patērišanu ierobežotu enerģijas avotu gadījumos. Sistēmas kalpošanas laikam arī ir jābūt aprēķina daļai, īpaši tādos lietojumos, kas attiecas uz starpplanētāro izpēti. Te sistēma var būt daļēji autonoma vai daļēji attālināti vadīta — tas ir kā hibrīds, kas ietver sevī abas sistēmas un ir piemērots darboties ar vienu vai otru vadību, jo, kad viena vadības sistēma nedarbojas, otra sistēma var veikt uzdevumu. Izpētes laikā tika atklāti daži problemātiski elementi. Pirmkārt, tā ir gaismas mainīgā daba un, otrkārt, datu iegūšana, nodrošinot pietiekamu un piemērotu reaktīvu atsauci no mobilā robota.

Promocijas darba sākuma sadaļās ir izpētītas tradicionālās robotu brīva ceļa sekošanas metodes, un tās ietver esošo sistēmu priekšrocību un trūkumu analīzi. Tāpat tajās ietverti galvenie pētījumu uzdevumi un hipotēzes.

Atsevišķās darba daļās ir izpētītas robotizētās sistēmas papildu iekārtas paralēlai vai tiešai izmantošanai. Pierādīts, ka nolasāmas sensoru sistēmas lietošanas galvenie ieguvumi ir ārkārtīgi zemais enerģijas patēriņš, augsta izturība un plašs sensoru izvēles un programmēšanas metožu diapazons, kas ir atkarīgs no pētnieka izdomas.

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Visi pētījumi, rezultāti un secinājumi ir saistīti ar hipotēzes pierādījumu, mērķu un uzdevumu izpildi. Daļa no pētījuma tika iekļauta arī citos projektos, ņemot vērā pētījuma rezultātu plašās izmantošanas iespējas.

Darbā ir ievads, septiņas nodaļas un secinājumi. Bibliogrāfijas sarakstā ir 55 informācijas avoti. Promocijas darbam ir 125 lapaspuses. Tas ir ilustrēts ar 77 attēliem, 22 formulām un 10 tabulām, tajā ir 14 pielikumi.

Saturs

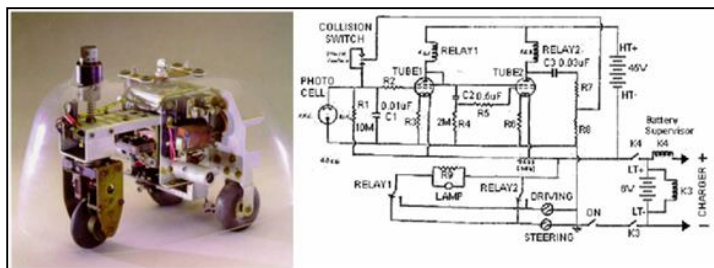
Tēma. Ievads.....	6
Promocijas darba uzdevumi.....	6
Zinātniskā novitāte	7
Praktiskais pielietojums	7
Pētījuma metodes.....	7
Promocijas darba struktūra un apjoms.....	8
Rezultātu aprobācija — Starptautiskās konferences	9
Saistīto ar darba tēmu autora zinātnisko publikāciju saraksts	10
1. Brīva ceļa sekošana — vides iekšpusē.....	11
2. Sensora tehnoloģijas.....	12
3. Brīva ceļa sekošana	13
4. <i>AMBOA</i> sistēmas trīs primārās stadijas.....	13
5. Izplūdušā loģika <i>AMBOA</i> Ver.3	14
6. Autonoma transporta līdzekļa dzinēja vadība.....	14
7. Analīze un matemātiskie pamati.....	16
8. <i>AMBOA</i> vadītas apmācības shēmas apstrāde.....	18
9. Secinājumi.....	20
10. Turpmākie pētījumi.....	22
11. Literatūra	22
PIELIKUMI	22
A. IZVĒLĒTO SENSORU ANALĪZE	24
B. GALA <i>AMBOA</i> ATTĒLS.....	25

Tēma. Ievads

Ja robots darbojas kontrolētā vidē, tādā kā ražošanas rūpnīcā, ir iespējams lietot programmēšanas tehnoloģijas, lai nodrošinātu robota funkcionēšanu zināmā apkārtņē. Šī telpa ir zināma kā robota darba telpas ietvars (DT), kas noteikts ar specifiskiem algoritmiem. Pēc tam, kad darba telpa ir definēta un zināma, ir iespējams izvairīties no šķēršļu novietošanas šajā telpā. Tas izslēdz prasības robota jutībai pret vidi, lai pieņemtu lēmumus par šķēršļu apiešanu. Tomēr kādu nestatisku elementu novietošana šajā telpā var izraisīt nopietnas sekas robota darba telpā un vietā. Acīmredzams, ka ārpus determinētas vides strādājošiem robotiem ir nepieciešama spēja kustēties starp daudziem šķēršļiem. Šie roboti var būt robotizētas rotaļlietas, bezpilota transporta līdzekļi, industriāli roboti u. c.

Pēc autora domām, mobilajam robotam ir jārod kāds labums no savas darba telpas. Šīs idejas analogija varētu būt tāda, ka cilvēkam arī ir jābūt savai telpai, kurā viņš/ viņa jūtas komfortabli.

Autora motivācija šiem īpaša tipa robotu lietojumiem nāk no Greja Valtera, W. (1910–1977) pētījumiem un rakstiem. Viņa roboti bija unikāli, jo, pretēji iepriekš veidotajiem robotiem, tie nenodrošināja noteiktu uzvedību. Šiem robotiem bija refleksi jeb tie uzvedās reaktīvi, tādēļ mijiedarbība ar apkārtējo vidi piešķīra tiem īpatnību nekad neatkārtot kādu darbību divreiz. Šī dzīvai būtnei līdzīgā uzvedība bija tā saucamās mākslīgas dzīvības (*Artificial Life*) agrīna forma.



0. att. Valtera Greja «Tortoise» un oriģinālā shēma

Promocijas darba uzdevumi

Darba pirmais uzdevums bija izveidot pasīvu apkārtējās gaismas sensora masīvu un vadības sistēmu, lai nodrošinātu praktiskāku pilnīgi autonomu brīva ceļa sekošanas iekārtu.

Otrais uzdevums ietver sevī piemērotas vadītās neironu apmācības metodes sākotnējos pētījumus pseidoatmiņā balstītas reaktīvas sistēmas izveidei, lai realizētu izvairīšanos no šķēršļiem dinamiskās vai neizpētītās vidēs.

Zinātniskā novitāte

1. Piedāvāta vienas daudzsensoru fotoelementu matricas izmantošana sākotnējās pasīvās nolasāmās sistēmā mijiedarbībai ar dinamisku apkārtējo vidi, tādējādi uzlabojot autonoma mobila pašgājēja vadāmības parametrus.
2. Piedāvātā sensoru matrica nav ierobežota ar kāda konkrēta sensora tipa izmantošanu (sensoru sistēma ir noņemama) un atkarībā no lietotāja prasībām ir viegli pielāgojama, izmantojot daudzas analogas vai digitālas fotoelementu iekārtas, turklāt, ja tas ir nepieciešams, var tikt lietoti arī aktīvie sensori.
3. Izstrādāts neironu-izplūdušais (*Neuro-Fuzzy*) vadības algoritms sensoru matricas pielāgošanai un apmācībai.

Praktiskais lietojums

Izstrādātais *AMBOA* (*Ambient Obstacle Avoidance robot*) robots ir izmantojams kā ideāls stends plaša diapazona zinātniskās pētniecības projektiem. Izstrādātā konstrukcija ir piemērota plaša diapazona sensoru (pasīvo un aktīvo) lietošanai un ir aprīkota ar ļoti jaudīgu mikroprocesoru, bezvadu komunikācijām, mākslīgo neironu tīkla prototipu (turpmākaiem pētījumiem), *Wi-Fi* redzes iespējām, pašuzlādes iespēju un daudzām citām funkcijām. Šī stenda izmantošanas iespējas pētniecībai ir ierobežotas tikai ar pētnieka izdomu.

Autora pamata mērķis *AMBOA* izveidē bija izpētes veikšana dinamiskās vidēs attālinātai darbībai, izolētiem mērķiem un pat ārpus Zemes izpētei. No līdzšinējiem mūsu Saules sistēmas pētījumiem ir acīmredzams, ka dažādu robotizēto sistēmu izmantošana ir ierobežota robotu sistēmu mobilitātes ierobežojumu dēļ un nākotnē šī problēma tikai palielināsies. Autors uzskata, ka labs sākuma punkts ir robota apakšsistēmās iestrādāt iespēju pārvietoties dinamiskās vidēs bez attālinātas vadības lielās distancēs un tās radītajiem ierobežojumiem, pārraidot izvēlētās vides video attēlu. Tas, protams, nedrīkst atņemt operatoram iespēju koriģēt robota uzvedību, tomēr, jo vairāk iebūvēto sistēmu, kas neprasa pastāvīgu operatora uzmanību ar attālinātas vadības palīdzību, jo lielāku platību var izpētīt ar vairāk potenciāliem rezultātiem.

Pētījuma metodes

Pirmkārt, pētījums ietver *AMBOA* sākotnējo versiju Ver. 1 un Ver. 2 izstrādi. Piedāvātajai sensoru sistēmas konstrukcijai ir ļoti maz analogu, tāpēc bija nepieciešams izstrādāt sensoru grupu ar trīs sensoriem astoņās matricās, kur katra matrica izpilda analogo un digitālo signālu

apstrādes funkcijas. Visi dati tika pārbaudīti, lai apliecinātu mērījumu un provizoriskas modelēšanas rezultātus. Izstrādātas shēmas, algoritmi un iekārtas tika pārbaudītas, izmantojot šādu programmatūru:

- fuzzyTech — Fuzzy/Neural Studio — fuzzy loģiskās modelēšanas un programmēšanas algoritmi;
- *Excell*;
- *LT Spice* — komponentu izvēle;
- *Pspice* — shēmu modelēšana un analīze;
- *Orcad* — spiesto plašu projektēšana;
- *Eagle* — spiesto plašu projektēšana;
- *Visio* — 2D projektēšana;
- *Blender* — 3D projektēšana;
- *Matrix2PNG* — matricas sensora ieejas krāsu modelēšana;
- *Neural.NET* — neironu vadītas apmācības programmatūra;
- *Aforge.net C#* (*C Sharp* programmēšanas struktūra *.NET* lietojumiem);
- *Matrix2PNG* — matricas datu pārveidošana uz *PNG* krāsu diagrammu.

Lai panāktu atsevišķo sensoru vienmērīgu darbību kopējā sistēmā sistēmas testēšana un pielāgošana, notika iteratīvs izmēģinājumu un uzlabojumu process.

Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir veltīts robotikas pētniecībai — īpaši brīva ceļa sekošanas tēmai, kas ir viens no vissvarīgākajiem aspektiem minētājā jomā. Darbs piedāvā pilnu projektu pasīva/lasāma sensora sistēmas izveidē, lietojot tikai pieejamo apkārtējas vides gaismu. Turpmāk sistēma ir palielināta, izmantojot gan izplūdušās loģikas, gan vadītās apmācības neironu tīklus. Pati sistēma ir izveidota kā pētniecības un izstrādes iekārta ar iespēju izmantot vairākus sensoru tipus un algoritmu funkcijas, kas sniedz iespējas vispusīgiem mobilu robotu platformu izmēģinājumiem. Autora vīzija bija izveidot robotu kā pētniecības un apmācības instrumentu, kas varētu būt pielāgojams daudzām adaptronikas sistēmām.

Neironu tīkla algoritms tika izvēlēts tādēļ, ka tas ir vislabāk piemērots sensoru sistēmas konfigurācijai, tomēr, lai atļautu vairāk iespēju šajā jomā, robota platformā ir izvietoti iekšējā atmiņa un augstas veiktspējas procesors.

Darba **pirmā nodaļa** ir veltīta brīva ceļa sekošanas pārskatam vai ievadam, tās aktualitātei un saistītām problēmām. Tiek doti autora apsvērumi, aplūkotas pētījuma metodes un izvirzītas galvenās hipotēzes. Tiek aplūkota arī zinātniskā un praktiskā novitāte un lietojumu iespējas.

Otrajā nodaļā dots īss apraksts par tradicionālajiem sensoriem un to lietojumu mūsdienu robotos. Tiek aplūkoti šo sensoru izmantošanas priekšlikumi un trūkumi *AMBOA* sistēmā. Detalizēti aprakstītas praktiskās metodes lietošanai ceļa sekošanai un formulēti secinājumi, pamatojoties uz praktisko pieredzi un pētījumu materiāliem.

Trešajā nodaļā tiek analizētas brīva ceļa sekošanas robotizētas sistēmas, izplatītās lietošanas un atšķirības starp šķēršļu izvairīšanās un šķēršļu atpazīšanas tehnoloģijām. Tiek izskaidrota un novērtēta sensoru pretējās nobīdes priekšrocība, parādot *AMBOA* sistēmā piedāvāto metodi.

Ceturtnā nodaļa sniedz īsu pārskatu par *AMBOA* attīstības stadijām no versijas Ver. 1 līdz versijai Ver. 3.

Piektajā nodaļā dota informācija par *AMBOA* sistēmas vadības funkciju izplūdušās loģikas un neironu tīklu arhitektūru. Šī nodaļa ir ievads izplūdušajā loģikā un lietojumos, kas izmanto šo metodi. Aplūkota neironu-izplūdušā (*Neural-Fuzzy*) arhitektūra un projektā izmantotā programma, kas aptver autonomo transporta līdzekļu dzinēju vadību un to, kā tas attiecas uz *AMBOA* projektu.

Sestā nodaļa aplūko par «vadāmo apmācību» saukto neironu tīkla «*Delta Rule*» un kopā ar pielikumu B skaidro izmantoto metodi.

Rezultātu aprobācija — starptautiskās konferences

1. Compatibility and Power Electronics (CPE), Tallinn, Estonia, 2011.
2. (International Journal Arts & Sciences) International Conference for Academic Disciplines in Gottenheim, Germany, 2012.
3. The 16th International Conference of ELECTRONICS, Palanga, Lithuania, 2012.
4. International Journal Arts & Sciences, International Conference for Academic Disciplines in Rome, Italy, 2013.
5. EUROCON, IEEE, European Conference, Zagreb, Croatia, 2013.
6. RTUCON, 54th International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Latvia, 2013.
7. EPE'14-ECCE Europe, Lappeenranta, Finland, 2014.
8. RTUCON, 55th International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Latvia, 2014.
9. RTUCON, 56th International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Latvia, 2015.

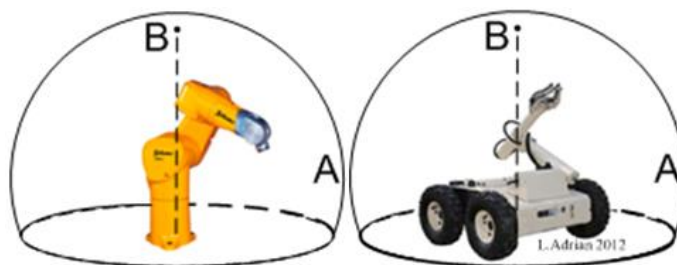
Ar darba tēmu saistīto autora zinātnisko publikāciju saraksts

1. **L. Adrian**, I. Galkin “Clear Path Sensors for Robotics (The Autonomy-Based Model)”, 7th International Conference, Compatibility and Power Electronics CPE'2011 Forum, Tallinn (Estonia) June 3rd, 2011. http://egdk.ttu.ee/files/sf2011/CPE2011_Student_Forum_062-067.pdf
2. **Leslie R. Adrian**, I. Galkin “Preliminary Circuit Design for Robotics Environment Mapping Utilizing Ambient Light, Reflected Light and Stationary Infrared Radiation”, Scientific Journal of Riga Technical University. 29th International Conference, Power and Electrical Engineering. Volume 29, Issue 1, Pages 123–128, ISSN (Print)1407-7345, DOI: 10.2478/v10144-011-0021-y, October 2011.
3. **L. R. Adrian** and L. Ribickis, “Fuzzy Logic Control of Photo-voltaic Sensors for Obstacle Avoidance or Mapping Robot”, (IJAS) International Conference for Academic Disciplines in Gottenheim, Germany. Academic Journal of Science, Vol. 1, No. 2 Dec 29, 2012.
4. **L. R. Adrian** and L. Ribickis, “Fuzzy Logic Analysis of Photovoltaic Data for Obstacle Avoidance or Mapping Robot”, The 16th International Conference ELECTRONICS'2012, Palanga, Lithuania, 18th – 20th June 2012. No. 1(127) Vol 19, Jan 2013.
5. **Leslie R. Adrian**, An Autonomy-Based Model for Obstacle Avoidance in Robotics, (IJAS) International Conference for Academic Disciplines in Rome, Italy. Published May 19, 2013. <http://universitypublications.net/ijas/0601/html/SPQ788.xml>
6. **Adrian, L. R.**; Ribickis, L., “Design Of Human Tracking Robot Utilizing Pyroelectric Sensor and Analog Circuitry”, *EUROCON, 2013 IEEE*, vol., no., pp. 1927, 1931, 1–4 July, 2013. doi:10.1109/EUROCON.2013.6625242
7. **L. Adrian**, D. Repole and L. Ribickis. Passive Human Tracking Robot Utilizing PIR and Four Band Multispectral Snapshot, Electronic Proceedings (RTUCON2013) 54th International Scientific Conference of Riga Technical University, Page 32.
8. **Adrian, L. R.**; Ribickis, L., “Proposed Piezoelectric Energy Harvesting in Mobile Robotic Devices,” Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2014 55th International Scientific Conference on , vol., no., pp. 63, 66, 14–14 Oct. 2014.
9. **Adrian, L. R.**; Ribickis, L., “Intelligent power management device for street lighting control incorporating long range static and non-static hybrid infrared detection system,” (EPE'14-ECCE Europe), 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, vol., no., pp. 1, 5, 26–28 Aug. 2014.
10. A. Patlins, N. Kunicina, **L. R. Adrian**, Sensor Networking And signal Processing in City Transport Systems. Proceedings of the 18th International Conference, Lietuva, Kaunas, 23.–24. oktobris, 2014. Kaunas: Technologija, 2014, 355.–359.lpp.
11. **Adrian, L. R.**; Repole, D.; Ribickis, L., “Proposed neuro-guided learning for obstacle avoidance in AMBO a robotic device,” in Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2015 56th International Scientific Conference on, vol., no., pp. 1–5, 14–14 Oct. 2015.

1. Brīva ceļa sekošana zināmā vidē

Ja robots darbojas definētā vidē, piemēram, rūpnīcā vai ražotnē, ir iespējams lietot programmēšanas tehnoloģijas, lai nodrošinātu robota funkcionēšanu šajā zināmajā vidē. Šī vide ir zināma kā robota darba telpas ietvars (DTI) (*workspace envelope*), kurā vadībai izmanto specifiskus algoritmus. Kad darba telpa ir definēta, ir iespējams izvairīties no šķēršļiem, kas atrodas šajā telpā. Tas izslēdz nepieciešamību un prasības robota vides jutībai, lai pieņemtu lēmumus ceļa sekošanā. Tomēr kādu kustīgu vai pārvietojamu elementu novietošana šajā telpā var izraisīt nopietnas sekas robota darbībai. Acīmredzams — ārpus noteiktas vides strādājošiem robotiem jābūt spējai kustēties starp daudziem šķēršļiem. Piemēram, robotizētas rotaļlietas, bezpilotu aviācijas transportlīdzekļi un industriālie mobilie roboti.

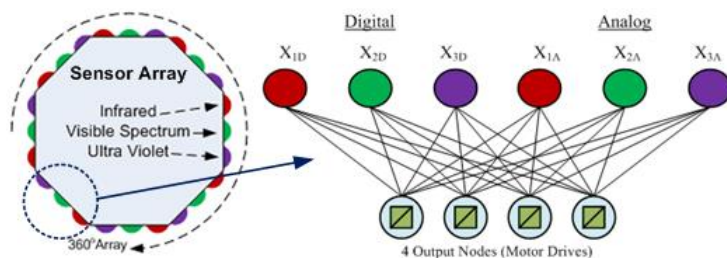
Pēc autora domām, mobilajam robotam ir jābūt tādai īpašībai kā DTI. Šīs idejas analogija varētu būt tā, ka cilvēkam ir jābūt savai telpai, kurā viņš/viņa jūtas komfortabli, piemēram, kosmonautu skafandri. Šādu telpu (DTI) varam lietot mobilām iekārtām (1.1. att.). DTI paaugstina prasības sensoru sistēmai, kurai ir universāls jutīguma diapazons vai spēja precīzi atšifrēt datus. Pēc savas būtības brīva ceļa sekošanas sistēma ir ieprogrammētas un atbilstošas reakcijas un atsauces uz ārējo iedarbību.



1.1. att. Stacionārie un mobilie roboti prasa darba telpu
(Autora apgalvojums)

Daudzi raksti un pētījumi izskaidro, kā var veidot un realizēt brīva ceļa sekošanas uzdevumus gan ierobežotā telpā, gan tās ārpusē, pētot svešas un dinamiskas vides.

1.2. att. ilustrē trīs sensoru grupas tīklu tās viselementārākajā formā. Katrā grupa sūta analogā formā esošus datus uz mikrokontrolleri ar analogu signālu palīdzību, izmantojot izplūdušas loģikas filtrēšanas procesu. Digitālus signālus tieši apstrādā ar mikrokontrolleri.



1.2. att. Trīs sensoriem ar astoņām grupām. Katrā formē vienu masīvu ar 24 sensoriem, kurā katrs izpilda analoga un digitāla aptverošas gaismas uztvērēja dubulto funkciju.

2. Sensoru tehnoloģijas

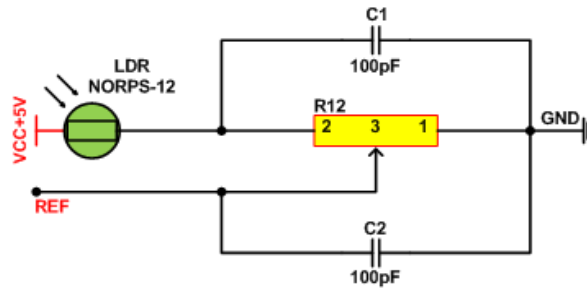
Gaismas sensori no *AMBOA* sistēmas primāras funkcionālas telpas ietver sensoru grupu ar jutīgumu pret daudziem viļņu garumiem (λ) pilnā elektromagnētiskā spektrā, atkarībā no lietoto filtru tipa. Ir zināmi daudzi sensoru veidi: fotorezistori, fototranzistori, fotodiodes, sensori ar spēju noteikt krāsu un sensori ar cilvēka redzei tuvu jutīgumu.



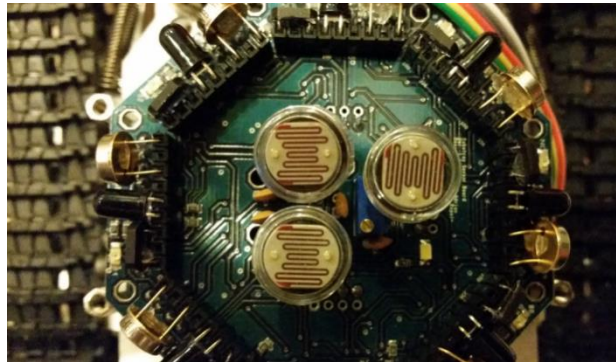
2.1. att. *AMBOA* Ver. 2, sensora masīva modulis

Viļņa garums λ var atrasties cilvēka redzes diapazonā vai būt neredzams. Atkarībā no spilgtuma līmeņa, mikrokontrollerim vai analogajam kontrollerim ir jāspēj izvēlēties robotizētās iekārtas pareizo trajektoriju. Šādi aprīkotas iekārtas ir piemērotas darbam tumšās vidēs, īpaši — ja šķēršļi ir apgaismoti. Var izmantot arī kameras, tomēr foto jutīgie sensori var izpildīt to pašu uzdevumu bez papildu prasībām mikrokontrollerim vai arī ar fiksētas analogas iekārtas palīdzību. Papildu foto jutīgie sensori minimāli ietekmē robota enerģijas balansu, atšķirībā no kamerām, kas var ievērojami ietekmēt robota enerģijas resursus.

Acīmredzams, ka foto sensori apmierinoši darbojas vidēs ar noteiktu, iepriekš zināmu apgaismojumu. Pietiekami efektīva tehnoloģija regulēt sensoru masīvu jutīgumu [2], [3] un [4] ir augstas kvalitātes precīzu maiņrezistoru lietojums (2.2. un 2.3. att.).



2.2. att. LDR/VAR potenciāla dalītāja konfigurācija



2.3. att. Trīs LDR/VAR potenciāla dalītāji apkārtējas vides apgaismojuma jutības regulēšanai

3. Brīva ceļa sekošanas analīze

Šī darba sadaļa ir veltīta brīva ceļa sekošanas analīzei.

Pirmais, ko iedomājamies, kad runājam par robotu izmantošanu, ir transporta līdzekļi, kas strādā uz Marsa, militārie roboti un droni, dažkārt — arī mobilie apkalpojošie roboti. Visas šīs iekārtas un visi robotizētie lietojumi, īpašības un pārsteidzošie rezultāti joprojām ir tālu no īstās autonomijas jēdziena, un tie labāk atbilst nosaukumam — attālināti darbojošās vai attālināti vadītās mašīnas (*ROM*) vai transporta līdzekļi (*ROV*). Tajos tikai daži no procesiem prasa autonomiju, tie tiek vadīti attālināti un pilda iepriekš ieprogrammētus uzdevumus [5], [6].

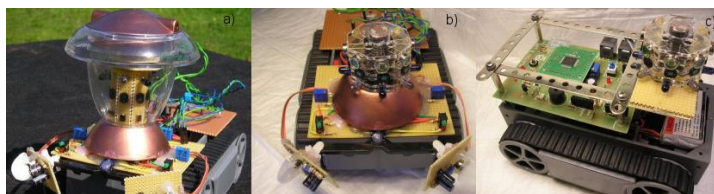
Nodaļā apskatīts;

- brīva ceļa sekošanas vispārināts lietojums;
- izvairīšanās no šķēršļiem vai to identifikācija.

4. *AMBOA* sistēmas trīs primārās stadijas

Brīva ceļa sekošanas robota (*AMBOA*) izstrādāšana notika trijās stadijās. Pirmajā bija «ļoti gudra rotaļlieta» *AMBOA* (4.1 att. a), ar ļoti precīzu navigāciju dinamiskā vidē, ar spēju noteikt infrasarkanā viļņa garumu 360° rādiusā un ar pilnīgi analogas sistēmas izmantošanu kopā ar

modificēto *PIR* sistēmu. «Rotaļlieta» dažādos veidos varēja reaģēt uz tādām komandām kā «apstāties», «pienākt» un «atgriezties». Tā ir pietuvināta cilvēka sekošanas reakcijas sistēmai.



a) b) c)

4.1. att. *AMBOA* pirmie testa roboti

a) pirmā versija ar *PIR* sensoriem, b), c) ar fotodiožu masīviem

Sekošie *AMBOA* (4.1.att. b) un 4.1.att. c) tika veidoti sensoru masīvu izstrādei un izpētei, šeit izmanto jutīgāku fotodiodes, kuras mērķis samazināt transimpedences pastiprināšanas problēmas ar 24 fotodiodes (pielikums D). Modifikācija nodrošina lielāka apgaismojuma līmeņa identifikāciju, tomēr ārējo trokšņu iedarbības rezultātā tika bojāti transimpedences pastiprinātāji. Trokšņu samazināšana, īpaši — nolasāmās sistēmās, ir uz gaismas sensoriem pamatotas brīva ceļa sekošanas kritiskais aspekts [7] un [11], kā autors secināja darbā un pierādīja praktiskos eksperimentos.

Pēc tām *AMBOA* Ver. 2 tika izveidota tikai ar digitāliem elementiem, lai nodrošinātu sistēmas pielāgošanas spējas starp atsauksmēm tā, kā tas aprakstīts darba 5. nodaļā. Neatkarīgi no tā priekšroku ieguva hibrīda analoga un digitāla *AMBOA* Ver. 3, kurā efektīvi dublē sensoru sistēmas izmaiņas, kas ir aprakstīts 8. nodaļā un darba pielikumos B ... G.

5. Izplūdušā loģika *AMBOA* Ver. 3

Kvalitatīvo slēdzienu lietojums mākslīgo sistēmu lēmumu vadības nodrošinājumā, ja matemātiskais modelis nav zināms vai vienkārši nepastāv, vai ir ļoti sarežģīts precīzai darbībai reālajā laikā, izplūdušas loģikas mērķis ir iegūt risinājumus ar empīrisku un kvalitatīvo kritēriju lietojumu pretstatus «cietajai» loģikai [8], [9] un [10].

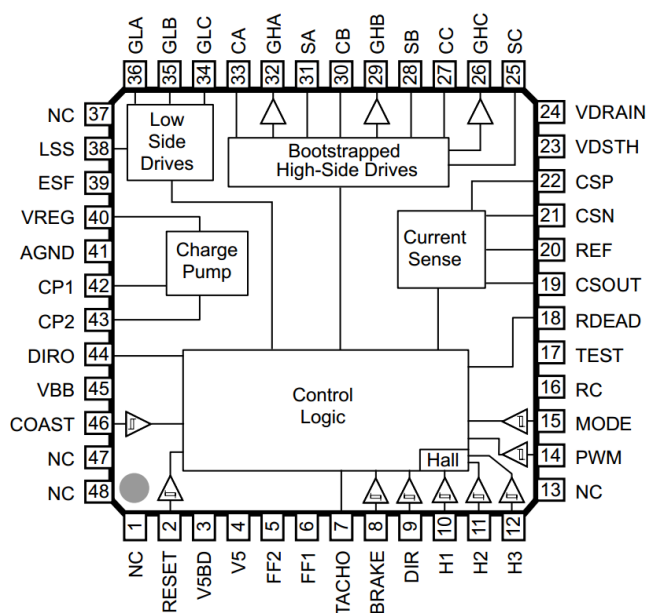
6. Autonoma transporta līdzekļa dzinēja vadība

Šī nodaļa ir veltīta autonoma transporta līdzekļa dzinēja vadībai, izveidotai *AMBOA* Ver. 2. Mērķis bija izveidot drošu un robustu sistēmu, kas būtu lietojama dažādos autonomos robotos, mainot tikai dažus parametrus vadības algoritmā.

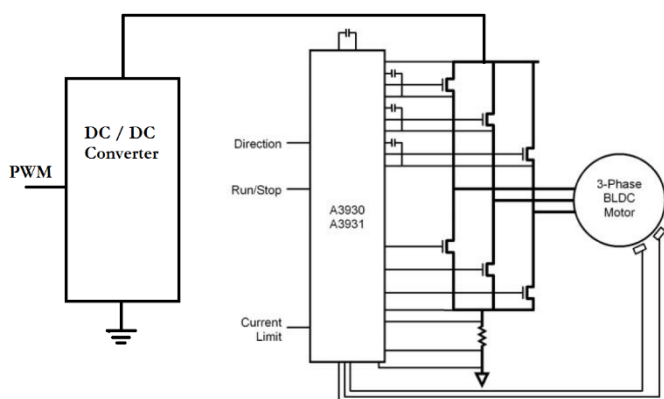
Drošas sistēmas vadības algoritms nedrīkst pārslogot mikrokontrolleri (*MCU*). Jāatceras, ka, neskatoties uz izmantotā procesora veidu/tipu, parasti izmanto asamblera valodu un

projektētāji raksta algoritmus *C* valodā. Šajā gadījumā decentralizētai vadības sistēmai, ko veido jaudīgs mikrokontroleris, kas vada procesu, un mazjaudīgāki mikrokontroleri (parasti *DSP*), speciāli izveidoti darbībai vadības perifērijā, kurus saista specifisku protokolu savstarpējā komunikācija, ir priekšrocības.

Realizētajā sistēmā neatkarīgi no izmantotās dzinēja topoloģijas ir nepieciešams mainīt tikai PIC32 vai DsPIC33 algoritmu dažus parametrus. Ir iespējams vadīt trīsfāzu bezkolektora dzinēju vai trīsfāzu līdzstrāvas bezkolektora dzinēju ar A3930, A3931, L293 integrālajām shēmām (6.1., 6.2. un 6.3. att.).

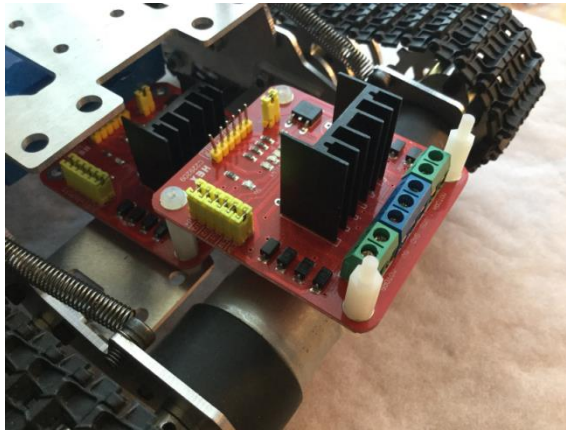


6.1. att. A3930 Pin Out



6.2.att. Dzinēja piedziņas barošana ar *DC/DC* pārveidotāju

Kā iepriekš minēts, robotam kā pētījuma instrumentam ir jābūt iespējai integrēt dažādas sistēmas, lai pilnīgi nodrošinātu iespējamo izpētes projektu, tādēļ ir tikai viena *AMBOA* sistēmas iespējamā dzinēja konfigurācija [12], [13] (6.2. att.).



6.3. att. Izvēlētais *AMBOA* integrālais dubultais H-tilts L293

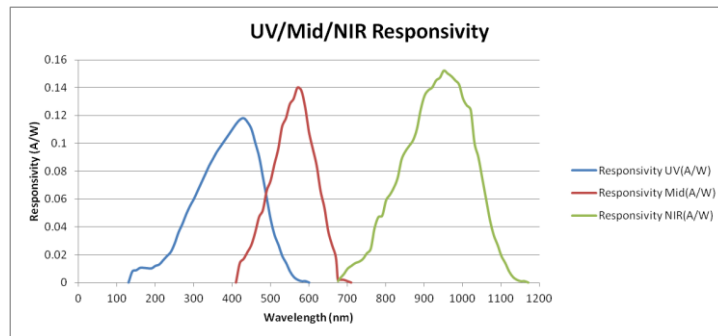
7. Analīze un matemātiskie pamati

Promocijas darbs ietver un analizē metožu attīstībai un mērījumiem izmantoto matemātisko pamatu, modelēšanu un rezultātu analīzi, tostarp:

- *LDR/VAR* vadāmais potenciāla dalītājs izmantots trim individuāliem no gaismas atkarīgiem rezistoriem (pielikums G);
- fotodiodes jutīgums tiek definēts kā radītas fotostrāvas un elektromagnētiskās spektrālās jaudas attiecība pie tā konkrētā viļņu garuma [14]:
 - teorētiskā fotodiodes darbība un praktiskie rezultāti;
 - p-n pārejas kapacitāte;
 - caurlaides josla un reakcija;
 - ierobežošanas pretestība;
 - foto–vadošais režīms;
 - dalīšanas frekvences efekts;
 - izmantoto sensoru analīzes pārbaudes rezultāti, 7.1. att. un pielikums A, 1. tabula.

Pielikums G [15].

- Izplūdušās loģikas dalības definējumi, izplūdušie ierobežojumi, izejas defazifikācija un centroīdu metode, pielikums I [16].
- Autonoma nelineāra dinamiska sistēma, pielikums J [17]
- Apstrādes elements ar vienīgo izejas savienojumu, pielikums K [18], [19].
- Jutīguma pastiprināšana ar transimpedanci, pielikums N [20].



7.1. att. Izvēlēto sensoru jutīguma attiecības pārklāšanas rezultāts

7. Nodaļas secinājumi

AMBOA masīvā ietvertie sensori:

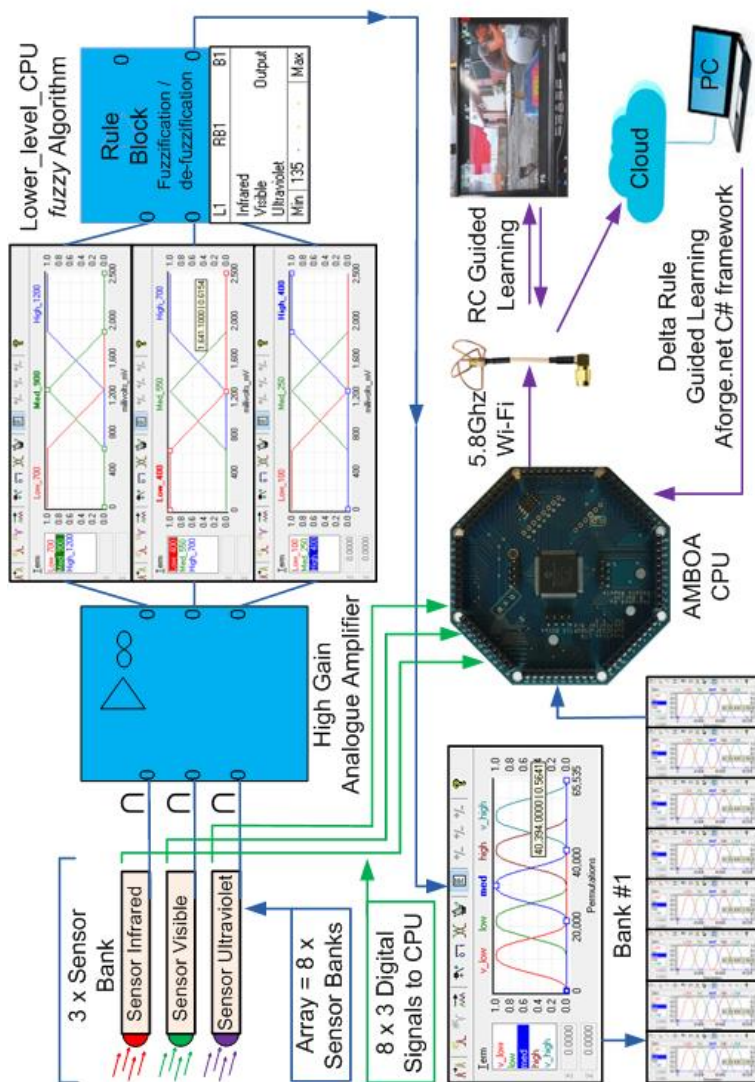
- FGAP71 — ultravioleta fotodiode ar viļņa garuma diapazonu no 150...500 nm;
- BPW21R — daļēji redzamais spektru ar cilvēka redzi ekvivalentu jutīgumu, 420...675 nm, maksimālai spektrālai jutīgums pie 565 nm;
- BPW34F — dienas gaismas IR fotodiode ar filtru, 780...1000 nm, ar maksimālo spektrālo jutīgumu 950 nm.

Kā redzams 7.1. attēlā, katra sensora individuālajam jutīgumam ir neliela reakcijas pārklāšanās, tādējādi ir nepieciešams precīzi nodrošināt izplūdušas loģikas un sistēmas neironu apmācības procesus.

Pielikumā A 1. tabulā ierakstīts viļņa garums noteica sistēmas pārbaudes ticamo pamatu. Sensoriem ar viļņa garumu 500 nm jutīgums ir tuvu vēlamam un nav nepieciešams veidot papildu joslas caurlaides filtru katram sensoram.

Sistēma tika veidota ar mērķi izmantot dažādu veidu sensorus — foto, skaņas un ultraskaņas sensorus dažādas kombinācijas vai arī dažādas kombinācijas ar tikai vienu ierobežojumu sensoram, vēlams gan — ar analogu vai digitālu signāla izeju.

Testēšanas fāzē sistēmā izmantoja sensorus ar spektru no UV līdz NIR. A izplūdušās loģikas sistēmas palīdzību apstrādāts sensoru nelielais spektrālais pārklājums var būt ieguvums, ja atšķir reālo izeju jebkuriem diviem sensoriem.



7.2. att. AMBOA sistēmas modelis

8. AMBOA vadītas apmācības shēmas apstrāde

Izpētēs ir izveidots brīvā ceļa sekošanas (AMBOA) robots ar pilnīgi pasīvu sensoru sistēmu [21]. Citiem vārdiem sakot, tas “uzticas” tikai iegūtajam spektrālajam viļņa garumam un neizstaro radiāciju kā infrasarkano vai skaņas iekārtu gadījumā. Sensoru masīvs reģistrē tikai viļņu garumu spektrālā diapazonā no ultravioleta līdz infrasarkanam, veidojot digitālu un analoģu datu masīvu. Līdz šim robotu programmēšanas dominējošais stils ir bijis izplūdušās loģikas algoritmu lietošana, un tas ir devis diezgan apmierinošus rezultātus.

Datus iegūst, vadot robotu ar tālvadību par «izvēlēto vidi» nosauktajā telpā, kas ir robota darbības reālā vide vai šīs vides tuvs analogs. Operators vada robotu ap dažiem šķēršļiem no dažādiem virzieniem un leņķiem, lai veidotu nepieciešamo sekošanas algoritmu. Tādējādi gan analogie, gan digitālie dati tiek iegūti noteiktā apmācības periodā T_{learn} .

Permutācija sensora masīvā eksponenciāli paaugstinājās, ja aprēķinā tika ņemti vērā iegūto signālu atkārtojumi vai dubultošanās. Lai aprēķinātu kombināciju skaitu jebkura iegūta signāla atkārtošana, nepieciešams kāpināt 24 sensorus 24. pakāpē. Tomēr analogā metodē tas ir maz iespējams fotoelektrisko parametru lielo izmaiņu dēļ. Digitālajam masīvam atkārtošana ir acīmredzami regulāra (7.2. att.)

Izejas sensora datus pēc tam apstrādā ar izvēlēto neironu algoritmu, kas mūsu gadījumā ir *Aforge.net C #*, paredzēts konstruktoriem un mākslīgā intelekta pētniekiem. Process tiek minēts kā grupas apmācība, jo pēc tam, kad dati ir apkopoti, tie tiek analizēti, izmantojot «*Delta Rule*» metodi. Vienas kārtas pavairošanas tīkls tiek izmantots kā tieša virziena perceptrons — neironu tīkls, kas sastāv no četrām izejas mezglu viena slāņa, kur ieejas tiek barotas tieši uz izejām, izmantojot 96 nozīmju virkni. Delta noteikums ir savā visvienkāršākajā veidā, kā aprakstīts [22].

Sistēmas stadijas:

- datu vākšana — fotoelementi, analogie un digitālie;
- tieša digitālo signālu pārvade uz centrālo apstrādes ierīci;
- analogo datu izplūdušā analīze — pārkārtošanas samazināšana;
- defazificēto fotoelektrisko datu pārsūtīšana uz centrālo apstrādes ierīci;
- grupu datu bezvadu pārvade uz mākoņiem (*cloud*) vai datoru (PC);
- analīze ar uzraudzības apmācību;
- neironu procesa, attēlota kā korelācijas matrica ar saistītajām vērtībām, bezvadu pārvade atpakaļ uz *AMBOA* sistēmu.

Promocijas darbā dotais piemērs griežas ap četrām mezglu un vienas izejas tīklu, ar oriģinālo nozīmi, iestatītu uz “0”, un ar patvaļīgu nozīmes attīstību ar 0,25 soli. Lietojot Delta noteikumu, kļūdas rezultāts ir iespējams ar nosacījumu, ka visiem risinājumiem ir jābūt kā sekojošās ieejas lineāra funkcijai.

Promocijas darba 6. nodaļa un pielikums B

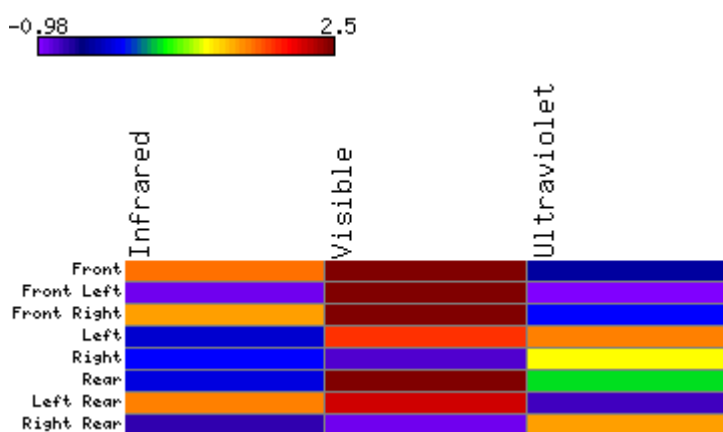
Uzraudzības apmācības procesa laikā ir kļuvis nepieciešams vizualizēt to, kas notiek laikā neironu apmācības algoritmā. Pēc robota vadības ar tālvadības ciklu datus padod ar izplūdušas loģikas algoritmu, lai samazinātu iesaistīto pārkārtošanu lielo skaitu un pēc tam saistītu ar delta noteikuma algoritmu. Pēc atkārtošana rezultāts parādās kā matricas pamats un nobīdes paraugs. Izmantojot *Matrix2PNG* pārveidošanas programmu, ko nodrošina [23], operators var

augšupielādēt failu, kurā dati atdalīti ar tabulatora zīmi tab (tabula 1.), un iegūt vizuālu tuvināšanu tam, ko “redz” robots (8.1. att.).

Faila datu atdalīšanas ar tab. piemērs.

1. tabula

Sensors	Infrasarkanais	Redzamais	Ultravioletais
Front	1,30	2,30	-0,43
Front Left	-0,90	2,10	-0,98
Front Right	1,10	2,50	-0,11
Left	-0,22	1,50	1,20
Right	-0,10	-0,80	0,76
Rear	-0,20	2,40	0,32
Left Rear	1,20	1,80	-0,76
Right Rear	-0,70	-0,90	1,10



8.1. att. *Matrix2PNG* pārveidošanas karte

Vizuālajā piemērā robota priekšējo sensoru grupā var redzēt zemāku infrasarkanā viļņu garuma λ koeficientu, augstu koeficientu krāsu redzamajos viļņu garumos un praktiski neredzamu ultravioletajā viļņu diapazonā. Iegūtā matrica ilgstošā T_{Learn} periodā veido daudz sarežģītāku matricu, tomēr 8.1. att. sniedz vispārēju priekšstatu.

9. Secinājumi

Pētniecības darbs bija veltīts 360° pasīvas nolasīšanas brīva ceļa sekošanas sistēmas izstrādei (nosaukta par *AMBOA*), novērtēšanai un realizēšanas iespējamības noteikšanai mobilās robotizētās sistēmās. Darbā pētniecības objekta (*AMBOA* robotizēta platforma) realizēšanai tika izveidotas daudzas tehniskas platformas, to iespiedplates, komunikācijas un spēka moduļi u. c.

Rezultāti

Efektivitātes mērījums pēc savas būtības ir sarežģīts uzdevums. Autonomas mobila robota platformas spēja strādāt bez sadursmēm ir diezgan reta. Pieejamos avotos vērtē aktīvo sensoru tehnoloģijas, piemēram, *IR Proximity* (izstaro infrasarkanu viļņu garumu) vai ultraskaņa (izstaro īpašas frekvences skaņas viļņus), bet maz ir vērtējumu ar pasīvām vai tikai nolasīšanas sistēmām, kurās izmanto tikai vides izstaroto elektromagnētiskos starojumu vai atstarojumu.

Darbībā pilnīgi statistiskā vidē ar citiem kustīgiem objektiem izstrādātā sistēma uzrāda labākus rezultātus, salīdzinot par citām sekošanas sistēmām, turklāt īsākā apmācības periodā (promocijas darba 7.2. nodaļa). Kad statistiskie objekti ir «ierakstīti», sistēma darbojas praktiski bez sadursmēm, un līdzīgu, salīdzinot ar citām brīva ceļa sekošanas sistēmu metodēm, efektivitātes līmeni — aptuveni 80 % līdz 95 % [24], [25], [26]. Jāņem vērā arī tas, ka — ja $FOV_{max} \rightarrow 0$, efektivitāte samazinās. Citiem vārdiem sakot, transportlīdzekļa priekšā uzstādītai trīs *IR* sensoru sistēmai ir daudz mazāks redzes lauks nekā 360° , un tai ir jābūt mazāk efektīvai nekā sistēmai ar pilnu redzeslauku. Tādējādi sistēmu ar mazāku efektivitāti par 95 % un redzeslauku mazāku par 360° *FOV* nav iespējams novērtēt šādu sistēmu kontekstā.

Efektivitātes analīze un secinājumi

Jautājums par efektivitātes autonomās robotikas jomā ir daudzveidīgs un subjektīvs. Ir daudzas prasības attiecībā pret atsevišķu sensoru efektivitāti, ciktāl tas attiecas uz to spēju noteikt šķēršļus, taču biežāk tās tiek veiktas, pamatojoties uz «zināmo globālas vides informāciju». Citiem vārdiem sakot, ainava ir zināma, šķēršļa izmēri ir zināmi, objekta telpiskais novietojums ir zināms. Šajā ziņā ir normāli noteikt efektivitāti no zemas vērtības līdz augstai (ap 95 %) konkrētam sensora veidam, piemēram, infrasarkanu viļņu sensoriem vai ultraskaņas sensoriem, kuru priekšrocības un trūkumi tika pārskatīti promocijas darba 2. nodaļā.

No otras puses, *AMBOA* sistēma nav viegli salīdzināma ar atsevišķo sensoru sistēmām, kā arī nav izstrādāta līdzīgā veidā. Sistēma ir sensoru masīvs, kas, ņemot vērā to platjoslas īpašības, spēj apstrādāt sensoru datus plašā diapazonā, apvienojumā ar pieejamo permutāciju ļoti lielo skaitu. Patiesībā, ņemot vērā to, ka lasījumi no visiem masīva sensoriem var dubultoties, «permutācijas ar atkārtosanos» skaits var pārsniegt $24^{24} \approx 1,3337 \cdot 10^{33}$ (analogi). Šāds skaitlis praktiski liedz aprēķinus sensora digitālajā pusē. Minētie faktori apvienojumā ar 7. nodaļā minētajām vadības vai bezvadības apmācības algoritma metodēm sniedz *AMBOA* šādas priekšrocības:

- lietderību kā laika funkciju (T_{learn} noteikts 7.2. sadaļā);
- T_{learn} kļūst atkarīga no pieejamas *MOB*.

Tādējādi — jo ilgāks ir apmācību periods, jo efektīvāka ir sistēma (pieejamās atmiņas ietvaros).

AMBOA sistēmas efektivitātes pieaugums nevar būt uzreiz skaidri noteikts apmācību algoritmu dinamiskās struktūras dēļ.

Dinamiskajā vidē sistēmas efektivitāti var noteikt ar palielināto apmācības periodiem, periods T_{learn} . Sistēma var strādāt «vadītās apmācības» vai «bez uzraudzības apmācības» režīmos, un abi atteicas uz T_{learn} periodu un robota «iebūvētas atmiņas» aspektu. Efektivitātes palielinājums ir pierādīts ar paaugstinātu «apmācības periodu», kas ir ierobežots tikai ar robota atmiņas apjomu.

10. Turpmākie pētījumi

Šis darbs aplūko trīs pētījumiem un izvēlētās metodes apstiprināšanai nepieciešamās pakāpes, lai iegūtu daļēji vai pilnīgi autonomu mobilo sekošanas sistēmu, izvairoties no trajektorijā esošajiem šķēršļiem. Šī pakāpes ietver oriģinālās *AMBOA* sistēmas attīstību līdz neironu izplūdušiem algoritmiem un mobilas platformas pseidoatmiņas sistēmu. Šim nolūkam tika izveidoti trīs individuāli roboti, katrs ar uzlabojumu, salīdzināot ar iepriekšējo. Balstoties uz iepriekš teikto, var secināt, ka izvēlētā brīva ceļa sekošanas metode ir lietojama un efektīva un var tikt izmantota mobilajos robotizētos lietojumos. Tuvākajā nākotnē ir plānots turpināt šo pētījumu šādos aspektos:

- datu vākšana pseidoatmiņas lietojumiem;
- atmiņas uzkrāšanas robotizēto manipulāciju praktiskie lietojumi;
- liela diapazona pētīšanas tehnoloģijas pilnīgi autonomiem līdzekļiem;
- slēgtas vides robotu drošības modelēšana;
- datu piekļuves piemēroto vadības metožu izpēte, ieskaitot *MOB Wi-Fi*, *Cloud* un citas metodes robotiem, robotu grupām vai tālvadības izpētes robotiem.

11. Literatūra

- [1] Grey Walter, W. (1910–1977), "The Living Brain", Reprint, Publisher: The Norton Library, 2008.
- [2] S.R. Munasinghe, C. L. J. J. Oh and O. Khatib, "Obstacle avoidance using velocity dipole field method," in 2005, International Conference on Control, Automation, and Systems, ICCAS, Korea.
- [3] J.J. Craig, Introduction to robotics: mechanics and control, Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.

- [4] R. Balogh, "Educational Robotic Platform based on Arduino," in Proceedings of the 1st international conference on Robotics in Education, RiE2010. FEI STU, Slovakia, 2010.
- [5] American Honda Motor Co. Inc., "ASMIO - The World's Most Advanced Humanoid Robot," American Honda Motor Co. Inc., 2015. [Internet research]. Available: <http://asimo.honda.com/>. [Accessed January 2015].
- [6] J. Pramuk, "BMW unveils self-parking car system," CNBC News, 16 December 2014. [Internet research]. Available: <http://www.cnn.com/id/102274053>. [Accessed January 2015].
- [7] Xinshun Zhang, Jiyu Jin, Huimin Meng, Zhisen Wang, "A Sensor Optimal Proposal Based on Intelligent Street Lighting System", R&D Institute of Integrated Measurement and Control, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China, Proceedings of ICCTA 2011.
- [8] L.A. Zadeh, A theory of approximate reasoning, in: J. Hayes, D. Michie, L.I. Mikulich (Eds.), Machine Intelligence 9, Halstead Press, New York, 1979, pp. 149–194.
- [9] Robert Fullér, Neural Fuzzy Systems, Donner Visiting professor Abo Akademi University, ISBN 951-650-624-0 ISSN 0358-5654, 1995, pp.157–160.
- [10] D. Nauck, F. Klawon; R. Kruse, "Foundations of Neuro-Fuzzy Systems", J.Wiley & Sons, 1997.
- [11] W. Ross Ashby, "An Introduction to Cybernetics" First Published (1956).
- [12] American Honda Motor Co. Inc., "ASMIO - The World's Most Advanced Humanoid Robot," American Honda Motor Co. Inc., 2015. [Internet research]. Available: <http://asimo.honda.com/>. [Accessed January 2015].
- [13] ST Microelectronics, "Designing with the L296 Monolithic Power Switching Regulator", (Internet Research), http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/CD00003945.pdf.
- [14] Thorlabs, Inc. Website: <http://www.thorlabs.de/> Available PDF, White-Papers, Internet Research and manufacturer of photo sensors utilized within the thesis.
- [15] National Instruments, "Photo-Diodes" White-Paper, 14839, Publish Date: Sep 18, 2013.
- [16] R. Jang, "Neuro-Fuzzy Modelling": Architectures, Analysis and Applications", PhD Thesis, University of California, Berkley, July 1992.
- [17] Robert Fullér, Neural Fuzzy Systems, Donner Visiting professor Abo Akademi University, ISBN 951-650-624-0 ISSN 0358-5654, 1995, pp. 157–160.
- [18] J.M.Zurada, Introduction to Artificial Neural Systems (West Publishing Company, New York, 1992).
- [19] L. R. Adrian and L. Ribickis, "Design of Human Tracking Robot Utilizing Pyroelectric Sensor and Analogue Circuitry", IEEE Eurocon, 2013.
- [20] L. R. Adrian and L. Ribickis, "Fuzzy Logic Analysis of Photovoltaic Data for Obstacle Avoidance or Mapping Robot", The 16th International Conference ELECTRONICS'2012, Palanga, Lithuania ,18th – 20th June 2012. No. 1(127), Jan 2013 Vol 19, No 1 (2013).
- [21] McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1988). A simulation-based tutorial system for exploring parallel distributed processing. Behaviour Research Methods, Instruments & Computers, 2, 263-275.
- [22] Pavlidis, P. and Noble W.S. (2003) Matrix2png: A Utility for Visualizing Matrix Data. Bioinformatics 19: 295–296.

- [24] Guoxiang Ping; Bing Wei; Xianglong Li; Xiang Luo, "Real time obstacle avoidance for redundant robot," in Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on , vol., no., pp.223–228, 9–12 Aug. 2009.
- [25] Bourdon, G.; Ruaux, P.; Delaplace, S., "Instantaneous fuzzy modelling for obstacle avoidance," in Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century., IEEE International Conference on , vol.3, no., pp.2546–2551 vol.3, 22–25 Oct 1995.
- [26] Gevher, M.; Erkmén, A.M.; Erkmén, I., "Sensor based online path planning for serpentine robots," in Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on , vol.1, no., pp.674–679 vol.1, 2001.

PIELIKUMI

A. IZVĒLĒTO SENSORU ANALĪZE

Tabula 2: Izvēlēto sensoru analīzes rezultāti (no 7. sadaļas)

Wave length (nm)	Responsivity UV(A/W)	Wave length (nm)	Responsivity Mid(A/W)	Wave length (nm)	Responsivity NIR(A/W)
130	0	410	0	675	0,001
140	0,008	420	0,014	680	0,003
150	0,00883	430	0,017	690	0,006
160	0,01058	440	0,022	700	0,01
170	0,01058	450	0,027	710	0,012
180	0,0103	460	0,036	720	0,014
190	0,0102	470	0,047	730	0,015
200	0,012	480	0,052	740	0,017
210	0,013	490	0,066	750	0,021
220	0,016	500	0,073	760	0,024
230	0,019	510	0,085	770	0,039
240	0,022	520	0,096	780	0,047
250	0,028	530	0,112	790	0,048
260	0,036	540	0,118	800	0,059
270	0,042	550	0,128	810	0,063
280	0,049	560	0,132	820	0,068
290	0,055	570	0,14	830	0,075
300	0,06	580	0,138	840	0,088
310	0,066	590	0,126	850	0,094
320	0,072	600	0,108	860	0,098
330	0,078	610	0,096	870	0,102
340	0,084	620	0,084	880	0,11
350	0,089	630	0,066	890	0,124
360	0,094	640	0,054	900	0,134
370	0,098	650	0,037	910	0,138
380	0,102	660	0,027	920	0,14
390	0,106	670	0,018	930	0,145

400	0,11	675	0,002	940	0,147
410	0,114	680	0,002	950	0,152
420	0,117	690	0,002	960	0,15
430	0,118	700	0,001	970	0,148
440	0,115	710	0	980	0,145
450	0,11	-----	-----	990	0,142
460	0,1	-----	-----	1000	0,132
470	0,09	-----	-----	1010	0,127
480	0,075	-----	-----	1020	0,124
490	0,06	-----	-----	1030	0,1
500	0,045	-----	-----	1040	0,09
510	0,034	-----	-----	1050	0,075
520	0,027	-----	-----	1060	0,06
530	0,019	-----	-----	1070	0,045
540	0,014	-----	-----	1080	0,034
550	0,008	-----	-----	1090	0,027
560	0,004	-----	-----	1100	0,019
570	0,002	-----	-----	1110	0,014
580	0,001	-----	-----	1120	0,008
590	0,001	-----	-----	1130	0,004
600	0	-----	-----	1140	0,002
-----	-----	-----	-----	1150	0
-----	-----	-----	-----	1160	0

B. AMBOA ROBOTA ATTĒLS

