

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Atis HERMANIS
Doktora studiju programmas "Elektrotehnoloģiju datorvadība" doktorants

**FORMAS NOTEIKŠANA, IZMANTOJOT IESTRĀDĀTUS SENSORUS
MOBILĀM KIBERFIZIKĀLAJĀM SISTĒMĀM**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
vadošais pētnieks *Dr.sc.comp.*
M. GREITĀNS
profesors, *Dr.sc.ing.*
O. KRIEVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

Hermanis A. Formas noteikšana, izmantojot iestrādātus sensorus mobilām kiberfizikālajām sistēmām. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2016. – 35. lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes P-14 2016. gada 20. jūnija lēmumu, protokols Nr. 2016-3(59).

ISBN 978-9934-10-867-9

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 25. novembrī plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12, 212. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Ilja Galkins
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Grakovskis
Transporta un sakaru institūts, Latvija

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Yannick Le Moullec
Tallinas Tehniskā universitāte, Igaunija

APSTIPRINĀJUMS

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

Atis Hermanis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, piecas nodaļas, nobeigumu, literatūras sarakstu, 7 pielikumus, 46 ilustrācijas, kopā 119 lappuses. Literatūras sarakstā ir 96 nosaukumi.

SATURS

SAĪSINĀJUMI	5
VISPĀRĒJS DARBA RAKSTUROJUMS	6
Tēmas aktualitāte	6
Darba mērķis un uzdevumi	6
Pētījumu metodika	7
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	7
Aizstāvamās tēzes.	8
Darba praktiskā vērtība un aprobācija	8
Darba struktūra	10
1. METODES FORMAS NOTEIKŠANAI AR IESTRĀDĀTU APRĪKOJUMU	11
1.1 Formas noteikšana, mērot materiāla locīšanos	11
1.2 Formas noteikšana, mērot objekta segmentu orientācijas	11
1.3 Secinājumi	12
2. FORMAS NOTEIKŠANA AR INERCIĀLO/MAGNĒTISKO SENSORU MEZGLIEM	13
2.1 Formas noteikšana ar akselerometru mezgliem.	13
2.2 Formas noteikšana ar akselerometru un magnetometru mezgliem	15
2.3 Simulācijas.	17
2.4 Secinājumi	18
3. FORMAS NOTEIKŠANAS SENSORU TĪKLA APARATŪRAS ARHITEKTŪRA	19
3.1 Uzlabotais ziedlapķēdes <i>SPI</i>	19
3.2 Secinājumi	20
4. EKSPERIMENTĀLĀS SISTĒMAS	21
4.1 Virsmas noteikšana ar akselerometru tīklu	21
4.2 Sensoru tīkla arhitektūra	22
4.3 Formas noteikšana ar akselerometru un magnetometru tīklu	23
4.4 Secinājumi	26
5. VIRSMAS NOTEIKŠANAS LIETOŠANA MOBILĀS KIBERFIZIKĀLAJĀS SISTĒ- MĀS.	28
5.1 Stājas monitorings un atgriezeniskā saite	28
5.2 Aprobācija medicīnas lietojumos	28
5.3 Secinājumi	30
NOBEIGUMS	31
LITERATŪRA	32

SAĪSINĀJUMI

2D – divas dimensijas

3D – trīs dimensijas

CLK – takts signāls (no angļu val. *clock signal*)

CPS – kiberfizikālās sistēmas (no angļu val. *Cyber-Physical Systems*)

I2C – starp integrālo shēmu komunikācijas protokols (no angļu val. *Inter-Integrated Circuit*)

MEMS – mikroelektromehāniskās sistēmas (no angļu val. *Micro Electro Mechanical Systems*)

MISO – vedēja ieeja, sekotāja izeja (no angļu val. *Master In Slave Out*)

MOSI – vedēja izeja, sekotāja ieeja (no angļu val. *Master Out Slave In*)

LiDAR – gaismas uztveršana un mērīšana (no angļu val. *Light Detection And Ranging*)

PC – personālais dators (no angļu val. *Personal Computer*)

RMS – vidējā kvadrātiskā vērtība (no angļu val. *Root Mean Square*)

SIMO – sekotāja ieeja, vedēja izeja (no angļu val. *Slave In Master Out*)

SOMI – sekotāja izeja, vedēja ieeja (no angļu val. *Slave Out Master In*)

SPI – virknes perifēriju saskarne (no angļu val. *Serial Peripheral Interface*)

SPP – virknes pieslēgvietas profils (no angļu val. *Serial Port Profile*)

SWD – viedā valkājamā ierīce (no angļu val. *Smart Wearable Device*)

TRIAD – trīs asu orientācijas noteikšana (no angļu val. *Three Axis Attitude Determination*)

UART – universālais asinhronais raidītājs/uztvērējs (no angļu val. *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*)

USB – universālā virknes kopne (no angļu val. *Universal Serial Bus*)

VISPĀRĒJS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Spēja mērīt dažādu objektu 3D ģeometriskās īpašības ļauj iegūt datus par objektu formu. Ja objekts tiek mērīts reālā laikā, tad var tikt novērotas arī plūstošas deformācijas. Šādi dati ir vērtīgi dažādos jaunos lietojumos. Robottehnikas sistēmās spēja noteikt formu var tikt lietota, lai iegūtu informāciju par objektiem apkārtējā vidē [1]. Tāpat tā var palīdzēt iegūt precīzu atgriezenisko saiti par robota manipulatoru pozīciju [2]. Jaunajā lokanās elektronikas nozarē [3] formas noteikšana var nodrošināt tiešu atgriezenisko saiti par ierīces apveidu, kā arī ļaut izveidot jaunus saskarnes paņēmienus ar šīm ierīcēm. Turklāt ieguvumi no formas noteikšanas tehnoloģijas būtu arī jaunajā un strauji augošajā valkājamo ierīču un viedo audumu nozarē [4]. Šeit dati par auduma formu var tikt lietoti, lai iegūtu informāciju par valkātāja stāju un kustībām reālā laikā. Skaidri saskatāmais formas noteikšanas tehnoloģiju potenciāls, kā arī attīstība dažādās jaunās sensoru tehnoloģijās, piemēram, mikroelektromehāniskajās sistēmās (MEMS) [5], piesaista aizvien vairāk pētniekus šai problēmai.

Iepriekš minētajos lietojumos ierīces parasti tiek vadītas ar speciālas grupas datoriem, sauktiem par iegultajām sistēmām [6]. Vēsturiski iegultās sistēmas tika uztvertas kā nelieli datori un netika īpaši izdalītas no vispārējās datorzinātnes. Tomēr, lai vadītu sarežģītākus procesus, iegultajām sistēmām ir nepieciešama aizvien ciešāka sasaiste ar fizikālo vidi, kas rada jaunus izaicinājumus. Šī iemesla dēļ radās jauna iegulto sistēmu apakšgrupa – kiberfizikālās sistēmas (CPS). CPS var tikt uztvertas kā iegulto sistēmu paplašinājums, kur īpaša uzmanība tiek veltīta, lai apvienotu skaitļošanas un fizikālos procesus. Lai to nodrošinātu, liela nozīme ir jaunām sensoru tehnoloģijām un sensoru sistēmām, kas var veicināt jaunu un funkcionālāku CPS radīšanu. Turklāt daudzām CPS, piemēram, valkājamām ierīcēm, portatīvai elektronikai, robottehnikai u. c., nepieciešams nodrošināt mobilo darbību. Tāpēc, izstrādājot CPS sensoru sistēmas, īpaša uzmanība jāpievērš ne tikai sistēmas spējai darboties ar ierobežotiem resursiem, bet arī spējai darboties ar ierobežotu apkārtējo infrastruktūru.

Saistībā ar CPS visas metodes 3D formas datu ieguvei var tikt sadalītas divās lielās kategorijās. Pirmajā kategorijā ietilpst metodes, kas lieto dažāda veida tālzipēti, izmantojot vai nu aktīvu, vai pasīvu ārēju aprīkojumu, piemēram, video kameru sistēmas, *LiDAR* sistēmas, taustus u.c. [7]. Otrajā kategorijā ietilpst sensori, kas ir iestrādāti mērāmajā objektā. Vairums iepriekšējo pētījumu, kas apskata objektu 3D formas noteikšanu, ietilpst pirmajā kategorijā [8]. Šīs metodes bieži nodrošina augstas precizitātes objektu modeļus, tomēr sistēmām, kas izmanto ārēju aprīkojumu, ir divas raksturīgas problēmas. Pirmkārt, sistēmas darbībai ir nepieciešama speciāli aprīkota vide, kas ievērojami ierobežo darbības rādus un mobilitāti. Otrkārt, nopietna problēma ir pārklājumi – ārējiem sensoriem jābūt tiešā redzamībā, kas bieži var nebūt ērti realizējams. Turklāt sarežģītākas formas objekti dažreiz var paši aizklāt kādas no savām detaļām. Abi šie ierobežojumi būtiski apgrūtina metožu, kas balstītas uz ārēju aprīkojumu, lietošanu tādos mobilo CPS lietojumos kā viedie formas jūtīgie audumi, lokanā elektronika u. c., tāpēc šajā darbā tiek apskatītas metodes, kas izmanto aprīkojumu, kas ir iestrādāts objektā.

Darba mērķis un uzdevumi

Šī darba mērķis ir veicināt jaunu CPS lietojumu attīstību, izpētot jaunas 3D formas noteikšanas metodes. Uzmanība ir vērsta uz metožu izpēti, kas izmanto mobilām CPS piemērotu aprīkojumu. Turklāt uzmanība ir vērsta arī uz miniatūras zema jaudas patēriņa aparatūras izmantošanu, efektīvu datu apstrādes algoritmu izstrādi, kas būtu piemēroti reāla laika CPS, kā arī

efektīvas datu savākšanas metodes izstrādei no liela daudzuma sensoru, kas nodrošinātu augstas izšķirtspējas mērījumus.

Darba sākumā tika definēti šādi uzdevumi:

- izpētīt literatūru par objektu formas mērīšanu ar sensoriem, kas var tikt iestrādāti mērāmajā objektā, un atrast piemērotāko pieeju mobilu *CPS* lietojumiem;
- izstrādāt virsmas atjaunošanas metodi, kas ir balstīta uz iestrādātiem sensoriem, var iegūt reāla laika datus par objekta *3D* formu un var tikt realizēta iegultā sistēmā;
- izstrādāt metodi datu ieguvei, kas var efektīvi savākt datus no liela skaita sensoru, kas nepieciešami formas atjaunošanas algoritmam;
- eksperimentāli pārbaudīt piedāvātās metodes un praktiski novērtēt virsmas atjaunošanas algoritmu veikspēju;
- īstenot un aprobēt izstrādātās metodes reālā mobilas *CPS* lietojumā.

Pētījumu metodika

Lai izpildītu šī darba uzdevumus, tika uzskaitītās pētījumu metodikas. Izpētot literatūru un definējot izstrādāto metožu arhitektūru, tika lietotas analītiskās metodes. Lai teorētiski pārbaudītu piedāvāto datu savākšanas un formas atjaunošanas algoritmu veikspēju, kā arī teorētiski noteiktu dažādu kļūdu ietekmi uz rezultātiem, tika lietoti matemātiskie aprēķini un skaitliskās simulācijas. Tika veikta eksperimentālā pārbaude un mērījumi, lai pārbaudītu datu ieguves un virsmas atjaunošanas algoritmu darbību laboratorijas apstākļos. Tika veikti lauka izmēģinājumi un aprobācija, lai reālos apstākļos novērtētu piedāvāto metožu darbību medicīnas lietojumiem.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Darba galvenie rezultāti un zinātniskā novitāte ir šāda:

- izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta jauna metode virsmas formas atjaunošanai, izmantojot akselerometru tīklu. Piedāvāta jauna, uzlabota pieeja uz akselerometru datiem balstītai virsmas formas atjaunošanai, kas ļauj automātisku virsmas segmentu virzienu (rotāciju ap vertikālo asi) noteikšanu, balstoties uz sensoru slīpuma mērījumiem;
- izpētītas esošās, kā arī izstrādāta un realizēta jauna virsmas formas noteikšanas metode, kas balstīta uz paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoru tīkla datiem. Metode nodrošina ātru datu apstrādi iegultās sistēmās;
- veikta detalizēta analīze dažādu kļūdu avotu ietekmei uz formas noteikšanas precizitāti, kā arī veikts virsmas atjaunošanas darbības praktisks novērtējums, salīdzinot to ar modernu, komerciālu sistēmu, kas formas noteikšanai izmanto ārēju aprīkojumu;
- izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta jauna metode efektīvai datu savākšanai reālā laikā no sensoru tīkla ar vairāk nekā 200 sensoru mezgliem, kas ir balstīta uz standarta zema jaudas patēriņa un cenas elektroniskajām komponentēm;
- piedāvātās datu savākšanas un virsmas atjaunošanas metodes realizētas mobilā *CPS* medicīnas lietojumam. Izveidotā sistēma aprobēta medicīniskos pētījumos cilvēka stājas monitoringam sadarbībā ar divām medicīnas iestādēm.

Aizstāvamās tēzes

Darbā tika izvirzītas un pierādītas šādas tēzes:

- zema jaudas patēriņa inerciālo un magnētisko sensoru tīkls var tikt izmantots, lai noteiktu 3D virsmas formu ar vidējo kļūdu, kas ir mazāka par 6 % attiecībā pret mazāko virsmas dimensiju;
- izmantojot piedāvāto uzlaboto ziedlapķēžu slēguma 4 vadu arhitektūru un standarta aparatūru, iespējams iegūt nepieciešamo informāciju par 3D orientāciju no vairāk nekā 200 sensoriem ar vairāk nekā 50 Hz nolasīšanas frekvenci;
- piedāvātais fiksēto vektoru garumu algoritms ļauj ar to pašu aparatūru atjaunot objekta formu vairāk nekā 40 reižu ātrāk ar vērā ņemamu (mazāk nekā 1 %) precizitātes samazinājumu, salīdzinot ar agrāk piedāvāto integrējošo algoritmu.

Darba praktiskā vērtība un aprobācija

Darba rezultāti var tikt lietoti viedo audumu jomā ērtai un neuzkrītošai cilvēka stājas un kustību mērīšanai. Stājas monitoringa sistēma, kas izmanto darbā piedāvātos datu savākšanas un virsmas atjaunošanas algoritmus, tika aprobēta medicīniskos pētījumos. Turklāt starp potenciālajiem lietojumiem ir arī tādas jomas kā lokanā elektronika un robotika, kur metodes var nodrošināt atgriezenisko saiti par sistēmas formu.

Zinātniskie raksti, kuros publicēti darba rezultāti:

- A. Hermanis, R. Cacurs and M. Greitans, "Acceleration and Magnetic Sensor Network for Shape Sensing," in IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 5, pp. 1271–1280, March 1, 2016. (**Ietekmes koeficients 1.762**, IEEE, Scopus)
- A. Hermanis, R. Cacurs and M. Greitans, "Shape sensing based on acceleration and magnetic sensor system," 2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISSIS), Hapuna Beach, HI, 2015, pp. 1–2. (short paper, IEEE, Scopus)
- K. Nesenbergs, A. Hermanis, M. Greitans, "A Method for segment based surface reconstruction from discrete inclination values", (2014) Elektronika ir Elektrotehnika, vol. 20, no. 2, pp. 32–35. (Scopus)
- A. Hermanis, R. Cacurs, K. Nesenbergs and M. Greitans, "Efficient real-time data acquisition of wired sensor network with line topology," 2013 IEEE Conference on Open Systems (ICOS), Kuching, 2013, pp. 133–138. (IEEE, Scopus)
- A. Hermanis, K. Nesenbergs, R. Cacurs, and M. Greitans, "Wearable Posture Monitoring System with Biofeedback via Smartphone", Journal of Medical and Bioengineering vol. 2, no. 1, pp. 40–44, 2013. (WorldCat, CrossRef)
- A. Hermanis and K. Nesenbergs, "Grid shaped accelerometer network for surface shape recognition," 2012 13th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, 2012, pp. 203–206. (**Best Paper Award**, IEEE, Scopus)

Konferenču tēzes, demonstrāciju apraksti un plakāti, kuros publicēti darba rezultāti:

- A. Hermanis, R. Cacurs, K. Nesenbergs, M. Greitans, E. Syundyukov, and L. Selavo. 2016. Demo: Wearable Sensor System for Human Biomechanics Monitoring. In Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN '16), 15–17 February. Gratz, Austria. Junction Publishing, USA, 247–248. (Demo, abstract and poster, ACM)
- A. Hermanis, R. Cacurs, K. Nesenbergs, M. Greitans, E. Syundyukov, L. Selavo, "Wearable sensor grid architecture for body posture and surface detection and rehabilitation", (2015) IPSN 2015 – Proceedings of the 14th International Symposium on Information

Processing in Sensor Networks (Part of CPS Week), pp. 414–415. (Demo, abstract and poster, ACM, Scopus)

- A. Hermanis, A. Greitane, S. Geidane, A. Ancāns, R. Cacurs, M. Greitans, "Wearable Head and Back Posture Feedback System For Children With Cerebral Palsy", Abstract: Journal of Rehabilitation Medicine (ISSN 1650-1977), 2015. (Abstract)
- K. Nesenbergs, A. Hermanis, A. Greitane, M. Greitans, "Virtual Reality Rehabilitation System for Children with Cerebral Palsy", 25th European Academy of Childhood Disability, Newcastle, England, 10–12 October, 2013. (Poster)
- A. Hermanis, K. Nesenbergs, "Accelerometer network for human posture monitoring", Riga Technical University 53rd International Scientific Conference, 10-12 October, 2012 Riga. (Abstract)

Konferences un semināri, kuros prezentēti darba rezultāti:

- "4th Baltic and North Sea Conference on Physical and Rehabilitation Medicine", 16–18 September 2015, Riga, Latvia
- "Cyber-physical systems week 2015", 13–16 April 2015, Seattle, WA, USA.
- "2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS)", 23–26 March 2015, Hapuna Beach, USA.
- "2013 IEEE Conference on Open Systems", 2–4 December 2013, Kuching, Malaysia.
- "2013 2nd International Conference on Medical Information and Bioengineering (ICMIB 2013)", 16–17 March 2013, Bali, Indonesia.
- "International Symposium on Biomedical Engineering and Medical Physics", 10–12 October 2012, Riga, Latvia.
- "13th Biennial Baltic Electronics Conference", 3–5 October 2012, Tallin, Estonia.
- "5th International Doctoral School of Energy Conversion and Saving Technologies", 27–30 May 2016, Ronisi, Latvia.
- "4th International Doctoral School of Electrical Engineering and Power Electronics", 29–30 May 2015, Ronisi, Latvia.
- "3rd International Doctoral School of Electrical Engineering and Power Electronics", 23–24 May 2014, Ronisi, Latvia.
- "2nd International Doctoral School of Electrical Engineering and Power Electronics", 24–25 May 2013, Ronisi, Latvia.
- "From exclusion to inclusion" Conference on novelties in Cerebral Palsy research, University of Latvia, May 8th 2014, Riga, Latvia.
- Latvijas Ergoterapeitu asociācijas vasaras konference 2014 "Ergoterapijas prakses kontekstu daudzveidība – mūsdienīgas metodes ergoterapijā", 14. jūnijs, 2014. g., rehab. centrs "Vaivari", Jūrmala, Latvija.
- Summer School "Smart Textiles for Healthcare", 25–28 August 2015, Riga, Latvia

Šis darbs ir izstrādāts Elektronikas un datorzinātņu institūtā, Rīgā, Latvijā. Darba rezultāti ir tikuši izmantoti šādos projektos:

- Valsts pētījumu programmas "Kiberfizikālās sistēmas, ontoloģijas un biofotonika drošai un viedai pilsētai un sabiedrībai" (VPP SOPHIS), projekts Nr. 1. "Kiberfizikālo sistēmu tehnoloģiju attīstība un to pielietojumi medicīnā un viedā transporta jomā" (KiFiS).
- „Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai (ViPTeh)” Nr.2013/0008/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/016.
- Valsts pētījumu programma „Inovatīvu daudzfunkcionālu materiālu, signālapstrādes un informātikas tehnoloģiju izstrāde konkurētspējīgiem zinātņu ietilpīgiem produktiem”, projekts Nr. 2 „Inovatīvas signālapstrādes tehnoloģijas viedu un efektīvu elektronisko sistēmu radīšanai”.

Darba struktūra

Promocijas darba apjoms ir 118 lappuses. 1. nodaļā ir aprakstīta detalizēta literatūras analīze par dažādām virsmas noteikšanas metodēm, kas ir balstītas uz iestrādātu aprīkojumu. Balstoties uz analīzi, atrasta piemērotākā pieeja mobilām CPS. 2. nodaļā ir aprakstītas metodes 3D formas noteikšanai, balstoties uz lokāliem orientāciju mērījumiem. Vispirms ir aprakstīts gadījums ar akselerometru sensoru tīkla izmantošanu un tā ierobežojumiem. Tālāk tiek piedāvāta metode, kas izmanto akselerometru un magnetometru tīklu. Ir dotas detalizētas simulācijas, lai teorētiski pārbaudītu sistēmas veiktspēju. 3. nodaļā ir apskatīti dažādi komunikāciju interfeisi, kas pieejami integrālajās shēmās, un ir piedāvāta jauna metode, kas ļauj efektīvi savākt datus no liela daudzuma sensoru un ir piemērota formas noteikšanas sistēmu lietojumos. 4. nodaļa ir veltīta virsmas noteikšanas sensoru tīklu eksperimentālo sistēmu izstrādei un pārbaudei. Tāpat ir dots detalizēts virsmas noteikšanas algoritmu veiktspējas novērtējums. 5. nodaļā ir aprakstīta piedāvāto algoritmu realizācija un aprobācija mobilā CPS. Balstoties uz darbā piedāvātajām metodēm, ir izstrādāta mobila stājas monitoringa ierīce medicīnas lietojumam. Šajā nodaļā ir arī aprakstīta sistēmas aprobācija medicīnas iestādēs pacientiem ar stājas un kustību traucējumiem. Darba beigās ir dots pārskats un secinājumi.

Šis promocijas darbs ir balstīts uz darba autora publikācijām [9, 10, 11, 12, 13, 14], kuru līdzautori ir Ričards Cacurs, Modris Greitāns un Krišjānis Nesenbergs. Darbā iekļauta arī papildu informācija, kas ir iepriekš publicēta darba autora maģistra darbā [15] un konferenču tēzēs [16, 17, 18, 19, 20], kur papildu līdzautori ir Armands Ancāns, *Emil Syndykov*, Leo Seļāvo, Santa Geidāne un Andra Greitāne. Šeit un tālāk darba tekstā atsauces uz autora paša darbiem ir izceltas un pasvītrotas.

1. METODES FORMAS NOTEIKŠANAI AR IESTRĀDĀTU APRĪKOJUMU

Literatūrā atrodami vairāki pētījumi, kuros mēģināts noteikt $3D$ objekta virsmas formu, izmantojot sensorus, kas ir novietoti uz objekta vai iestrādāti tajā iekšā. Parasti tiek izmantots sensoru tīkls, kas vairākās vietās uz objekta iegūst kādu lokālu informāciju. Apkopojot un apstrādājot šo informāciju, iespējams iegūt kopējās virsmas ģeometrijas parametrus. Šie pētījumi var tikt sadalīti divās apakšgrupās.

1.1. Formas noteikšana, mērot materiāla locīšanos

Vienā pētījumu apakšgrupā informācija par objekta formu tiek iegūta, mērot materiāla locīšanos. Tas var tikt darīts, balstoties uz dažādām fizikālajām parādībām, kuras var tikt uztvertas, izmantojot elektronisku aprīkojumu [21]. Literatūrā ir atrodamas dažādu veidu metodes formu noteikšanai, kas izmanto plašu klāstu ar dažādiem locīšanas sensoriem: virsmas akustisko viļņu sensori [22], optiskās šķiedras sensori [23], pjezoelektriskie sensori uz polimērmateriāliem [24, 25], kā arī pjezoelektriskie sensori, kas iestrādāti audumā [26], u. c.

Vairumam no virsmas formas noteikšanas metodēm, kas ir balstītas uz materiāla locīšanās mērīšanu, ir līdzīgas īpašības. Starp biežāk minētajiem trūkumiem ir sensoru histerēze, novecošanās, ierobežota izšķirtspēja, kā arī nepieciešamība pēc sarežģītas aparatūras un datu apstrādes algoritmiem, lai nodrošinātu informāciju par daudzdimensiju deformācijām lielos virsmas laukumos. Tāpat bieži pētījumi ir galvenokārt koncentrēti uz diskreto deformāciju mērīšanu un atpazīšanu, nevis universālu brīvi izvēlētas $3D$ formas noteikšanu. Šāda pieeja ir izplatīta tāpēc, ka ir sarežģīti pārvērst locīšanās sensoru signālus datus, kas apraksta nepārtrauktu, deformētu virsmu, dažādu iepriekš apskatītu sensoru īpašību dēļ.

1.2. Formas noteikšana, mērot objekta segmentu orientācijas

Otrā pētījumu apakšgrupā objekta forma tiek noteikta, mērot dažādu objekta virsmas segmentu orientācijas. Kopējās formas parametri tiek atjaunoti no lokālajiem orientāciju datiem, balstoties uz zināmu segmentu savienojumu modeli. Pēdējā laika progress *MEMS* tehnoloģijās [5] ļauj ražot miniatūrus zema jaudas patēriņa inerciālos sensorus, kas var tikt izmantoti orientācijas noteikšanai.

Vairums literatūrā apskatīto formas noteikšanas metožu, kas ir balstītas uz orientācijas mērīšanu ar inerciālajiem sensoriem, tiek izmantotas tikai specifiskos lietojumos. Starp populārākajiem lietojumu piemēriem ir valkājamas sistēmas, kas ļauj noteikt dažādas cilvēka ķermeņa pozas un kustības [27, 28, 29, 30, 31]. Šajos darbos pie dažādām cilvēka ķermeņa daļām tiek piestiprināti sensori, kas ļauj atjaunot ķermeņa pozu, izmantojot cilvēka biomehāniskos modeļus.

Salīdzinoši maz pētnieku ir apskatījuši inerciālo sensoru lietošanu brīvi izvēlētas formas noteikšanai vispārīgā gadījumā. Autori avotos [32, 33] apraksta metodes vienkāršu formu noteikšanu ar trīs asu akselerometru tīklu. Avotos [34, 35] tiek lietots akselerometru un magnētisko sensoru tīkls, lai atjaunotu virsmas formu, bet ir dots tikai virspusīgs metodes apraksts. Autori avotos [36, 37] apraksta $3D$ līknes atjaunošanu no orientāciju mērījumiem. Avotos [38, 39] vairākas šādas līknes tiek izmantotas virsmas atjaunošanai, un laikā mainīgu deformāciju mērīšana ir parādīta avotā [40]. Šīs metodes balstās uz detalizētu datu interpolāciju starp sensoru mezgliem un ir matemātiski netriviālas, kas prasa salīdzinoši lielus skaitļošanas resursus izmantošanai pārvietojamās ierīcēs. Tāpat avotos ir minētas grūtības atrast etalonu, lai noteiktu formas

atjaunošanas precizitāti, kā arī problēmas ar sarežģīto datu ieguves procesu, lai varētu iegūt reāla laika mērījumus. Šo iemeslu dēļ nav detalizētu pētījumu par sistēmu praktisko realizāciju un veikspējas novērtējumu.

Daudzos iepriekš minētajos avotos, akselerometri ir papildināti ar magnētiskā lauka sensoriem, kas ļauj mērīt papildus atskaites vektoru un iegūt pilnu sensora 3D orientācijas novērtējumu [41], nodrošinot spēju atjaunot pilnu 3D formas modeli. Bieži sistēmā papildus tiek pievienoti arī žiroskopi, lai nodrošinātu precīzu orientācijas noteikšanu arī dinamiskos apstākļos un vibrāciju laikā [42]. Akselerometriem pamatā ir augstfrekvenču troksnis, kas rodas no vibrācijām un kustībām ar augstu dinamiku. Pretēji tam uz žiroskopiem bāzēta orientācijas mērīšana galvenokārt satur zemfrekvenču troksni, ko bieži mēdz saukt par dreifu [43]. Literatūrā atrodami vairāki datu apstrādes filtri [44, 45, 46, 47], kas, lietojot abus sensoru kopā, ļauj izmantot to papildinošās īpašības. Neskatoties uz priekšrocībām, žiroskopu izmantošanai ir nepieciešami būtiski sarežģītāki datu apstrādes algoritmi. Turklāt modernās *MEMS* zema jaudas patēriņa sistēmās žiroskopi var izmantot pat ap 17 reižu vairāk strāvas stiprumu nekā akselerometri un magnetometri kopā [48].

1.3. Secinājumi

Eksistē vairāki pētījumi, kas veltīti 3D formas noteikšanai ar iebūvētu aprīkojumu. Neskatoties uz to, daudzi no tiem sniedz tikai virspusēju metožu aprakstu, atstājot daudzus svarīgus jautājumus neapskatītus. Tas ierobežo metožu veikspējas novērtēšanu un praktisko realizāciju.

Locīšanās sensori parasti nodrošina datus par tikai vienu deformācijas brīvības pakāpi. Šī iemesla dēļ netriviālu 3D formu mērīšanai ir jāveido sarežģīti sensoru tīkli. Tāpat dažādas sensoru īpašības, piemēram, histerēze, nelinearitāte un novecošanās, padara apgrūtināšu atbilstošo datu apstrādes algoritmu izstrādi. Šie trūkumi būtiski apgrūtina šo metožu lietošanu mobilās *CPS*.

Veiksmīgākie risinājumi, kas izmanto orientācijas mērīšanu, ir saistīti ar specifiskiem, ierobežotiem lietojumiem. Ļoti maz līdzšinējo pētījumu ir veikti, lai šo pieeju realizētu un eksperimentāli pārbaudītu formas noteikšanai vispārīgos gadījumos, piemēram, brīvi izvēlētas virsmas formas noteikšanai. Galvenokārt tas ir saistīts ar problēmām izveidot sensoru tīklu efektīvai datu savākšanai, kā arī nepieciešamību veidot salīdzinoši sarežģītus datu apstrādes algoritmus. Neskatoties uz to, šo pieeju padara pievilcīgu spēja viegli iegūt mērījumus vairākās brīvības pakāpēs. Tāpat nepieciešamie *MEMS* sensori mūsdienās ir plaši izplatīti, salīdzinoši lēti un ērti integrējami iegultās sistēmās. Šo iemeslu dēļ autors tālāk darbā izvēlas pētīt formas noteikšanu, balstītu uz orientāciju mērījumiem ar inerciālajiem/magnētiskajiem sensoriem. No inerciālajiem sensoriem tiek apskatīti tikai akselerometri tāpēc, ka žiroskopi patērē ievērojami vairāk enerģijas un tiem nepieciešami daudz vairāk resursus prasīši signālu apstrādes algoritmi.

2. FORMAS NOTEIKŠANA AR INERCIĀLO/MAGNĒTISKO SENSORU MEZGLIEM

2.1. Formas noteikšana ar akselerometru mezgliem

Jebkura cieta ķermeņa orientācija var tikt uztverta kā ķermeņa atskaites sistēmas rotācija globālā atskaites sistēmā. Populārs veids, kā aprakstīt rotācijas, ir ar kvaternioniem [49]. Īsumā kvaternionu rotācijas apraksts definē rotācijas asi $\vec{n}$ un rotācijas leņķi θ .

Statiskos apstākļos normēts trīs asu akselerometra mērījumu vektors $(a_x; a_y; a_z)$ var tikt definēts kā vertikāls vektors $(0; 0; 1)$, kas ir rotēts par leņķi θ ap asi $(a_x; a_y; a_z)$ attiecībā pret globālo atskaites sistēmu. Leņķi θ un rotāciju asi $\vec{n}$ var iegūt:

$$\theta = \arccos((a_x; a_y; a_z) \cdot (0; 0; 1)); \quad (2.1)$$

$$\vec{n} = (a_x; a_y; a_z) \times (0; 0; 1). \quad (2.2)$$

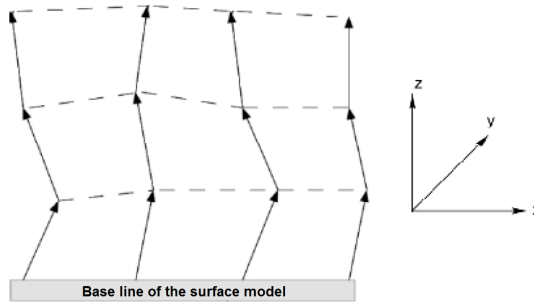
Rotācijas kvaterniona komponentes var aprēķināt:

$$\begin{aligned} q_0 &= a = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right); \\ q_1 &= n_x b = n_x \sin\left(\frac{\theta}{2}\right); \\ q_2 &= n_y b = n_y \sin\left(\frac{\theta}{2}\right); \\ q_3 &= n_z b = n_z \sin\left(\frac{\theta}{2}\right). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Lai transformētu 3D vektorus, rotācijas kvaternioni var tikt izmantoti tiešā veidā vai arī, lai konstruētu klasisku rotāciju matricu $R(q)$ izmērā trīs reiz trīs [49]. $R(q)$ apraksta rotāciju, kas atbilst sensora orientācijai attiecībā pret globālo atskaites sistēmu. Jebkurš vektors, kas apraksta virsmas segmentu, var tikt vienkārši transformēts, reizinot to ar $R(q)$:

$$\vec{v}' = R(q)\vec{v}, \quad (2.4)$$

kur $\vec{v}$ ir vektors un $\vec{v}'$ ir šis pats vektors, kurš transformēts atbilstoši sensora orientācijai.

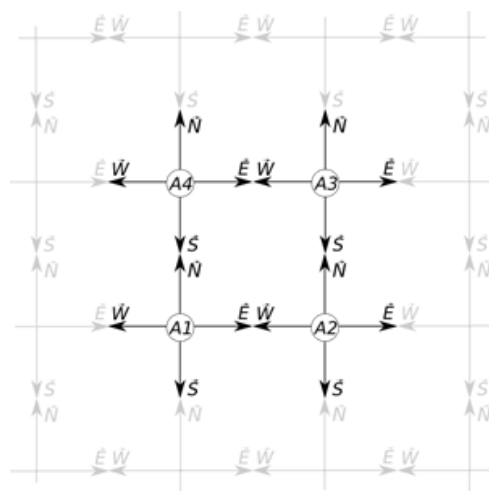


2.1. att. Atjaunotā virsmas modeļa struktūra.

Lai atjaunotu formu, kurā izvietots sensoru tīkls, vispirms jāiegūst orientācijas matrica $R(q)$ katram sensoram [14]. Tad rotācijas matricas tiek izmantotas izteiksmē (2.4), lai transformētu attiecīgos virsmas segmentus aprakstošos vektorus uz atbilstošā sensora patieso orientāciju (2.1. att.).

Jāņem vērā, ka iegūtās rotācijas matricas iekļauj tikai divas brīvības pakāpes – rotācijas ap horizontālajām asīm. Rotācijas ap vertikālo asi no akselerometra mērījumiem tiešā veidā iegūt nevar, un tās šajā modelī ir pieņemtas par fiksētām. Šis tuvinājums ir pietiekams vienkāršu formu aproksimēšanai, taču sarežģītākām formām var ieviest ievērojamas kļūdas.

Lai mazinātu šo trūkumu, ir piedāvāta metode segmentētas virsmas atjaunošanai, kas, balstoties uz segmentu orientācijas divu brīvības pakāpju mērījumiem un savienojuma modeli, tuvināti atrod segmentu rotācijas ap vertikālo asi [13]. Tiek pieņemts, ka virsma sastāv no I vienāda izmēra segmentiem, kas ir vienmērīgi izvietoti režģī, kura izmērs ir $n \cdot m$. Katrs modeļa segments tiek aprakstīts ar krustenisku objektu, kas ir definēts ar četriem vektoriem, tālāk sauktiem par virzienu vektoriem. Virzienu vektoru sākuma dati $\vec{N}_i, \vec{E}_i, \vec{S}_i, \vec{W}_i$ katram no $i \in [1, \dots, I]$ segmentiem tiek aprēķināti, rotējot virzienu vektorus atbilstoši attiecīgā segmenta sensora datiem. Katra segmenta patiesā orientācija ap vertikālo asi α_i un patiesais segmenta centra novietojums $\vec{C}_i$ tiek aprēķināts, sadalot virsmas atjaunošanu $(n - 1) \cdot (m - 1)$ apakšproblēmās, tālāk sauktās par darba grupām. Katra no šīm darba grupām sastāv no četriem segmentiem A1, A2, A3, A4, kas bez jebkādām sākotnējām rotācijām ir savienoti, kā redzams 2.2. attēlā.



2.2. att. Darba grupas struktūra.

Katrā darba grupā trīs no četriem segmentiem tiek pieņemti par savstarpēji savienotiem “U” formas veidā, izveidojot vienādojumu sistēmu:

$$\begin{cases} \vec{C}_{A1} + \vec{E}_{A1} = \vec{C}_{A2} + \vec{W}_{A2} \\ \vec{C}_{A1} + \vec{N}_{A1} = \vec{C}_{A4} + \vec{S}_{A4} \\ \vec{C}_{A2} + \vec{N}_{A2} = \vec{C}_{A3} + \vec{S}_{A3} \end{cases} \quad (2.5)$$

Sākumā viens no segmentiem tiek definēts kā atskaites punkts pārējam modelim. Tālāk algoritms secīgi pārbauda visas iespējamās kombinācijas darba grupas segmentu α_i vērtībām noteiktā intervālā, lietojot pilno pārlasi. Katrā kombinācijā tiek aprēķināta kļūda Δ_d , kas apraksta attālumu starp ceturto segmentu pāri. Pieņemot nepārtrauktu virsmu, kombinācija ar zemāko Δ_d tiek uzskatīta par derīgu. Pēc tam, kad ir aprēķinātas α_i un $\vec{C}_i$ vērtības katram darba grupas segmentam, tiek izvēlēta nākamā darba grupa tā, lai tā saturētu vismaz vienu iepriekš apstrādātu segmentu.

Vispārīgā gadījumā piedāvātajam uzlabojumam ir ierobežojumi gadījumos, kad divu brīvības pakāpju orientācijas dati un modeļa ierobežojumi nedod pietiekami daudz informācijas par rotācijām ap vertikālo asi.

2.2. Formas noteikšana ar akselerometru un magnetometru mezgliem

Lai varētu mērīt brīvi izvēlētas 3D formas, tika izstrādāta metode, kas balstīta uz orientāciju mērīšanu ar paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoru tīklu.

Kā minēts iepriekš, orientācija var tikt aprakstīta ar rotāciju matricu R . Metodes R aprēķināšanai ir daudz tikušas apskatītas literatūrā, kas saistīta ar kosmosa kuģu orientācijas noteikšanu, kur R var tikt atrasta, izmantojot Saules un tālo zvaigžņu virzienu novērojumus [50, 51]. Šis pats uzdevums var tikt pielīdzināts sensoru mezgla orientācijas noteikšanai, kas var mērīt Zemes gravitācijas un magnētisko lauku vektorus. Vispārīgā gadījumā orientācijas noteikšana mēdz tikt definēta kā Vahbas problēma (*Wahba's problem*) [52], kas meklē R kā atrisinājumu šādas izteiksmes minimizācijai:

$$\sum_{k=1}^K \|v_k^* - Rv_k\|^2, \quad (2.6)$$

kur $\{v_1, v_2, \dots, v_K\}$ un $\{v_1^*, v_2^*, \dots, v_K^*\}$ ir kopas ar K vektoru novērojumiem attiecīgi objekta un globālajā atskaites sistēmā. Paātrinājuma un magnētiskā lauka sensori katrā sistēmas stāvoklī nodrošina tikai divu vektoru novērošanu, kas ir minimālais skaits pilnas 3D orientācijas noteikšanai. Šī iemesla dēļ nevar tikt definēta jēgpilna minimizācijas problēma, un ir jāizmantoto deterministiska pieeja. Literatūrā atrodami vairāki deterministiski algoritmi, kas ļauj atrast orientāciju, izmantojot divu vektoru mērījumus [41, 53].

TRIAD [41] tika izmantots kā viens no ātrākajiem un skaitļošanai vienkāršākajiem deterministiskajiem algoritmiem, kam nepiemīt nenoteiktības problēmas. Ievadot Zemes gravitācijas un magnētiskā lauka vektoru virzienu mērījumus, kā arī šo pašu vektoru virzienus Zemes atskaites sistēmā, *TRIAD* algoritms ļauj atrast rotācijas matricu R , kas apraksta pilnu sensora 3D orientāciju attiecībā pret Zemes atskaites sistēmu. R tālāk var tikt izmantota, lai atrastu attiecīgo virsmas segmenta orientāciju. Jebkurš vektors, kas apraksta virsmas segmentu, var tikt transformēts, to reizinot ar R :

$$\vec{v}' = R\vec{v}, \quad (2.7)$$

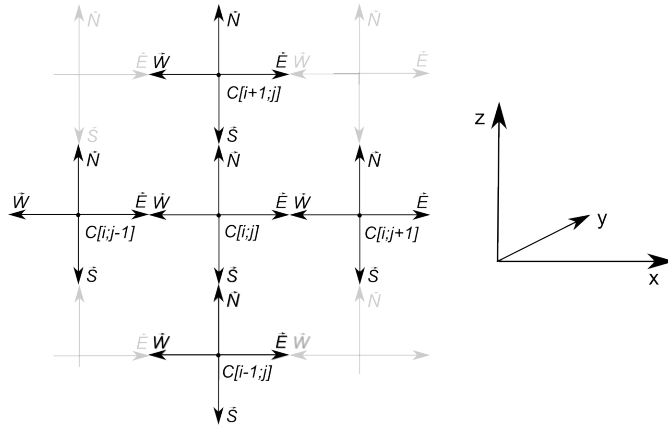
kur $\vec{v}$ ir vektors formas modeļa sākuma stāvoklī un $\vec{v}'$ ir šis pats vektors, kas ir transformēts atbilstoši tā sensora orientācijai.

Brīvi izvēlētas 3D formas atjaunošana no lokāliem segmentu 3D orientāciju datiem līdz šim padziļināti nav tikusi pētīta. Veiksmīgākās no līdzšinējām pieejām orientāciju informāciju izmanto, lai dažādās vietās uz virsmas iegūtu datus par pieskarēm [36, 38]. Pēc būtības dati par pieskarēm apraksta līkņu atvasinājumus diskrētos punktos. Zinot diskrētās atvasinājumu vērtības un attālumu pa līkni starp tām, var tikt sastādīts šāds vienādojums:

$$L = \int_{p_k}^{p_{k+1}} \|U'(l)\| dl, \quad (2.8)$$

kur $U(l)$ ir parametrizēta līkne ar līknes garuma parametru l un zināmiem atvasinājumiem $U'(l)$ punktos $l = p_k$ ($k = 1, \dots, n$), kur n ir kopējais sensoru mezglu skaits. $L = p_{k+1} - p_k$ ir attālums starp sensoru mezgliem, pieņemot vienmērīgu sensoru izvietošanu. Līknes forma tiek atjaunota, vispirms interpolējot diskrētos atvasinājumus (saglabājot vienādību (2.8)), lai iegūtu nepārtrauktu $U'(l)$. Pēc tam līknes atrisinājums $U(l)$ tiek iegūts, skaitliski integrējot $U'(l)$. Vairāku šādu līkņu atjaunošana var nodrošināt datus arī par virsmas formu.

Aprakstītajai metodei ir nepieciešami ievērojami skaitļošanas resursi interpolēšanas un skaitliskās integrēšanas dēļ. Turklāt nav iespējams atjaunot deformācijas ar periodu, kas mazāks vai



2.3. att. Virsmas segmentu struktūra.

Katrs segments sastāv no centra punkta C un četriem virzienu vektoriem $\vec{N}$, $\vec{E}$, $\vec{S}$ un $\vec{W}$.

vienāds ar attālumu starp sensoriem. Tas samazina ieguvumus no precīzas interpolēšanas un integrēšanas un rada nepieciešamību izmantot vairāk, kā arī ciešāk izkārtotus sensorus.

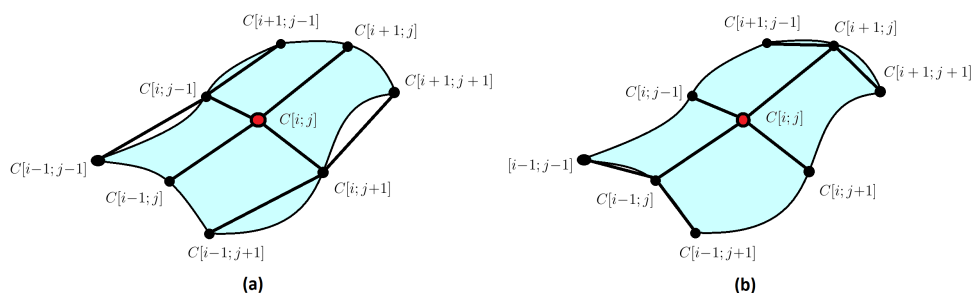
Balstoties uz līdzšinējo pieeju, tika izstrādāts jauns algoritms, kas ir veidots tā, lai varētu izmantot pēc iespējas vairāk sensorus, palielinot izšķirtspēju un samazinot skaitļošanas laiku [9, 10]. Detalizētas interpolēšanas un integrēšanas vietā algoritmā tiek pieņemts, kas sensori ir piestiprināti stingriem, savstarpēji savienotiem virsmas segmentiem. Šāda pieeja nodrošina rupjāku modeļa aproksimāciju, taču var būtiski samazināt skaitļošanas laiku. Metode ļauj ātri atjaunot formu, izmantojot lielu skaitu sensoru, kas nodrošina lielāku sensoru blīvumu, līdz ar to augstāku formas noteikšanas izšķirtspēju.

Virsmas modelis tiek sadalīts n stingros segmentos, kur $n = i \cdot j$ ir kopējais sensoru skaits tā, lai segmentu struktūra atbilstu sensoru tīkla režģa struktūrai (i un j apzīmē rindas un kolonnas sensoru novietojumam režģī). Kā parādīts 2.3. attēlā, katrs segments tiek aprakstīts ar četriem virzienu vektoriem, kas apzīmēti ar $\vec{N}[i; j]$, $\vec{E}[i; j]$, $\vec{S}[i; j]$ un $\vec{W}[i; j]$, kā arī segmenta centra punktu $C[i; j]$. Segmenta centra punkti ir punkti, kas apraksta virsmas ģeometriju. Vispirms visi segmenti tiek ievietoti globālajā atskaites sistēmā, tiem piešķirot sākuma virzienu vektoru vērtības: $\vec{N}_b = (0; 0; \frac{L_1}{2})$; $\vec{E}_b = (\frac{L_2}{2}; 0; 0)$; $\vec{S}_b = (0; 0; -\frac{L_1}{2})$; $\vec{W}_b = (-\frac{L_2}{2}; 0; 0)$. L_1 un L_2 ir attālumi starp sensoriem reālajā režģī attiecīgi gareniskā un sāniskā virzienā.

Formas atjaunošanas laikā sākuma virzienu vektori tiek transformēti atbilstoši to sensoru orientācijai, izmantojot vienādojumu (2.7). Pēc segmentu struktūras (2.3. att.) ir redzams, ka ja viens no centra punktiem ir zināms, tad jebkurš cits centra punkts šajā pašā rindā vai kolonnā var tikt aprēķināts, saskaitot vai atņemot attiecīgos segmentu virzienu vektorus.

Kā parādīts 2.4. attēlā, lai aprēķinātu centra punktus, var tikt izmantoti ceļi pa rindām vai kolonnām. Teorētiski abos gadījumos rezultātiem vajadzētu būt vienādiem, taču tie var atšķirties galīga izmantotā sensoru skaita un mērījumu kļūdu dēļ. Lai atrisinātu šo problēmu, virsmas formu definējošie punkti tiek atrasti kā vidējās centra punktu vērtības no abiem gadījumiem, kas ļauj izveidot noslēgtu režģi.

Iegūtie segmentu centra punkti var tikt uztverti kā 3D punktu mākonis, kas definē objekta formu līdzīgi tam, kā tiek iegūts no 3D skenera. Pilnīgs formas modelis var tikt konstruēts, zīmējot kvadrātisku režģi starp iegūtajiem punktiem, šādā veidā aproksimējot objekta virsmas formu.

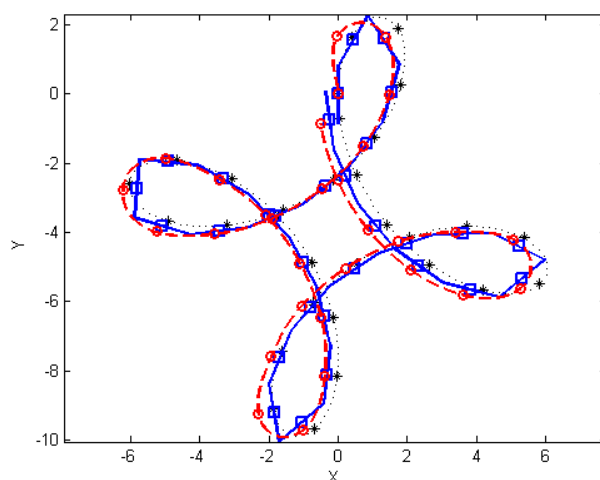


2.4. att. Centra punktu savienojumu struktūra.

$C[i; j]$ – atskaites punkts. (a) – tiek iegūta viena atskaites rinda, pārējie centra punkti tiek aprēķināti ar kolonnu metodi; (b) – tiek iegūta viena atskaites kolonna, pārējie centra punkti tiek aprēķināti ar rindu metodi.

2.3. Simulācijas

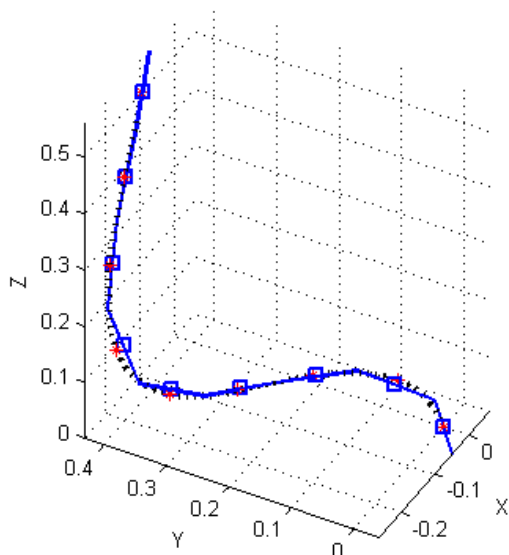
Piedāvātā formas noteikšanas metode tika salīdzināta ar līdzšinējo pieeju [36]. Vienkāršošanas nolūkos tika apskatīts tikai 2D gadījums. Tika ģenerēta līkne ar sarežģītu formu (līdzīga kā avotā [36]) [9]. Līkne tika atjaunota ar abām metodēm no 30 simulētiem sensoriem (2.5. att.). Vidējais Eiklīda attālums starp simulētajiem un atjaunotajiem sensoru novietojumiem attiecībā pret kopējo līknes garumu bija 0,49 %, izmantojot šajā darbā piedāvāto metodi un 0,31%, izmantojot metodi no avota [36]. Simulācija tika veidota *MATLAB* vidē, 3,2 Mhz divkodolu PC, aprēķinu laiki tika fiksēti – 0,72 ms šajā darbā piedāvātajai metodei un 30,05 ms metodei no [36].



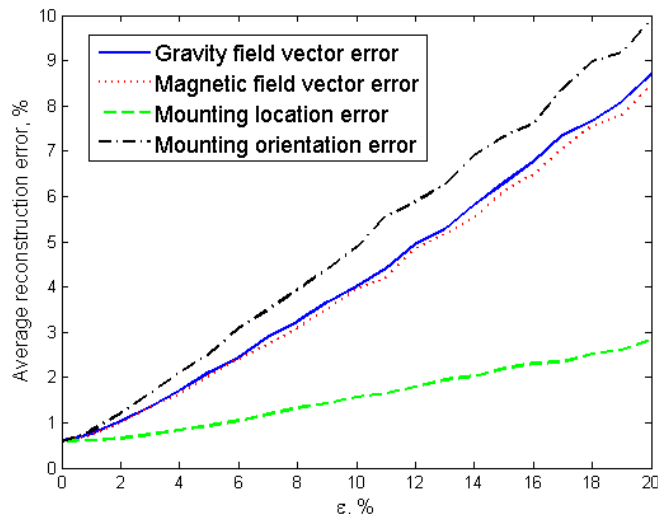
2.5. att. Formas atjaunošanas metožu salīdzinājums.

Ģenerētā līkne ir punktotā līnija, zvaigznītes apzīmē sensoru novietojumu. Atjaunošana ar metodi [36] ir raustītā līnija, aplīši apzīmē sensoru novietojumu. Atjaunošana ar piedāvāto metodi ir nepārtrauktā līnija, kvadrāti apzīmē sensoru novietojumu.

Papildus aproksimācijas kļūdām vairāki kļūdu avoti rodas no mērījumu procesa. Lai novērtētu katra kļūdas avota ietekmi uz formas noteikšanas precizitāti, tika simulēti deviņi sensoru mezgli, kas vienmērīgi izvietoti uz 3D līknes, un aprēķināti to teorētiskie paātrinājuma un magnētiskā lauka mērījumi. 2.6. attēlā parādīta ģenerētā līkne ar punktotu līniju, zvaigznītes parāda simulēto sensoru novietojumu. Atjaunotā līkne ir nepārtrauktā līnija, kvadrāti parāda sensoru novietojumu. Lai novērotu ietekmi uz atjaunošanas precizitāti, teorētiskajos paātrinājuma un



2.6. att. Ģenerētā 3D līkne.

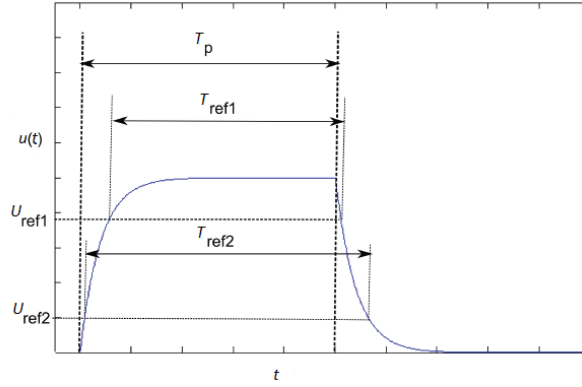


2.7. att. Dažādu kļūdu avotu ietekme.

magnētiskā lauka sensoru datus tika ieviestas kļūdas no dažādiem avotiem ar vienmērīgi pieaugošu kļūdas standartnovirzi. Katram kļūdas avotam ar katru standartnovirzi tika izpildīti 1000 Montekarlo metodes aprēķini. Vidējās vērtības apkopotām atjaunošanas kļūdām ir parādītās 2.7. attēlā. Katrai no līknēm ϵ apzīmē simulētās kļūdas standartnovirzi attiecībā pret: gravitācijas lauka vektora garumu; magnētiskā lauka vektora garumu; attālumu starp sensoriem (montāžas novietojuma kļūdai); π (montāžas orientācijas kļūdai). Vidējā līknes atjaunošanas kļūda ar teorētiskajiem datiem (aproximēšanas kļūda) bija 0,59 % attiecībā pret līknes garumu.

2.4. Secinājumi

Galvenā priekšrocība formas atjaunošanai tikai ar paātrinājuma sensoriem ir vienkāršāka datu apstrāde un sistēmas struktūra, kas izmanto tikai viena tipa sensorus. Tomēr, lai mērītu brīvi izvēlētu 3D formu, metode, kas ir balstīta uz pilnīgiem 3D orientācijas mērījumiem, ir piemērotāka. Tika demonstrēts, ka piedāvātā formas noteikšanas metode ar galīgu garumu vektoriem, salīdzinot ar līdz šim piedāvāto detalizēto lokālo atvasinājumu interpolēšanu un integrēšanu, nodrošina vairāk kā 40 reižu ātrāku atjaunošanu (*Matlab* simulācijā), tikai nedaudz samazinot atjaunošanas precizitāti. Interpolēšanas algoritms nespēj iegūt datus par deformācijām, kas ir mazākas vai vienādas ar attālumu starp sensoriem, tāpēc ir jāpalielina sensoru novietojuma blīvums, lai iegūtu augstāku formas noteikšanas precizitāti. Šī iemesla dēļ autors uzskata, ka praktiskās reāla laika formas noteikšanas sistēmās komplicēti atjaunošanas algoritmi var tikt aizstāti ar vienkāršāku aproksimāciju, lai nodrošinātu ātrāku datu apstrādi un varētu izmantot vairāk sensorus. Galvenais šādu metožu trūkums ir nepieciešamais sensoru novietojuma blīvums, kam jābūt pēc iespējas augstākam, lai mērītu deformācijas ar mazu periodu.



3.2. att. Takts signāla pulsa platuma izmaiņa atkarībā no komparatora references sprieguma.

mezglu pāri, Ω . Pamatojoties uz mazāko nepieciešamo V_n , vienādojums (3.1) var tikt izmantots, lai novērtētu maksimāli pieslēdzamo sensoru skaitu.

Otra īpašība, kas ierobežo maksimāli pieslēdzamo sensoru skaitu, ir lietojumam nepieciešamā nolasīšanas frekvence no katra sensoru mezgla tīklā. Tā var tikt aprēķināta:

$$T_{\text{sample}} = bn\left(\frac{8}{f_{\text{CLK}}} + T_{\text{SPI}}\right) + T_{\text{data}}, \quad (3.2)$$

kur T_{sample} – minimālais nolasīšanas periods, s, f_{CLK} – *SPI* takts signāla frekvence, Hz, n – kopējais sensoru mezglu skaits tīklā, b – baitu skaits no katra sensora, T_{data} – aizture datu sagatavošanai sensoru mezglā, s, T_{SPI} – ar *SPI* aparatūru saistītā aizture.

3.2. Secinājumi

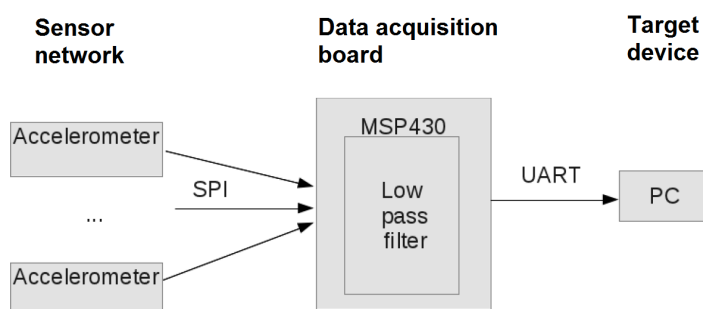
Piedāvātā metode var nodrošināt efektīvu datu savākšanu no liela daudzuma sensoru tīkla, savienojot ierīces virknē. Tas atrisina ierīču adresēšanas problēmas, kas rodas tīklos ar lielu skaitu sensoru. Metode arī samazina nepieciešamo vadu skaitu un nodrošina vienkāršu savienojumu struktūru, kas ļauj ērtu integrēšanu, piemēram, audumā. Vienkāršajai vadu struktūrai ir arī priekšrocības izmantošanā ar straujā attīstībā esošajiem viedajiem audumiem, kas var aizvietot vadus ar vadošiem pavedieniem [55]. Turklāt metodes realizēšanai ir nepieciešama tikai standarta zema jaudas patēriņa aparatūra, un tā nodrošina pietiekamu datu pārraides ātrumu reāla laika sistēmām, kas ir svarīgs aspekts daudzos lietojumos.

Sensoriem pievienotie mikrokontrolleri papildus var tikt izmantoti datu priekšapstrādei, kā arī veidojot sistēmas ar izkliedētu skaitļošanas arhitektūru. Tas var sniegt ievērojamas priekšrocības mobilām *CPS* reāla laika un zema jaudas patēriņa lietojumos.

4. EKSPERIMENTĀLĀS SISTĒMAS

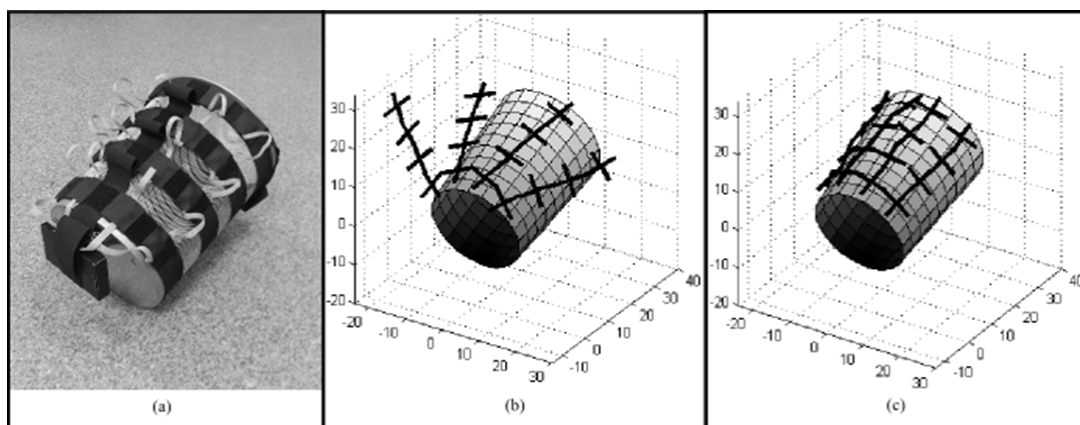
4.1. Virsmas noteikšana ar akselerometru tīklu

Lai novērtētu veikspēju virsmas formas atjaunošanai no akselerometru datiem, kas aprakstīta 2.1. apakšnodaļā, tika izveidots prototips, kas sastāv no trīs asu akselerometru tīkla un datu savākšanas plates [14, 15] (4.1. att.). Tika izmantots 16 sensoru tīkls, izvietots režģī, kura dimensijas ir 4×4 .



4.1. att. Eksperimentālās akselerometru sistēmas struktūra.

Virsmas atjaunošanas precizitāte tika noteikta, uzliekot sensoru režģi uz dažādām virsmām ar zināmu ģeometriju. Eksperimentos tika izvēlētas virsmas ar salīdzinoši vienkāršām formām, kur orientācijas noteikšana ap vertikālo asi nav nepieciešama. Vidējā kļūda sensoru novietojuma atjaunošanai bija 0,71 cm.



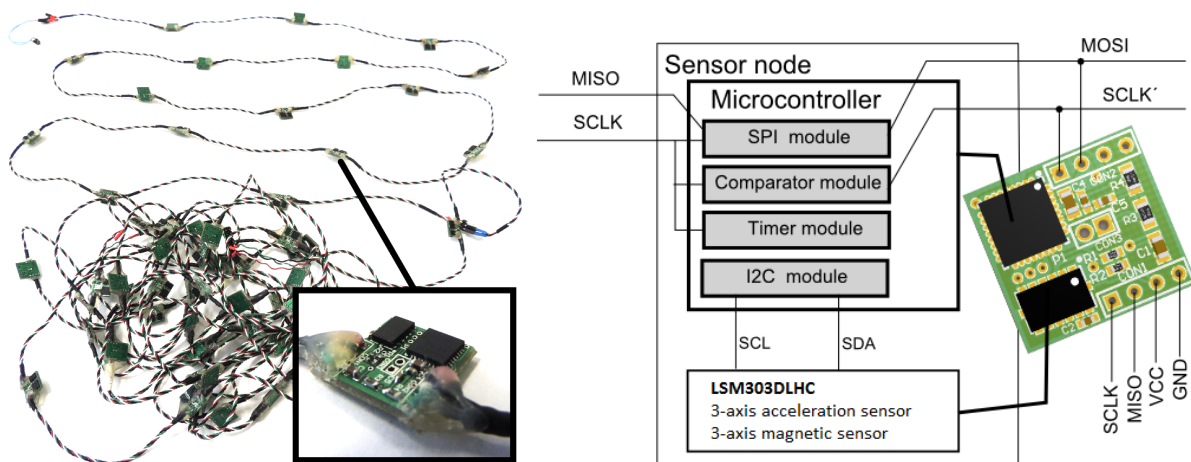
4.2. att. Akselerometra tīkla eksperimentālais uzstādījums.

(a) – atskaites objekts; (b) – savietots atskaites modelis un atjaunotais virsmas modelis, pieņemot fiksētu segmentu orientāciju ap vertikālo asi; (c) 0- savietots atskaites modelis un atjaunotais virsmas modelis ar orientācijas ap vertikālo asi noteikšanu.

Lai eksperimentāli pārbaudītu darbību piedāvātajai metodei, kas ļauj noteikt segmentu rotācijas leņķus trešajā brīvības pakāpē (rotācijas ap vertikālo asi), sensori tika piestiprināti pie izliktas atskaites virsmas [13]. 4.2. attēlā redzams salīdzinājums virsmas atjaunošanai, lietojot modeli ar fiksētu segmentu rotāciju ap vertikālo asi, kā arī ar metodi, kas nodrošina šo rotāciju tuvinātu atrašanu. No eksperimentiem redzams vērā ņemams uzlabojums, taču aprēķinu laiks pēdējā gadījumā bija apmēram 1 sekunde, realizējot algoritmu *MATLAB* vidē, modernā personālajā datorā. Tas būtiski ierobežo metodes lietošanu sistēmās ar ierobežotiem resursiem.

4.2. Sensoru tīkla arhitektūra

Lai eksperimentāli pārbaudītu 3. nodaļā piedāvāto uzlabotā ziedlapķēžu *SPI* arhitektūru, tika izveidota eksperimentāla sistēma ar 60 sensoru mezgliem (4.3. att.) [11]. Visi sensoru mezgli tika savienoti ķēdē atbilstoši 3.1. attēlā parādītajai struktūrai.



4.3. att. Eksperimentālā sensoru ķēde ar 4.4. att. Sensoru mezgla struktūra (izmērs 13 mm × 60 sensoru mezgliem). 13 mm × 2 mm).

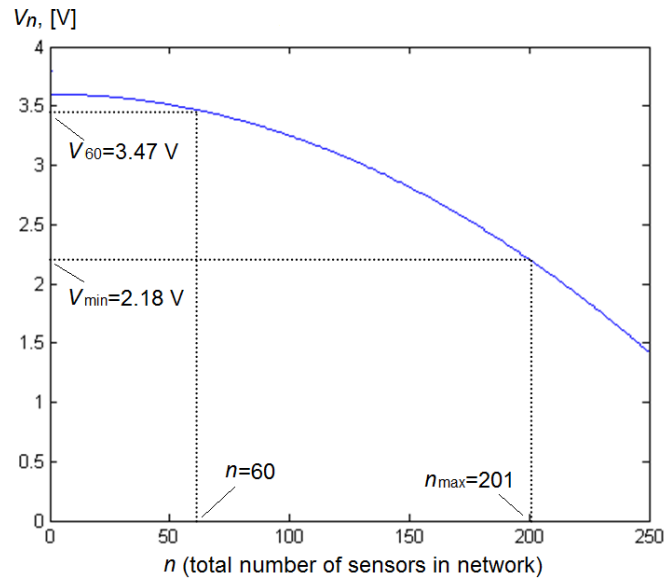
Eksperimentālajā sistēmā tika izmantots *MSP-EXP430FR5739* izstrādes rīks kā vedējierīce (*master*). Sensoru mezgli tika izveidoti no trīs asu paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoriem *LSM303DLHC*, kas sazinās pa *I2C* līniju ar *MSP430g2553* mikrokontrolleri (4.4. att.).

Takts signāla atkārtošanai sensora mezglā tika izmantots mikrokontrollerī iebūvēts komparators. Kā izklāstīts 3. nodaļā, atkārtotā takts signāla platums katrā atkārtošanas reizē izmainās, tāpēc nepieciešama speciāla kalibrēšanas procedūra. Kalibrēšana tika nodrošināta, pievienojot ienākošā takts signāla līniju taimera modulim, kas var izmērīt takts signāla pulsa platumu. Atkarībā no pulsa platuma tika izvēlēta komparatora references sprieguma vērtība tā, lai tiktu kompensēts takts signāla pulsa platuma kropļojums.

Eksperimentālajā sistēmā vedējierīces barošanas spriegums V_{cc} bija 3,6 V. Izmērītā strāvas stipruma *RMS* vērtība I_{cc} katram sensoru mezglam bija 460 μA , veidojot 27,6 mA kopējo strāvas stipruma patēriņu visiem 60 sensoriem. Vadu pretestība R_w tika nomērīta 0,15 Ω . 4.5. attēlā redzamā līkne tika iegūta, izmantojot vienādojumu (3.1), un tā parāda attiecību starp kopējo sensoru skaitu un pēdējā sensora barošanas spriegumu tīklam ar iegūtajiem parametriem. Teorētiskais barošanas spriegums uz pēdējā sensora 60 sensoru tīklam ir atzīmēts 3,47 V un aptuveni sakrīt ar eksperimentāli izmērīto. Ņemot vērā mazāko pieļaujamo barošanas sprieguma vērtību sensoram *LSM303DLHC*, kas ir 2,18 V, tīklā var tikt saslēgti kopā 201 sensoru mezgls.

SPI datu pārraides takts frekvence bija 1 MHz. Eksperimentāli noteiktais datu sagatavošanas laiks T_{data} bija 200 μs . Izmērītā *SPI* aparatūras aizkave bija aptuveni 8 μs . Ievietojot šos parametrus vienādojumā (3.2), mazākais nolasīšanas periods tiek iegūts 6 ms, kas atbilst aptuveni 166 Hz nolasīšanas frekvencei ar 60 sensoru tīklu un saņemtiem 6 baitiem no katra sensoru mezgla. Balstoties uz līdzīgiem aprēķiniem, maksimālā nolasīšanas frekvence priekš aprēķinātā maksimālā sensoru skaita ($n_{max} = 201$) tika iegūta 51 Hz.

Izveidotā sistēma nodrošina, ka visi sensori tiek sinhroni nolasīti un tad līdz nākamajai nolasē dati tiek pārsūtīti uz datu savākšanas plati. Katrs sensoru mezgls ķēdē var tikt aprīkots ar identisku programmatūru, kas ievērojami atvieglo sensoru tīkla izstrādāšanu. Konkrētās sensoru tīkla shēmas un iegūtā programmatūra ir atrodama šī darba pilnās versijas pielikumos.

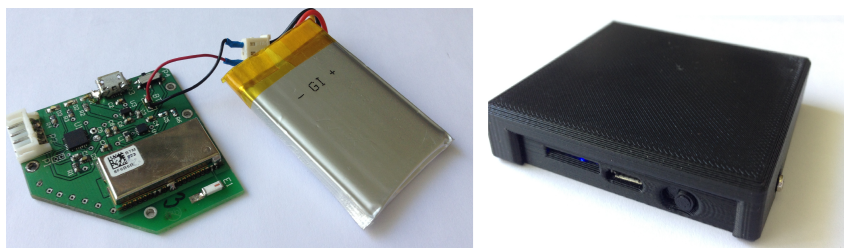


4.5. att. Attiecība starp sensoru skaitu tīklā un pēdējā sensora barošanas spriegumu.

4.3. Formas noteikšana ar akselerometru un magnetometru tīklu

Šajā apakšnodaļā tika detalizēti novērtēta 2.2. apakšnodaļā piedāvātās virsmas formas atjaunošanas metodes, kas izmanto akselerometru un magnetometru sensoru tīkla datus, veikspēja.

Virsmas segmentu orientāciju noteikšanai tika izstrādāts sensoru mezgls, kas balstīts uz zema jaudas patēriņa un izmaksu aparatūras. Zemes gravitācijas un magnētiskā lauka vektori tika mērīti ar trīs asu akselerometru un magnetometru *LSM303DLHC*. Šī sensora kombinācijā ar *TRIAD* [41] algoritmu orientācijas noteikšanas veikspēja tika eksperimentāli pārbaudīta, salīdzinot to ar komerciālu augstas precizitātes orientācijas sensoru *Xsens MTi-G*. Pirms eksperimenta *LSM303DLHC* magnetometrs tika kalibrēts cieto un mīksto metālu efektu kompensēšanai, izmantojot algoritmu no avota [56]. 1000 mērījumu secībai dažādās orientācijās iegūtās RMS kļūdas pacēlumam (*pitch*), sagāšanai (*roll*) un virzienam (*heading*) bija attiecīgi 1,7, 1,8 un 5,4 grādi.

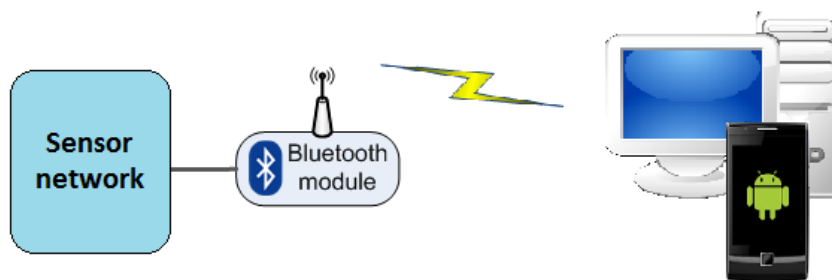


4.6. att. Datu savākšanas ierīce.

Pa kreisi – redzamas moduļa komponentes ar *MSP430g2553* mikrokontrolleri un *BTM-222 Bluetooth* raidītāju.

Pa labi – moduļa komponentes ievietotas 3D drukātā korpusā ar izmēru 5,5 cm x 6 cm x 1,3 cm.

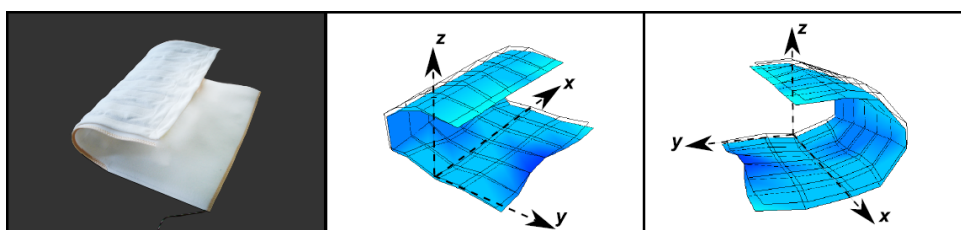
Formas noteikšanai eksperimentāli tika pārbaudīts tīkls ar 63 trīs asu paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoru mezgliem [9]. Sensori tika izvietoti režģī, kura dimensijas ir 9×7 un savstarpējie attālumi ir 4,8 cm gareniski un 3,5 cm sāniski, un ievietoti starp diviem auduma slāņiem. Ērtai datu ieguvei tika izstrādāta datu savākšanas ierīce ar bateriju un *Bluetooth* raidītāju (4.6. att.), lai nodrošinātu datu pārsūtīšanu uz dažādām standarta skaitļošanas ierīcēm, piemē-



4.7. att. Datu ieguves sistēmas struktūra.

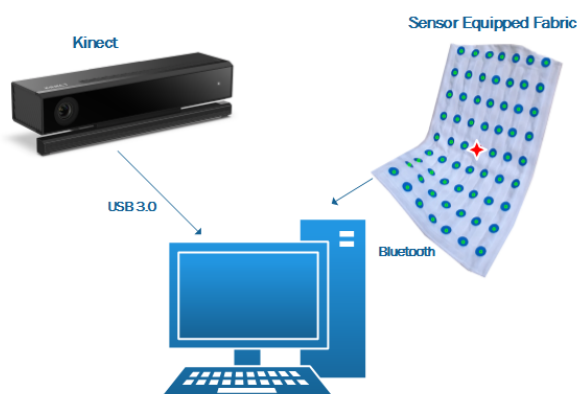
ram, PC, planšetdatoru vai viedtālruni (4.7. att.). Kopējais vidējais strāvas stipruma patēriņš 63 sensoru tīklam un datu savākšanas ierīcei ir ap 80 mA, nodrošinot vairāk kā 12 stundu darbību ar 1000 mAh bateriju.

Virsmas atjaunošanas algoritms tika realizēts gan *MATLAB* vidē, datorā, gan kā lietotne *Android* ierīcē, lai demonstrētu darbību pārvietojamā sistēmā (4.8. att.). Video demonstrācija eksperimentālās sistēmas reāla laika darbībai ir pieejama avotā [57].



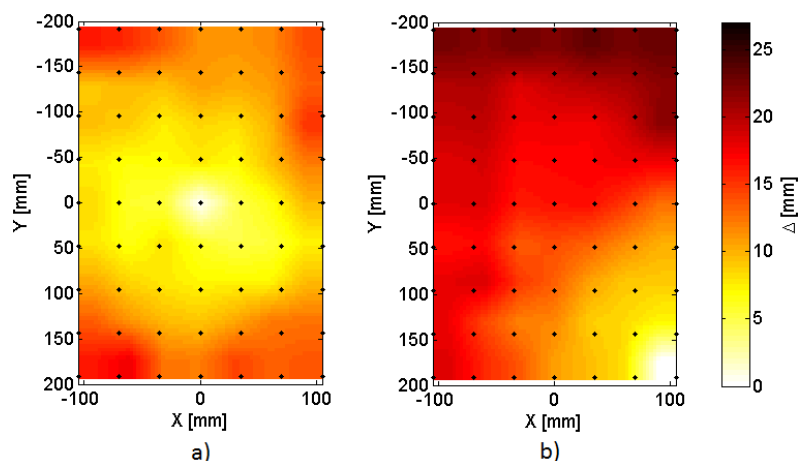
4.8. att. Audums ar iestrādātu sensoru tīklu un atbilstošie atjaunoto formu modeļi *Android* lietotnē.

Lai novērtētu piedāvātās virsmas noteikšanas metodes precizitāti, tika izveidots eksperimentālais stends, kas sastāv no auduma ar sensoru tīklu, *Microsoft Kinect V2*, kas tika lietots kā 3D skeneris, un personālā datora (4.9. att.). Stends nodrošināja iespēju filmēt sensoru audumu ar *Kinect* sensoru un vienlaicīgi iegūt datus no abām sistēmām salīdzināšanai. Tika izpildīti trīs dažādi eksperimenti – divi statiskos apstākļos (kustību paātrinājums $\ll g$) un viens dinamiskos. Katrā eksperimentā tika savākti dati no vismaz 1000 dažādām auduma formām.



4.9. att. Eksperimentālais stends.

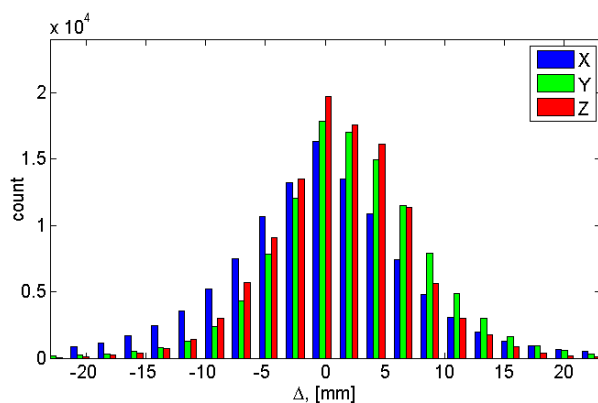
Sensoru atrašanās vietas uz auduma ir atzīmētas ar aplīšiem, atskaites sensoram – ar zvaigzni.



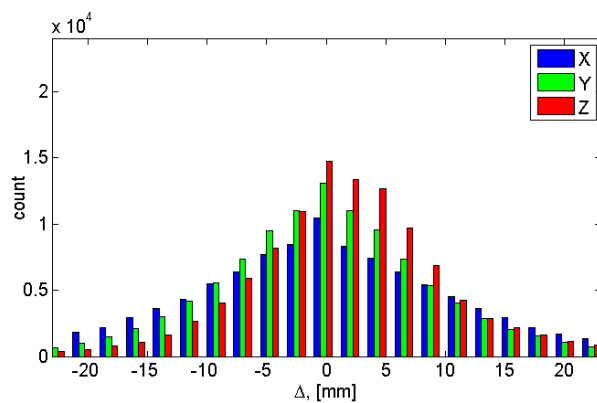
4.10. att. Atšķirību kartējums starp sensoru audumu salīdzinājumā ar *Kinect*.

a) atskaites sensors novietots režģa centrā, b) atskaites sensors novietots režģa stūrī. Melnie punkti apzīmē sensoru atrašanās vietas (punktus, kuri tiek rekonstruēti).

Lai novērotu kļūdu izplatību modelī, statistiskos apstākļos tika veikti divi eksperimenti - ar atskaites sensoru novietotu sensoru režģa centrā un stūrī. Tika sagaidīts, ka atjaunošanas kļūda palielināsies sensoriem, kas atrodas tālāk no atskaites punkta. 4.10. attēlā redzams katra sensora visu mērīto formu vidējās nobīdes kartējums uz sensoru režģa. Kā gaidīts, ir redzams, ka vidējās nobīdes ir lielākas punktiem, kas ir tālāk prom no atskaites sensora. Formas noteikšanas vidējo nobīžu sadalījums ir parādīts 4.11. un 4.12. attēlā. Nobīdes un to standartnovirzes ir norādītas 4.1. tabulā. Ņemot kopējo kļūdu kā Eiklīda attālumu standartnovirzēm pa katru asi, statistiskos apstākļos tiek iegūta 6 % kļūda relatīvi pret mazāko virsmas dimensiju (21 cm).



4.11. att. Atšķirību izkliede starp punktiem no piedāvātās metodes un *Kinect* sensora. Atskaites punkts centrā.

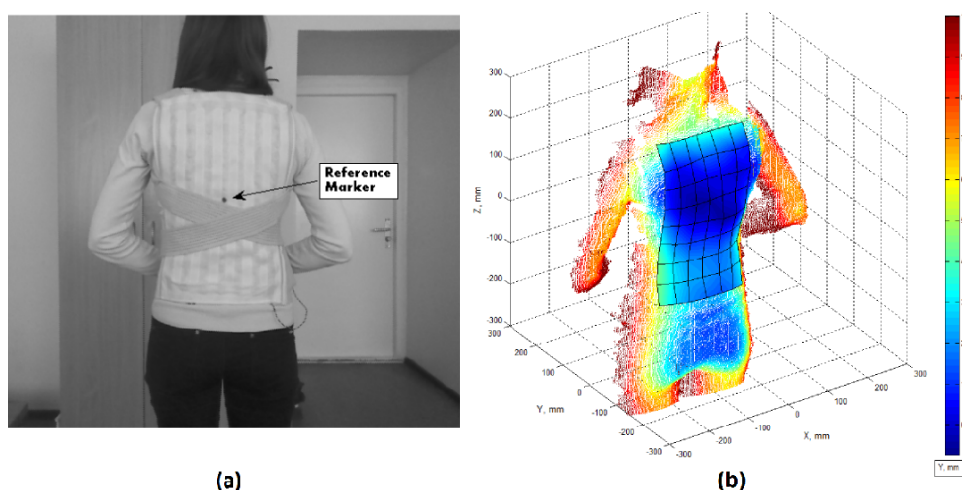


4.12. att. Atšķirību izkliede starp punktiem no piedāvātās metodes un *Kinect* sensora. Atskaites punkts stūrī.

Dinamisku apstākļu eksperimentos tika izstrādāta uzvelkama veste ar muguras daļu veidotu no auduma, kurā ir iestrādāts sensoru tīkls virsmas formas noteikšanai (4.13. attēls (a)). *Kinect* priekšā subjekts izpildīja dažādas kustības ātrumā, kas ir tipisks viegla treniņam. Dati tika ierakstīti vienlaicīgi no *Kinect* un sensoru sistēmas formas noteikšanai līdzīgi kā iepriekšējos eksperimentos (4.13. attēls (b)). Kļūdu karte un izkliedes parametri var tikt atrasti darba pilnajā versijā.

Distribution parameters of differences between Kinect and Shape sensing array points.

	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
μ_{center} [mm]	−0.7	2.1	1.1
σ_{center} [mm]	8.9	6.7	5.8
μ_{corner} [mm]	0.1	−0.1	1.6
σ_{corner} [mm]	14.4	10.4	8.7



4.13. att. Eksperimentālais stends stājas monitoringam.

(a) – cilvēks ar vesti no auduma formas mērīšanai; (b) – savietoti modeļi no *Kinect* sensora un piedāvātās sensoru sistēmas. Krāsa ir kartēta pa *y* asi, lai izceltu dziļumu.

4.4. Secinājumi

Šajā nodaļā tika demonstrēts, ka ir iespējams mērīt vienkāršu formu virsmas ar trīs asu akselerometru tīklu. Tiešā veidā akselerometri nevar izmērīt orientācijas visās trīs brīvības pakāpēs, ierobežojot iespējas ar tiem mērīt brīvi izvēlētas 3D formas. Šī problēma var tikt mazināta ar piedāvāto metodi, kas tuvināti nosaka orientācijas ap vertikālo asi no slīpuma mērījumiem un virsmas modeļa ierobežojumiem, tomēr tai ir nepieciešami ievērojami skaitļošanas resursi, turklāt problēma tāpat netiek novērsta pilnībā. No šī var secināt, ka mobilu *CPS* lietojumos piemērotāka būtu metode, kas tiešā veidā var izmērīt pilnu 3D orientāciju, piemēram, papildus akselerometriem izmantot arī magnetometrus.

Piedāvātā uzlabotā ziedlapķēžu *SPI* arhitektūra eksperimentos parādīja spēju savākt datus no vairāk nekā 200 sensoru mezgliem, saglabājot maksimālo nolasīšanas frekvenci no visa sensoru tīkla ap 50 Hz. Demonstrētā spēja savākt datus no zema jaudas patēriņa un izmaksu sensoru tīkla ir svarīga mobilās *CPS*, kurās nepieciešams liels daudzums tuvu novietotu sensoru.

No vienādojuma (3.1) var secināt, ka, samazinot vadu pretestību vai sensoru mezglu strāvas stipruma patēriņu, iespējams vēl ievērojami paaugstināt maksimālo sensoru skaitu. Piemēram, samazinot vadu garumu, līdz ar to arī vadu pretestību, 10 reizes, būtu iespējams savienot vairāk nekā 600 sensoru mezglu. Šajā gadījumā ar to pašu aparāturu būtu iespējams vēl aizvien sasniegt līdz pat 17 Hz nolasīšanas frekvenci.

Eksperimentu rezultāti 3D formas noteikšanai, izmantojot paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoru tīklu, parādīja metodes spēju atjaunot brīvi izvēlētu 3D formu reālā laikā. Statisku apstākļu eksperimentos, salīdzinot ar *Kinect V2* sensoru, tika sasniegta 6 % precizitāte relatīvi pret mazāko virsmas dimensiju. Šāda kļūda ir pietiekami zema vairākos lietojumos, tomēr tā ir augsta, salīdzinot ar aproksimācijas kļūdu, kas tika iegūta 2.2. nodaļas simulācijās. Praktiskā realizācijā atjaunošanas precizitāte samazinās sensoru mērījumu un montāžas kļūdu dēļ (2.7. att.), kurām ir ievērojama ietekme uz formas atjaunošanas precizitāti.

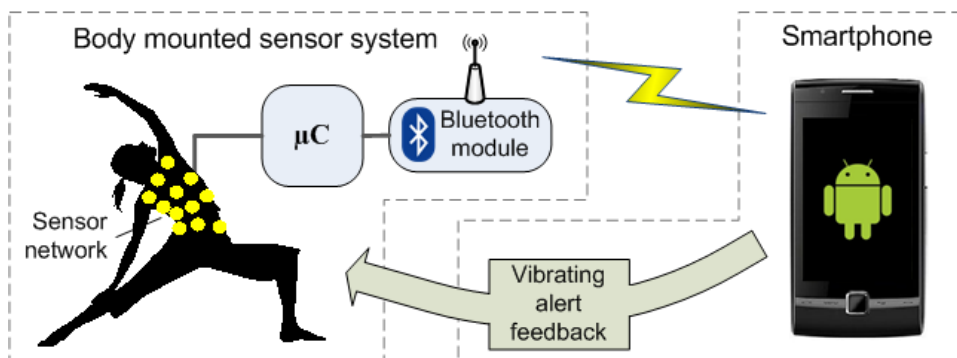
Empīriski tika atrasts, ka sensora *LSM303DLHC* trokšņu līmenis, kā arī atlikušās kļūdas pēc kalibrācijas ir salīdzinoši mazas, tāpēc tām ir niecīga ietekme uz atjaunošanas precizitāti. Pretēji tam paātrinājumi, kas rodas no kustībām, kā arī magnētiskā lauka kropļojumi var ieviest kļūdas ar amplitūdu, kas ir salīdzināmas ar Zemes gravitācijas un magnētiskā lauka vektoriem. Atbilstoši 2.7. attēlam redzams, ka tas var ieviest ievērojamas kļūdas formas atjaunošanā. Šīs problēmas var tikt samazinātas, lietojot komplicētas datu filtrēšanas metodes vai pievienojot papildu sensorus, piemēram, žiroskopus, kas var palīdzēt precīzai orientāciju noteikšanai. Lai to darītu, vispirms ir jāatrisina problēmas ar paaugstinātu strāvas stipruma patēriņu un datu apstrādes sarežģītību.

Cits ievērojams kļūdu avots rodas no sensoru mehāniskās montāžas. Ir ticami, ka bez augstas precizitātes ražošanas procesa sensori var tikt iestrādāti audumā ar līdz 10 % novietojuma kļūdu (3,5 mm kļūda ar 3,5 cm attālumu starp sensoriem) un 5 % orientācijas kļūdu ($\pi/20$ leņķa kļūda), kas katra jau rada attiecīgi 0,9 % un 2,0 % formas atjaunošanas kļūdu. Tas parāda, ka, izstrādājot sistēmu, īpaša uzmanība ir jāpievērš mehāniskajās realizācijas precizitātei.

5. VIRSMAS NOTEIKŠANAS LIETOŠANA MOBILĀS KIBERFIZIKĀLAJĀS SISTĒMĀS

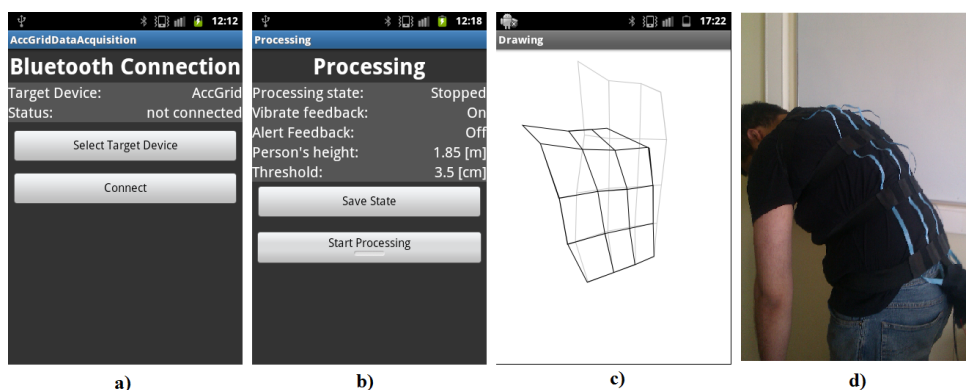
5.1. Stājas monitorings un atgriezeniskā saite

Lai pārbaudītu piedāvāto metožu praktisko lietojamību mobilās CPS, tika izstrādāta sistēma cilvēka stājas monitoringam un bioloģiskās atgriezeniskās saites veidošanai, kas var tikt lietota paralēli ikdienas aktivitātēm [12]. Izstrādātā sistēma sastāv no valkājamas sensoru sistēmas datu savākšanai un pārsūtīšanai un standarta viedtālruna ar speciāli izveidotu lietotni datu apstrādei un lietotāja saskarnei (5.1. att.).



5.1. att. Stājas monitoringa sistēmas struktūra.

Tika izveidota speciāla *Android* lietotne datu apstrādei, saglabāšanai un atgriezeniskās saites ģenerēšanai (5.2. att.). Tika realizēts algoritms, kas salīdzina pašreizējā stāvokļa modeli ar iepriekš saglabātu pareizo stājas modeli, šādā veidā pieņemot lēmumu, vai nepieciešams ieslēgt vibrējošu signālu atgriezeniskajai saitei. Izveidotā sistēma tika lietota izmēģinājuma pētījumā, lai novērtētu sistēmas darbības veikspēju un ietekmi uz cilvēka stāju [12].



5.2. att. *Android* lietotnes logi un valkājamā ierīce.

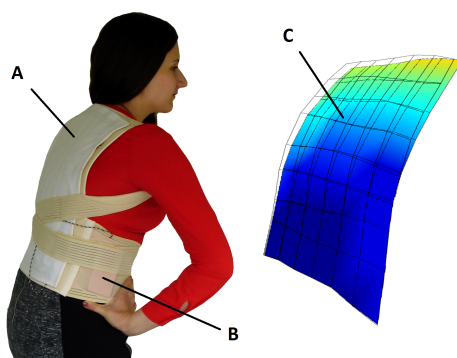
a) logs *Bluetooth* uzstādījumiem, b) logs aprēķinu parametru uzstādīšanai, c) logs saglabāto un tekošo stājas modeļu apskatei, d) valkājamā ierīce.

5.2. Aprobācija medicīnas lietojumos

Piedāvāto metožu veikspēja reālos apstākļos tika pārbaudīta pilotpētījumos medicīnas lietojumam. Tika uzbūvēti vairāki ierīču prototipi, kas izmanto darbā apskatītās virsmas noteikšanas un datu ieguves metodes, un to lietošana aprobēta.

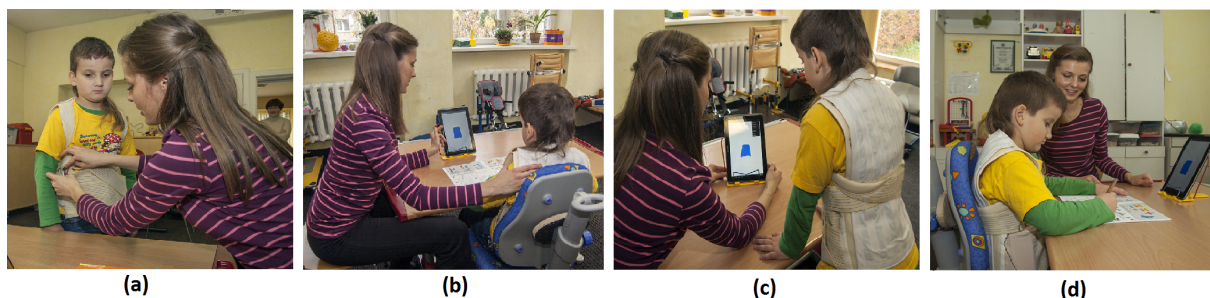
Sadarbībā ar kompāniju SIA "Unihaus" tika aprobēta stājas monitoringa un atgriezeniskās saites sistēma, kas aprakstīta 5.1. nodaļā. Aprobācijā piedalījās 13 līdz 15 gadus veci pacienti ar ievērojamiem muguras stājas defektiem. Aprobācijas mērķis bija pārbaudīt sistēmas lietojamību ortopēdijā un fizioterapijā.

Sadarbībā ar rehabilitācijas centru "MEL" tika izstrādāts sistēmas prototips mobilam stājas monitoringam un atgriezeniskajai saitei, lai to lietotu rehabilitācijā gados jauniem cerebrālās triekas pacientiem ar ķermeņa augšdaļas muskuļu distoniju. Tika izstrādāta vieda valkājamā ierīce, kas balstīta uz mobilo sistēmas arhitektūru, kas aprakstīta 5.1. apakšnodaļā, un audumu formas noteikšanai, kas aprakstīts 4.3. apakšnodaļā (skatīt 5.3. attēlu). Ierīce ir savienota ar viedtelefonu, kur speciāli veidota lietotne nodrošina datu saņemšanu, apstrādi, saglabāšanu, vizualizēšanu un lietotāja saskarni.



5.3. att. Viedā valkājamā ierīce stājas monitoringam.

A – audums formas noteikšanai ar iestrādātu akselerometru/magnetometru tīklu; B – datu savākšanas modulis ar Bluetooth raidītāju un lādējamu litija bateriju; C – stājas modelis, veidots *Android* lietotnē. Krāsa norāda uz nobīdēm no iepriekš saglabātā atskaites modeļa.



5.4. att. Viedās valkājamās ierīces aprobācija rehabilitācijas centrā "MEL".

(a) – ierīce tiek uzstādīta; (b) – tiek nokalibrēta atskaites stāja; (c) – pacients tiek iepazīstināts ar ierīces darbību; (d) – rehabilitācijas process, sistēma darbojas paralēli terapijas sesijai, rādot reāla laika stājas modeli un nodrošinot atgriezenisko saiti, ja tiek uztvertas nobīdes no atskaites modeļa.

Aprobācijas laikā valkājamā ierīce tika lietota cerebrālās triekas pacientiem ciešā medicīnas personāla uzraudzībā. Tā tika izmantota kā tehniskais palīg līdzeklis, lai palīdzētu rehabilitācijas

nodarbībās pacientiem kontrolēt ķermeņa augšdaļas stāju un muskulatūru, izmantojot bioloģiskās atgriezeniskās saites mehānismu, ko nodrošina ierīce.

5.4. attēlā redzams aprobācijas process un sistēmas izmantošana pa soļiem. Pētījums pierādīja, ka izstrādāta stājas monitoringa un atgriezeniskās saites sistēma nodrošina ērtu un neuzkrītošu veidu stājas monitoringam mobilā vidē bez speciālas ārējas infrastruktūras.

5.3. Secinājumi

Aprobācija un pilotpētījumi pierādīja, ka darbā piedāvātās metodes var tik praktiski lietotas mobilās CPS. Tika demonstrēts, ka darbā piedāvātā formas noteikšanas metode, kas ir balstīta uz orientāciju mērījumiem ar paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoru tīklu, var tikt ērti un neuzkrītoši lietota viedajos apģērbos. Aprobācijā izmantotās standarta mobilās skaitļošanas ierīces, kuru procesoru takts frekvence ir sākot ar 600 MHz, varēja nodrošināt datu apstrādes lietotnes darbību reālā laikā. Tas demonstrē, ka darbā piedāvātie algoritmi ir pietiekami skaitļošanai efektīvi, lai tos varētu izmantot mobilās CPS ar ierobežotiem resursiem.

Piedāvāto virsmas noteikšanas metožu lietojamības potenciālu pierāda medicīnas speciālistu interese, kas ir vainagojusies ar kopējām publikācijām [18, 19] un prezentācijām medicīnas konferencēs. Pilnas aprobācijas un pilotpētījumu atsauksmes no medicīnas iestādēm ir atrodamas šī darba pilnās versijas pielikumos.

Lai arī darbā praktiski pārbaudītie lietojumi ir saistīti ar medicīnu, darba autors uzskata, ka tā noteikti nav vienīgā joma, kurā var lietot darbā aprakstītās metodes. Demonstrētā spēja mērīt brīvi izvēlētas 3D formas reālā laikā ar zema jaudas patēriņa un cenas elektroniku var būt noderīga arī citās jomās, kas minētas šī darba ievadā, piemēram robotikā, lokanajā elektronikā vai augsta līmeņa sporta aprīkojumā.

NOBEIGUMS

Šī darba mērķis bija veicināt jaunu *CPS* lietojumu attīstību, atklājot jaunas *3D* formas noteikšanas metodes. Literatūrā tika atrastas divas atšķirīgas pieejas formas noteikšanai ar iestrādātu aprīkojumu – viena ir balstīta uz materiāla locīšanās mērīšanu un otra izmanto inerciālos un magnētiskos sensorus. Piemērotāku īpašību un *MEMS* tehnoloģiju attīstības dēļ tālākiem pētījumiem tika izvēlēta pieeja ar inerciālajiem/magnētiskajiem sensoriem.

2.1. nodaļā tika aprakstīts teorētiskais pamatojums *3D* objektu virsmas mērīšanai ar akselerometru tīklu. 4.1. apakšnodaļā tas tika eksperimentāli pārbaudīts. Metode ļauj iegūt datus par objektiem ar ierobežotu formu variāciju. Šī darba galvenais ieguldījums saistībā ar formas noteikšanas metodēm ir brīvi izvēlētas *3D* formas noteikšana ar akselerometru un magnetometru tīklu, kas aprakstīta 2.2. apakšnodaļā. Iepriekš piedāvātajiem risinājumiem ir nepieciešami lieli skaitļošanas resursi, tāpēc tie nav piemēroti mobilām *CPS*. Darbā piedāvāta jauna metode formas atjaunošanai, kam nepieciešami būtiski mazāki skaitļošanas resursi, ieviešot minimālu precizitātes samazinājumu. Tika atklāts, ka formas noteikšanai ar augstu izšķirtspēju ir vēlams lietot lielu daudzumu sensoru. Tā kā neviens no šobrīd pieejamajiem datu pārraides interfeisiem šim uzdevumam tiešā veidā nav izmantojams, 3. nodaļā tika piedāvāta jauna metode datu pārsūtīšanai. Šī metode tika izmantota eksperimentālajā paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoru tīkla sistēmā, kas aprakstīta 4.3. apakšnodaļā. Izstrādātais tīkls ļāva iegūt datus reālā laikā, izmantojot piedāvāto virsmas atjaunošanas metodi. Papildus tika izveidots eksperimentālais stends, lai detalizēti novērtētu piedāvātās virsmas atjaunošanas metodes precizitāti ar statistiski vērā ņemamu datu kopu.

Pēdējā, 5. nodaļā ir aprakstīta piedāvāto metožu izmantošana mobilās *CPS* medicīnas lietojumam. Sadarbībā ar medicīnas speciālistiem sistēmas tika aprobētas medicīnas pētījumos. Šo pētījumu rezultāti ir publicēti un prezentēti medicīnas konferencēs. Neskatoties uz to, ka metožu aprobācija tika veikta tikai saistībā ar medicīnas lietojumiem, novērotā metožu veikspēja saistībā ar īpašībām, kas ir svarīgas mobilām *CPS*, sniedz pamatu metožu tālākai izmantošanai arī citās jomās.

Nobeigumā šajā darbā tika izstrādātas, eksperimentāli pārbaudītas un veiksmīgi aprobētas metodes, kas ļauj brīvi izvēlētu formu mērīšanu reālā laikā ar iebūvētu aprīkojumu un kas ir piemērotas mobilām *CPS*. Visi darba sākumā uzstādītie uzdevumi ir veiksmīgi izpildīti un aprakstīti šī darba nodaļās, tāpēc darba autors uzskata šo darbu par pilnīgu un pabeigtu.

LITERATŪRA

- [1] R. A. Russell and S. Parkinson. “Sensing surface shape by touch”. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 1. 1993, pp. 423–428.
- [2] D. Trivedi and C. Rahn. “Model-based shape estimation for soft robotic manipulators: The planar case”. In: *Journal of Mechanisms and Robotics*. Vol. 6. 2. 2014.
- [3] A. Nathan et al. “Flexible Electronics: The Next Ubiquitous Platform”. In: *Proceedings of the IEEE Special Centennial Issue*. Vol. 100. 2012, pp. 1486–1517.
- [4] J. Cheng et al. “Smart Textiles: From Niche to Mainstream”. In: *IEEE Pervasive Computing*. Vol. 12. 3. 2013, pp. 81–84.
- [5] F. Chollet and H. Liu. *A (not so) short introduction to Micro Electro Mechanical Systems*. This is an electronic document published under Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 License. 2015. URL: <http://memscyclopedia.org/introMEMS.html>.
- [6] E. A. Lee and S. A. Seshia. *Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach*. Second Edition, LeeSeshia.org, 2015.
- [7] M. J. Holroyd. *Methods for the Synchronous Acquisition of 3D Shape and Material Appearance*. PhD Thesis, University of Virginia, 2011.
- [8] G. Sansoni, M. Trebeschi, and F. Docchio. “State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation”. In: *Sensors*. Vol. 9. 1. 2009, pp. 568–601.
- [9] A. Hermanis, R. Cacurs, and M. Greitans. “Acceleration and Magnetic Sensor Network for Shape Sensing”. In: *IEEE Sensors Journal*. Vol. 16. 5. 2016, pp. 1271–1280.
- [10] A. Hermanis, R. Cacurs, and M. Greitans. “Shape sensing based on acceleration and magnetic sensor system”. In: *2nd IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (IEEE ISISS 2015)*. 2015.
- [11] A. Hermanis et al. “Efficient real-time data acquisition of wired sensor network with line topology”. In: *2013 IEEE Conference on Open Systems (ICOS 2013)*. 2013, pp. 133–138.
- [12] A. Hermanis et al. “Wearable Posture Monitoring System with Biofeedback via Smartphone”. In: *Journal of Medical and Bioengineering*. Vol. 2. 1. 2013, pp. 40–44.
- [13] K. Nesnebergs, A. Hermanis, and M. Greitans. “A Method for segment based surface reconstruction from discrete inclination values”. In: *Elektronika ir Elektrotechnika*. Vol. 20. 2. 2014, pp. 32–35.
- [14] A. Hermanis and K. Nesnebergs. “Grid shaped accelerometer network for surface shape recognition”. In: *Proceedings of the Biennial Baltic Electronics Conference, BEC*. 2012, pp. 203–206.
- [15] A. Hermanis. *Inerciālo sensoru tīkls virsmas formas noteikšanai*. Maģistra darbs, RTU, 2012.
- [16] A. Hermanis et al. “Demo: Wearable Sensor System for Human Biomechanics Monitoring”. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*. Graz, Austria, 2016, pp. 247–248.
- [17] A. Hermanis et al. “Wearable Sensor Grid Architecture for Body Posture and Surface Detection and Rehabilitation”. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. Seattle, Washington, 2015, pp. 414–415.

- [18] A. Hermanis et al. “Wearable Head And Back Posture Feedback System For Children With Cerebral Palsy”. In: *Journal of Rehabilitation Medicine (ISSN 1650–1977)*. Vol. 47. 8. 2015, p. 777.
- [19] K. Nesenbergs et al. “Virtual Reality Rehabilitation System for Children with Cerebral Palsy”. In: *25th European Academy of Childhood Disability*. Newcastle, England, 10-12 oct, 2013.
- [20] A. Hermanis and K. Nesenbergs. “Accelerometer network for human posture monitoring”. In: *Riga Technical University 53rd International Scientific Conference*. Riga, Latvia, 2012.
- [21] E. Szelitzky et al. “Low Cost Angular Displacement Sensors for Biomechanical Applications – A Review”. In: *Journal of Biomedical Engineering and Technology*. Vol. 2. 2. 2014, pp. 21–28.
- [22] D. Preethichandra and K. Kaneto. “SAW sensor network fabricated on a polyvinylidene difluoride (PVDF) substrate for dynamic surface profile sensing”. In: *IEEE Sensors Journal*. Vol. 7. 5. 2007, pp. 646–649.
- [23] R. Balakrishnan et al. “Exploring Interactive Curve and Surface Manipulation Using a Bend and Twist Sensitive Input Strip”. In: *Proceedings of the 1999 Symposium on Interactive 3D Graphics*. I3D '99. Atlanta, Georgia, USA, 1999, pp. 111–118.
- [24] T. Kato, A. Yamamoto, and T. Higuchi. “Shape recognition using piezoelectric thin films”. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. Vol. 1. 2003, pp. 112–116.
- [25] C. Rendl et al. “FlexSense: A transparent self-sensing deformable surface”. In: *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. 2014, pp. 129–138.
- [26] F. Lorussi et al. “Wearable, redundant fabric-based sensor arrays for reconstruction of body segment posture”. In: *IEEE Sensors Journal*. Vol. 4. 6. 2004, pp. 807–818.
- [27] W. Wong and M. Wong. “Detecting spinal posture change in sitting positions with tri-axial accelerometers”. In: *Gait and Posture*. Vol. 27. 1. 2008, pp. 168–171.
- [28] G. Hansson et al. “Validity and reliability of triaxial accelerometers for inclinometry in posture analysis”. In: *Medical and Biological Engineering and Computing*. Vol. 39. 4. 2001, pp. 405–413.
- [29] R. E. Mayagoitia, A. V. Nene, and P. H. Veltink. “Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems”. In: *Journal of Biomechanics*. Vol. 35. 4. 2002, pp. 537–542.
- [30] D. Roetenberg, H. Luinge, and P. Slycke. “Xsens MVN: Full 6DOF Human Motion Tracking Using Miniature Inertial Sensors”. In: *Xsens Technologies, White Paper*. 2013, pp. 1–9.
- [31] D. Roetenberg. *Inertial and Magnetic Sensing of Human Motion*. PhD Thesis, University of Twente, 2006.
- [32] T. Hoshi, S. Ozaki, and H. Shinoda. “Three-dimensional shape capture sheet using distributed triaxial accelerometers”. In: *4th International Conference on Networked Sensing Systems*. 2007, pp. 207–212.

- [33] P. Mittendorf and G. Cheng. “3D surface reconstruction for robotic body parts with artificial skins”. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2012, pp. 4505–4510.
- [34] T. Hoshi and H. Shinoda. “Gravity-based 3D shape measuring sheet”. In: *SICE, 2007 Annual Conference*. 2007, pp. 2126–2131.
- [35] T. Hoshi and H. Shinoda. “Three-dimensional shape capture sheet using distributed six-axis sensors”. In: *5th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2008)*. 2008, pp. 156–161.
- [36] N. Sprynski et al. “Curve reconstruction via a ribbon of sensors”. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems*. 2007, pp. 407–410.
- [37] D. David and N. Sprynski. “Method and device for acquisition of a geometric shape”. In: *US Patent 9,188,422*. 2005.
- [38] M. Huard et al. “Reconstruction of quasi developable surfaces from ribbon curves”. In: *Numerical Algorithms*. Vol. 63. 3. 2013, pp. 483–506.
- [39] N. Saguin-Sprynski et al. “Surfaces reconstruction via inertial sensors for monitoring”. In: *7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2014) – 2nd European Conference of the Prognostics and Health Management (PHM) Society*. 2014, pp. 702–709.
- [40] N. Sprynski, B. Lacolle, and L. Biard. “Motion capture of an animated surface via sensors’ ribbons – Surface reconstruction via tangential measurements”. In: *1st International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems*. 2011, pp. 421–426.
- [41] M. Shuster and S. Oh. “Three-axis attitude determination from vector observations”. In: *J Guid Control*. Vol. 4. 1. 1981, pp. 70–77.
- [42] J. Leavitt, A. Sideris, and J. E. Bobrow. “High bandwidth tilt measurement using low-cost sensors”. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Vol. 11. 3. 2006, pp. 320–327.
- [43] X.-S. Ji and S.-R. Wang. “Research on the MEMS gyroscope random drift error”. In: *Yuhang Xuebao/Journal of Astronautics*. Vol. 27. 4. 2006, pp. 640–642.
- [44] D. Choukroun, I. Bar-Itzhack, and Y. Oshman. “Novel quaternion Kalman filter”. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. 42. 1. 2006, pp. 174–190.
- [45] R. G. Valenti, I. Dryanovski, and J. Xiao. “A Linear Kalman Filter for MARG Orientation Estimation Using the Algebraic Quaternion Algorithm”. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 65. 2. 2016, pp. 467–481.
- [46] H. Fourati et al. “Complementary Observer for Body Segments Motion Capturing by Inertial and Magnetic Sensors”. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Vol. 19. 1. 2014, pp. 149–157.
- [47] S. Madgwick, A. Harrison, and R. Vaidyanathan. “Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm”. In: *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. 2011.
- [48] STMicroelectronics. *iNEMO inertial module: 3D accelerometer, 3D gyroscope, 3D magnetometer*. 2013, pp. 1–74.
- [49] A. Hanson. *Visualizing Quaternions*. The Morgan Kaufmann Series in Interactive 3D Technology, 2005.

- [50] C. C. Liebe. “Star trackers for attitude determination”. In: *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. Vol. 10. 6. 1995, pp. 10–16.
- [51] I. Bar-Itzhack and Y. Oshman. “Attitude Determination from Vector Observations: Quaternion Estimation”. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. AES-21. 1. 1985, pp. 128–136.
- [52] G. Wahba. “A Least Squares Estimate of Satellite Attitude”. In: *SIAM Review*. Vol. 7. 3. 1965, pp. 409–409.
- [53] X. Yun, E. R. Bachmann, and R. B. McGhee. “A Simplified Quaternion-Based Algorithm for Orientation Estimation From Earth Gravity and Magnetic Field Measurements”. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 57. 3. 2008, pp. 638–650.
- [54] H. Estl. “SPI interface and use in a daisy-chain bus configuration”. In: *Infineon Technologies AG, Application Note, Feb. 2002*.
- [55] H. Lee et al. “Wearable personal network based on fabric serial bus using electrically conductive yarn”. In: *ETRI Journal*. Vol. 32. 5. 2010, pp. 713–721.
- [56] J. Vasconcelos et al. “Geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame”. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. 47. 2. 2011, pp. 1293–1306.
- [57] A. Hermanis and R. Cacurs. *YouTube, EDI shape sensing fabric video demonstration*. 25.05.2016. URL: https://www.youtube.com/watch?v=YDG0ERF2_d8.