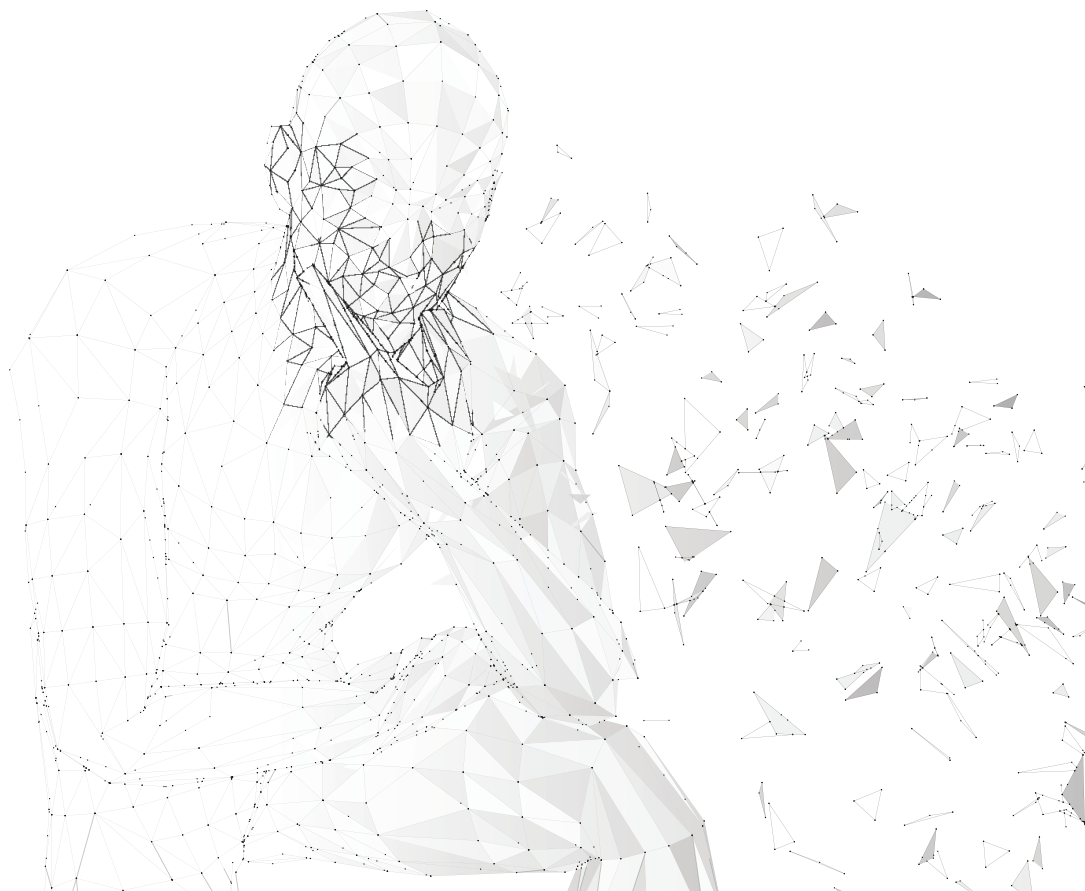


Armands Ancāns

ĶERMEŅA SENSORU TĪKLS TĀ VIRSMAS FORMAS REKONSTRUKCIJAI

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Mikroviļņu inženierijas un elektronikas institūts

Armands Ancāns

Doktora studiju programmas "Elektronika" doktorants

**ĶERMEŅA SENSORU TĪKLS TĀ
VIRSMAS FORMAS
REKONSTRUKCIJAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. comp.
MODRIS GREITĀNS

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Ancāns, A. Ķermeņa sensoru tīkls tā virsmas formas rekonstrukcijai. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. – 44 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-08” 2023. gada 6. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 21.

<https://doi.org/10.7250/9789934229268>
ISBN 978-9934-22-926-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZITS ZINATNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 16. jūnijā plkst. 11 Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Profesors *Dr. sc. ing.* Dmitrijs Pikuļins,
Rīgas Tehniskā universitāte – Latvija

Emeritētais profesors *Dr. sc. ing.* Mart Min,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Armands Ancāns (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 5 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 33 attēli, piecas tabulas, četri pielikumi, kopā 62 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 52 nosaukumi.

SATURS

Saīsinājumi	5
Apzīmējumi	6
Vispārējs darba apraksts	8
Tēmas aktualitāte	8
Darba mērķis un uzdevumi	9
Pētījumu metodika	9
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	10
Aizstāvējamās tēzes	11
Darba praktiskais lietojums un publikācijas	11
Darba struktūra	12
1 Sensoru datu ieguve un ķermeņa formas atjaunošana	13
1.1 Metodes ķermeņa ģeometriskās formas noteikšanai	13
1.2 Inerciālie sensori orientācijas noteikšanai	14
1.3 Komunikācija ķermeņa sensoru tīklos	14
1.4 Mikrokontrolleru komunikācijas saskarņu pārskats	15
I2C	15
UART	16
SPI	16
Kopsavilkums	17
1.5 Secinājumi	17
2 Metode formas noteikšanai ar orientācijas sensoriem struktūrās	19
2.1 Piedāvātās metodes būtība	19
2.2 Piedāvātās metodes īpašības	20
2.3 Speciālgadījums ar zigzagstruktūru	21
2.4 Secinājumi	22
3 Piedāvātā pieeja ķermeņa sensoru datu ieguvei	24
3.1 Sistēmas kopējā arhitektūra	24
3.2 Vadu saziņas protokols	24
3.3 Mezglu arhitektūra	26
3.4 Secinājumi	28
4 Simulācijas un eksperimentālie pētījumi	30
4.1 Formas rekonstrukcijas simulācijas	30
4.2 Eksperimentālais makets rokas formas rekonstrukcijai	32
4.3 Komunikācijas protokola novērtējums	35

4.4	Savienojuma punktu rekonstrukcijas precizitātes novērtējums	36
4.5	Secinājumi	38
5	Nobeigums. Darba galvenie rezultāti un secinājumi	40
	Literatūra	42

SAĪSINĀJUMI

3D	trīsdimensiju
2D	divdimensiju
ADDR	UART adreses bitu kadru konfigurācija
BCC	komunikācija caur cilvēka ķermeni (<i>body coupled communication</i>)
BLE	<i>Bluetooth</i> [®] zemas enerģijas protokols (<i>Bluetooth</i> [®] <i>Low Energy</i>)
BT	<i>Bluetooth</i> [®] protokols
CSV	ar komatiem atdalītas vērtības (<i>Comma-Separated Values</i>)
I2C	starp integrālo ķēžu saskarne (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)
ICP	iteratīvais tuvākais punkts (<i>Iterative Closest Point</i>)
ID	identifikācijas numurs
IDLE	UART dižstāves kadru konfigurācija
IMU	inerciālo sensoru mezgls (<i>inertial measurement unit</i>)
ĶST	ķermeņu sensoru tīkls
MCU	mikrokontrollers
MEMS	mikroelektromehāniskā sistēma (<i>micro-electromechanical system</i>)
Rx	saskarnes uztverošā ieeja
SPI	seriālā perifērijas saskarne (<i>Serial Peripheral Interface</i>)
Tx	saskarnes raidošā izeja
UART	universālais asinhronais uztvērējs un raidītājs (<i>Universal Asynchronous Receiver-transmitter</i>)
VCC	pozitīvs barošanas spriegums
VQF	daudzpusīgais uz kvaternioniem bāzētais filtrs (<i>Versatile Quaternion-based Filter</i>)

APZĪMĒJUMI

α	leņķis pret horizontālo asi
C	līnijas punktu kopa
C_{avg}	līniju vidējā svērtā vērtība
D_{off}	līknes nobīdes vektors
R_k	zigzaglīnijas struktūras k segmentu rotācijas matricas
v_k^*	zigzaglīnijas struktūras k segmentu atskaites stāvokļi
v_k	zigzaglīnijas struktūru veidojošie k vektori. Skatīt 2.4. att.
η	informācijas pārraides efektivitāte
λ	simulēto zigzagstruktūru stiepes koeficients
σ	standartnovirze
d	Eiklīda attālums
f_b	simbolu pārraides ātrums
K	sensoru skaits
k	sensora kārtas skaitlis
K_{gen}	līniju ģenerēšanai izmantoto leņķa funkcijas nolašu skaits
L	līnijas kopējais garums
L_k	zigzaglīnijas struktūru k vektoru garumi
M	savienojuma punktu skaits
m	savienojuma punkta kārtas skaitlis
n_{data}	datu bināro simbolu skaits ziņojumā
n_{nodes}	Kopnei pieslēgto mezglu skaits
N_{rand}	simulāciju skaits ar nejauši ģenerētām līnijām
n_{sens}	simulēto zigzagstruktūru sensoru skaits
s	līnijas garuma parametrs
s_{conn}	līnijas garums starp simulēto zigzagstruktūru savienojumu punktiem

t_b laika intervāls viena binārā simbola pārraidei

$t_{protocols}$ protokola laiks datu simbolu pārraidei

u, v parametriski uzdotas virsmas parametri

w līniju punktu svaru koeficienti

VISPĀRĒJS DARBA APRAKSTS

Tēmas aktualitāte

Daudzpusīgā informācija, ko var iegūt, ierakstot un analizējot cilvēka ķermeņa formu un kustības, ir raisījusi strauji augošu pētniecības interesi ¹. Cilvēka ķermeņa forma un kustības tiek saistītas ne tikai ar skeleta un muskuļu sistēmas darbību, bet arī ar cilvēka miegu, komunikāciju un nervu sistēmas attīstību, tādējādi piedāvājot jaunas iespējas sportā, rehabilitācijā un slimību diagnostikā. Daži no lietojumiem cilvēka kustību digitālajai rekonstrukcijai ir digitālā satura radīšana, lai radītu dabiskas filmas vai datorspēļu varoņu cilvēciskās kustības, robotizēto sistēmu kustību plānošana, lai apmācītu robotizētas sistēmas veikt kustības kā cilvēkiem, kā arī cilvēka un datora saskarņu izstrāde, lai veidotu intuitīvas datorvadības ierīces. Lai gan ķermeņa sensorus parasti saista ar cilvēka ķermeni, tos var izmantot arī citiem ķermeņiem, kam ir līdzīgas prasības attiecībā uz mobilitāti un neuzkrītošu darbību, piemēram, mīkstās robotikas sistēmās, konstrukciju drošības monitoringā un citur.

Ir vairākas pieejas, lai noteiktu ķermeņa formas un kustību, un tās var iedalīt divās grupās atkarībā no izmantotā aprīkojuma: metodes, kas izmanto ārējo aprīkojumu (piemēram, stereo kameras, *LiDAR* sistēmas, skārienjutīgas zondes u. c.), un metodes, kas izmanto aprīkojumu, kas pieguļ pētāmajam ķermenim vai ir iestrādāts tajā. Pirmās grupas pieejas nodrošina augstu precizitāti, taču tām ir ierobežota darbības zona, un apkārtējie apstākļi, piemēram, vides redzamība un objektu aizklāšanās, būtiski ietekmē to darbību. Otrās grupas pieejas ir piemērotākas grūti kontrolējamās vidēs, piemēram, pūlī, pilsētvidē vai dabā, kur vajadzīgos apstākļus nodrošināt ir ļoti sarežģīti. Šajā grupā ietilpst mobilas ķermeņa sensoru sistēmas, kas balstītas mehānisko deformāciju vai inerciālajos sensoros un kas ir piemērotas ķermeņa kustību rekonstrukcijai.

Attīstoties materiāliem, ir uzlabojusies mehānisko deformācijas sensoru precizitāte un iestrādājamība apģērbā, taču to izmantošana lietojumos ar vidēji lielu un lielu kustību amplitūdu ir ierobežota. Kā alternatīvu mobilajās ķermeņa sensoru sistēmās kustību monitoringam var lietot mikroelektromehānisko sistēmu (MEMS) inerciālos sensorus. MEMS sensori ir ļoti kompakti un tos var nemanāmi iestrādāt apģērbā vai aksesuāros. Ar tiem iegūtie ķermeņa formas un kustību rekonstrukcijas rezultāti sniedz augstu precizitāti gan statiskām, gan dinamiskām kustībām, kas ir salīdzināma ar optisko sistēmu precizitāti [10].

Pašreizējās metodes ķermeņa formas rekonstrukcijai, izmantojot MEMS sensorus, balstās orientācijas mērījumos, kas tiek iegūti ar MEMS inerciālajiem sensoriem. Taču literatūrā apskatītajās pieejās tikai ar orientācijas datiem nav pietiekami, lai noteiktu objektu formu raksturojošās telpiskās koordinātas. Lai rekonstruētu ģeometrisku objektu formu no

¹SCOPUS zinātnisko publikāciju datubāzē no 1890. līdz 2021. gadam pēc atslēgvārdiem “*human body movements*” atrodas vairāk nekā 76 tūkstoši dokumentu, to skaits ir ļoti strauji pieaudzis tieši pēdējos gados.

tai pieguļošu orientācijas sensoru nolasēm, ir nepieciešams zināt arī orientācijas sensoru savstarpējos attālumus [21]. Speciāli sensori, kas paredzēti precīzu attālumu noteikšanai starp orientācijas nolasīšanas punktiem, ievērojami palielina sistēmas izmaksas un izstrādes sarežģītību, tāpēc apskatītajām sistēmām ķermeņa formas noteikšanai attālums starp sensoriem tiek fiksēts un uzskatīts par nemainīgu [10]. Līdz ar to zināmās ierīces formas noteikšanai ar orientācijas sensoriem nepieļauj stiepšanos, kas ierobežo to spēju piekļauties pētītajam ķermenim.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izstrādāt efektīvu un mērojamu ķermeņa sensoru sistēmu, kas būtu piemērota stiepjamu un liecamu formu rekonstrukcijai. Darbā ir aprakstīta jauna pieeja ķermeņa ģeometrisku formu raksturojošo punktu rekonstrukcijai, izmantojot orientācijas sensorus struktūrās. Šī pieeja pieļauj ne tikai ķermeņa lieci, bet arī stiepi, neietekmējot sensoru savstarpējos attālumus uz struktūras virsmas. Ņemot vērā potenciāli lielo sensoru mezglu skaitu, kas nepieciešams detalizētai ķermeņa formas rekonstrukcijai, darbā tiek piedāvāta arī jauna pieeja efektīvai sensoru datu savākšanai, kas ietver pielāgotu sistēmas arhitektūru un jaunu komunikācijas protokolu.

Mērķa sasniegšanai ir definēti vairāki uzdevumi.

1. Veikt literatūras analīzi un izpētīt metodes ķermeņa ģeometrisku formu rekonstrukcijai ar sensoriem, kas fiziski savienoti ar ķermeni.
2. Izpētīt promocijas darbā piedāvātās metodes lietojamību ķermeņa ģeometriskās formas rekonstrukcijai un salīdzināt to ar citām šobrīd zināmajām metodēm.
3. Veikt literatūras analīzi un izpētīt komunikācijas risinājumus efektīvai datu ieguvei no liela skaita sensoriem uz ķermeņa.
4. Izpētīt promocijas darbā piedāvātā datu ieguves pieejas veiktspēju datu ieguvei no ķermeņa sensoriem formas rekonstrukcijai ar inerciālajiem sensoru struktūrās.
5. Izstrādāt eksperimentālo maketu darbā piedāvātās ķermeņa ģeometrisku formu raksturojošo punktu rekonstrukcijas un sensoru datu ieguves metodes eksperimentālai izpētei.
6. Apkopot iegūtos eksperimentālos rezultātus un pārbaudīt hipotēzes par piedāvātās metodes lietojamību ķermeņa ģeometrisku formu raksturojošo punktu koordināšu noteikšanai un piedāvātās arhitektūras lietojamību datu ieguvei no ķermeņa sensoru tīkla ar lielu funkcionāli vienādu mezglu skaitu.

Pētījumu metodika

Lai izpildītu definētos darba uzdevumus, tiek izmantota šāda pētījumu metodoloģija: literatūras analīze, lai iegūtu ieskatu par publicētajiem materiāliem darba pētniecības

problēmas risināšanai; analītiskā modelēšana, lai novērtētu pētīto vadu komunikācijas risinājumu teorētiskās sakarības un robežas; skaitliskā simulācija, lai pārbaudītu piedāvāto formas rekonstrukcijas metožu parametru ietekmi uz formas rekonstrukcijas rezultātu; eksperimentālie pētījumi, lai laboratorijas apstākļos validētu piedāvātās pieejas formas rekonstrukcijai un ķermeņa sensoru datu ieguvei un novērtētu veiktās sistēmas dizaina izvēles.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Darba zinātnisko novitāti veido divas daļas.

1. Izstrādāta un pārbaudīta jauna pieeja, kas ļauj noteikt objekta ģeometriskās formas raksturojošos punktus, izmantojot orientācijas sensorus stiepjāmās struktūrās.
2. Izstrādāta un pārbaudīta jauna pieeja, kas ļauj iegūt ķermeņa sensoru tīkla datus no grupām ar lielu skaitu funkcionāliem mezgliem, izmantojot zema enerģijas patēriņa mikrokontrolleros (MCU) izplatītās komunikācijas saskarnes.

Veicot simulācijas līnijas punktu rekonstrukcijai ar zigzagstruktūrām, tika novērtēta zigzagstruktūras un sensoru parametru ietekme uz punktu rekonstrukcijas precizitāti un veikts kļūdas salīdzinājums ar pieeju, kurā sensori ir izvietoti uz ķermeņa, nevis struktūrā. Rezultātā tika iezīmētas būtiskas piedāvātās pieejas īpašības: 1) ar tās palīdzību ķermeņa forma ievērojami mazāk ietekmē rekonstrukcijas rezultātus; 2) zigzagstruktūrām, samazinoties sensoru kļūdai, rekonstruēto punktu kļūda konverģē uz nulli neatkarīgi no ķermeņa formas sarežģītības, 3) zigzagstruktūras pieļaujamā stiepe tieši proporcionāli ietekmē punktu rekonstrukcijas kļūdu.

Eksperimentālajiem pētījumiem ir izstrādāts zigzagstruktūras eksperimentālais makets, lai noteiktu 12 rokas formu raksturojošos punktus. Salīdzinot izstrādāto eksperimentālo maketu ar *Optitrack™* infrasarkanā kameru sistēmu rokas formas noteikšanai dažādām pozām, rekonstruēto punktu vidējā atšķirība, kas tika novērtēta kā Eiklīda attālums, ir 19,9 mm.

Piedāvātā pieeja ķermeņa sensoru datu ieguvei ļauj nodrošināt ne tikai efektīvu saziņu ar sensoru grupām, kas ietver lielu skaitu funkcionāli vienādu mezglu, bet arī barošanu, mezglu nolasīšanas sinhronizāciju, brīvu tīkla mezglu fizisko topoloģijas veidošanu un sistēmas mērogojamību. Turklāt piedāvātā pieeja ir realizējama ar standarta saskarnēm un zema enerģijas patēriņa MCU.

Izstrādātajā eksperimentālajā maketā piedāvātā sensoru datu ieguves pieeja ir realizēta tīklā ar trīs vadu savienojumiem, pa kuriem tiek pārvadīts datu signāls un barošanas spriegums. Izveidotais vadu tīkls ir izmantots, lai iegūtu datus no grupas ar 26 inerciālajiem sensoriem 50 reizes sekundē. Novērtējot komunikācijas protokola veiktspēju, tika secināts, ka praktiski, izmantojot maketā izmantotos sensoru mezglus, sensoru nolasīšanas biežumu var palielināt līdz 93 Hz, kas ir aptuveni 64 % no konkrētā protokola teorētiski maksimālās vērtības (144,9 Hz).

Aizstāvāmās tēzes

Promocijas darbā ir definētas un pierādītas vairākas tēzes.

1. Piedāvātā pieeja ir piemērojama ķermeņa virsmas formas rekonstrukcijai gan stiepes, gan lieces deformāciju gadījumos, kamēr hordas garums starp savienojuma punktiem nepārsniedz šos punktus savienošo struktūras segmentu līnijas garumu.
2. Ķermeņa formu raksturojošo punktu koordināšu noteikšanas precizitāte, izmantojot orientācijas sensorus zigzagstruktūrās, kas savienotas ar ķermeni noteiktos punktos, ir mazāk atkarīga no ķermeņa formas nekā pieejai ar orientācijas sensoriem uz ķermeņa.
3. Piedāvātais pusduplexais vadu komunikācijas protokols samazina nepieciešamo virstēriņu grupas mezgliem saziņai proporcionāli sagrupēto mezglu skaitam.

Darba praktiskais lietojums un publikācijas

Promocijas darbs ir izstrādāts Elektronikas un datorzinātņu institūtā, un darbā piedāvātās pieejas ir tapušas, attīstot tehnoloģijas ķermeņa formas noteikšanai ar valkājamiem inerciālajiem sensoriem vairākos Eiropas un Latvijas mēroga projektos:

- valsts pētījumu programma “Kiberfizikālās sistēmas, ontoloģijas un biofotonika drošai & viedai pilsētai un sabiedrībai” (VPP *SOPHIS*) projekts Nr. 1 “Kiberfizikālo sistēmu tehnoloģiju attīstība un to pielietojumi medicīnā un viedā transporta jomā” (*KiFiS*);
- *FLAG-ERA* projekts “*Frictionless Energy Efficient Convergent Wearables For Healthcare and Lifestyle Applications*” Nr. ES RTD/2017/21 (*CONVERGENCE*)
- Eiropas Reģionālās attīstības fonda (ERAF) 1.2.1. specifiskā atbalsta mērķa “Palielināt privātā sektora investīcijas P & A” 1.2.1.2. pasākums “Atbalsts tehnoloģiju pārneses sistēmas pilnveidošanai” projekts “3D formu jūtīgs audums” (Nr. KC-L-2017/4 un Nr. KC-PI-2017/25) (*3D AUDUMS*);
- ERAF programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 1.2.1. specifiskā atbalsta mērķa “Palielināt privātā sektora investīcijas P & A” 1.2.1.2. pasākums “Atbalsts tehnoloģiju pārneses sistēmas pilnveidošanai” projekts “Sensorais apģērbs pareizām fiziskām aktivitātēm ar atgriezenisko saiti”, Nr. KC-PI-2020/42 (*SCAPE-IF*);
- valsts pētījumu programma “Viedo materiālu, fotonikas, tehnoloģiju un inženierijas ekosistēma” (Nr. VPP-EM-FOTONIKA-2022/1-0001).

Darbā piedāvātā metode ķermeņa formas rekonstrukcijai ļauj izstrādāt stiepjamus sensoros apģērbus, kas labi pieguļ augumam un ļauj precīzi noteikt ķermeņa formu un ar to saistītos parametrus, piemēram, skeletomuskulārās sistēmas kustības reāllaikā vai ķermeņa daļu apkārtmērus un proporcijas. Šī pieeja potenciāli ļauj atbrīvoties no inerciālajām kustību noteikšanas sistēmām raksturīgās pozas kalibrācijas un individuālo ķermeņa

proporciju ievadišanas. Ņemot vērā darbā piedāvātās ķermeņa formas rekonstrukcijas metodes priekšrocības un potenciālos lietojumus produktu izstrādē, par to ir uzrakstīts Latvijas patents un Latvijas patentu birojā iesniegts patenta pieteikums Nr. LVP2021000078.

Darbā piedāvātā pieeja optimizētai komunikācijai ar mezglu grupām ar minimizētu vadu savienojumu daudzumu ir lietojama ķermeņa sensoru tīklu (KST) realizācijām, kur komunikācija un reāllaika datu nolase jānodrošina lielam skaitam KST mezglu. Piedāvāto komunikācijas pieeju var realizēt ar zema enerģijas patēriņa MCU plaši izplatītām vadu saziņas saskarnēm, līdz ar to mezglu izstrāde neprasa papildu specifiskas komponentes. Ņemot vērā, ka piedāvātā pieeja atvieglo vadu KST izstrādi un integrēšanu apgērbā, tai ir potenciāls veicināt jaunu KST tehnoloģiju un produktu attīstību, kam nepieciešama datu ieguve no KST ar lielu mezglu skaitu.

Ar promocijas darba rezultātiem saistītas četras zinātniskās publikācijas: [3], [20], [4], [2].

Darba struktūra

Promocijas darba 1. nodaļā ir kodolīgi apskatīti līdzšinējie pētījumi un tehnoloģijas ķermeņa formas noteikšanai ar ķermeņa sensoriem (1.1. nodaļa). Padziļinātāk ir apskatīti formas noteikšanas algoritmi, kas balstīti orientācijas sensoros. Attiecīgi 1.2. nodaļā ir izklāstīti inerciālo sensoru darbības pamatprincipi, kas ļauj noteikt sensora fizisko orientāciju. Ņemot vērā, ka detalizētai ķermeņa formas noteikšanai ir nepieciešams liels skaits sensoru, 1.3. nodaļā ir apskatītas literatūrā atrodamās tehnoloģijas KST arhitektūrai un sensoru datu ieguvei.

Promocijas darba 2. nodaļā ir piedāvāta un kodolīgi izklāstīta jauna pieeja ķermeņu formas noteikšanai ar inerciālajiem orientācijas sensoriem, kas iestrādāti ķermenim piestiprinātās struktūrās. 2.3. apakšnodaļā konkrētāk ir apskatīts zigzagstruktūras gadījums kā potenciāli piemērotākais lietojumiem KST.

Ņemot vērā, ka piedāvātās metodes īstenošanai nepieciešama reāllaika datu ieguve no liela skaita ķermeņa sensoru, kas var veidot sarežģītas fiziskās topoloģijas, 3. nodaļā ir piedāvāta arhitektūra un jauns mezglu komunikācijas protokols, kas nodrošina efektīvu saziņu ar tīkla mezglu grupām un ļauj minimizēt savienojumiem nepieciešamo vadu daudzumu.

Lai validētu piedāvātās formas rekonstrukcijas metodes un KST arhitektūru darbību, promocijas darba 4. nodaļas sākumā ir veiktas simulācijas formas rekonstrukcija ar sintezētiem datiem (4.1. nodaļa). Tālāk seko apraksts izstrādātajam eksperimentālajam maketam rokas formu raksturojošo punktu rekonstrukcijai ar zigzagstruktūrās iestrādātiem sensoru mezgliem un eksperimentālais pētījums maketa punktu koordinātu salīdzināšanai ar *Optitrack* infrasarkanu kameru sistēmu.

Darba pēdējā nodaļā ir apkopojums par promocijas darbā sasniegtajiem rezultātiem un izdarītajiem secinājumiem.

1. SENSORU DATU IEGUVE UN ĶERMEŅA FORMAS ATJAUNOŠANA

Šīs nodaļas mērķis ir apkopot un salīdzināt publicētās ķermeņa formas rekonstrukcijas metodes ar ķermeņa sensoriem. Ņemot vērā potenciāli augsto precizitāti, padziļinātāk ir apskatītas pieejas ar orientācijas sensoriem un MEMS inerciālie sensori orientācijas noteikšanai. Ņemot vērā potenciāli lielo ķermeņa sensoru skaitu, kas nepieciešami detalizētai formas rekonstrukcijai, ir apskatītas arī publicētās KST tehnoloģijas sensoru datu ieguvei.

1.1. Metodes ķermeņa geometriskās formas noteikšanai

Starp apskatītajām ķermeņa sensoru tehnoloģijām ķermeņa formas rekonstrukcijai kā potenciāli piemērotākie ir izvēlēti MEMS orientācijas sensori, kas ir izgatavojami mazos izmēros, iestrādājami apģērbā un aksesuāros, izmantojami augstas precizitātes statistiku un dinamisku ķermeņu formu noteikšanai.

Ķermeņu formas rekonstrukciju ar orientācijas sensoru datiem sākotnēji ir pētījusi Natālija Sprynski (*Nathalie Sprynski*) [21]. Viņas piedāvātajā pieejā matemātiskais formulējums ir balstīts līniju raksturojošās vektoru funkcijas $\mathbf{C}$ parametrizācijā pēc tās garuma $\mathbf{C}(s) = [x(s), y(s), z(s)]^T$, kur $s \in [0, L]$ un L – līnijas kopējais garums.

Līnijām, kas ir parametriskas pēc līnijas garuma, atvasinājums ir vienības vektors, un 2D gadījumā $\mathbf{C}'(s) = [\cos \alpha(s), \sin \alpha(s)]^T$, kur $\alpha \in [0, 2\pi)$ ir līnijas pieskares leņķis pret horizontālo asi (1.1. att.). Attiecīgi problēmu 2D līnijas rekonstrukcijai no orientācijas sensoru datiem var formulēt šādi: no leņķa funkcijas nolasēm $\alpha_k = \alpha(s_k)$ un atbilstošajām līnijas parametra vērtībām s_k , kur $k = 1, 2, \dots, K$, atrast līniju $\mathbf{C}(s)$, kurai izpildās sakarība $\mathbf{C}'(s_k) = [\cos \alpha_k, \sin \alpha_k]^T$.

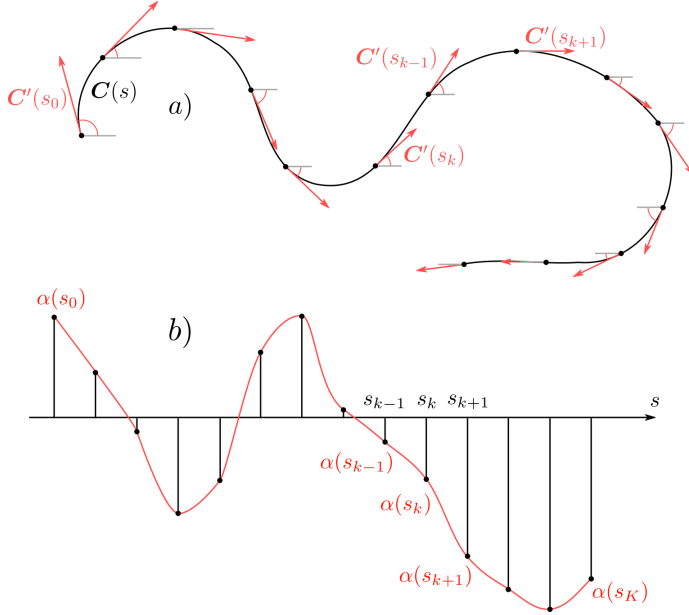
N. Sprynski piedāvāja to risināt, interpolējot leņķa funkcijas nolases ar kubiskajiem splainiem, un rekonstruēt līniju $\mathbf{C}(s)$, skaitliski integrējot iegūtās atvasinājuma funkcijas komponentes:

$$\mathbf{C}(s) = \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \int_0^s \cos \alpha(t) dt \\ y_0 + \int_0^s \sin \alpha(t) dt \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

kur x_0 un y_0 ir rekonstrukcijas sākuma koordinātas.

Piedāvāto pieeju var paplašināt uz 3D līnijām [17] un 3D virsmām [21].

Literatūrā publicētie prototipi objektu formas rekonstrukcijai, izmantojot inerciālos un magnētiskos sensorus, ir apkopoti 1.1. tabulā. Apskatītajām sistēmām sensoru savstarpējie attālumi visos prototipos ir fiksēti un nepieļauj ķermeņa stiepes deformācijas.



1.1. att. Līnijas rekonstrukcijas no sensoru datiem ilustrācija: a) līnija un līnijas atvasinājuma vektori diskrētos punktos s_k ; b) leņķa funkcija $\alpha(s)$, kas tiek rekonstruēta no diskrētām α_k nolasēm, kas atbilst līnijas atvasinājuma vektoru leņķim ar horizontālo asi.

1.2. Inerciālie sensori orientācijas noteikšanai

Orientācijas noteikšana ar MEMS inerciālo sensoru mezgliem (IMU), kas var apvienot akselerometru, žiroskopu, magnetometru sensorus dažādās kombinācijās, ir kļuvusi par fundamentālu sastāvdaļu inerciālajā kustību analizē. Cik zināms, no literatūrā aprakstītajiem algoritmiem IMU datu sapludināšanai un orientācijas noteikšanai, patlaban salīdzinoši vislabākos rezultātus sniedz VQF (*Versatile Quaternion-based Filter*) algoritms, ar kuru noteiktās orientācijas vidējā kvadrātiskā kļūda ir gandrīz divas reizes mazāka nekā alternatīvām [12].

1.3. Komunikācija ķermeņa sensoru tīklos

Viens no vissvarīgākajiem kritērijiem ķermeņa sensoru tīklu tehnoloģijās ir kustību brīvība un lietošanas ērtums. Līdz ar to KST galvenokārt izmanto bezvadu sensoru tehnoloģijās. Vienīgas oficiālais bezvadu KST standarts ir *IEEE 802.15.6 (IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.6: Wireless Body Area Networks IEEE)*. Par spīti akadēmiskajai interesei praksē biežāk tiek izmantoti ražotāju specifiski risinājumi vai *Bluetooth Low Energy (BLE)* protokols, kas ir plaši atbalstīts personālajās mobilajās iekārtās.

Apkopojums ierīcēm objektu formas rekonstrukcijai, izmantojot inerciālos un
magnētiskos sensorus

Ierīce	Sensoru savstarpējais novietojums	Struktūra
Ierīce mugurkaula formas noteikšanai [5]	Fiksēts	Lenta
“Morphosense” [16]	Fiksēts	Lenta
“Morphopipe” [19]	Fiksēts	Lenta
“Morphoshape” [15]	Fiksēts	Režģis
3DCS [11]	Fiksēts	Režģis
Formu jutīgs audums [1]	Fiksēts	Režģis

Bezvadu ķermeņa sensoru mezglu izmantošanai ir vairāki izaicinājumi: raidītāju un uztvērēju elektriskās ķēdes sarežģīti mezglu izstrādi, katram mezglam ir nepieciešama baterija vai mehānismi enerģijas iegūšanai no apkārtējās vides (vibrācijas, siltums, saules gaisma), ierobežotā frekvenču josla ir jādala ar citām ierīcēm, kas bieži vien pasliktina sistēmas veiktspēju, turklāt informāciju, kas tiek pārraidīta pa gaisu, ir vieglāk pārtvert, radot potenciālus draudus datu drošībai. Minētos izaicinājumus potenciāli varētu risināt ar vadu komunikācijas pieejām, kas aprakstītas 1.4. nodaļā.

1.4. Mikrokontrolleru komunikācijas saskarņu pārskats

Šajā nodaļā ĶST izveidei tiks apskatītas un salīdzinātas trīs galvenās zema enerģijas patēriņa MCU vadu saskarnes: *Inter-Integrated Circuit* (I2C), *Universal asynchronous receiver-transmitter* (UART) un *Serial Peripheral Interface* (SPI). Īpaša uzmanība tiks pievērsta apskatīto saskarņu tīkla konfigurāciju vadu daudzumam, vadu savienojumu prasībām, datu pārraides ātrumam un efektivitātei.

Saskarņu salīdzināšanai tiks sastādītas analītiskas izteiksmes simbolu pārraides efektivitātes η novērtēšanai:

$$\eta = \frac{t_b \cdot n_{data}}{t_{protokols}} = \frac{n_{data}}{t_{protokols} \cdot f_b}, \quad (1.2)$$

kur $t_{protokols}$ – protokola laiks datu simbolu pārraidei;

t_b – viena simbola pārraides laiks;

f_b – saskarnes simbolu ātrums.

I2C

I2C fiziskais slānis ir sinhrona, pusduplekša virknes kopne ar divām vienpolārām līnijām: datu (SDA) un takts (SCL). Tas vairākos avotos tiek izmantots risinājumos, lai ar vadiem savienotu apgērbā iestrādātus elektroniskos mezglus [5], [18], [14]. Tajos iezīmējas galvenie ierobežojumi I2C izmantošanai ĶST: kopnes parazītiskie parametri ierobežo atvērtā

kolektora vai atvērtās noteces kopnes garumu un pieslēdzamo mezglu skaitu, adresācijas konflikti un mezglu pielikšana/noņemšana sistēmas darbības laikā.

No I2C signālu specifikācijas protokola simbolu pārraides efektivitāte pamata datu apmaiņas procedūrām ir:

$$\eta_{i2c} = \frac{n_{data}}{t_{i2c} \cdot f_b} = \frac{n_{data}}{9 + 1,25 \cdot n_{data} + 2,5 \cdot 10^{-9} f_b}. \quad (1.3)$$

UART

UART komunikācijas fiziskais slānis ir divas vienpolāras datu līnijas: uztverošā (Rx) un raidošā (Tx), ko var izmantot gan simpleksai, gan pusdupleksai, gan duplexai komunikācijai starp kopnei pieslēgtajiem mezgliem. Signāli abās līnijās tiek kodēti, izmantojot divtaktu tranzistoru izejas, kas nodrošina ātru pārslēgšanos starp signālu loģiskajiem līmeņiem. Mezglu adresācijai un datu bloku nodalīšanai var izmantot vienu no divām pieejām: dīkstāves kadrus (IDLE) vai kadrus ar adreses bitu (ADDR). Pieņemot, ka tiek izmantots kadra formāts ar astoņiem datu bitiem, vienu stop bitu un bez paritātes bita, simbolu pārraides efektivitātes abiem kadru formātiem izsaka šādas sakarības:

$$\eta_{uart_idle} = \frac{n_{data}}{20 + 1,25 \cdot n_{data}}, \quad (1.4)$$

$$\eta_{uart_addr} = \frac{n_{data}}{11 + 1,375 \cdot n_{data}}. \quad (1.5)$$

$$(1.6)$$

SPI

SPI ir sinhrona virknes komunikācijas saskarne, kura komunikācijai izmanto kopni ar četrām vienpolārām līnijām (MISO, MOSI, CLK, CS). Signāli uz līnijām tiek kodēti, izmantojot divtaktu tranzistoru izejas, kas, līdzīgi kā UART, nodrošina salīdzinoši ātru pārslēgšanos starp loģiskajiem līmeņiem.

Potenciāli lielā vadu skaita dēļ tīklos ar lielu sensoru skaitu SPI tiek lietota reti. Lielākam sensoru skaitam piemērotākas ir SPI ziedlapiņķedes topoloģijas, kas vadu skaitu reducē uz četri vai pat divi [9], taču šai pieejai raksturīga līnijas topoloģija, kurai ne vienmēr var efektīvi optimizēt vadu izlietojumu.

Komunikācijai ar lielu skaitu sensoru mezgliem var izmantot arī SPI pusduplekso kopnes konfigurāciju (SPI PD) ar trīs vadiem (dati, takts un izvēle līnijas). SPI moduļos nav integrēta speciāla kadru bloku adresācijas shēma, taču, lai veiktu salīdzinājumu ar citām saskarnēm, pieņemsim, ka pirmie astoņi bloka simboli tiek atvēlēti adresācijai. Tad efektivitāte šim protokolam ir:

$$\eta_{spi_pdupl} = \frac{n_{data}}{n_{data} + 8}. \quad (1.7)$$

Kopsavilkums

Apskatītās saskarnes un to konfigurācijas ir apkopotas 1.2. tabulā. Lai gan literatūrā komunikācijai ar ķermeņa sensoriem populārākā vadu saziņas saskarne ir I2C, vērtējot pēc izejas pakāpes atbilstības ĶST prasībām, no apskatītajām saskarnēm ĶST vadu komunikācijai potenciāli piemērotākas ir saskarnes ar divtaktu tranzistoru izejām (UART, SPI), jo to darbību mazāki ietekmē vadu garuma un tīkla ierīču pieslēgvietu parazitiskie parametri.

1.2. tabula

Mikrokontroleru komunikācijas saskarņu apkopojums saziņai ar ķermeņa sensoru tīklā

Saskarne	Konfigurācija	Topoloģija	Izeja	Vadi	Ātrums, kBd/s
I2C	Standarta	$\leftrightarrow$ Kopne	OD/OC	2	100
I2C	“Fast”	$\leftrightarrow$ Kopne	OD/OC	2	400
I2C	“Fast+”	$\leftrightarrow$ Kopne	OD/OC	2	1000
I2C	“High Speed”	$\leftrightarrow$ Kopne	OD/OC	2	3400
I2C	“Ultra Fast”	$\leftrightarrow$ Kopne	PP	2	5000
UART	Adreses bits	$\leftrightsquigarrow$ Kopne	PP	2 ^a	460,8 ^b
UART	Dīkstāves kadrs	$\leftrightsquigarrow$ Kopne	PP	2 ^a	460,8 ^b
SPI	Pilnais	$\leftrightsquigarrow$ Kopne	PP	3+n _{nodes} ^a	1000 ^b
SPI	Ziedlapiņķēde	$\leftrightsquigarrow$ Līnija	PP	4	1000 ^b
SPI	Pusduplekssais	$\leftrightarrow$ Kopne	PP	3	1000 ^b
SPI	Uzlabota ziedlapiņķēde [9]	$\leftarrow$ Līnija	PP	2	1000 ^b

$\leftrightarrow$ pusduplekss, $\leftrightsquigarrow$ duplekss, $\leftarrow$ simplekss.

OC – atvērts kolektors (*open-collector*).

OD – atvērta notece (*open-drain*).

PP – divtaktu izeja (*push-pull*).

n_{nodes} – kopnei pieslēgto mezglu skaits.

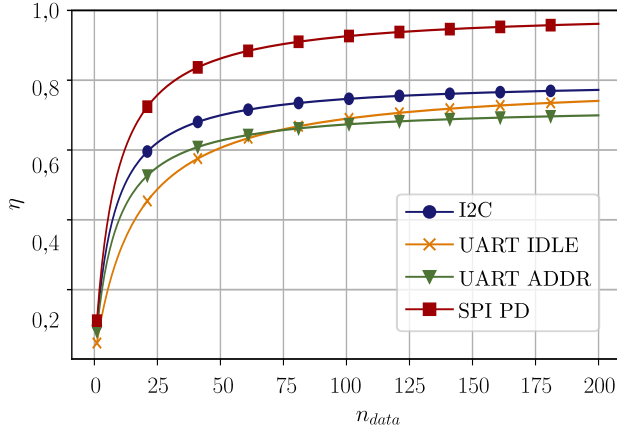
^a Pusdupleksā konfigurācijā ir par vienu vadu mazāk.

^b Norādīta tipiskā vērtība mūsdienās izmantoto zema enerģijas patēriņa MCU.

Apskatīto MCU saskarņu pusduplekso konfigurāciju datu pārraides efektivitāte atkarībā no datu simbolu daudzuma n_{data} ir redzama 1.2. attēlā.

1.5. Secinājumi

Ķermeņa formas noteikšanai mainīgas vides apstākļos, kad ir apgrūtināta redzamība vai iespējama ķermeņu aizkļāšanās, piemērotākās tehnoloģijas ir tās, kas balstās ķermenim piegulošajos mehānisko deformāciju vai inerces sensoros. Tā kā ķermeņa formas izmaiņas



1.2. att. Apskatīto I2C, UART un SPI saskarņu datu pārraides efektivitāte, izmantojot pusduplexas kopnes konfigurācijas ar simbolu pārraides ātrumu $f_b = 460800$ Bd/s.

bieži vien iekļauj lielas un vidēji lielas kustības un mehānisko deformāciju sensori šajā diapazonā cieš no samazinātās jutības un lielas mērījumu kļūdas, promocijas darbā galvenā uzmanība pievērsta IMU.

Pašreizējās pieejas ķermeņa formas noteikšanai ar IMU ir balstītas atsevišķu virsmas punktu tangenciālās informācijas iegūšanā, interpolēšanā un integrēšanā, balstoties zināšanās par šo punktu savstarpējiem ģeodēziskajiem attālumiem. Lai gan teorētiskais modelis pieļauj, ka attālums starp sensoriem var mainīties, praktiskajās realizācijās tas vienmēr tiek nofiksēts. Veicot tehnoloģiju izpēti, netika atrasti pētījumi, kas atklātu IMU potenciālu stiepes deformētu ķermeņu formas noteikšanai, kas ir svarīgs aspekts, lai varētu izgatavot dažādām ķermeņa formām pieguļošas sistēmas.

Lai gan ĶST patlaban dominē bezvadu risinājumi, lietojumiem ar lielu skaitu blīvi izvietotu sensoru potenciāli piemērotāki ir vadu risinājumi. Padziļinātāk tika apskatīti zema enerģijas patēriņa MCU un iegultajās sistēmās visplašāk lietotās saskarnes: UART, I2C un SPI. Tika secināts, ka, lai gan I2C protokols jau ir veiksmīgi izmantots vairākos ĶST prototipos, saskarnes ar divtaktu izejām (UART, SPI) ir piemērotākas komunikācijai pa visu ķermeni, jo to signālu pārslēgšanās ātrumu mazāk ietekmē vadu parazitiskie elektriskie parametri un pieslēgto ierīču skaits.

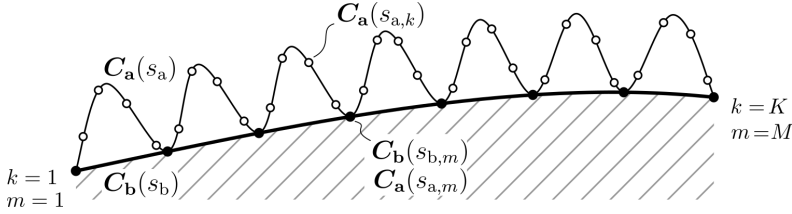
Individuālā adresācijas pieeja rada virstēriņu, kas proporcionāls nolasīto tīkla mezglu skaitam. Līdz ar to sistēmām reāllaika ķermeņa formas noteikšanai, kurās ir svarīgi nodrošināt efektīvu datu pārraidi starp lielu skaitu funkcionāli vienādiem sensoru mezgliem, ir nepieciešams izstrādāt uzlabotu pieeju, kas ļautu vienlaikus nolasīt visus mezglus un samazinātu saziņas virstēriņu.

2. METODE FORMAS NOTEIKŠANAI AR ORIENTĀCIJAS SENSIORIEM STRUKTŪRĀS

Šis nodaļas mērķis ir iepazīstināt ar piedāvāto pieeju ķermeņa formas raksturojošo punktu rekonstrukcijai no orientācijas sensoru datiem bez speciālu sensoru izmantošanas IMU savstarpējo attālumu izmaiņu noteikšanai.

2.1. Piedāvātās metodes būtība

Piedāvāto metodi ķermeņa formas rekonstrukcijai, izmantojot orientācijas sensorus, raksturo 2.1. attēls, kurā ķermeņa formu raksturojošā līnija $C_b(s_b)$ ir savienota ar elastīgas struktūras formu raksturojošu līniju $C_a(s_a)$ diskrētos savienojuma punktos $C_b(s_{b,m}) = C_a(s_{a,m})$, kur $s_a \in [0, L_a]$ un $s_b \in [0, L_b]$ ir līnijas garuma parametri, $m = 1, 2, \dots, M$ – savienojuma kārtas skaitlis, M – savienojumu kopējais skaits un L_a, L_b – attiecīgo līniju kopējie garumi. Uz struktūras fiksētos punktos $C_a(s_{a,k})$ ir izvietoti orientācijas sensori, kur $k = 1, 2, \dots, K$ – sensora kārtas skaitlis un K – sensoru kopējais skaits. Piedāvātā metode balstās tajā, ka, ķermeņa formai deformējoties (liecoties vai stiepjoties), mainās ķermenim piespīrinātās struktūras forma, taču tās kopējais garums un attālumi starp sensoru punktiem noteiktās ķermeņa deformācijas robežās var palikt nemainīgi.

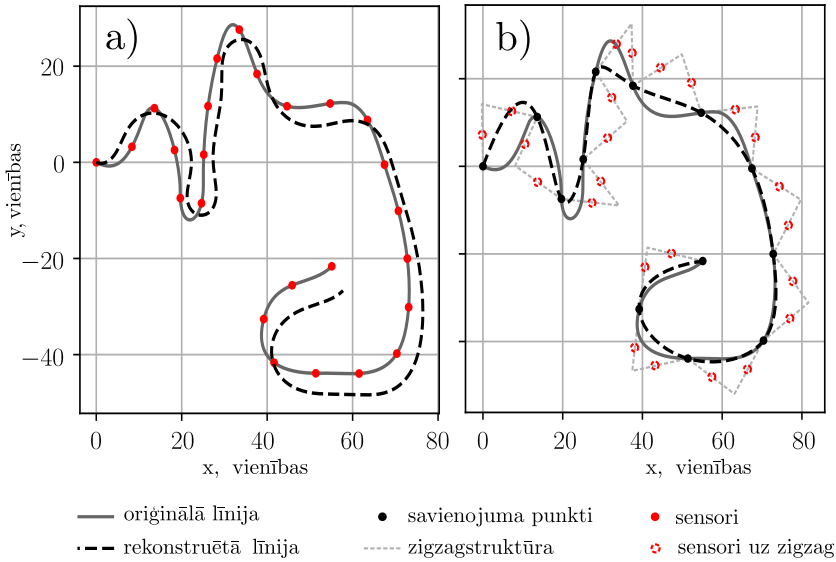


2.1. att. Shematisks zīmējums ķermeņa formas noteikšanai, izmantojot orientācijas sensorus un līklīnijas struktūru, kas savienota ar ķermeni atsevišķos punktos. $C_a(s_a)$ – struktūru aprakstoša līnija, $C_b(s_b)$ – ķermeņa formu aprakstoša līnija, $C_a(s_{a,k})$ – orientācijas sensoru novietojumu raksturojošie punkti, $C_b(s_{b,m})$ struktūras un ķermeņa savienojumus raksturojošie punkti, $k = 1, 2, \dots, K$ – sensora kārtas skaitlis, K – sensoru kopējais skaits, $m = 1, 2, \dots, M$ – savienojuma kārtas skaitlis un M – savienojumu kopējais skaits.

Piedāvātās ķermeņa formas rekonstrukcijas metodes pamatā struktūras formu raksturojošās līnijas $C_a(s_a)$ noteikšana no orientācijas datiem $s_{a,k}$ punktos ar 1.1. nodaļā apskatītajām pieejām. Zinot savienojuma punktiem atbilstošās struktūras līnijas parametra vērtības $s_{a,m}$, var noteikt ķermeņa formu raksturojošās koordinātas un rekonstruēt ķermeņa formu. Rekonstruēto ķermeņa formu raksturojošās līnijas vai virsmas parametrizācijai var izmantot parametrizāciju pēc hordas garuma (*chord length*) vai centrītes (*centripetal*) metodes [8]. Virsmas rekonstrukcijai no līnijām uz ķermeņa virsmas var izmantot globālo virsmas rekonstrukcijas metodi [7].

2.2. Piedāvātās metodes īpašības

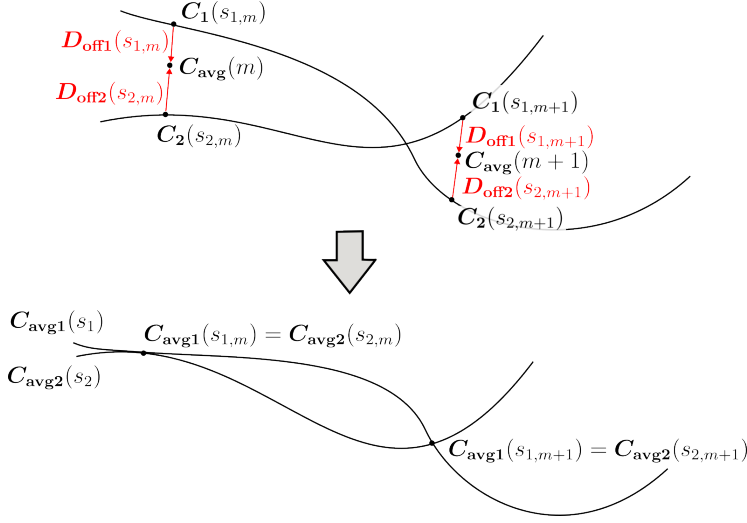
Publicētajām pieejām ķermeņa formas rekonstrukcijai ar orientācijas sensoriem uz ķermeņa, kā parādīts 2.2. a. attēlā, ir raksturīga rekonstrukcijas kļūdas uzkrāšanās, kas saistīta ar nepietiekamu sensoru nolašu skaitu. Ar promocijas darbā piedāvāto pieeju, kā redzams 2.2. b. attēlā, lai gan rekonstruētā līnija starp savienojuma punktiem vietām ievērojami atšķirties no uzdotās līnijas, savienojuma punktos rekonstruēto punktu koordinātas precīzi sakrīt ar uzdotās līnijas punktiem neatkarīgi no attāluma līdz rekonstrukcijas sākumpunktam $s = 0$. Šī nianse izpaužas, kad izmantoto struktūru formas ir ievērojami vienkāršākas interpolēšanai un rekonstrukcijai ar 1.1. nodaļā aprakstītajām pieejām nekā paša ķermeņa formas.



2.2. att. Sintētiski uzdotas 2D līnijas rekonstruētas ar ideālām sensoru nolasēm: a) sensori ir uz līnijas; b) sensori ir uz zigzagstruktūras.

Piedāvātajai pieejai pieļaujamo ķermeņa formas izmaiņu diapazonu nosaka struktūras mehāniskās īpašības. Pirmkārt, hordas attālums starp savienojuma punktiem nevar pārsniegt struktūras attiecīgā posma līnijas garumu. Otrkārt, pašai struktūrai ierobežo mehāniskā realizācija – lokanība, fiziskie izmēri un mijiedarbība ar cietiem fiziskajiem objektiem.

Konstruējot struktūras ķermeņa formas noteikšanai, atsevišķus struktūru savienojuma punktus var stratēģiski apvienot (2.3. att), veidojot līniju krustpunktus $C_1(s_{1,m})$ un $C_2(s_{2,m})$. Informāciju par kopīgajiem punktiem var izmantot, lai kompensētu atšķirības $D_{\text{off}}(s_{1,m})$ un iegūtu konsekventāku formas rekonstrukcijas rezultātu.



2.3. att. Rekonstruētas struktūras līnijas krustpunktu nobīdes.

Starp dažādiem novērtējumiem $C_1, C_2, \dots$, patieso aprēķina kā vidējo svērtu:

$$C_{\text{avg}}(C_1, C_2, \dots) = \frac{w_1 C_1 + w_2 C_2 + \dots}{w_1 + w_2 + \dots}, \quad (2.1)$$

kur w – svari atbilstoši punkta attālumam līdz rekonstrukcijas sākumpunktam.

Attiecīgi nobīdes vektorus iegūst šādi:

$$D_{\text{off1}}(s_{1,m}) = C_{\text{avg}}(m) - C_1(s_{m,1}), \quad (2.2)$$

$$D_{\text{off2}}(s_{2,m}) = C_{\text{avg}}(m) - C_2(s_{m,2}). \quad (2.3)$$

Iegūtos nobīdes vektorus $D_{\text{off1}}(s_{1,m})$ un $D_{\text{off2}}(s_{2,m})$ interpolējot, iegūst līkņu nobīdes $D_{\text{off1}}(s_1)$ un $D_{\text{off2}}(s_2)$, ko var izmantot līniju punktu korekcijai, lai salāgotu savienojuma savienojuma punktu koordinātas:

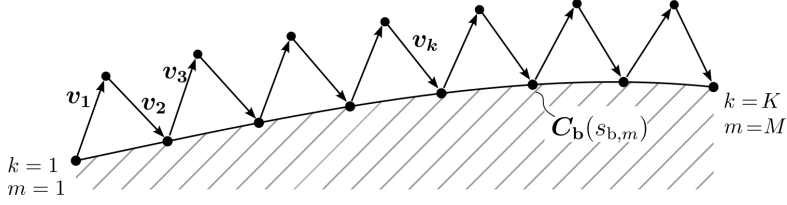
$$C_{\text{avg1}}(s_1) = C_1(s_1) + D_{\text{off1}}(s_1), \quad (2.4)$$

$$C_{\text{avg2}}(s_2) = C_2(s_2) + D_{\text{off2}}(s_2). \quad (2.5)$$

2.3. Speciālgadījums ar zigzagstruktūru

Darba gaitā padziļinātāk ir apskatītas zigzagstruktūras, kas piestiprinātas ķermenim, kā parādīts 2.4. attēlā.

Zigzagstruktūras modeli veido vektori $\mathbf{v}_k$ ar garumu $L_k = \|\mathbf{v}_k\|$ un stiprinājuma punkti $C_b(s_{b,m})$. Zinot rotācijas matricas zigzagsegmentu rotācijai $\mathbf{R}_k$ attiecībā pret noteiktiem atskaites stāvokļiem $\mathbf{v}_k^*$, stiprinājuma punktu koordinātas var aprēķināt šādi:



2.4. att. Zigzaglīnijas struktūras stiepes un lieces deformēta objekta 2D formas noteikšanai.

$$\mathbf{C}_b(s_{b,1}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

$$\mathbf{C}_b(s_{b,m}) = \sum_{k=1}^{2(m-1)} \mathbf{v}_k = \sum_{k=1}^{2(m-1)} \mathbf{R}_k \mathbf{v}_k^*, \quad \text{kur } m > 1. \quad (2.7)$$

2D gadījumā, par atskaites stāvokli izmantojot horizontālās ass virzienu, atskaites vektori ir $\mathbf{v}_k^* = [L_k, 0]^T$, un stiprinājuma punktu koordinātas, kur $m > 1$, var izteikt šādi:

$$\mathbf{C}_b(s_m) = \sum_{k=1}^{2(m-1)} \mathbf{R}_k \mathbf{v}_k^* = \sum_{k=1}^{2(m-1)} L_k \begin{bmatrix} \cos(\alpha_k) & -\sin(\alpha_k) \\ \sin(\alpha_k) & \cos(\alpha_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{2(m-1)} L_k \begin{bmatrix} \cos \alpha_k \\ \sin \alpha_k \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

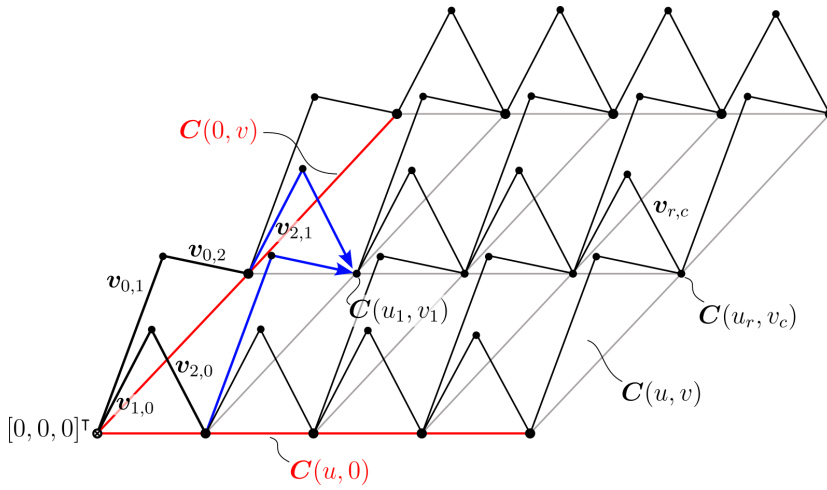
kur α_k – struktūras vektoru leņķis pret horizontālo asi.

Zigzagstruktūru principu var izmantot arī, lai rekonstruētu savienojuma punktus, kas raksturo 3D virsmu $\mathbf{C}(u,v)$, kur u un v ir virsmu raksturojošie parametri (2.5. att.). Ņemot vērā, ka 3D režģa punktus var aprēķināt attiecībā gan pret atskaites kolonnu $\mathbf{C}(0,v)$, gan pret atskaites rindu $\mathbf{C}(u,0)$ un ka iegūtie rezultāti var atšķirties rekonstrukcijas kļūdu dēļ, zināšanas par savienojuma punktiem var izmantot, lai novērtējumus salāgotu pēc 2.3. attēlā parādītā principa, kas aprakstīts iepriekš.

Zigzagstruktūru segmentu garums nosaka, cik lielas deformācijas (liekšanu, stiepšanu un saspiešanu) struktūra pieļauj. 2.4. att. struktūras gadījumā ar diviem zigzag segmentiem starp savienojuma punktiem, pieļaujamie hordas garumi ir $d_m \leq L_{2m-1} + L_{2m}$, kur $m = 2, 3, \dots, M$ un M – savienojuma punktu skaits.

2.4. Secinājumi

Stiepes un lieces deformētu ķermeņu formas noteikšanai ar IMU struktūrās, kas savienotas ar ķermeni atsevišķos punktos, ir vairākas priekšrocības, salīdzinot ar apskatītājam pieejām, kurās IMU izvietoti tieši uz ķermeņa virsmas. Pirmkārt, ar piedāvāto pieeju attālums starp ķermeņa un struktūras savienojuma punktiem noteiktās robežās var mainīties, neietekmējot sensoru attālumus uz struktūras. Līdz ar to nav nepieciešami papildu sensori to patstāvīgai nolasīšanai. Otrkārt, struktūras veidojot no ģeometriskajām formām,



2.5. att. Telpiskas zigzagstruktūrās piemērs ķermeņa virsmai piederoša režģa punktu ieguvei. Zilās līnijas norāda punkta $C(u_1, c_1)$ iegūšana attiecībā pret atskaites rindu un pret atskaites kolonnu.

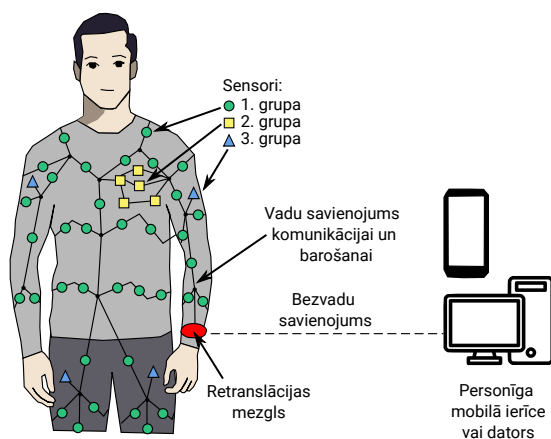
kas ir precīzāk interpolējamas nekā paša ķermeņa forma, var izvairīties no rekonstrukcijas kļūdas uzkrāšanās, kas ir saistītas ar nepietiekamu sensoru skaitu precīzai ķermeņa tangenciālo nolašu interpolēšanai.

3. PIEDĀVĀTĀ PIEEJA ĶERMENĀ SENSORU DATU IEGUVEI

Šajā nodaļā ir piedāvāta un detalizēti aprakstīta pieeja sensoru datu ieguvei ĶST ķermeņa formas rekonstrukcijai.

3.1. Sistēmas kopējā arhitektūra

Sistēmas arhitektūra sensoru mezglu datu ieguvei personīgajā mobilajā ierīcē ir parādīta 3.1. attēlā. Tā ietver lielu skaitu pa visu ķermeni izvietotus sensoru mezglus, vadu savienojumus, retranslācijas mezglu ar barošanas avotu un pašu mobilo ierīci, kurā dati tiek ievākti.



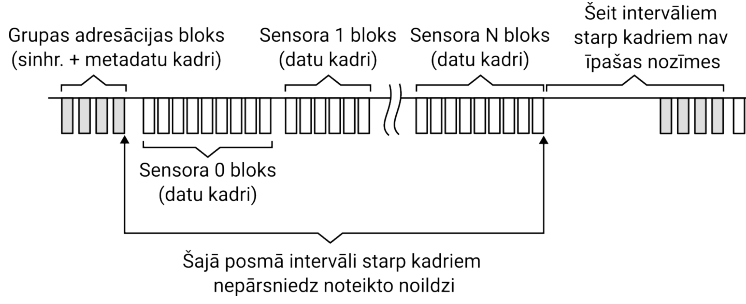
3.1. att. Piedāvātās sistēmas kopējā arhitektūra.

Tīkla mezglos, lai nodrošinātu augstu elektronisko komponentu integrācijas pakāpi, tiek izmantotas komerciāli pieejamas zema enerģijas patēriņa integrālās komponentes: MEMS IMU sensori un MCU. Tajās izplatītas saskarnes ir I2C, SPI un UART, kuru konfigurācijas saziņai kopnes topoloģijā ir apskatītas 1.4. nodaļā.

Formas rekonstrukcija ar orientācijas sensoriem iekļauj potenciāli lielu skaitu ar mezgliem, kas ir jānolasa vienlaikus. Līdz ar to šādi sagrupētos sensorus ir efektīvāk adresēt kā grupu, nevis individuāli. Lai uzlabotu sistēmas efektivitāti un veiktspēju piedāvātajai ĶST arhitektūrai ar sagrupētiem sensoriem, 3.2. nodaļā tiek piedāvāta jauna saziņas pieeja, kas mezglu individuālo adresāciju aizstāj ar sensoru grupām pielāgotu adresācijas protokolu.

3.2. Vadu saziņas protokols

Piedāvātais protokols efektīvai datu ieguvei no sensoriem grupas, kā redzams 3.2. attēlā, sastāv no komunikācijas kadriem, kuru secības veido blokus ar adresācijas un sensoru datiem.



3.2. att. Piedāvātā saziņas protokola komunikācijas kadru diagramma.

Protokols ir balstīts vedējsekotāja principā, kurā vedējs ģenerē nolasāmajai grupai unikālu adresācijas bloku. Pēc adresācijas bloka noraidīšanas tiek veiktas datu nolases un pieņemts, ka kopne ir aizņemta, kamēr grupas sensoru mezgli noteiktā secībā pārraida savus blokus ar datiem. Lai izvairītos no kopnes “uzkāŗšanās” starp kadriem ir spēkā noildzes laiks, ko pārsniedzot, visi iesaistītie mezgli pieņem, ka saziņa ar attiecīgo grupu ir beigusies un kopne ir atkal brīva.

Piedāvāto principu ar nelielām niansēm var izmantot gan UART, gan SPI kopņu pusdupleksajām konfigurācijām:

- 1) UART psudupleksajā konfigurācijā sinhronizācijai var brīvi izvēlēties tīklam vienotu sinhronizācijas kadru secību;
- 2) UART adreses bita konfigurācijā sinhronizācijai izmanto kadru ar aktīvu adreses bitu;
- 3) UART dīkstāves kadra konfigurācijā sinhronizācijai izmanto datu līnijas dīkstāves laiku;
- 4) SPI pusdupleksajā konfigurācijā sinhronizācijai izmanto CS signāla vadošo fronti.

Salīdzinot ar 1.4. nodaļā apskatītajiem protokoliem, piedāvātajam protokolam var novērtēt virstēriņa samazinājumu:

$$\mu = \frac{t_{virsterins}}{t_{virsterins}^*} = \frac{t_{protokols} - n_{data}/f_b}{t_{protokols}^* - n_{data}/f_b}. \quad (3.1)$$

SPI un UART pusdupleksajām kopņu topoloģijās, individuālo adresāciju piemērojot grupām ar n_{nodes} mezgliem, iegūst:

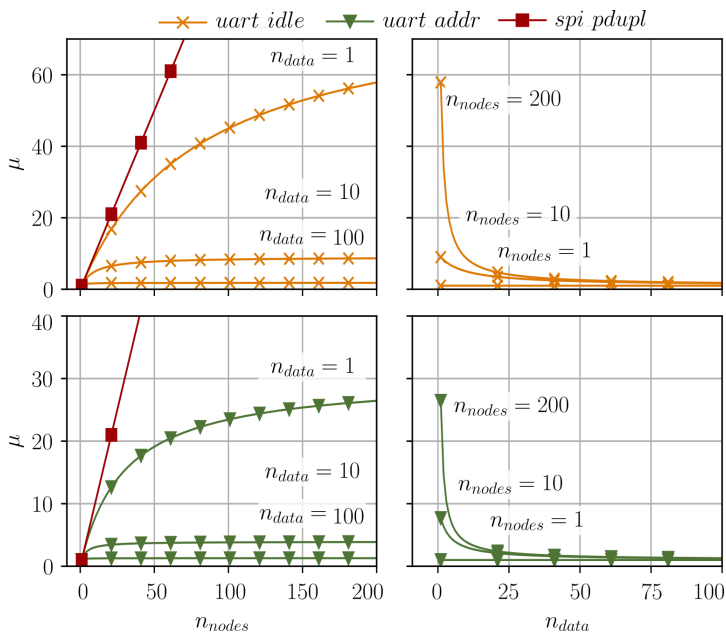
$$\mu_{uart_idle} = \frac{20 \cdot n_{nodes} + 0,25 \cdot n_{nodes} \cdot n_{data}}{20 + 0,25 \cdot n_{nodes} \cdot n_{data}}, \quad (3.2)$$

$$\mu_{uart_addr} = \frac{11 \cdot n_{nodes} + 0,375 \cdot n_{nodes} \cdot n_{data}}{11 + 0,375 \cdot n_{nodes} \cdot n_{data}}, \quad (3.3)$$

$$\mu_{spi_pdupl} = \frac{8 \cdot n_{nodes}}{8} = n_{nodes}. \quad (3.4)$$

Kā redzams, SPI pusdupleksās kopnes konfigurācijā ar piedāvāto protokolu virstēriņš tiek samazināts n_{nodes} reižu neatkarīgi no sensoru datu daudzuma. Virstēriņa uzlabojuma sakarības UART protokola konfigurācijām uzskatāmāk parāda grafiki 3.3. attēlā.

UART konfigurācijām virstēriņa samazinājums ar piedāvāto protokolu ir ievērojami mazāks. Neskatoties uz to, kad mezglu skaits ir liels, bet sensoru individuālo datu daudzums neliels, UART dīkstāves kadru formātā potenciālais virstēriņa samazinājums var būt vairāk nekā 10 reižu ($n_{data} < 8$, $n_{nodes} > 150$). Ņemot vērā 3.3. attēla grafikos redzamās sakarības, UART potenciālie lietojumi ir sensoru tīklos, kuros mezglu skaits ir liels, bet katra mezgla vidējais datu daudzums ir neliels. Piemēram, ar UART dīkstāves kadriem, ja $n_{data} < 24$ un $n_{nodes} > 25$, $\mu > 3,8$.



3.3. att. UART un SPI pusduplekso kopnes konfigurāciju virstēriņa salīdzinājums ar promocijas darbā aprakstīto protokolu atkarībā no mezglu skaita un mezglu vidējā datu daudzuma.

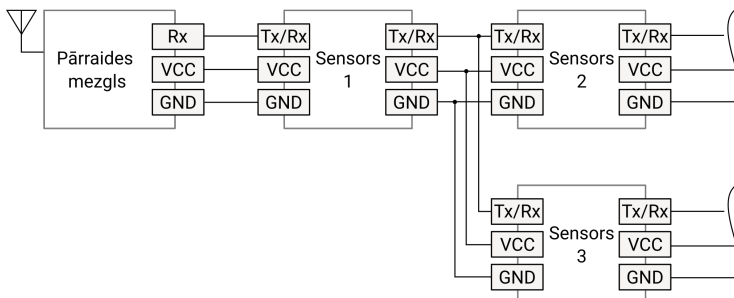
3.3. Mezglu arhitektūra

Lai precizētu piedāvāto KST mezglu arhitektūru sistēmai stiepes un lieces deformētu ķermeņu formas rekonstrukcijai, tika izvirzītas un 3.1. tabulā apkoptas sistēmas prasības mezgliem un vadu savienojumiem (tabulā apzīmēts ar T), sensoru mezgliem (tabulā apzīmēts ar S) un retranslācijas mezglam (tabulā apzīmēts ar R).

Ķermeņa sensoru sistēmas funkcionālās un ekspluatācijas prasības ķermeņa formas rekonstrukcijai

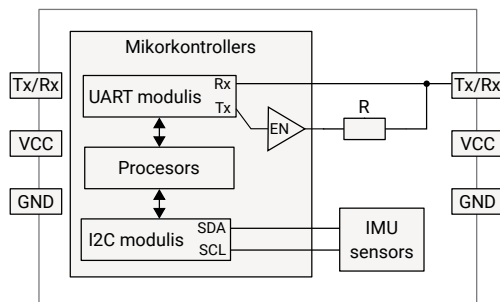
Nr.	Prasības	Komentāri
T.1	Minimāls vadu savienojumu daudzums	Maksimālam lietošanas ērtumam un optimizētam materiālu izlietojumam
T.2	Brīva vadu savienojumu atzaru veidošana gan no kopnes, gan no sensoru mezgliem	Lai optimizētu materiālu izlietojumu, uzlabotu sistēmas uzticamu darbību
T.3	Minimāli mezglu fiziskie izmēri	Ietekmē materiālu izlietojumu un valkāšanas ērtumu
T.4	Izmantotas komerciāli pieejamas elektroniskās komponentes	Ietekmē sistēmas izmaksas un izstrādes sarežģītību
T.5	Sensoru dati tiek pārraidīti 50 reizes sekundē	Atbilstoši modernajiem video standartiem kadru frekvenci parasti salāgo ar rūpnieciskā tīkla frekvencei
S.1	Sensoru mezglu skaits – līdz 100 funkcionāli identiskiem mezgliem	Potenciālais daudzums detalizētai ķermeņa formas rekonstrukcijai
S.2	Sensoru mezgli nodrošina lokālas orientācijas mērījumus	Prasība ķermeņa formas rekonstrukcijas pieejai
R.1	Retranslācijas mezgls nodrošina barošanu visiem tīkla mezgliem	Samazina sensoru mezglu izmērus, sarežģītību, izmaksas
R.2	Enerģijas avots ir uzlādējams	Samazina bīstamo atkritumu daudzumu
R.3	Retranslācijai izmanto personīgajās mobilajās ierīcēs izplatītas tehnoloģijas	Datu ieguvei nav nepieciešams specializētas iekārtas

Lai prasības nodrošinātu, tika izvirzīta 3.4. attēlā redzamā KST fiziskā topoloģija ar trīs vadu savienojumiem (Tx/Rx – asinhrons datu signāls, VCC – pozitīvais barošanas spriegums, GND – zeme). Sensoru datu sinhronizētai nolasīšanai tiek izmantots promocijas darbā piedāvātais protokols ar UART pusduplexas kopnes konfigurāciju.



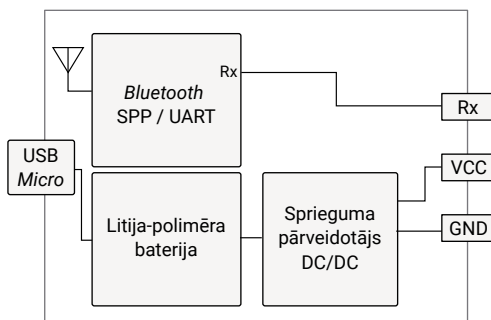
3.4. att. Piedāvātā KST mezglu fiziskā topoloģija.

Sensoru mezgla uzbūve, izmantojot komerciāli pieejamas zema enerģijas patēriņa komponentes, ir parādīta 3.5. attēlā.



3.5. att. Sensoru mezgla uzbūves shēma

Retranslācijas mezgla uzbūve, izmantojot komerciāli pieejamas, zema enerģijas patēriņa komponentes ir parādīta 3.6. attēlā.



3.6. att. Bezvadu datu pārraides mezgla uzbūves shematiskais zīmējums.

Piedāvātajai sistēmas un tās mezglu arhitektūrai ir vairākas priekšrocības, salīdzinot ar citām zināmajām ķermeņa sensoru sistēmām, kas izmanto vadu savienojumus (1.1. tabula).

1. Izmantotā viena savienojuma kopnes topoloģija ļauj brīvi veidot savienojumus un optimizēt vadu izlietojumu, samazinot izmaksas un atvieglojot sistēmas iestrādāšanu apgērbā.
2. Izmantotā kopnes signālu kodēšana ar divtaktu tranzistoru izejām nodrošina mazākus signāla kropļojumus vadu parazitisko parametru dēļ.
3. Piedāvātais protokols ir ar mazāku datu virstēriņu.

3.4. Secinājumi

Ņemot vērā vispārīgās prasības sistēmai, lai nodrošinātu ķermeņa formas rekonstrukciju no orientācijas sensoru datiem, ir piedāvāta jauna pieeja ķermeņa sensoru datu ieguvei no sagrupētiem sensoriem, izmantojot vadu savienojumus. Papildu sistēmas arhitektūrai

tiek piedāvāts jaunu saziņas protokolu, kas SPI un UART pusdupleksajām konfigurācijām ievērojami samazina datu pārraides virstēriņu un uzlabo efektivitāti. SPI gadījumā datu virstēriņa samazinājums ir lielāks nekā UART. Tas ir tieši proporcionāls nolasīto mezglu skaitam neatkarīgi no datu simbolu skaita.

Taču lietojumiem ar uzsvaru uz mazāku vadu daudzumu UART pusdupleksā konfigurācija ir potenciāli piemērotāka. Analizējot iegūtās sakarības virstēriņa samazinājumam, var secināt, ka UART gadījumā ar piedāvāto pieeju potenciālais ieguvums ir vērā ņemams situācijās, kad sensoru datu simbolu skaits ir mazs (< 24), bet sensoru skaits ir liels (> 25).

Ņemot vērā definētās funkcionālās un ekspluatācijas prasības sistēmai ķermeņa formas rekonstrukcijai, tīklu mezglu arhitektūra tika pielāgota saziņai, izmantojot UART saskarnes pusduplekso konfigurāciju. Salīdzinot piedāvāto pieeju ar citām zināmajām pieejām cilvēka ķermeņa sensoru datu ieguvei pa vadu savienojumiem, iezīmējas vairākas piedāvātās pieejas priekšrocības: ar izvēlēto kopnes topoloģiju ir samazināts vadu izlietojums un uzlabota savienojumu veidošanas brīvība, ar izvēlēto saskarni ir samazināta kopnes parazitisko parametru ietekme uz signālu kvalitāti un ar izvēlēto protokolu ir samazināts saziņā izmantotais simbolu virstēriņš.

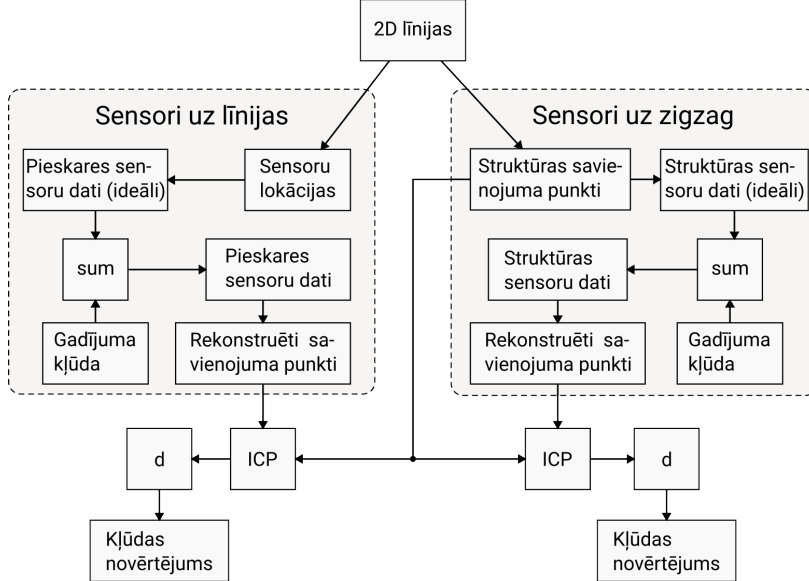
4. SIMULĀCIJAS UN EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Šīs nodaļas mērķis ir ar skaitliskām simulācijām un eksperimentāliem pētījumiem novērtēt 2. un 3. nodaļās aprakstītās pieejas.

4.1. Formas rekonstrukcijas simulācijas

Lai izpētītu, kā promocijas darbā piedāvātās metodes ar zigzagstruktūrām formas rekonstrukcijas rezultātu ietekmē: 1) rekonstruētā ķermeņa forma, 2) sensoru izvietojanas biežums, 3) sensoru mērījumu kļūda, 4) zigzagstruktūru segmentu garums, tika veiktas skaitliskas simulācijas ar sintētiskiem sensoru datiem no zigzagstruktūrām, kas savienotas ar nejauši sintezētām 2D līnijām. Iegūtos kļūdas novērtējumus var vispārināt arī uz 3D līnijām, ņemot vērā, ka kļūdas vektora garums ir tāds pats, kā 2D.

Simulāciju procesu atspoguļo 4.1. attēlā redzamā blokshēma. 2D līnijas tiek konstruētas vienu vienību garas no vienmērīgi izvietotām nejaušām leņķa funkcijas nolasēm, kas interpolētas ar kubiskajiem splainiem, minimizējot leņķa funkcijas izliekuma izmaiņas [16], un integrētas pēc 1.1. formulas. Izvēlētais leņķa funkcijas nejaušo nolašu skaits K_{gen} nosaka, cik sarežģīta būs iegūtā leņķa funkcija un cik nolases būs nepieciešamas tās formas rekonstrukcijai.



4.1. att. Formas rekonstrukcijas simulāciju blokshēma.

Abām pieejām (sensori uz līnijas un sensori uz zigzagstruktūrām) tiek sintezēti ideāli sensoru dati α_k – sensora leņķis pret horizontālo asi. Zigzagstruktūras izstiepšanās pakāpes

raksturošanai tiek definēts struktūras stiepes koeficients $\lambda = s_{conn_max}/s_{conn} = 2L/s_{conn}$, kur s_{conn_max} – struktūras maksimālais pieļaujamais attālums starp savienojuma punktiem.

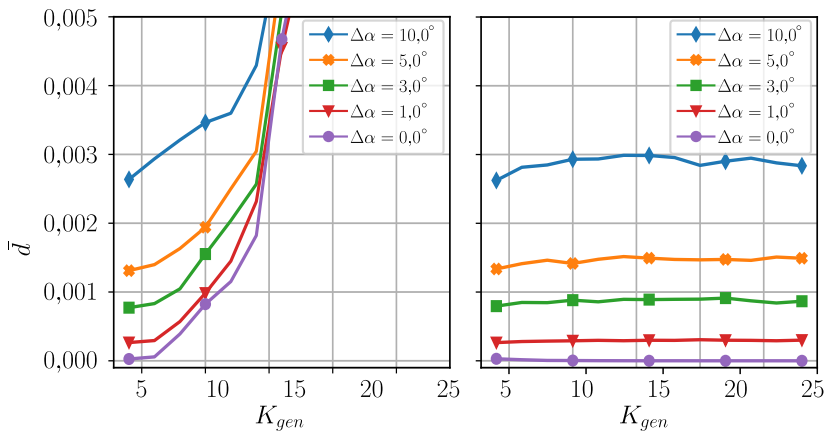
Simulācijās pirms zigzagstruktūras formas un savienojumu punktu rekonstrukcijas ar 2.3. nodaļā aprakstīto pieeju, sensoru datiem pieskata gadījuma kļūdu $\Delta\alpha_k$, ko reāliem sensoriem rada mērījumu nenoteiktība.

Rekonstruētās savienojuma koordinātas tiek salāgotas ar sākotnējām, izmantojot *Iterative Closest Point* (ICP) algoritmu [6], un rekonstrukcijas kļūda starp salāgotajiem 2D punktiem tiek novērtēta, aprēķinot Eiklīda attālumu d :

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (4.1)$$

kur x_1, y_1 ir rekonstruētās punkta koordinātas un x_2, y_2 – patiesās punkta koordinātas.

Simulāciju rezultāti ar mainīgu līniju sintezēšanai izmantoto leņķa nolašu skaitu K_{gen} un fiksētiem pārējiem parametriem ir parādīti 4.2. attēlā². Nolašu skaits K_{gen} mainās intervālā no 4 līdz 24. Kā redzams, piedāvāto metodi vidējās kļūdas atkarība no ģenerēto punktu skaita ir ļoti maza, salīdzinot ar pieeju, kurā sensori ir uz līnijas un vidējā kļūdas vērtība strauji pieaug, kad K_{gen} pietuvojas un pārsniedz $n_{sens}/2$.



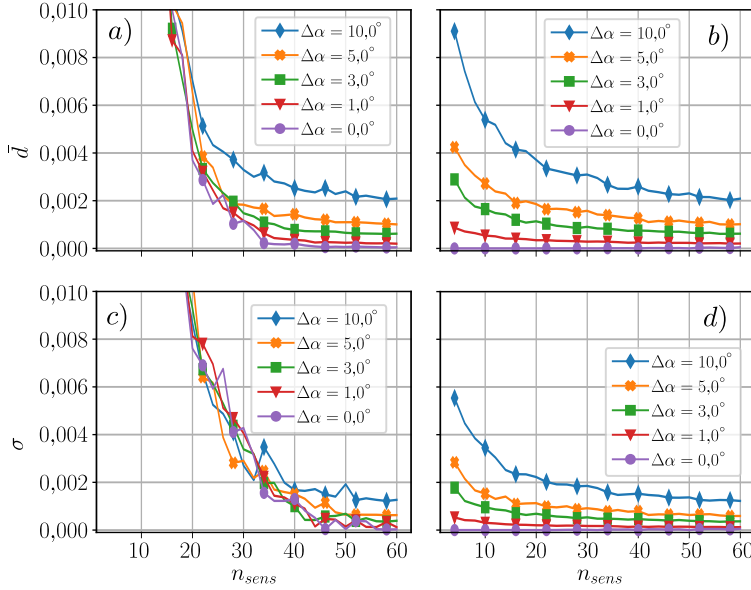
4.2. att. Savienojumu punktu rekonstrukcijas vidējā kļūda atkarībā no līniju sintezēšanai izmantoto nolašu skaita: a) rekonstrukcija ar sensoriem uz ķermeņa aprakstošās līnijas; b) rekonstrukcija ar sensoriem uz zigzagstruktūru aprakstošās līnijas.

Fiksētie parametri: $n_{sens} = 30$, $\lambda = 1$, $N_{rand} = 100$.

Simulāciju rezultāti ar mainīgu sensoru skaitu n_{sens} un fiksētiem pārējiem parametriem rezultāti ir parādīti 4.3. attēlā³. Kā redzams, ar promocijas darbā piedāvāto metodi, kad $\Delta\alpha = 0$, savienojuma punkti tiek atjaunoti perfekti, taču, pieaugot sensoru kļūdai, palielinās arī rekonstrukcijas kļūda un tās atkarība no sensoru skaita.

²https://pubgit.edi.lv/armands-phd/simulations/-/blob/master/RandSim_2.py.

³https://pubgit.edi.lv/armands-phd/simulations/-/blob/master/RandSim_1.py.



4.3. att. Savienojumu punktu rekonstrukcijas vidējā kļūda atkarībā no sensoru skaita:

a) rekonstrukcija ar sensoriem uz ķermeņa; b) rekonstrukcija ar sensoriem zigzagstruktūrās. Rekonstrukcijas kļūdas standartnovirze σ ; c) rekonstrukcija ar sensoriem uz ķermeņa; d) rekonstrukcija ar sensoriem zigzagstruktūrās. Fiksētie parametri: $K_{gen} = 10$, $\lambda = 1$, $N_{rand} = 100$.

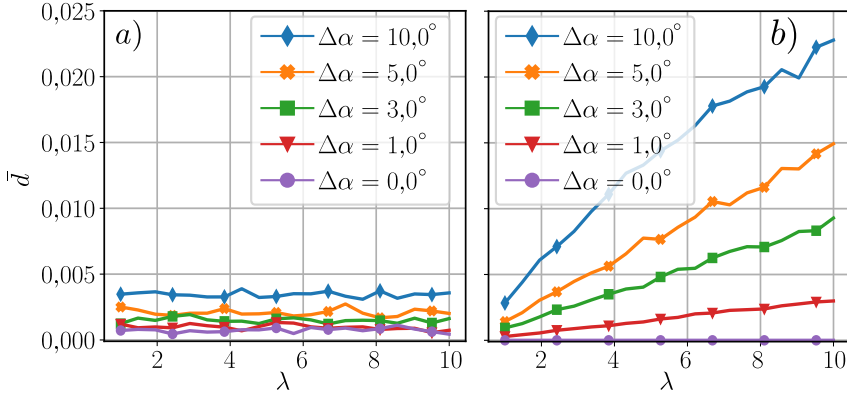
Simulāciju rezultāti ar mainīgu stiepes koeficientu λ ir prādīti 4.4. attēlā⁴. Kā redzams 4.4. b. attēlā, starp stiepes koeficientu un vidējo kļūdu ir lineāra korelācija. Turklāt līknes stāvums pieaug līdz ar ar sensoru mērījumu kļūdas $\Delta\alpha$ pieaugumu. Attiecīgi, izstrādājot zigzagstruktūras ķermeņa formas rekonstrukcija, lai minimizētu savienojuma punktu rekonstrukcijas kļūdu, tiek rekomendēts izmantot pēc iespējas mazākus zigzagposmu garumus.

4.2. Eksperimentālais makets rokas formas rekonstrukcijai

Šajā apakšnodaļā ir aprakstīts eksperimentālā maketa dizains, izstrāde un testēšana, lai pārbaudītu darbā piedāvātās sistēmas arhitektūru (3. nodaļa) un pieeju ķermeņa formas rekonstrukcijai ar IMU (2. nodaļa). Eksperimentālā maketa izgatavošanai ir izmantotas komerciāli pieejamas komponentes, speciāli projektētas spiestās plātes un ar 3D printeri izgatavotas detaļas.

Izgatavotajam maketam, kā redzams 4.5. attēlā, ir zigzagstruktūra, kas fiksētos punktus savienota ar pieguļošu apģērbu rokas formas rekonstrukcijai (savienojuma punktos ir piestiprināti marķieri). Kopumā zigzagstruktūru veido 26 posmi, tās kopējais garums

⁴ https://pubgit.edi.lv/armands-phd/simulations/-/blob/master/RandSim_2.py.



4.4. att. Savienojumu punktu rekonstrukcijas kļūda atkarībā no zigzagstruktūras stiepes koeficienta: a) rekonstrukcija ar sensoriem uz ķermeņa; b) rekonstrukcija ar sensoriem zigzagstruktūrās. Fiksētie parametri: $K_{gen} = 10$, $n_{sens} = 30$, $N_{rand} = 100$.

ir 1,534 m, un tai ir 12 savienojuma punkti ar ķermeni. Novērtējot posmu savienojumu precizitāti, tiek pieņemts, ka posmu galapunkti sakrīt ar $\pm 2,5$ mm nenoteiktību.

Sensoru tīkla izstrāde ir balstās 3.2. nodaļā aprakstītajā protokolā un 3.3. nodaļā aprakstītajās mezglu arhitektūrā. Saziņai tiek izmantots savienojums ar trīs vadiem (GND, VCC, Tx/Rx) atbilstoši UART pusdupleksās kopnes pamata konfigurācijai. Asinhronajai komunikācijai tiek izmantots šāds UART kadru formāts: 1 sākuma un beigu simbols, 0 paritātes simboli, 8 datu simboli, 460800 Bd/s simbolu pārraides ātrums.

Saziņas adresācijas bloku veido fiksēta UART kadru secība no sešiem kadriem: [0x55, 0xAA, 0x55, 0xAA, LEN(0–7), LEN(8–15)]. Katra sensora dati tiek pārsūtīti pa vadu tīklu, izmantojot 12 kadrus: kas satur sensora identifikatoru (kārtas numuru) grupā (ID), kvaterniona nolasi, sensora fona kalibrācijas statusu un ciklisko redundances pārbaudi. Katram sensoram piešķirtais ID ir piesaistīts tā lokācijai zigzagstruktūrā un secībai, kādā sensoru mezgli sūta datus pēc grupas adresācijas bloka saņemšanas.

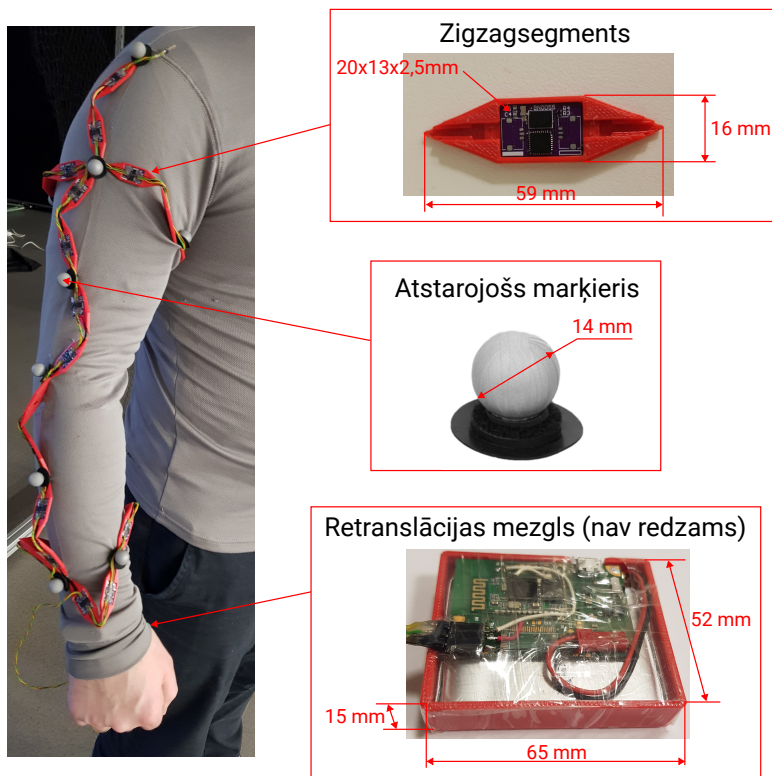
Ar aprakstīto UART kadru formātu, adresācijas bloka struktūru un sensoru datu struktūru kopējais kadru skaits, kas tiek izmantots sensoru datu nolasei, ir $n_{frames} = 6 + n_{nodes} \cdot 12 = 6 + 26 \cdot 12 = 318$. Attiecīgi minimālais laiks visu eksperimentālā maketa mezglu kadru pārraidei ir:

$$\begin{aligned} \min\{t_{frames}\} &= n_{frames} \cdot 10/f_b = (6 + n_{nodes} \cdot 12) \cdot 10/f_b = \\ &= 318 \cdot 10/460800 \approx 6,9 \text{ ms} \end{aligned} \quad (4.2)$$

un maketa maksimālā visu kadru pārraides frekvence:

$$f_{frames_max} = \frac{1}{\min\{t_{frames}\}} \approx 144,9 \text{ Hz}. \quad (4.3)$$

Zigzagsegmentos integrēto sensoru mezglu pilns spiestās plates projekts atrodams



4.5. att. Eksperimentālais makets rokas formas rekonstrukcijai ar zigzagstruktūrām.

*Gitlab*⁵. Sensoru mezgls satur *BNO055* IMU čipu, *MSP430G2553* MCU ar programmatūru, kuras *Code Composer Studio* projekts ar *C* kodu atrodams *Gitlab*⁶.

Pirmajam sensoram (ID = 0) programma ir modificēta, lai tas pildītu vedējmeģla funkciju un ar fiksētu laika intervālu (20 ms) ģenerētu komunikācijas sākuma secību. Attiecīgi modificēts sensoru vedējmeģla programmas *Code Composer Studio* projekts ar *C* kodu *BNO055* mikrokontrolleram atrodams *Gitlab*⁷.

Bezvadu pārraides mezgls tika realizēts atbilstoši 3.6. attēlā parādītajai blokshēmai. Bezvadu pārraidi nodrošina UART/*Bluetooth* modulis, kura datu lapa pieejama internetā⁸. Stabila 3,3 V barošanas sprieguma nodrošināšanai mezgls satur 2000 mAh litija-polimēra bateriju un impulsveida līdzsprieguma regulatoru.

⁵ <https://pubgit.edi.lv/armands-phd/sensor-node-pcb>.

⁶ <https://pubgit.edi.lv/armands-phd/sensor-node-bus-fw>.

⁷ <https://pubgit.edi.lv/armands-phd/sensor-node-bus-fw/-/tree/master-node>.

⁸ https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/HC-05%20Datasheet.pdf.

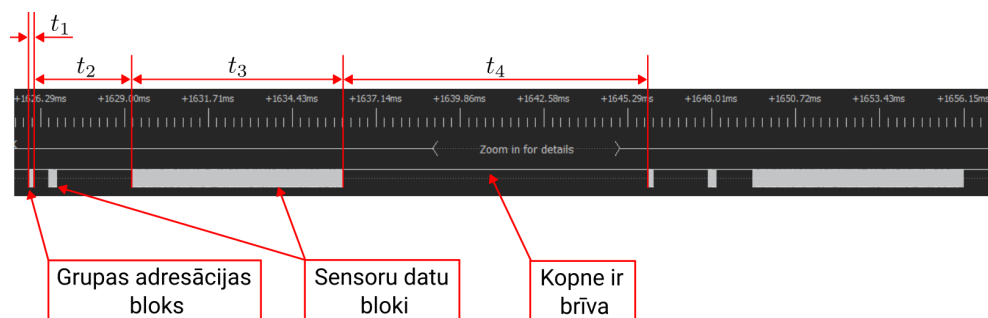
4.3. Komunikācijas protokola novērtējums

Lai novērtētu izstrādātā eksperimentālā maketa vadu komunikācijas protokola veikspēju, datu signāls “Tx/Rx” protokola darbības laikā tika analizēts ar “DSLogic U3Pro16”⁹ loģisko analizatoru (nolašu frekvence 1 GHz), ar ko tika noteikti 4.6. attēlā parādītie laika intervāli: t_1 – laika intervāls grupas adresācijas blokam, t_2 – laika intervāls lokālai sensoru nolašu iegūšanai, t_3 – laika intervāls sensoru datu bloku pārraidei pēc visu mezglu lokālās sensoru nolasīšanas, t_4 – laika intervāls, kurā kopne ir brīva. Visu minēto laika intervālu summa veido sensoru datu nolasīšanas periodu $T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$. Papildus tam katrā laika intervālā tika fiksēts nosūtīto kadru skaits, ko izmanto, lai aprēķinātu vidējo viena kadra noraidīšanai nepieciešamo laiku t_{kadr} . Iegūtie rezultāti, veicot mērījumus 10 secīgām grupu nolasēm, apkopoti 4.1. tabulā.

4.1. tabula

Protokola laika intervālu mērījumu rezultāti

Laiks	Vidējais	Standartnovirze	Minimālais	Maksimālais
t_1	130,73 μ s	0,016 μ s	130,720 μ s	130,770 μ s
t_2	3,13 ms	0,396 ms	1,978 ms	3,480 ms
t_3	6,56 ms	0,247 ms	6,019 ms	7,124 ms
t_4	10,28 ms	0,302 ms	9,880 ms	10,821 ms
T	20,11 ms	0,141 ms	20,045 ms	20,517 ms
t_{1_kadr}	21,79 μ s	0,003 μ s	21,787 μ s	21,795 μ s
t_{3_kadr}	22,79 μ s	0,018 μ s	22,771 μ s	22,833 μ s



4.6. att. Eksperimentālā maketa datu līnijas digitālais signāls ekrānšāviņš.

Kā redzams 4.1. tabulā, kadru pārraides laiki t_{1_kadr} un t_{3_kadr} ir ļoti tuvi maksimāli iespējamajam: $t_{kadr} = 10/460800 = 21,70 \mu$ s. Attiecīgi datu pārraides fāzē (t_3) laika virstēriņš, kas rodas mikrokontrollera programmas aizkavju dēļ, ir $\approx 5 \%$,

⁹<https://www.dreamsourcelab.com/shop/logic-analyzer/dslogic-u3pro16/>.

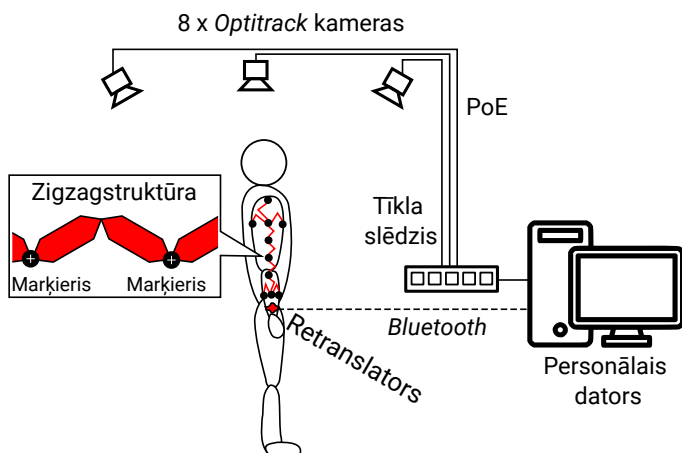
un, nesamazinot tīkla nolašu frekvenci (50 Hz), sensoru mezglu skaitu var palielināt pat $\lfloor (t_{4\min}/t_{3\text{ kadr s max}} - 6)/12 \rfloor = 35$, kopā ļaujot tīklā saslēgt un nolasīt 61 sensora mezglus.

Izmantojot 4.1. tabulas datus, maketam var novērtēt arī visu kadru pārraides frekvenci $f_{frames\max}^* = \frac{1}{t_{1\max} + t_{2\max} + t_{3\max}} \approx 93$ Hz, kas ir $\approx 64\%$ no teorētiski iespējamās ar izmantoto protokolu.

4.4. Savienojuma punktu rekonstrukcijas precizitātes novērtējums

Izstrādātā eksperimentālā maketa savienojuma punktu rekonstrukcijas precizitātes novērtēšanai ar zigzagstruktūru iegūtās savienojuma koordinātas tika salīdzinātas ar marķieru koordinātēm, kas iegūtas ar *Optitrack*TM optisko marķieru izsekošanas sistēmu.

Kā parādīts 4.7. attēlā, eksperimentā tika izmantotas šādas ierīces: personālais dators, 4.2. nodaļā aprakstītais zigzagstruktūru eksperimentālais makets ar 12 savienojuma punktiem rokas formas rekonstrukcijai, *Optitrack* sistēma ar 8 infrasarkanajām kamerām un 12 atstarojoši marķieri 14 mm diametrā, kas piestiprināti zigzagstruktūru savienojuma punktos. Marķieru fizisko izmēru dēļ tiek pieņemts, ka *Optitrack* marķieru centru koordinātas un ar zigzagstruktūru iegūtās stiprinājuma punktu koordinātas sakrīt ar ± 7 mm nenoteiktību, kas atbilst marķieru rādiusam.



4.7. att. Eksperimenta instalācija zigzagstruktūras maketa punktu rekonstrukcijas precizitātes novērtēšanai.

Eksperimenta laikā zigzagstruktūras eksperimentālais makets tika filmēts ar *Optitrack* kameru sistēmu, savukārt zigzagstruktūras maketa lietotājs ar noteiktu laika intervālu (10 s) ieņēma dažādas statiskas pozās. Pamatā tika izvēlētas trīs statiskas rokas pozas, kas tika atkārtoti ieņemtas pēc iespējas dažādākos virzienos. Pamata pozas ir šādas:

- iztaisnota roka (1. poza): roka un plauksta ir pilnībā izstiepta taisnā līnijā. Šī poza ļauj validēt sistēmu salīdzinoši vienkāršu formu rekonstrukcijai;

- iztaisnota, svērpta roka (2. poza): roka ir izstiepta tāpat, kā poza ar iztaisnotu roku, taču plauksta ir pagriezta par 180 grādiem. Šī poza ļauj validēt sistēmu savērptu formu rekonstrukcijai;
- saliekta roka (3. poza): roka saliekta elkonī, veidojot taisnu leņķi. Šī poza ir ar strauju ķermeņa formas izmaiņu elkoņa locītavas rajonā, ļaujot validēt sistēmu ķermeņa formas noteikšanai ar locītavām.

Optitrack datu ierakstīšanai un priekšapstrādei (punktu marķēšana) tika izmantota *Optitrack*TM (2022. gada 7. jūnijs) “*Motive 3.0.1 Final*” datorprogramma¹⁰, ar kuru apstrādātie datu kadri ar atbilstošiem laika zīmogiem tika eksportēti uz *comma-separated values* (CSV) failu. Savukārt zigzagstruktūras maketa sensoru datu ierakstīšanai tika izstrādāts speciāls rīks¹¹, kas nodrošina IMU datu nolasīšanu un kadru saglabāšanu CSV formātā ar atbilstošiem laika zīmogiem.

Zigzagstruktūras stiprinājumu punktu rekonstrukcijai no *BNO055* sensoru orientācijas datiem tika izmantota 2.3. nodaļā aprakstītā pieeja. Iegūtās struktūras stiprinājuma punktu relatīvās koordinātas un *Optitrack* iegūtie mērījumi tiek salāgoti, izmantojot ICP algoritmu [6].

4.2. tabula

Atšķirība starp savienojuma punktu koordinātēm, kas iegūtas ar zigzagstruktūras eksperimentālo maketu un *Optitrack* marķieru izsekošanas kameru sistēmu (vērtības ir norādītas milimetros)

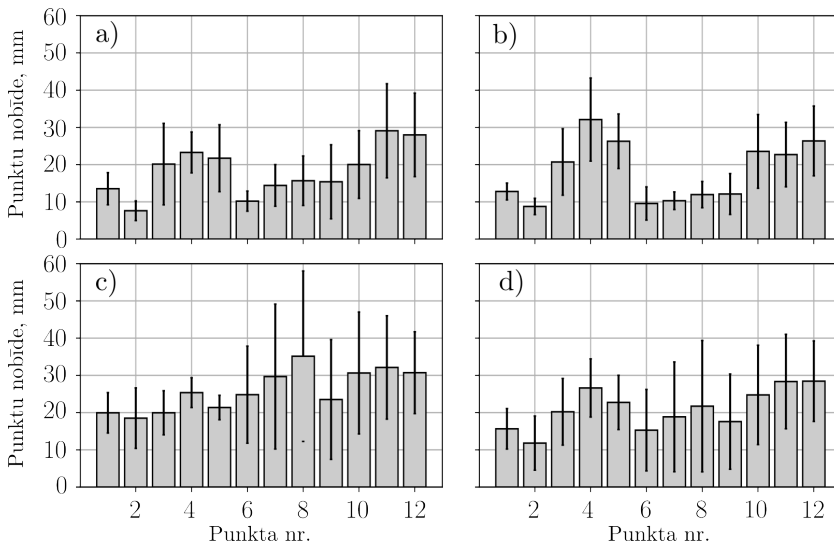
Punkta nr.	1. poza		2. poza		3. poza		Kopā ņemot	
	$\bar{d}$	σ	$\bar{d}$	σ	$\bar{d}$	σ	$\bar{d}$	σ
1	13,53	4,32	12,79	2,26	19,94	5,43	15,65	5,44
2	7,62	2,64	8,76	2,19	18,51	8,12	11,81	7,27
3	20,14	10,94	20,71	8,93	19,95	5,92	20,22	8,95
4	23,27	5,49	32,10	11,16	25,36	4,01	26,62	7,81
5	21,73	8,99	26,28	7,33	21,37	3,28	22,73	7,29
6	10,19	2,70	9,57	4,46	24,81	13,04	15,28	10,94
7	14,42	5,59	10,30	2,37	29,68	19,46	18,86	14,74
8	15,68	6,65	11,95	3,52	35,14	22,88	21,73	17,63
9	15,40	9,95	12,11	5,49	23,52	16,08	17,58	12,79
10	20,03	9,10	23,55	9,91	30,64	16,37	24,75	13,34
11	29,10	12,64	22,70	8,66	32,13	13,88	28,34	12,68
12	27,99	11,20	26,36	9,37	30,72	10,99	28,44	10,81
Kopā ņemot	17,09	10,44	16,70	9,97	25,14	14,14	19,90	12,45

Eiklīda attālumi starp abu sistēmu noteiktajiem punktiem ir apkopoti 4.2. tabulā un

¹⁰ <https://optitrack.com/support/downloads/motive.html>.

¹¹ <https://pubgit.edi.lv/armands-phd/loggingtool>.

4.8. attēlā. Kopā ņemot visas redzamo marķieru nolases visām pozām, vidējais attālums starp punktiem statisko pozu gadījumā ir $19,9 \text{ mm} \pm 12,45 \text{ mm}$ jeb $0,8 \%$ no kopējā maketa zigzagstruktūras garuma ($1,53 \text{ m}$). Šo atšķirību potenciāli var samazināt, uzlabojot zigzagstruktūras posmu savienojumu precizitāti ($\pm 2,5 \text{ mm}$), samazinot nobīdi starp zigzagstruktūras savienojuma punktiem un *Optitrack* marķieru centriem ($\pm 7 \text{ mm}$) un samazinot nesakritību starp zigzagsegmentu un orientācijas sensoru lokālajām koordinātu sistēmām.



4.8. att. Attālums starp zigzagstruktūras maketa savienojuma punktiem un *Optitrack* marķieriem statisku objektu formas rekonstrukcijā: a) 1. poza – roka iztaisnota; b) 2. poza – roka savērpta, c) 3. poza – roka saliekta elkonī, d) kopā ņemot visām pozām.

Lai novērtētu eksperimentālā maketa zigzagstruktūras stiepes koeficientu eksperimentos, tika aprēķināts vidējais līnijas garums, ko veido hordas no savienojuma punktiem: $980,9 \text{ mm} \pm 21,78 \text{ mm}$. Attiecīgi tuvināts vidējais struktūras stiepes koeficients ir $\lambda_{\text{exp}} = 1534/980,9 \approx 1,56$. Ņemot vērā iespējamo *BNO055* sensora mērījumu nenoteiktību $\Delta\alpha_{\text{BNO055}} = 4,61^\circ$ [13], no 4.4. attēla līknēm varam aptuveni novērtēt simulēto vidējo kļūdu savienojumu rekonstrukcijas kļūdu uz līnijas garuma vienību $\bar{d}_1(\lambda = 1,56, \Delta\alpha = 4,61) \approx 0,025$. Attiecīgi eksperimentālā maketa zigzagstruktūras savienojuma punktu vidējā kļūda, ko rada *BNO055* sensora mērījuma nenoteiktība, ir $\approx 3,8 \text{ mm}$.

4.5. Secinājumi

Ar simulācijām tika noskaidrots, ka ar piedāvāto metodi ķermeņa forma savienojuma punktu rekonstrukcijas precizitāti ietekmē daudz mazāk nekā pieejās ar sensoriem uz

ķermeņa. Tika noskaidrots arī, ka ar sensoriem uz līnijas un sensoriem zigzagstruktūrās, savienojumu punktu rekonstrukcijas precizitāte ir apgriezti proporcionāla sensoru skaitam. Turklāt gadījumā ar sensoriem zigzagstruktūras, sensoru mērījumu kļūdai samazinoties, rekonstrukcijas kļūda konverģē uz nulli, visā sensoru skaita diapazonā. Šī ir būtiska priekšrocība lietojumiem, kuros ir vai nu grūti novērtēt rekonstrukcijai nepieciešamo sensoru izvietojumu uz līnijas, lai iegūtu pietiekamu nolašu skaitu līnijas tangenciālās informācijas interpolēšanai, vai arī ķermeņa forma ir tik sarežģīta, ka tās precīza rekonstrukcijai ar sensoriem uz virsmas praktiski nav realizējama.

Simulācijās, novērtējot stiepes koeficienta (saistīts ar zigzagsegmentu garumu) ietekmi uz rekonstrukcijas precizitāti, tika noskaidrots, ka tos saista lineāra korelācija – jo lielāks stiepes koeficients un zigzagstruktūras segmentu garums, jo lielāka rekonstrukcijas kļūda un sensoru leņķa kļūdas ietekme. Līdz ar to, izstrādājot reālas sistēmas ar piedāvāto pieeju savienojumu punktu rekonstrukcijai, tiek rekomendēts izvēlēties pēc iespējas mazākus zigzagsegmentu garumus.

Eksperimentālajiem pētījumiem izstrādātais makets rokas formas rekonstrukcijai ar 26 zigzagstruktūras posmiem ļauj noteikt koordinātas 12 savienojuma punktiem, kuru lokācijas ir izvēlētas rokas formas noteikšanai visā tās garumā. Savienojuma punktu rekonstrukcijai izstrādātais makets nolasa zigzagsegmentu orientācijas kvaternionu formā un pārsūta tos uz ārēju ierīci ar 50 Hz frekvenci, ko ir iespējams palielināt līdz 93 Hz, kas ir pilnībā pietiekami vizuāli plūstošas formas rekonstrukcijas nodrošināšanai. Tā kā tas ir tikai 64 % no izmantotā protokola teorētiski iespējamajiem 144,9 Hz, izstrādātajam eksperimentālajam maketam nepieciešamības gadījumā var palielināt sensoru skaitu vai sensoru nolašu frekvenci.

Novērtējot maketa punktu rekonstrukcijas sakritību ar *Optitrack* marķieru izsekošanas sistēmu, tika iegūts, ka statiskām pozām kopējā atšķirība vidēji ir 19,9 mm. Potenciāli to var samazināt līdz noteiktai 3,8 mm robežai, kas tika aptuveni novērtēta, balstoties eksperimentālā maketa parametros un veiktajās simulācijās. Citi identificētie cēloņi minēto sistēmu rezultātu nesakritībai ir struktūras savienojumu neprecizitātes ($\pm 2,5$ mm), nobīde starp savienojuma punktiem un *Optitrack* marķieru centriem (± 7 mm) un nesakritība starp zigzagsegmentu un sensora čipa lokālajām atskaites sistēmām.

5. NOBEIGUMS. DARBA GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Darba mērķis ir izstrādāt efektīvu un mērogojamu ķermeņa sensoru sistēmu, kas būtu piemērota stiepjamu un liecamu formu rekonstrukcijai. Mērķa sasniegšanai definēto darba uzdevumu izpilde, iegūtie rezultāti un secinājumi ir aprakstīti četrās nodaļās.

Promocijas darba 1.1. nodaļā ir apkopotas un salīdzinātas dažādas ķermeņa formas noteikšanas metodes, no kurām kā potenciāli piemērotākā ķermeņa formas rekonstrukcijai ar augstu precizitāti ir pieeja ar orientācijas sensoriem, kas izvietoti uz ķermeņa. Šī pieeja ir izmantojama ne tikai lieces, bet arī stiepes deformētu ķermeņu formas rekonstrukcijai, taču ar nosacījumu, ka katru reizi papildus telpiskajām orientācijām tiek noteikti arī sensoru savstarpējie attālumi. Apskatītajos avotos sistēmu realizācija ar mainīgu sensoru savstarpējo attālumu ir maz pētīta un konkrēti realizācijas piemēri nav piedāvāti.

Promocijas darbā (2. nodaļa) tiek piedāvāta jauna pieeja stiepjamu un liecamu ķermeņu formu raksturojošo punktu rekonstrukcijai, kas balstīta orientācijas sensoru izvietojumā nevis uz ķermeņa virsmas, bet uz zigzagstruktūrām, kas savienotas ar ķermeni atsevišķos punktos. Salīdzinot piedāvāto pieeju ar literatūrā apskatītājām, papildus iespējai noteikt stiepes deformētu ķermeņu formu, iezīmējas vēl viena būtiska potenciālā priekšrocība – ar piedāvāto metodi iegūto savienojuma punktu rekonstrukcijas precizitāti mazāk ietekmē nosakāmā ķermeņa forma.

Veicot simulācijas ar nejausi ģenerētām sintētiskām līnijām un sintētiskiem orientācijas sensoru datiem (4.1. nodaļa), definētā hipotēze par ķermeņa formas ietekmi tika apstiprināta. Papildus tam simulācijās tika novērtēta sensoru skaita ietekme uz savienojuma punktu rekonstrukcijas precizitāti. Atšķirībā no pieejas, kurā sensori ir uz ķermeņa, ar promocijas darbā piedāvāto metodi, sensoru mērījumu kļūdai samazinoties, rekonstrukcijas kļūda konverģē uz nulli neatkarīgi no sensoru daudzuma. Simulācijās tika novērtēta arī zigzagstruktūras segmentu garuma ietekme uz savienojumu punktu rekonstrukcijas precizitāti. Rezultāti uzrādīja, ka segmentu garums tieši proporcionāli ietekmē rekonstrukcijas kļūdas vidējo vērtību. Līdz ar to reālās sistēmās, lai samazinātu savienojumu punktu rekonstrukcijas kļūdu, tiek rekomendēts struktūras segmentu garumu pēc iespējas minimizēt.

Ņemot vērā potenciāli lielo sensoru skaitu, kas nepieciešams detalizētai ķermeņa formas rekonstrukcijai, 1.3. nodaļā tika apskatītas potenciālās ķermeņa sensoru tīklu komunikācijas tehnoloģijas un to piemērotība liela skaita sensoru tīkla izveidei. Tika secināts, ka patlaban dominē bezvadu risinājumi, taču lietojumiem ar lielu skaitu blīvi izvietotiem sensoriem piemērotāki ir vadu risinājumi, kas ķermeņa sensoru tīklu kontekstā ir maz pētīti.

Promocijas darba 3. nodaļā ir piedāvāta un detalizēti aprakstīta jauna pieeja, kas ir piemērota liela mezglu skaita ķermeņa sensoru tīkla datu ieguvei, izmantojot vadu savienojumus un MCU izplatītas saskarnes ar divtaktu tranzistoru izejām (UART, SPI).

Piedāvātā pieeja ietver gan pielāgotu vadu tīkla arhitektūru ar trīs vadu savienojumiem (datu signāls un barošana) optimizētam vadu izlietojumam sarežģītām mezglu topoloģijām, gan saziņas protokolu, kas ļauj būtiski samazināt simbolu pārraides virstēriņu. Veicot saziņas protokola analīzi, tika aprēķināts, ka ar piedāvāto saziņas protokolu grupu saziņas protokolu virstēriņu var samazināt proporcionāli sagrupēto mezglu skaitam.

Praktiskiem eksperimentiem, lai novērtētu darbā piedāvātās KST arhitektūras un ķermeņa formas rekonstrukcijas pieejas, tika izstrādāts zigzagstruktūras eksperimentālais makets rokas formas noteikšanai. Makets ietver 26 zigzag segmentus ar IMU, kas ar ķermeni veido 12 savienojuma punktus. Maketā tika īstenota darbā piedāvātā pieeja sensoru datu ieguvei un barošanai ar trīs vadu savienojumiem kopnes topoloģijā. Veicot komunikācijas signāla analīzi, tika noskaidrots, ka ar izveidoto maketu var nolasīt sensoru orientācijas datus no 26 sensoru mezgla ar ātrumu līdz 93 reizēm sekundē, kas ir $\approx 64\%$ no teorētiski maksimālā ar izmantotajiem protokola parametriem. Līdz ar to var secināt, ka piedāvātā pieeja ķermeņa sensoru datu ieguvei no blīvi izvietotiem liela skaita sensoriem ir realizējama ar komerciāli pieejamām zema enerģijas patēriņa komponentēm un ir lietojama reāllaika sistēmām.

Salīdzinot izstrādāto eksperimentālo maketu ar *Optitrack* marķieru izsekošanas sistēmu dažādu ķermeņa pozu noteikšanai, vidējā atšķirība starp iegūto savienojuma punktu koordinātēm ir $\pm 19,9$ mm. Ņemot vērā, ka lielāko daļu no tās veido segmentu savienojumu neprecizitātes ($\pm 2,5$ mm), *Optitrack* marķieru centru nobīdes (± 7 mm) un izmantotā sensoru čipa mērījumu nenoteiktība ($\pm 3,8$ mm), var secināt, ka eksperimentālie pētījumu apstiprina piedāvātās pieejas piemērotību ķermeņa virsmai piederošu punktu koordināšu noteikšanai un ķermeņa formas rekonstrukcijai.

Kopumā veiktās simulācijas un eksperimenti apstiprina piedāvātās formas rekonstrukcijas metodes piemērotību stiepes un lieces deformētu ķermeņu formas rekonstrukcijai no orientācijas sensoru datiem, turklāt tai ir identificētas vairākas priekšrocības, salīdzinot ar citām zināmajām metodēm. Piedāvātā pieeja, kas ietver sistēmas arhitektūru un saziņas protokolu ķermeņa sensoru datu ieguvei, ir ērti mērogojama dažādam sensoru mezglu skaitam un sarežģītām fiziskajām topoloģijām. Tā ļauj optimizēt sensoru tīkla izveidei nepieciešamo vadu izlietojumu un datu pārraides virstēriņu, izmantojot apskatītās zema enerģijas patēriņa MCU saziņas saskarnes.

Ņemot vērā izpildītos darba uzdevumus un sasniegtos rezultātus, var secināt, ka promocijas darbā definētais mērķis ir sasniegts, veiktais pētījums ir noslēgts un darbs ir pabeigts.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Hermanis A., Cacurs R., and Greitans M. Acceleration and magnetic sensor network for shape sensing. *IEEE Sensors Journal*, 16 (5):1271–1280, 2016. Cited by: 25.
- [2] A. Ancans, A. Rozentals, K. Nesenbergs, and M. Greitans. Inertial sensors and muscle electrical signals in human-computer interaction. volume 2017-December, pages 1–6. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. Cited by 9.
- [3] Armands Ancans, Modris Greitans, Ricards Cacurs, Beate Banga, and Artis Rozentals. Wearable sensor clothing for body movement measurement during physical activities in healthcare. *Sensors*, 21 (6), 2021.
- [4] Armands Ancans, Juris Ormanis, Ricards Cacurs, Modris Greitans, Elise Saoutieff, Adrien Faucorr, and Sebastien Boisseau. Bluetooth low energy throughput in densely deployed radio environment. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. Cited by: 8; All Open Access, Green Open Access.
- [5] Csaba Antonya, Silviu Butnariu, and Claudiu Pozna. Real-time representation of the human spine with absolute orientation sensors. In *2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, pages 1–6, 2016.
- [6] P. J. Besl and Neil D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (2):239–256, 1992.
- [7] John Fisher, John Lowther, and Ching-Kuang Shene. Curve and surface interpolation and approximation. volume 36, page 146, 06 2004.
- [8] Michael S. Floater and Tatiana Surazhsky. Parameterization for curve interpolation. In Kurt Jetter, Martin D. Buhmann, Werner Haussmann, Robert Schaback, and Joachim Stöckler, editors, *Topics in Multivariate Approximation and Interpolation*, volume 12 of *Studies in Computational Mathematics*, pages 39–54. Elsevier, 2006.
- [9] A. Hermanis, R. Cacurs, K. Nesenbergs, and M. Greitans. Efficient real-time data acquisition of wired sensor network with line topology. page 133–138. IEEE Computer Society, 2013. Cited by: 7.
- [10] Atis Hermanis. *Shape sensing based on embedded sensors for mobile cyber-physical systems*. Theses, Riga Technical University, 2016.
- [11] Takayuki Hoshi and Hiroyuki Shinoda. 3d shape measuring sheet utilizing gravitational and geomagnetic fields. In *2008 SICE Annual Conference*, pages 915–920, 2008.

- [12] Daniel Laidig and Thomas Seel. Vqf: Highly accurate imu orientation estimation with bias estimation and magnetic disturbance rejection. *Information Fusion*, 91:187–204, 2023. Cited by: 1; All Open Access, Green Open Access.
- [13] Zhirong Lin, Yongsheng Xiong, Houde Dai, and Xuke Xia. An experimental performance evaluation of the orientation accuracy of four nine-axis mems motion sensors. In *2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES)*, page 185–189, 2017.
- [14] Sarvenaz Salehi Mourkani. *IMU-based Suit for Strength Exercises: Design, Calibration and Tracking*. doctoralthesis, Technische Universität Kaiserslautern, 2021.
- [15] Saguin-Sprynski N., Jouanet L., Lacolle B., and Biard L. Surfaces reconstruction via inertial sensors for monitoring. page 702–709, 2014. Cited by: 11.
- [16] Sprynski N., David D., Lacolle B., and Biard L. Curve reconstruction via a ribbon of sensors. page 407–410, 2007. Conference name: 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, ICECS 2007; Conference date: 11 December 2007 through 14 December 2007; Conference code: 73150.
- [17] Gregory M. Nielson. -quaternion splines for the smooth interpolation of orientations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(2):224–229, 2004. Cited by: 26.
- [18] Xavier Righetti and Daniel Thalmann. Proposition of a modular i2c-based wearable architecture. pages 802–805. Ieee Service Center, 445 Hoes Lane, Po Box 1331, Piscataway, Nj 08855-1331 Usa, 2010.
- [19] Nathalie Saguin-Sprynski, Mikael Carmona, Laurent Jouanet, and Olivier Delcroix. New generation of flexible risers equipped with motion capture - morphopipe system. volume 3, page 1932–1941, 2016. Cited by: 3.
- [20] Elise Saoutieff, Tiziana Polichetti, Laurent Jouanet, Adrien Faucon, Audrey Vidal, Alexandre Pereira, Sébastien Boisseau, Thomas Ernst, Maria Lucia Miglietta, Brigida Alfano, Ettore Massera, Saverio De Vito, Do Hanh Ngan Bui, Philippe Benech, Tan-Phu Vuong, Carmen Moldovan, Yann Danlee, Thomas Walewyns, Sylvain Petre, Denis Flandre, Armands Ancans, Modris Greitans, and Adrian M. Ionescu. A wearable low-power sensing platform for environmental and health monitoring: The convergence project. *Sensors*, 21(5):1–21, 2021. Cited by: 7; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access.
- [21] Nathalie Sprynski. *Reconstruction de courbes et surfaces à partir de données tangentielles*. Theses, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, July 2007.



Armands Ancāns dzimis 1992. gadā Līvānos. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis bakalaura grādu elektrozinātnē (2014) un maģistra grādu elektronikā (2016). Kopš 2015. gada strādā Elektronikas un datorzinātņu institūtā, iesaistoties gan Latvijas, gan Eiropas mēroga projektos. Sākumā bija elektronikas inženieris, patlaban – pētnieks, fokusējoties uz valkājamo sensoru izstrādi un izmantošanu, lai gūtu ieskatu par cilvēka ķermeņa darbību un sniegtu atgriezenisko saiti par sporta un medicīnas lietojumiem.