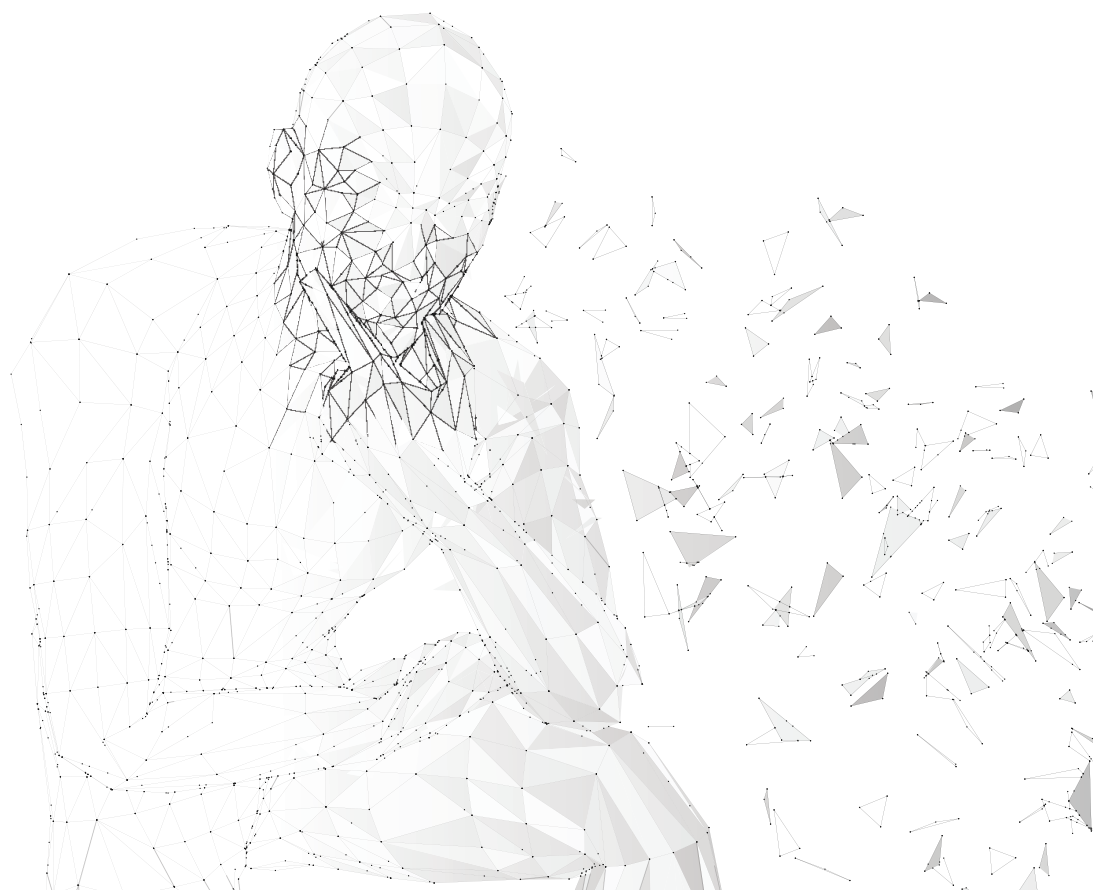


Armands Ancāns

ĶERMEŅA SENSORU TĪKLS TĀ VIRSMAS FORMAS REKONSTRUKCIJAI

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Armands Ancāns

Doktora studiju programmas "Elektronika" doktorants

**ĶERMEŅA SENSORU TĪKLS TĀ
VIRSMAS FORMAS
REKONSTRUKCIJAI**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs

Dr. sc. comp.

MODRIS GREITĀNS

Rīga 2023

ANNOTĀCIJA

Doktora darbs ir veltīts jaunu ķermeņa formas rekonstrukcijas pieeju izpētei, izmantojot uz ķermeņa izvietotus sensorus. Galvenais darba mērķis ir izstrādāt efektīvu un mērojamu ķermeņa sensoru sistēmu stiepjamu un liecamu formu rekonstrukcijai. Darbā ir veikta literatūras analīze ieskatam par publicētajām formas rekonstrukcijas metodēm ar ķermeņa sensoriem un ķermeņa sensoru datu ieguves pieejām. Pētījuma gaitā ir izstrādātas divas būtiskas inovācijas. Viena no tām ir jauna metode ķermeņa formu raksturojošo punktu 3D koordināšu ieguvei. Piedāvātā pieeja ir balstīta uz stiepjamās struktūrās iestrādātiem orientācijas sensoriem, un tā ļauj noteikt formu raksturojošo punktu koordinātes stiepes un lieces deformācijām pakļautiem ķermeņiem bez papildus sensoriem sensoru savstarpējo attālumu izmaiņu noteikšanai. Ar skaitliskām simulācijām ir pierādīta metodes darbība, novērtēta parametru ietekme uz rekonstrukcijas kļūdu un veikts salīdzinājums ar pieeju, kurā sensori izvietoti uz ķermeņa. Otrā inovācija ir pieeja datu ieguvei ķermeņa sensoru tīklā ar lielu skaitu sagrupētu mezglu. Tā ietver optimizētā vadu izlietojumam piemērotu sistēmas arhitektūru un jaunu vadu saziņas protokolu ar samazinātu datu pārraides virstēriņu zema enerģijas patēriņa mikrokontrolleru interfeisiem kopnes topoloģijā. Lai laboratorijas apstākļos validētu abas piedāvātās pieejas, ir izstrādāts eksperimentālais makets 12 rokas formu raksturojošo punktu rekonstrukcijai no 26 orientācijas sensoru datiem. Eksperimentālā maketa punktu rekonstrukcijas rezultāts dažādām rokas pozām ir salīdzināts ar Optitrack kameru sistēmas noteiktajām marķieru koordinātēm. Eksperimentālā maketa sensoru datu ieguves pieejas novērtēšanai ir analizēti datu ieguvei izmantoto signālu loģisko signālu laika diagrammas. Eksperimentāli un ar simulācijām validējot abas darbā piedāvātās pieejas, ir sniegts novērtējums un rekomendācijas sistēmas dizaina izvēlēm.

ANNOTATION

The thesis is dedicated to investigating novel methodologies for reconstructing body shapes using embedded sensors placed on the body. The aim is to develop a reliable and scalable system of body sensors capable of reconstructing stretchable and bendable shapes. The study encompasses a comprehensive review of existing approaches to body shape reconstruction and data acquisition from a network of body sensors. The research has led to the development of two significant innovations. Firstly, a novel technique for reconstructing the 3D coordinates of points that define the shape has been devised. This approach leverages orientation sensors embedded within elastic structures to reconstruct the coordinates of shape-defining points for objects experiencing stretching and bending deformations, without the need for supplementary sensors to measure alterations of distances between sensors. Numerical simulations have been conducted to validate the proposed method and establish a correlation between structural parameters and the accuracy of shape reconstruction. Furthermore, the simulations are utilized to compare the proposed approach to a conventional method that involves the placement of sensors directly on the body. The second innovation is an approach for data acquisition from a body sensor network with a large number of grouped sensors. This approach comprises an architecture for the optimized use of wires and a new communication protocol with minimized data overhead for low-power microcontroller interfaces in bus topologies. To validate the proposed methods in a laboratory setting, an experimental device with 26 orientation sensors was developed to reconstruct 12 points that define the shape of the arm. The reconstruction results obtained from this experimental device were then compared to those of the Optitrack optical marker tracking system. To evaluate the proposed data acquisition approach using the experimental device, the signals from the data bus were analyzed. Following the validation of the proposed methods through experiments and simulations, an evaluation of design choices was conducted, and recommendations were provided.

SATURS

Saīsinājumi	6
Apzīmējumu saraksts	7
Ievads	9
Tēmas aktualitāte	9
Darba mērķis un uzdevumi	10
Pētījumu metodika	11
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	11
Aizstāvējamās tēzes	12
Darba praktiskais pielietojums un publikācijas	12
Darba struktūra	14
1 Sensoru datu ieguve un ķermeņa formas atjaunošana	15
1.1 Metodes ķermeņa ģeometriskās formas noteikšanai	15
1.2 Inerciālie sensori orientācijas noteikšanai	19
1.3 Komunikācija ķermeņa sensoru tīklos	20
1.4 Mikrokontrolleru komunikācijas interfeisu pārskats	22
I2C	23
UART	24
SPI	26
Kopsavilkums	28
1.5 Secinājumi	29
2 Metode formas noteikšanai ar orientācijas sensoriem struktūrās	31
2.1 Piedāvātās metodes būtība	31
2.2 Piedāvātās metodes īpašības	32
2.3 Speciālgadījums ar zigzag struktūru	35
2.4 Secinājumi	37
3 Piedāvātā pieeja ķermeņa sensoru datu ieguvei	38
3.1 Sistēmas kopējā arhitektūra	38
3.2 Vadu saziņas protokols	39
3.3 Mezglu arhitektūra	44
3.4 Secinājumi	47
4 Simulācijas un eksperimentālie pētījumi	48
4.1 Formas rekonstrukcijas simulācijas	48
4.2 Eksperimentālais makets rokas formas rekonstrukcijai	51
4.3 Komunikācijas protokola novērtējums	54

4.4	Savienojuma punktu rekonstrukcijas precizitātes novērtējums	55
4.5	Secinājumi	59
5	Nobeigums – darba galvenie rezultāti un secinājumi	60
PIELIKUMI		62
1	Sensoru mezgla pilna elektriskā shēma un komponentu sa- raksts	64
2	Retranslācijas mezgla pilna elektriskā shēma	68
3	Sensoru mezgla komunikācijas algoritms	69
4	Sensoru mezglu vedēja komunikācijas algoritms	71
Literatūra		73

SAĪSINĀJUMI

3D Divas dimensijas

2D Trīs dimensijas

ADDR UART adreses bitu kadru konfigurācija

BCC Komunikācija caur cilvēka ķermeni (*body coupled communication*)

BLE *Bluetooth Low Energy*

BT *Bluetooth*

CSV *Comma-Separated Values*

I2C *Inter-Integrated Circuit*

ICP *Iterative Closest Point*

ID *Identifikācijas numurs*

IDLE UART diktāves kadru konfigurācija

IMU Inerciālo sensoru mezgls (*inertial measurement unit*)

ĶST Ķermeņu sensoru tīkls

MCU Mikrokontrollers

MEMS Mikroelektromehāniskā sistēma (*Micro-electromechanical systems*)

PDUPL UART pusdupleksā konfigurācija

Rx Interfeisa uztverošā ieeja

SPI *Serial Peripheral Interface*

Tx Interfeisa raidošā izeja

UART *Universal Asynchronous Receiver-transmitter*

VCC Pozitīvs barošanas spriegums

VQF textitVersatile Quaternion-based Filter

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

α	Leņķis pret horizontālo asi
C	Līnijas punktu kopa
C_{avg}	Līniju vidējā svērtā vērtība
D_{off}	Līnijas nobīdes vektors
R_k	Zigzag līnijas struktūras k segmentu rotācijas matricas
v_k^*	Zigzag līnijas struktūras k segmentu atskaites stāvokļi
v_k	Zigzag līnijas struktūru veidojošie k vektori. Skatīt 2.4. att.
η	Informācijas pārraides efektivitāte
λ	Simulēto zigzag struktūru stiepes koeficients
σ	Standartnovirze
c	Režģa kolonnu indekss
d	Eiklīda attālums
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	Zigzag līnijas struktūru k vektoru garumi
M	Savienojuma punktu skaits
m	Savienojuma punkta kārtas skaitlis
n_d	Datu bināro simbolu skaits vienā komunikācijas kadrā
n_{conn}	Simulēto zigzag struktūru savienojumu punktu skaits
n_{data}	Datu bināro simbolu skaits ziņojumā
n_{nodes}	Kopnei pieslēgto mezglu skaits

N_{rand}	Simulāciju skaits ar nejauši ģenerētām līnijām
n_{sens}	Simulēto zigzag struktūru sensoru skaits
r	Režģa rindu indekss
s	Līnijas garuma parametrs
t_b	Laika intervāls viena binārā simbola pārraidei
$t_{protocols}$	Laika intervāls noteikta bināro simbolu skaita pārraidei ar noteiktu protokolu
u, v	Parametriski uzdotas virsmas parametri
w	Līniju punktu svaru koeficienti

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Daudzpusīgā informācija, kuru varu iegūt, ierakstot un analizējot cilvēka ķermeņa formu un kustības, ir raisījusi strauji augošu pētniecības interesi¹. Cilvēka ķermeņa forma un kustības tiek saistītas ne tikai ar skeleta-muskuļu sistēmas darbību, bet arī ar cilvēka miegu [19], komunikāciju [50] un nervu sistēmas attīstību [20], paverot jaunas iespējas sportā, rehabilitācijā un slimību diagnostikā. Daži no pielietojumiem cilvēka kustību digitālajai rekonstrukcijai ir digitālā satura radīšana, lai radītu dabiskas filmu vai datorspēļu varoņu cilvēciskās kustības, robotizēto sistēmu kustību plānošana, lai apmācītu robotizētas sistēmas veikt kustības kā cilvēkiem, kā arī cilvēka-datora saskarņu izstrāde, lai veidotu intuitīvas dator vadības ierīces. Lai gan ķermeņa sensorus parasti saista ar cilvēka ķermeni, tos var izmantota arī pielietojumiem, kuros sensori tiek likti uz cita veida ķermeņiem, kuriem ir līdzīgas prasības attiecībā uz mobilitāti un neuzkrītošu darbību, piemēram, mīkstās robotikas sistēmās [21], konstrukciju drošības monitoringā [14] un citur.

Ķermeņa formas un kustību noteikšanai ir vairākas pieejas, kuras pēc izmantotā aprīkojuma iedalās divās grupās: metodes, kas izmanot ārējo aprīkojumu (stereo kameras, *LiDAR* sistēmas, skārienjutīgas zondes u.c.) un metodes, kas izmanto pētāmajam ķermenim pieguļošu vai pašā ķermenī iestrādātu aprīkojumu. Pieejas, kas atbilst pirmajai grupai, spēj nodrošināt augstas precizitātes mērījumus, taču tām ir ierobežota darbības zona un to darbību stipri ietekmē apkārtējās vides apstākļi, piemēram, vides redzamība un objektu aizklāšanās. Grūti kontrolējamās vidēs, piemēram, pūlī, pilsētvidē vai dabā, kur vajadzīgos apstākļus nodrošināt bieži vien ir ļoti sarežģīti, ķermeņa kustību rekonstrukcijai piemērotākas ir otrajai grupai piederošas pieejas – mobilas ķermeņa sensoru sistēmas, kas balstītas uz mehānisko deformāciju vai inerciālajiem sensoriem.

Attīstoties materiāliem, uzlabojas mehānisko deformācijas sensoru precizitāte un iestrādājamība apgērbā, taču to izmantošana pielietojumos 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 apgērbā 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 [42], [23].

Pašreizējās metodes ķermeņa formas rekonstrukcijai MEMS sensoriem balstās uz orientācijas mērījumiem, kas iegūti ar MEMS inerciālajiem sensoriem. Taču ar literatūrā apskatītajās pieejās tikai ar orientācijas datiem nav pietiekami, lai noteiktu objektu formu raksturojošās telpiskās koordinātes. Rekonstruējot ģeometrisku objektu formu no tai pie-

¹*SCOPUS* zinātnisko publikāciju datubāzē no 1890. līdz 2021. gadam uz atslēgas vārdiem "human body movements" atrodas vairāk kā 76 tūkstoši dokumenti, kuru skaits ir ļoti strauji pieaudzis tieši pēdējos gados.

guļošu orientācijas sensoru nolasēm, ir jāzina arī orientācijas sensoru savstarpējie attālumi [47]. Speciāli sensori precīzu attālumu noteikšana starp orientācijas nolasīšanas punktiem ievērojami palielina sistēmas izmaksas un izstrādes sarežģītību, tāpēc sistēmām ķermeņa formas noteikšanai attālums starp sensoriem tiek fiksēts un pieņemts nemainīgs [23]. Rezultātā ierīces formas noteikšanai praktiski nepieļauj stiepšanos un piekļaušanās pētītā objekta ģeometriskajai formai ir ierobežota.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izstrādāt efektīvu un mērogojamu ķermeņa sensoru sistēmu, kas būtu piemērota stiepjamu un liecamu formu rekonstrukcijai. Darbā ir aprakstīta jauna pieeja ķermeņa ģeometrisku formu raksturojošu punktu rekonstrukcijai ar orientācijas sensoriem struktūrās, kas 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, tiek piedāvāta arī jauna pieeja efektīvai sensoru datu savākšanai, kas ietver pielāgotu sistēmas arhitektūru un jaunu komunikācijas protokolu.

Mērķa sasniegšanai ir definēti sekojoši uzdevumi:

1. Veikt literatūras analīzi un izpētīt metodes ķermeņa ģeometrisku formu raksturojošu punktu koordināšu noteikšanai ar sensoriem, kas fiziski savienoti ar ķermeni;
2. Izpētīt promocijas darbā piedāvātās metodes pielietojamību ķermeņa ģeometrisku formu raksturojošu koordināšu noteikšanai un salīdzināt to ar citām šobrīd zināmajām metodēm;
3. Veikt literatūras analīzi un izpētīt komunikācijas risinājumus efektīvai datu ieguvei no liela skaita funkcionālie vienādu ķermeņa sensoru mezglu grupām;
4. Izpētīt promocijas darbā piedāvātā komunikācijas risinājuma veikspēju datu ieguvei no ķermeņa sensoru kopas formas rekonstrukcijai ar inerciālajiem sensoriem struktūrās;
5. Izstrādāt eksperimentālo maketu darbā piedāvātās ķermeņa ģeometrisku formu raksturojošu punktu koordināšu noteikšanas metodes un sensoru datu savākšanas metodes eksperimentālai izpētei un sasniedzamo parametru novērtēšanai;
6. Apkopot iegūtos eksperimentālos rezultātus un pārbaudīt hipotēzēs par piedāvātās metodes pielietojamību ķermeņa ģeometrisku formu raksturojošu punktu koordināšu noteikšanai un piedāvātās arhitektūras pielietojamību datu ieguvei no ķermeņa sensoru tīkla ar lielu funkcionāli vienādu mezglu skaitu;

Pētījumu metodika

Lai izpildītu darbā definētos uzdevumus, tiek izmantota sekojoša pētījumu metodoloģija: literatūras analīze, lai gūtu ieskatu par publicētajām materiāliem darba pētniecības problēmas risināšanai; analītiskā modeļošana, lai novērtētu pētīto vadu komunikācijas risinājumu parametru teorētiskās sakarības un robežas; skaitliskās simulācijas, lai pārbaudītu piedāvātās formas rekonstrukcijas metodes 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 objekta ģeometrisku formu raksturojošu punktu koordinātu noteikšanai, izmantojot orientācijas sensorus stiepjamās struktūrās;
2. Izstrādāta un pārbaudīta jauna pieeja ķermeņa sensoru tīkla datu ieguvei no grupām ar lielu skaitu funkcionāliem mezgliem, izmantojot zema enerģijas patēriņa mikrokontrolleros (MCU) izplatītus komunikācijas interfeisus;

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

Eksperimentālajiem pētījumiem ir izstrādāts zigzag struktūras eksperimentālais makets 12 rokas formu raksturojošo punktu noteikšanai. Salīdzinot izstrādāto eksperimentālo maketu rokas formas noteikšanai ar Optitrack™ infrasarkanā kameru sistēmu 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, kuras satur lielu skaitu funkcionāli vienādu mezglu, bet arī barošanu, mezglu nolašu sinhronizāciju, brīvu tīkla mezglu fizisko topoloģiju veidošanu un sistēmas mērogojamību. Turklāt piedāvātā pieeja ir realizējama ar standarta komunikācijas interfeisiem zema enerģijas patēriņa MCU.

Izstrādātajā eksperimentālajā maketā piedāvātā sensoru datu ieguves pieeja ir realizēta ar 3 vadu savienojumu tīklu, pa kuru 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 ar maketā izmantotajiem sensoru mezgliem sensoru nolašu biežumu var palielināt līdz 93 Hz, kas ir $\approx 64\%$ no konkrētā protokola teorētiski maksimālā (144,9 Hz).

Aizstāvāmās tēzes

1. Piedāvātā pieeja ir izmantojama 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 zigzag struktūrās, kas savienotas ar ķermeni noteiktos punktos, ir mazāk atkarīga no ķermeņa formas nekā pieejā ar orientācijas sensoriem uz ķermeņa.
3. Piedāvātais pusdupleksais vadu komunikācijas protokols, samazina ar grupas mezgliem saziņai nepieciešamo virstēriņu proporcionāli sagrupēto mezglu skaitam.

Darba praktiskais pielietojums 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 pārnesei 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 pārnesei 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 saistītus parametrus, piemēram, sekeleto muskulārās 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. Piedāvātā ķermeņa formu raksturojošo punktu rekonstrukcijas metode paver jaunas iespējas izstrādāt realitātei atbalstošākus cilvēka ķermeņa datormodelus, kas ņem vērā ne tikai ķermeņa daļu orientāciju un novietojumu, bet arī plastiskās ķermeņa deformācijas, piemēram, elpošanu. Ņemot vērā darbā piedāvātās ķermeņa formas rekonstrukcijas metodes priekšrocības un potenciālos pielietojumus 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 pielietojama 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 izplatītiem vadu saziņas interfeisiem, līdz ar to mezglu izstrādē neprasa papildus specifiskas komponentes. Ņemot vērā, ka piedāvātā pieeja atvieglo vadu KST izstrādi un integrēšanu apģērbā, 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 4 zinātniskās publikācijas [3], [45], [4], [2]:

1. 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;
2. 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;
3. 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;
4. 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.

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 sensoriem. Attiecīgi 1.2. nodaļā izklāstīti inerciālo sensoru darbības pamatprincipi sensora fiziskās orientācijas noteikšanai. Ņemot vērā, ka detalizētai ķermeņa formas noteikšanai ir nepieciešams liels skaits ar sensoriem, 1.3. nodaļā ir apskatītas literatūrā atrodamās tehnoloģijas ĶST arhitektūrai un sensoru datu ieguvei.

Promocijas darba 2. nodaļā ir piedāvāta un kodolīgi izklāstīta jauna pieeja ķermeņa formas noteikšanai ar inerciālajiem orientācijas sensoriem, kas iestrādāti ķermenim piestiprinātās struktūrās. 2.3. apakšnodaļā konkrētāk ir apskatīts zigzag struktūras gadījums, kā potenciāli piemērotākais pielietojumiem ĶST.

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 ĶST arhitektūru darbību Promocijas darba 4. nodaļas sākumā ir veiktas simulācijas formas rekonstrukcijai ar sintezētiem datiem (4.1. nodaļa). Tālāk seko apraksts izstrādātajam eksperimentālajam maketam rokas formu raksturojošo punktu rekonstrukcijai ar zigzag struktūrās iestrādātiem sensoru mezgliem un eksperimentālais pētījums maketa punktu koordinātu salīdzināšanai ar Optitrack infrasarkanā kameru sistēmu.

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

Darbs satur 4 pielikumus ar eksperimentālā maketa elektriskajām shēmām un programmatūras pseidokodiem, kā arī 52 atsauces uz literatūras avotiem.

1. SENSORU DATU IEGUVE UN ĶERMEŅA FORMAS ATJAUNOŠANA

Daudzpusīgā informācija, kuru varu iegūt, ierakstot un analizējot ķermeņa formu un kustības, ir raisījusi strauji augošu pētniecības interesi, taču, ņemot vērā ķermeņa formu dažādību un prasības elektriskajiem mezgliem, detalizēta ķermeņa formas noteikšana ar ķermenim pieguļošiem sensoriem joprojām ir izaicinājums. Lai identificētu galvenās problēmas, šajā nodaļā ir apskatīti līdzšinējie pētījumi un tehnoloģijas ķermeņa formas noteikšanai ar ķermenim pieguļošiem sensoriem, inerciālo sensoru darbības pamatprincipi sensora telpiskās orientācijas noteikšanai un tehnoloģijas sensoru datu ieguvei no tīkla ar lielu skatu sensoru mezglu.

1.1. Metodes ķermeņa ģeometriskās formas noteikšanai

Ķermeņa formas un kustību noteikšanas pieejas pēc aprīkojuma var iedalīt divās grupās: metodes ar ārējo aprīkojumu (stereo kameras, *LiDAR* sistēmas, skārienjutīgas zondes u.c.) un metodes ar pētāmajam ķermenim pieguļošu vai pašā ķermenī iestrādātu aprīkojumu. Pieejām ar ārējo aprīkojumu ir raksturīga salīdzinoši augsta precizitāte, taču tām ir ierobežota darbības zona un atkarība no apkārtējās vides apstākļiem, piemēram, vides redzamības un objektu aizklāšanās. Līdz ar to apstākļos, kuros nepārtrauktu tiešo redzamību nodrošināti sarežģīti, piemēram, pūlī, pilsētvidē vai dabā, ķermeņa formas un kustību rekonstrukcijai piemērotākas ir otrajai grupai piederošas pieejas – mobilas ķermeņa sensoru sistēmas, kas balstītas uz mehānisko deformāciju sensoriem vai inerciālajiem sensoriem.

Elektromehānisko deformāciju sensoru izgatavošanai valkājamām sistēmām pamatā ir sekojoši deviņi principi: pjezoelektriskie [52], pjezorezistīvie [15], kapacitatīvie [41], triboelektriskie [51] un tranzistīvie [49]. Izmantojot šos principus kombinācijā ar moderniem materiāliem, var izgatavot ātrdarbīgus mehānisko deformāciju sensorus ar mazu svaru, zemu enerģijas patēriņu, augstu jutību un augstu precizitāti. Taču pagaidām to izmantošana pielietojumos ar vidēji lielas un lielas amplitūdas kustībām ir ierobežota, jo sensoriem šajā sektorā ir samazināts jutīgums, vērā ņemama histerēze un mehāniskā nolietošana [24].

Mehānisko deformāciju noteikšanai vēl izmanto arī optiskās šķiedras sensorus, kuru gaismas pārvades īpašības ir atkarīgas no deformācijas, kādai pakļauta optiskā šķiedra. Šī tipa sensoriem unikāla priekšrocība ir tā, ka tos neietekmē ne elektriskie ne magnētiskie traucējumi. Deformāciju noteikšanai ar optiskajām šķiedrām ir vairākas pieejas (interferometrija, laika demēna reflektometrija, difrakcijas gravējumu sensori, intensitātes izmaiņu sensori), no kurām valkājamiem ķermeņa sensoriem piemērotākā ir uz intensitātes izmaiņām balstītā pieeja [12]. Tā ir salīdzinoši lēti un vienkārši īstenojama, taču šiem sensoriem ir zema jutība un mērījumi nav precīzi citu gaismas intensitāti ietekmējošo parametru dēļ [13].

Mobilajās ķermeņa sensoru sistēmās ķermeņa formas un kustību monitoringam, kā alternatīvu mehāniskajiem deformāciju sensoriem izmanto MEMS inerciālos sensorus. Tie ir ļoti kompakti, kas ļauj tos nemanāmi iestrādāt apģērbā vai aksesuāros, un ar tiem iegūtie ķermeņa formas un kustību rekonstrukcijas rezultāti sniedz augstu precizitāti gan statiskām gan dinamiskām kustībām, kas ir salīdzināma ar optisko sistēmu precizitāti [42], [23].

Ķermeņa formas rekonstrukciju no orientācijas sensoru (inerciālo sensoru) datiem sākotnēji ir pētījusi Natālija Sprynski (*Nathalie Sprynski*) [47]. Viņa piedāvāja pieeju līnijas formas atjaunošanai no secīgām līnijas pieskaru orientāciju nolasēm un zināmiem ģeodēziskajiem attālumiem starp šīm nolasēm [36]. Matemātiskais formulējums ir balstīts uz līniju raksturojošās vektoru funkcijas $\mathbf{C}$ parametrizāciju pēc tās garuma $s \in [0, L]$, kur L ir līnijas kopējais garums:

$$\mathbf{C}(s) = \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \\ z(s) \end{bmatrix}. \quad (1.1)$$

Līnijām, kas ir parametriskas pēc līnijas garuma, atvasinājums ir vienības vektors, kuru 2D gadījumā var aprakstīt ar leņķi pret horizontālo asi $\alpha \in [0, 2\pi)$:

$$\mathbf{C}'(s) = \begin{bmatrix} \cos \alpha(s) \\ \sin \alpha(s) \end{bmatrix}. \quad (1.2)$$

Līdz ar to problēmu 2D līnijas rekonstrukcijai no orientācijas sensoru datiem var formulēt sekojoši: ja ir dotas K leņķa funkcijas nolases $\alpha_k = \alpha(s_k)$ un atbilstošās līnijas parametra vērtības s_k , kur $k = 1, 2, \dots, K$ (skatīt 1.1. att.), atrast līniju $\mathbf{C}(s)$, kurai izpildās sakarība $\mathbf{C}'(s_k) = [\cos \alpha_k, \sin \alpha_k]^\top$.

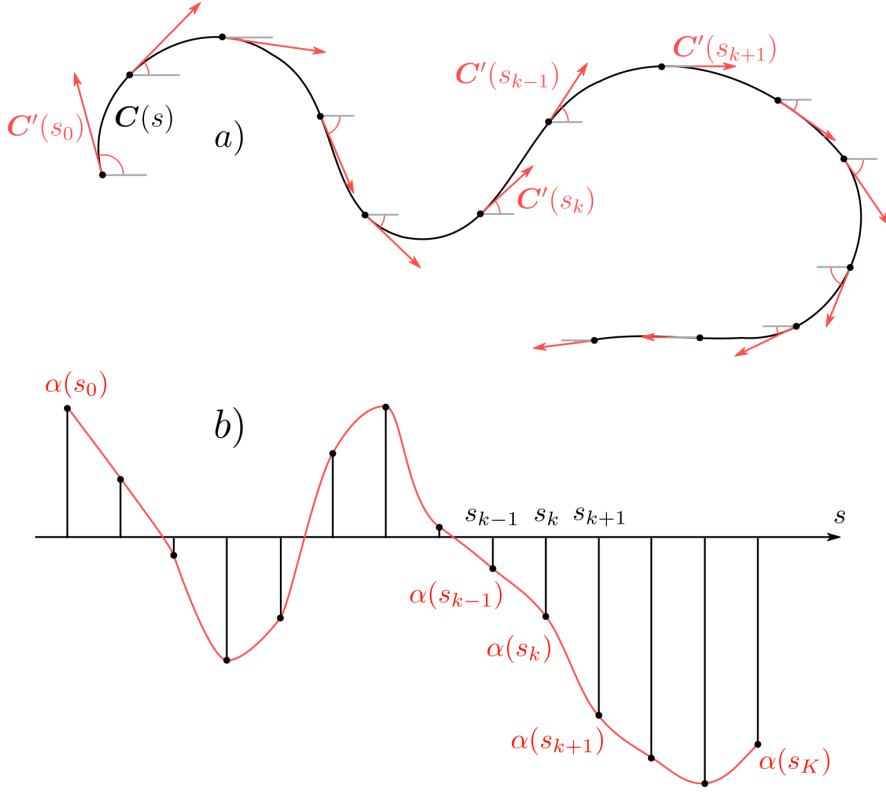
N. Sprynski piedāvāja to risināt, interpolējot leņķa funkcijas nolases ar kubiskajiem splineiem, un rekonstruēt līniju $\mathbf{C}(s)$, skaitliski integrējot iegūtās atvasinājuma funkcijas komponentes:

$$\mathbf{C}(s) = \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \int_0^s \cos \alpha(t) dt \\ y_0 + \int_0^s \sin \alpha(t) dt \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

kur x_0 un y_0 ir rekonstrukcijas sākuma koordinātes.

Piedāvāto pieeju var paplašināt uz 3D līnijām, pieskari uzdodot sfēriskajās koordinātēs un attiecīgi interpolējot abas leņķa funkcijas. Taču labākus rezultātus iegūst, interpolējot splineus uz vienības sfēras, izmantojot modificētu *De Casteljau* algoritmu, un aizstājot lineāro interpolāciju ar sfērisko lineāro interpolāciju [46], [38].

Metodes līniju atjaunošanai no pieskaru orientācijas nolasēm izmanto skaitlisko integrēšanu, lai iegūtu līnijas 2D un 3D koordinātes no pieskaru aproksimācijas. Huards *et al.*



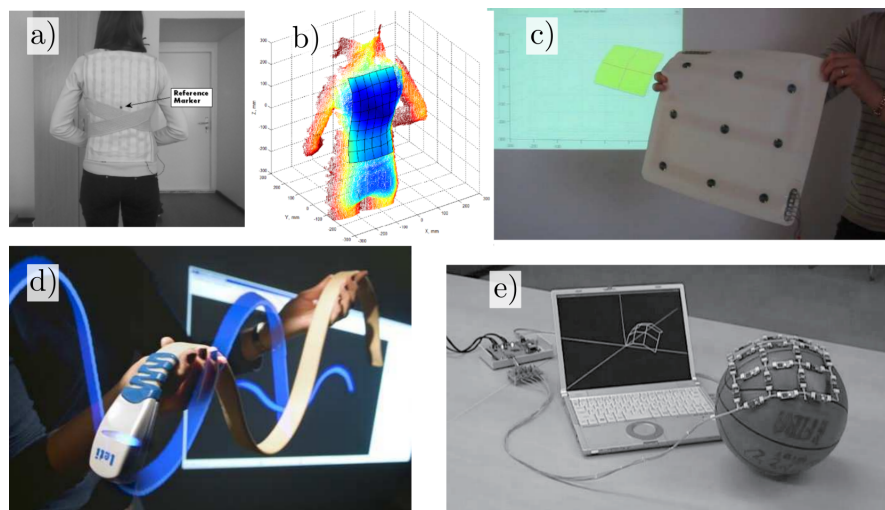
1.1. att. Līnijas rekonstrukcijas no sensoru datiem ilustrācija: a) līnija un līnijas atvasinājuma vektori diskrētos punktos s_k ; b) leņķa funkcija $\alpha(s)$, kura tiek rekonstruēta no diskrētām α_k nolasēm, kas atbilst līnijas atvasinājuma vektoru leņķim ar horizontālo asi.

[26] piedāvāja alternatīvu pieeju, kas balstīta uz Pitagora-hodogrāfa piektās kārtas polinomu splainiem. Šī pieeja ļauj rekonstruēt līnijas formas analītiskā veidā, taču, salīdzinot ar skaitliskās integrēšanas metodēm, tas prasa ievērojami vairāk skaitļošanas resursu.

N. Sprinski piedāvāja arī pieejas virsmas rekonstrukcijai no sensoru datiem, kas ļauj noteikt formu divām grupām ar paralēlām līnijām, kuras ir savstarpēji ortogonālas [47]. Šādu līniju grupas sadala virsmu četrstūrveida reģionos, kuru modelēšanai izmanto Kūna ielāpus (*Coons patch*). Taču pieeja ir ierobežojoša attiecībā pret līniju izvietojumu, kam ir jāpievērš īpaša uzmanība, ja līnijas tiek rekonstruētas individuāli. Huards *et al.* [27] piedāvāja risinājumu šim ierobežojumam ar alternatīvu pieeju kvazi-izklājamām (*quasi developable*) virsmām, kas veidotas no daudzšķautņņu ielāpiem, kuru robežlīknes iegūtas ar inerciālajiem sensoriem.

Balstoties uz šīm objektu formas rekonstrukcijas pieejām ir izstrādātas vairāki prototipi formas noteikšanai (1.2. att.). T. Hoshi *et al.* [25] pirmie prezentēja algoritmu un ierīci "3DCS" 3D objektu formas noteikšanai, izmantojot pieguļošu režģi ar segmen-

tiem, kuros iestrādāti inerciālie sensori. A. Hermanis [23] piedāvāja sistēmas arhitektūru un pielāgotu virsmas rekonstrukcijas algoritmu pielietojumiem mobilaajās kiberfizikālajās sistēmās ar ierobežotiem skaitļošanas resursiem. Viņa piedāvā pieeja ļauj efektīvi savākt sensoru datus no virtenēm ar lielu sensoru skaitu un veikt virsmas rekonstrukciju reālajā laikā, izmantojot mobilās skaitļošanas ierīces, piemēram, klēpj datorus, mobilos telefonus un planšētdatorus.



1.2. att. Daži no demonstrātoriem objekta formas noteikšanai ar inerciālajiem sensoriem: a) formu jutīgs audums cilvēka ķermeņa formas noteikšanai ar iestrādātiem 63 paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoriem un b) formu jutīgā auduma rekonstrukcijas rezultāts salīdzināts ar Microsoft Kinect V2 (pārpublicēts no [23]), c) formu jutīgs audums "Morphoshape" ar iestrādātiem 9 paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoriem virsmas rekonstrukcijai (pārpublicēts no [35]), d) formu jutīga lenta "Morphosense" ar integrētiem paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoriem (pārpublicēts no [47]), e) formu jutīgs režģis no paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoriem (pārpublicēts no [25]).

T. Stanko [48] ir pētījis pieejas virsmas rekonstrukcijai no orientācijas sensoru datiem, tās adaptējot virsmas reprezentācijām ar tīklojumu. Viņš pretēji vairumam līdzgājēju datu ievākšanai izmanto dinamisku ierīci ar vienu inerciālo sensoru, kura tiek bīdīta pa nosakāmo virsmu. Savā darbā viņš piedāvā jaunu, efektīvu pieeju gludu līniju tīklu ieguvei no trokšņainiem un neprecīziem orientācijas datiem un jaunu virsmas tīklojuma rekonstrukcijas metodi, izmantojot iegūtos gludos līniju tīklus.

Līdzšinējos pētījumos izstrādātie prototipi objektu formas rekonstrukcijai, izmantojot inerciālos un magnētiskos sensorus, ir apkopoti 1.1. tabulā. To struktūras ir lokanas un spēj piekļauties objektiem, lai veiktu gan līniju, gan virsmu rekonstrukciju, taču sensoru savstarpējie attālumi visos prototipos ir nofiksēti. Tas ierobežo tehnoloģiju pielietošanu

Apkopojums ierīcēm objektu formas rekonstrukcijai, izmantojot inerciālos un magnētiskos sensorus.

Ierīce	Sensoru savstarpējais novietojums	Struktūra
Ierīce mugurkaula formas noteikšanai [5]	Fiksēts	Lenta
"Morphosense" [36]	Fiksēts	Lenta
"Morphopipe" [44]	Fiksēts	Lenta
"Morphoshape" [35]	Fiksēts	Režģis
3DCS [25]	Fiksēts	Režģis
Formu jutīgs audums [1]	Fiksēts	Režģis

stiepes deformētu formu noteikšanai, piemēram, iestrādājot sensorus stiepjāmā, pieguļošā apgērbā. Teorētiski var izmantot speciālus sensorus, kas to nosaka nepārtraukti, taču tādu sistēmu piemēri, kuros izmantoti gan inerciālie sensori orientācijas noteikšanai, gan sensori inerciālo sensoru savstarpējā attāluma noteikšanai, literatūrā atrasti netika.

1.2. Inerciālie sensori orientācijas noteikšanai

Orientācijas noteikšanai tiek lietoti MEMS akselerometri, žiroskopi, magnetometri un dažādas šo sensoru kombinācijas atkarībā no pielietojuma specifiskām prasībām.

Ar akselerometriem nosaka objektu paātrinājumu sensora korpusa atskaites sistēmā, kuru veido noteikts skaits jutīgo asu. Atkarībā no pielietojuma izmanto vienu, divas vai trīs perpendikulāras asis, kuras veido ortogonālu, Zemes brīvās krišanas paātrinājuma vienībās "g" graduētu koordinātu sistēmu. Kā zināms, Zemes brīvās krišanas paātrinājums jūras līmeņa augstumā ir $9,81m/s^2$, līdz ar to $[g] = 9,81m/s^2$, taču ir vērts paturēt prātā, ka to var ietekmēt dažādas Zemes gravitācijas anomālijas.

Akselerometrus izmanto gan dinamiskā, gan statiskā paātrinājuma mērīšanai, un vispārīgā gadījumā tie uzrāda šo abu paātrinājumu vektoru summu. Izdalot dinamisko paātrinājumu, var izdarīt secinājumus par objekta kustībām - ne tikai par paātrinājumu, bet arī par ātrumu un pārvietojumu. Taču jāņem vērā, ka, integrējot paātrinājuma signālu, uzkrājas mērījumu kļūda un ar laiku rezultāts arvien attālinās no patiesās vērtības. Īpaši izteikti tas ir pārvietojuma noteikšanai, jo tajā paātrinājuma mērījumu integrēšana jāveic divreiz. Atrodoties statiskā stāvoklī dinamiskās komponentes nav, un uz akselerometra asīm ir nolasāmas Zemes gravitācijas vektora projekcijas. Gravitācijas vektors uz Zemes ir praktiski nemainīgs un vienmēr ir vērsts uz Zemes centru, līdz ar to akselerometru statiskā stāvoklī var izmantot sagāšanās leņķa noteikšanai, taču jāņem vērā, ka akselerometrs nevar noteikt orientācijas izmaiņu ap vertikālo asi, jo tad gravitācijas vektora projekcijas uz sensora asīm nemainās.

MEMS tehnoloģijas žiroskopu darbība balstās uz Korialisa spēku un vibrējoša struktūras tieksmi saglabāt nemainīgu svārstību plakni pat, ja atbalsts rotē. Žiroskopi mēra

objektu rotācijas leņķisko ātrumu ap noteiktām rotācijas asīm. To izmanto dažādās inerciālajās navigācijas sistēmās, piemēram, lai papildinātu vai aizvietotu magnētiskos kompasus, un ļoti augstas precizitātes žiroskopus izmanto tuneļu rakšanā, lai noteiktu rakšanas virzienu. Ikdienā ar žiroskopiem var sastapties, piemēram, digitālajās kamerās, kurās tos izmanto attēla stabilizācijai, un automašīnu elektroniskajās drošības sistēmās. Pagrieziena leņķis laika momentā ir atkarīgs no leņķiskā ātruma integrāļa, taču, tā kā MEMS žiroskopu struktūrām ir ievērojams gan ātri mainīgs gadījuma dreifs, gan lēni mainīgs temperatūras dreifs, līdzīgi kā ar akselerometriem, jāreķinās, ka integrēšanas rezultātā aprēķinātajiem leņķiem būs ar laiku pieaugoša nobīde.

Lai gan gan akselerometrus, gan žiroskopus atsevišķi var izmantot orientācijas noteikšanai, robustākai orientācijas un kustību noteikšanai tos bieži izmanto kopā, veidojot inerciālo sensoru mezglus (IMU), jo žiroskopu mērījumi palīdz no akselerometra datiem atdalīt dinamiskā paātrinājuma komponenti, rezultātā ļaujot iegūt precīzāku orientācijas novērtējumu gan statiskā gan dinamiskā stāvoklī. Papildus tam IMU bieži kombinē ar sensoriem magnētiskā lauka stipruma un virziena mērījumiem, lai noteiktu Zemes magnētiskā lauka virzienu un iegūtu sensoru pilnu orientāciju Zemes atskaites sistēmā. Taču, izmantojot magnētiskā lauka sensorus, jāņem vērā, ka to mērījumus stipri ietekmē magnētiski un feromagnētiski objekti, piemēram, dzels.

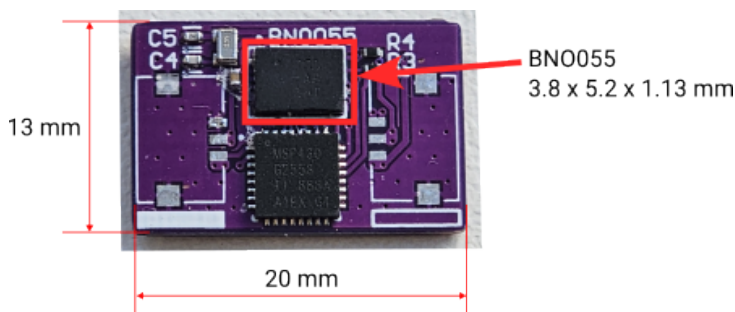
Orientācijas noteikšana ar IMU ir kļuvusi par fundamentālu sastāvdaļu inerciālajā kustību analizē, līdz ar to ir izstrādāts liels apjoms ar pieejām IMU orientācijas noteikšanas problēmu risināšanai, no kurām liela daļa ir apkopota un analizēta literatūras pārskatos [37], [10]. Cik zināms, no literatūrā aprakstītajiem algoritmiem IMU datu sapludināšanai un orientācijas noteikšanai, uz doto brīdi salīdzinoši vislabākos rezultātus sniedz VQF (*Versatile Quaternion-based Filter*) algoritms, ar kuru noteiktās orientācijas vidējā kvadrātiskā kļūda ir gandrīz divas reizes mazāka, kā alternatīvām [29].

Pielietojumiem orientācijas noteikšanai ir pieejami 9 asu IMU ar iegūtiem datu sapludināšanas algoritmiem, no kuriem var iegūt ne tikai filtrētus un kalibrētus sensoru datus, bet arī sensora absolūto orientāciju. Viens no šādu sensoru piemēriem integrālā čipa izpildījumā ir *BNO055* [?], kura izmēri ir parādīti 1.3. attēlā.

1.3. Komunikācija ķermeņa sensoru tīklos

ĶST un sensoru tīklu funkcijas daļēji pārklājs, taču ĶST ir vairākas specifiskas īpašības, kuru dēļ sensoru tīklu tehnoloģijas nav efektīvas. ĶST ir jāņem vērā bioloģiskā saderība ar cilvēka ķermeni, vides mainīgums, valkāšanas ērtums, zems enerģijas patēriņš, datu drošība un citi faktori, tai pašā laikā saglabājot tīkla spēju pielāgoties apstākļiem, augstu datu pārraides ātrumu un minimālas aiztures.

Līdz ar elektronisko komponentu attīstību un miniaturizāciju iespējas uz ķermeņa izvietot vairāk sensorus pieaug. Bet, lai gan komunikācijai ar atsevišķiem ķermeņa sensoriem tehnoloģijas ir labi attīstītas (*Bluetooth* (BT), *Bluetooth Low Energy* (BLE), *WiFi*, *ZigBee*.), tehnoloģijas datu ievākšana no liela skaita ķermeņa sensoru vēl nav pietiekami



1.3. att. *BNO055* sensora mezgls promocijas darbā izstrādātajam eksperimentālajam maketam, kas aprakstīts 4.2. nodaļā. Satur trīs asu akselerometru, trīs asu žiroskopu, trīs asu magnetometru un ARM Cortex-M0 mikrokontrolleri.

attīstītas.

Viens no vissvarīgākajiem kritērijiem ķermeņa sensoru tīklu tehnoloģijās ir kustību brīvība un lietošanas ērtums. Un, tā kā valkājamo vadu izgatavošana pati par sevi ir izaicinājums, faktiski gandrīz vienmēr ķermeņa sensoru tīklus saista ar bezvadu sensoru tehnoloģijām, kas informāciju pārraida pa gaisu.

Līdzšinējās KST tehnoloģijās dominē zvaigznes topoloģijas ar bezvadu savienojumiem starp datu savākšanas mezglu un vairākiem sensoru mezgliem, kas pēc izvēles var kalpot kā vienas pakāpes starpnieki ar attālākiem mezgliem. Šādu KST topoloģiju nosaka arī vienīgas oficiālais bezvadu KST standarts: IEEE 802.15.6 (*IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.6: Wireless Body Area Networks IEEE*). Standarts paredz bezvadu komunikāciju ar ierīcēm cilvēka ķermeņa iekšienē vai tā ciešā tuvumā, kā fizisko datu pārraides vidi izmantojot gan gaisu, gan paša cilvēka ķermeni.

IEEE 802.15.6 komunikācija pa gaisu daudz pētīta literatūras avotos ², kur tai ir piedāvāti vairāki uzlabojumi gan komunikācijas drošumam, gan ātrumam, gan energoefektivitātei. Par spīti akadēmiskajai interesei praksē komunikācijai ar bezvadu ķermeņa sensoriem un KST mezgliem biežāk tiek izmantoti ražotāju specifiski risinājumi vai BLE protokols, kas ir plaši atbalstīts personālajās mobilajās iekārtās: klēpj datoros, planšetdatoros un viedtālrunos.

BLE ir bezvadu tehnoloģija, kura izstrādāta, lai nodrošinātu zema enerģijas patēriņa bezvadu savienojumu ierīcēm nelielā attālumā. Kā jau nosaukums vedina domāt, viena no svarīgākajām šī protokola īpašībām ir zemais enerģijas patēriņš, taču ne tikai tas padara šo protokolu pievilcīgu KST pielietojumiem. BLE ir plašs un elastīgs satvars datu apmaiņai, turklāt protokolu atbalsta liels skaits personālo mobilo ierīču, kas ir ļāvis attīstīties milzīgam tirgum ar inovatīviem zema enerģijas patēriņa un specifiska pielietojuma produktiem. Jau neilgi pēc BLE specifikācijas iznākšanas 2010 gadā tā tika atzīta par

²Periodā no 2019. līdz 2022. gadam *SCOPUS* datubāzē atrodami 914 raksti uz atslēgas frāzi "IEEE 802.15.6".

vienu no būtiskākajiem virzītājspēkiem KST attīstībā [11].

IEEE 802.15.6 paredz arī, ka kā komunikācijas kanālu var izmantot pašu cilvēka ķermeni. Komunikācija caur cilvēka ķermeni (BCC) sniedz vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar komunikāciju caur gaisu, piemēram, privātums un potenciāli arī datu pārraides energoefektivitāte. Pašlaik, salīdzinot ar bezvadu un vadu komunikācijas risinājumiem, BCC ir agrīnā attīstības stadijā, kas tiek aktīvi pētīta [40], [32], [33], taču kā saziņas tehnoloģija KST vēl tiek reti lietota.

Bezvadu ķermeņa sensoru mezglu izmantošanai ir vairāki izaicinājumi: raidītāju un uztvērēju elektriskās ķēdes sarežģī mezglu izstrādi, katram mezglam ir nepieciešama baterija vai mehānismi enerģijas iegūšanai no apkārtējās vides (vibrācijas, siltums, saules gaismā), ierobežotā frekvenču josla ir jādala ar citām ierīcēm (*WiFi*, BT), kas bieži vien pasliktina sistēmas veiktspēju, turklāt informāciju, kas tiek pārraidīta pa gaisu, ir vieglāk pārtvert, radot potenciālus draudus datu drošībai.

Bezvadu tehnoloģiju izaicinājums KST potenciāli varētu risināt ar vadu komunikācijas pieejām. Tā kā attālumi starp mezgliem uz cilvēka ķermeņa nav lieli ($< 3\text{m}$), vadu savienojumi potenciāli nodrošina energoefektīvus (ar salīdzinoši maz zudumiem), ātrus un drošus komunikācijas kanālus. Vadu savienojumi un *Inter-Integrated Circuit* (I2C) protokols ir izmantoti saziņai ar ķermenim pieguļošiem sensoru mezgliem vairākos ķermeņa formas noteikšanai paredzētos prototipos [25], [5]. Hermanis *et al.* [22] piedāvā uzlabotu *Inter-Integrated Circuit* SPI ziedlapiņķēdes protokolu (*Enhanced SPI Daisy Chain*), kas ir modificēts, lai samazinātu vadu skaitu un nodrošinātu pieslēgto mezglu sinhronu nolasīšanu. Piedāvātais protokols nodrošina efektīvu, centralizētu datu savākšanu no sensoru virtenēm ar vairāk 100 mezgliem ar biežumu vismaz 50 Hz.

1.4. Mikrokontrolleru komunikācijas interfeisu pārskats

Šajā nodaļā tiks apskatīti un salīdzināti trīs galvenie MCU vadu interfeisi: I2C, *Universal asynchronous receiver-transmitter* (UART) un SPI. Šie interfeisi, lai gan labi zināmi iegulto sistēmu izstrādātājiem, ir maz pētīti pielietojumiem, kuros jānodrošina saziņa starp lielu mezglu skaitu, piemēram, KST. Tā kā KST ir svarīgi nodrošināt energoefektīvu, lietotājam nemanāmu un ātru reāllaika datu pārraidi ķermeņa robežās, īpaša uzmanība tiks pievērsta tīklu topoloģiju vadu daudzumam, vadu savienojumu prasībām, datu pārraides ātrumam un efektivitātei.

Interfeisu salīdzināšanai tiks sastādītas analītiskas izteiksmes informācijas pārraides efektivitātes η novērtēšanai:

$$\eta = \frac{t_b \cdot n_{data}}{t_{protokols}} = \frac{n_{data}}{t_{protokols} \cdot f_b}, \quad (1.4)$$

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

t_b – viena simbola pārraides laiks,

f_b – interfeisa simbolu ātrums. s

I2C

I2C fiziskais slānis ir sinhrona, pusduplekša virknes kopne ar divām vienpolārām līnijām: datu un takts. Standarta režīmā I2C atbalsta simbolu pārraides ātrumus līdz 100 kBd/s (kilobodi sekundē), bet ar paplašinājumiem - līdz 400 kBd/s ("*Fast Mode*"), 1 MBd/s ("*Fast Mode Plus*"), 3,4 MBd/s ("*High-speed Mode*") un pat 5 MBd/s ("*Ultra-fast mode*") [39]. Lai gan augstāki simbolu pārraides ātrumi ir vēlami reāllaika pielietojumiem, pašlaik lielākā daļa ierīču (MCU un sensoru) atbalsta tikai standarta un ātro režīmu līdz 400 kBd/s. Signāli uz I2C līnijām tiek kodēti, izmantojot atvērtā kolektora vai atvērtās noteces izejas pakāpes (izņemot "*Ultra-fast*" režīmu), kurām simbolu pārraides ātrumu stipri ierobežo pievilkšanas rezistoru vērtība, kas atkarīga no vadības tranzistoru jaudas un kopnes parazītiskajiem parametriem – pretestība, induktivitāte un kapacitāte. Līnijām ar labu vadītspēju izteikta ir tieši kapacitātes un induktivitātes ietekme, kas atkarīga no kopnei pieslēgto ierīču skaita un kopnes vadītāju garuma. I2C specifikācija nosaka maksimālo līnijas kapacitātes robežu 400 pF un 550 pF ("*Fast plus mode*"), taču to iespējams palielināt uz kopnes takts frekvences rēķina [39].

I2C interfeisa ziņojumu protokola adresācija paredz iespēju kopnei pieslēgt līdz 112 (7 bitu) vai 1024 (10 bitu) ierīcēm. Kā parādīts 1.4. attēlā, I2C protokols pamatā definē trīs datu apmaiņas formātus:

- kontrolieris raida uz mērķa ierīci,
- kontrolieris nolasa mērķa ierīci,
- kombinētais formāts.

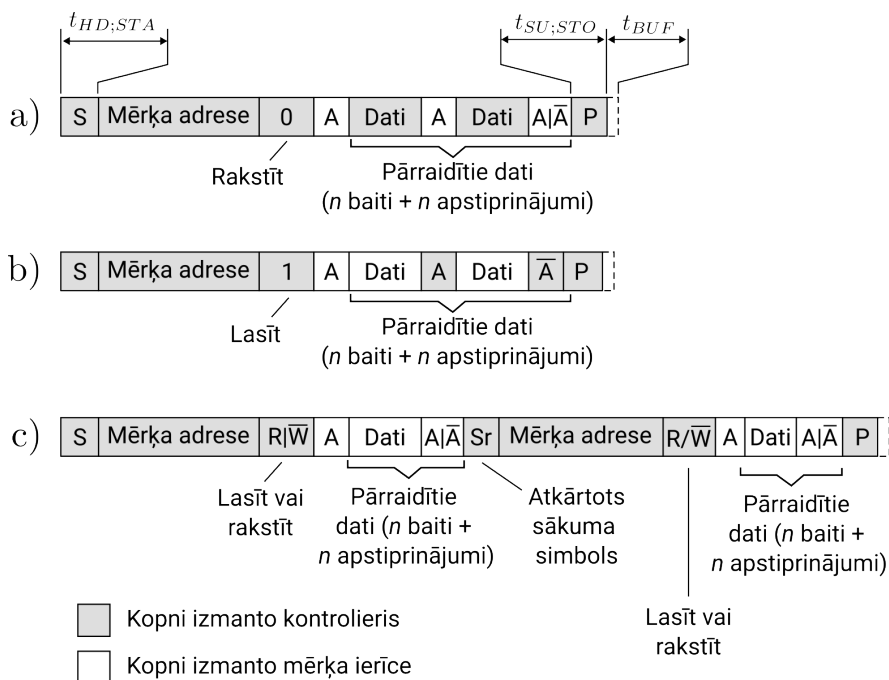
No I2C signālu specifikācijas "*Fast Mode*" un "*Fast Mode Plus*" režīmiem [39], kontroliera raidīšanas un nolasīšanas datu apmaiņas procedūrām laiks n_{data} datu simbolu pārraidei izriet sekojošs:

$$\begin{aligned}
 \min\{t_{HD;STA}\} &= 0,6 \mu s, \\
 \min\{t_{HD;STO}\} &= 0,6 \mu s, \\
 \min\{t_{BUF}\} &= 1,3 \mu s, \\
 t_{I2C} &= t_{HD;STA} + (9 + 1,25 \cdot n_{data})/f_b + t_{SU;STO} + t_{BUF} \geq \\
 &\geq (9 + 1,25 \cdot n_{data})/f_b + 2,5 \cdot 10^{-9}.
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

Attiecīgi ievietojot 1.4. formulā, I2C protokola efektivitāte pamata datu apmaiņas procedūrām ir:

$$\eta_{i2c} = \frac{n_{data}}{t_{i2c} \cdot f_b} = \frac{n_{data}}{9 + 1,25 \cdot n_{data} + 2,5 \cdot 10^{-9} f_b}. \tag{1.6}$$

I2C vairākos avotos tiek izmantots risinājumos, lai ar vadiem savienotu apgērbā iestrādātus elektroniskos mezglus [5], [25], [43], [34]. Avotā [43] tiek prezentēts prototips, kas komunikācijai starp mezgliem izmanto I2C interfeisu. Kā galvenās priekšrocības tiek minētas: plašā lietojamība industrijā (integrēts mikrokontrolleros un sensoros), ērta mezglu pieslēgšana un atslēgšana, mazais vadu daudzums savienojumu nodrošināšanai. Kā



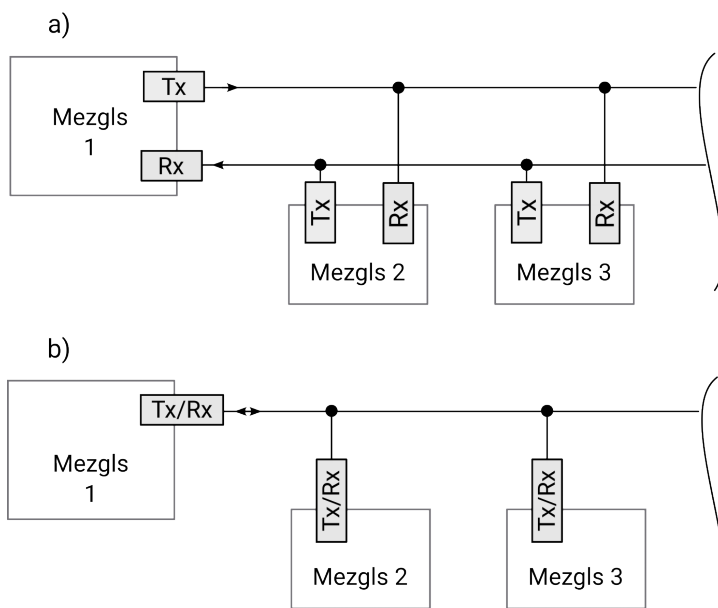
1.4. att. I2C pamata datu apmaiņas formāti: a) kontrolieris raida uz mērķa ierīci, b) kontrolieris nolasa mērķa ierīci, c) kombinētais formāts. A – apstiprinājuma simbols, $\bar{A}$ – neapstiprinājuma simbols, S – sākuma simbols, Sr – atkārtots sākuma simbols, P – beigu simbols.

izaicinājumi - ierobežotais pieļaujamais kopnes garums, adresācijas konflikti un mezglu pielikšana/noņemšana sistēmas darbības laikā. Rezultātos ir aprakstītas daudzsološas atsauksmes un komentāri no prototipa demonstrācijām, bet nav novērtētas arhitektūras veiktspējas robežas. Avotā [34], uz ķermeņa izvietotu IMU nolasīšanai tiek izmantota I2C kaskādes pieeja. Rezultātā uz katru sensoru mezglu nav nepieciešams atsevišķs mikrokontrollers, līdz ar to sensoru mezgli ir energoefektīvāki, ar mazāku svaru un mazākām materiālu izmaksām. Trūkums ir sensoru skaita ierobežojums: izstrādātā sistēma ļauj nolasīt tikai līdz 8 vienādiem sensoru mezgliem uz vienas I2C kopnes.

UART

UART (no a. v. "Universal Asynchronous Receiver-Transmitter") ir elektronisks bloks asinhronas virknes komunikācijas nodrošināšanai. Lai gan termins UART attiecas tikai uz digitālajām raidīšanas un uztveršanas ķēdēm, bieži vien ar to mēdz apzīmēt visu asinhrono virknes komunikācijas metodi un līnijas kodēšanas secības. UART komunikācijas fiziskais slānis ir divas vienpolāras datu līnijas: uztverošā (Rx) un raidošā (Tx), kuras var izmantot gan simpleksai, gan pusdupleksai, gan dupleksai komunikācijai starp vairākiem mezgliem

(1.5. att.). Papildus savienojumus priekš fiziskās datu plūsmas vadības (*clear to send*, *request to send*), taču to lietošana ir pēc izvēles. Signāli abās līnijās tiek kodēti, izmantojot divtaktu tranzistoru izejas, kas nodrošina ātru pārslēgšanos starp signālu loģiskajiem līmeņiem. Simbolu pārraides ātruma robežas šim protokolam nav noteiktas, vienīgais nosacījums ir, ka simbolu pārraides ātrumam ir jābūt vienādam starp komunicējošajām ierīcēm. Tipiski pārraides ātrumi ir 460800 Bd/s, 115200 Bd/s, 9600 Bd/s. Lai gan ar UART apzīmē universālu asinhronās komunikācijas bloku, MCU tiek atbalstīts visai ierobežotas asinhronās komunikācijas konfigurācijas: var izvēlēties starp vienu vai diviem start/stop bitiem, vienu vai nevienu paritātes bitu, no 5 līdz 8 datu bitiem.



1.5. att. UART interfeisa tīkla topoloģijas: a) dubleksā topoloģija; b) pusdubleksā topoloģija

UART kadru kodēšanas formāts ir parādīts 1.6. att. Kadrs sastāv no vismaz viena sākuma simbola (ST), n_d datu simboliem, paritātes simbola (PB) un beigu simbola (SP).
 b

1	5-8	0-1	1-2
ST	Datu biti	PB	SP

1.6. att. UART komunikācijas kadra formāts

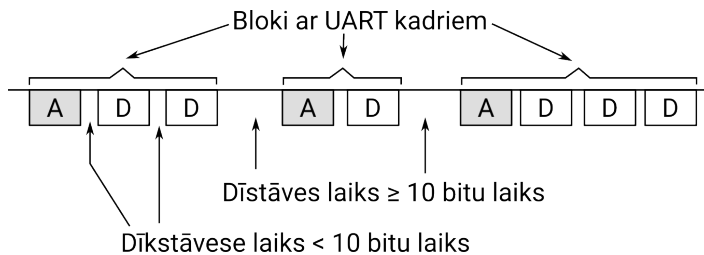
Asinhronai komunikācijai starp vairāk kā diviem mezgliem vairākos MCU ir integrēti datu slāņi ar daudz-procesoru pakešu formātiem: dīkstāves kadri un adreses biti. Funkcionālais izpildījums var atšķirties dažādiem MCU, taču pamatprincips ir vienāds.

Dīkstāves kadru formātā (1.7. att.) izmanto datu blokus, kuriem pirmais kadrs satur ierīces adresi, kurai sekojošais ziņojums ir domāts. Datu bloki tiek atdalīti dīkstāves (IDLE) kadriem, kuru garums ir atkarīgs no izmantotā simbolu pārraides ātruma. MSP430 MCU IDLE kadrs sastāv no 10 vieninieka simboliem pēc stop signāla. Pieņemot, ka kadra datu bitu daudzums ir $n_d = 8$, stop bitu daudzums ir 1 un netiek lietots paritātes bits, ar šādu kadru formātu un n_{data} datu simbolu bloka pārraides laiks vienam mezglam ir:

$$t_{uart_idle} = (20 + 1,25 \cdot n_{data}) / f_b \quad (1.7)$$

Līdz ar to efektivitāte šādai komunikācijai ir:

$$\eta_{uart_idle} = \frac{n_{data}}{20 + 1,25 \cdot n_{data}}. \quad (1.8)$$



1.7. att. UART dīkstāves kadru formāts

Izmantojot adreses bitus, IDLE kadram starp UART kadri nav īpašas nozīmes, bet, lai atšķirtu adreses no datiem, katram UART komunikācijas kadram tiek pievienots papildus bits. Līdzīgi, kā dīkstāves kadru formātā, pieņemot, ka kadra datu bitu daudzums ir $n_d = 8$, stop bitu daudzums ir 1 un netiek lietots paritātes bits, ar adrešu kadra formātā n_{data} datu simbolu bloku nolasīšanas laiks vienam mezglam ir:

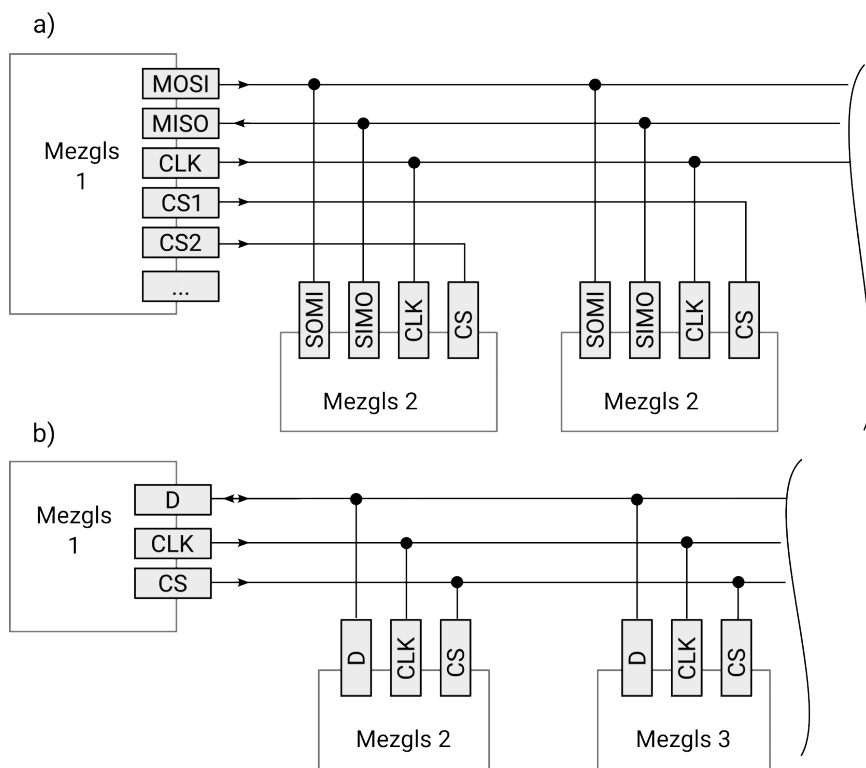
$$t_{uart_addr} = (11 + 1,375 \cdot n_{data}) / f_b. \quad (1.9)$$

Un efektivitāte:

$$\eta_{uart_addr} = \frac{n_{data}}{11 + 1,375 \cdot n_{data}}. \quad (1.10)$$

SPI

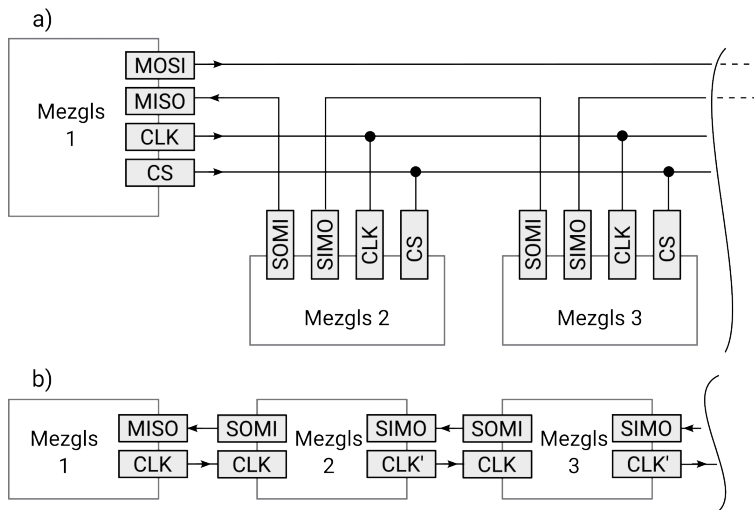
SPI ir sinhrons virknes komunikācijas interfeiss, kurš komunikācijai izmanto kopni ar 4 vienpolārām līnijām (MISO, MOSI, CLK, CS). Signāli uz līnijām tiek kodēti, izmantojot divtaktu tranzistoru izejas, kas līdzīgi kā UART nodrošina salīdzinoši ātru pārslēgšanos starp loģiskajiem līmeņiem. SPI ierīcēm ir raksturīga vedējsekotājsistēmas arhitektūra ar vienu vedēju un vienu vai vairākiem sekotājiem. 1.8a. att. ir parādītas SPI interfeisa pamata konfigurācijas.



1.8. att. SPI interfeisa topoloģijas: a) pilnduplekss; b) pusduplekss.

SPI kopne salīdzinoši ir visātrākā no trim, un tās adresācija ar CS līniju nerada nekādu datu virstēriņu, taču potenciāli lielā vadu skaita dēļ tīklos ar lielu sensoru skaitu šī konfigurācija netiek lietota. Lielākam sensoru skaitam piemērotākas ir SPI ziedlapiņķēdes topoloģijas (1.9. att.). Klasiskajā ziedlapiņķēdes pieejā uz visiem mezgliem ir viena CS līnija, kas vadu skaitu reducē uz 4. Autoru [22] piedāvātais modificēts SPI ziedlapiņķēdes slēgums sensoru datu nolasīšanai minimizē SPI komunikācijai izmantoto vadu skaitu vēl vairāk (1.9b. att.), ļaujot caur 2 vadu savienojumiem iegūt datus no teorētiski neierobežota daudzuma sensoru ar minimālu energopatēriņu un datu virstēriņu. Papildus tam ir atrisināta sensoru nolašu sinhronizācija, un pieļaujamais augstais bitu ātrums ir piemērots reāllaika sistēmām ar minimālām aizturēm. Datu ieguves protokola galvenie trūkumi ir: 1) sensorus var slēgt tikai virknē, līdz ar to sensoru savienošana uz sarežģītākām formām varētu būt neefektīva no vadu trasēšanas viedokļa, un katrs līnijas bojājums atslēdz mezglus, kas ir aiz bojājuma 2) komunikācija notiek tikai vienā virzienā (simplekss) 3) risinājums nav piemērots heterogēniem sensoru tīkliem, jo visi sensori tiek nolasīti ar vienādu frekvenci.

Komunikācijai ar lielu skaitu sensoru mezgliem var izmantot arī SPI pusduplekso režīmu, kurā datu līnijas ir apvienotas un tiek izmantots viena CS līnija visiem mezgliem



1.9. att. SPI interfeisa ziedlapiņķēdes topoloģijas: a) klasiskā; b) uzlabotā [22].

(1.8b. att.). Šādā režīmā SPI moduļos nav integrēta speciāla kadru bloku adresācijas shēma, taču, lai veiktu salīdzinājumu ar citiem interfeisiem, pieņemsim, ka pirmie 8 bloka simboli tiek atvēlēti adresācijai. Tad n_{data} simbolu nolasišanas laiks vienam mezglam būtu:

$$t_{spi_pdupl} = (n_{data} + 8)/f_b. \quad (1.11)$$

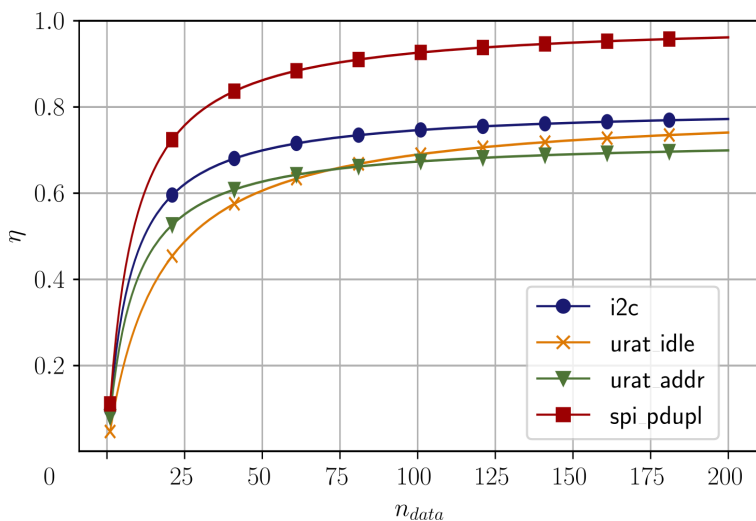
Un efektivitāte:

$$\eta_{spi_pdupl} = \frac{n_{data}}{n_{data} + 8}. \quad (1.12)$$

Kopsavilkums

Apskatītie interfeisi un to konfigurācijas ir apkopotas 1.2. tabulā. Lai gan literatūrā komunikācijai ar ķermeņa sensoriem populārākais vadu saziņas interfeiss ir I2C (standarta vai "Fast"), vērtējot pēc izejas pakāpes atbilstības ĶST prasībām, no apskatītajiem interfeisiem ĶST vadu komunikācijai potenciāli piemērotāki ir interfeisi ar divtaktu tranzistoru izejām (UART, SPI, I2C "Ultra Fast"), jo to darbību mazāki ietekmē vadu garuma un tīkla ierīču pieslēgvietu parazitiskie parametri.

Mikrokontrolleru interfeisu pusduplekso konfigurāciju datu pārraides efektivitāte atkarībā no datu simbolu daudzuma n_{data} ir parādīta 1.10. attēlā. Kā redzams, visaugstāko datu pārraides efektivitāti sniedz SPI interfeiss, izmantojot 3 vadu savienojumus. Tad seko I2C protokols, izmantojot 2 vadus, un tad abas UART daudzprocesoru konfigurācijas, kurām pie 72 simboliem efektivitāte ir vienāda un kurām pietiek ar vienu vadu savienojumu. Zem 72 simbolu sliekšņa efektīvāka ir UART konfigurācija adreses bitu, bet virs – UART konfigurācija ar dikstāves kadru.



1.10. att. I2C, UART un SPI protokolu datu pārraides efektivitāte, izmantojot pusdupleksas kopnes konfigurācijas ar vienādu simbolu pārraides ātrumu $f_b = 460800 \text{ Bd/s}$: i2c – I2C datu nolases/pārraides formāts atbilstoši NXP specifikācijai, urat idle – UART formāts ar dīkstāves kadriem, urat addr – UART formāts ar adreses bitu, spi pdupl – SPI formāts pusdupleksajā konfigurācijā, izmantojot 8 adreses simbolus

Starp interfeisiem, kam raksturīga divtaktu izejas ķēde, no topoloģijas un vadu izlietojuma aspekta KST pielietojumam potenciāli vispiemērotākās ir UART interfeisa pusdupleksās topoloģijas, kurās saziņai tiek izmantots viens datu signāla vads. Taču UART kadru un kadru bloku pārraides efektivitāte ir viszemākā no apskatītajiem interfeisiem un to konfigurācijām.

1.5. Secinājumi

Ķermeņa formas noteikšanai mainīgas vides apstākļos, kad ir apgrūtināta redzamība vai iespējama ķermeņu aizklāšanās, piemērotākās tehnoloģijas ir tās, kuras balstās uz ķermenim pieguļošiem mehānisko deformāciju vai inerces sensoriem. Tā kā ķermeņa formas izmaiņas bieži vien iekļauj lielas un vidēji lielas kustības un mehānisko deformāciju sensori šajā diapazonā cieš no samazinātās jutības un lielas mērījumu kļūdas, promocijas darbā galvenais fokuss tiks veidots tieši uz IMU.

Pašreizējās pieejas ķermeņa formas noteikšanai ar IMU ir balstītas uz atsevišķu virsmas punktu tangenciālās informācijas iegūšanu, interpolēšanu un integrēšanu, balstoties uz zināšanām par šo punktu savstarpējiem ģeodēziskajiem attālumiem. Lai gan teorētiskais modelis pieļauj, ka attālums starp sensoriem var mainīties, praktiskajās realizācijās tas vienmēr tiek nofiksēts. Līdz ar to, veicot tehnoloģiju izpēti netika atrasti pētījumi, kas atklātu IMU potenciālu stiepes deformētu ķermeņu formas noteikšanai, kas ir svarīgs

Mikrokontrolleru komunikācijas interfeisu apkopojums saziņai ar ķermeņa sensoru tīklā.

Interfeiss	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	$\Leftarrow$ Kopne	PP	2^a	$460,8^b$
UART	dīkstāves kadrs	$\Leftarrow$ Kopne	PP	2^a	$460,8^b$
SPI	Pilnais	$\Leftarrow$ Kopne	PP	$3+n_{nodes}^a$	1000^b
SPI	Ziedlapiņķēde	$\Leftarrow$ Līnija	PP	4	1000^b
SPI	Pusduplekssais	$\leftrightarrow$ Kopne	PP	3	1000^b
SPI	Uzlabota ziedlapiņķēde [22]	$\Leftarrow$ Līnija	PP	2	1000^b

$\leftrightarrow$ Pusduplekss, $\Leftarrow$ 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.

aspekts, lai varētu izgatavot dažādām ķermeņa formām pieguļošas sistēmas.

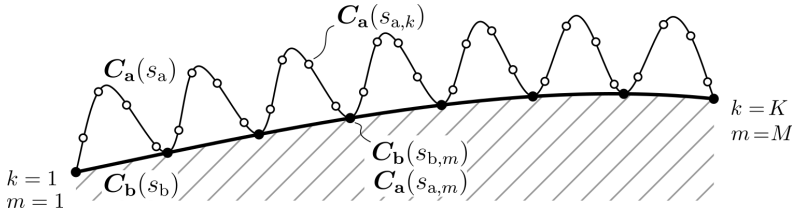
Ņemot vērā potenciāli lielo sensoru skaitu, kas ir jāizvieto pa visu ķermeni tā formas noteikšanai, tika apskatītas arī pieejas ķermeņa sensoru tīklu arhitektūrām un komunikācijai starp tīkla mezgliem. Lai gan, pašlaik dominē bezvadu risinājumi, pielietojumiem ar lielu skaitu blīvi izvietotu sensoru potenciāli piemērotāki ir vadu risinājumi. Padziļinātāk tika apskatīti zema enerģijas patēriņa MCU un iegultajās sistēmās visplašāk lietotie komunikācijas interfeisi: UART, I2C un SPI. Tika secināts, ka, lai gan I2C protokols jau ir veiksmīgi izmantots vairākos KST prototipos, interfeisi ar divtaktu izejām (UART, SPI) ir piemērotāki komunikācijai pa visu ķermeni, jo to signālu pārslēgšanās ātrumu mazāk ietekmē vadu parazitiskie elektriskie parametri un pieslēgto ierīču skaits. Taču, apskatot UART un SPI tīkla topoloģijas, kas ar minimālu vadu izlietojumu var savienot lielu skaitu sensoru uz sarežģītas formas ķermeņiem, tika secināts, ka pašreizējās pieejas ar tīkla mezglu individuālo adresāciju ir neefektīvas, ja sensoru tīklā vairāki mezgli, kas jānolasa vienlaicīgi. 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 vienlaicīgi nolasīt visus mezglus un samazinātu saziņas virstēriņu.

2. METODE FORMAS NOTEIKŠANAI AR ORIENTĀCIJAS SENSORIEM STRUKTŪRĀS

Apskatītās metodes formas noteikšanai, izmantojot orientācijas sensorus, balstās uz virsmai pieguļošu sensoru orientācijas mērījumiem un zināšanām par sensoru savstarpējiem attālumiem. Šī pieeja ir ērta, ja ķermenis tiek pakļauts tikai lieces deformācijām un izmaiņas sensoru savstarpējos attālos uz virsmas nav vērā ņemamas. Taču ķermeņa formas noteikšanai ar sensoriem, kas iestrādāti, piemēram, apģērbā, ir svarīgi, lai tas būtu stiepjams un pieguļošs. Lai gan sensoru savstarpējo attālumu noteikšanai var izmantot mehāniskos stiepes sensorus, kā tika noskaidrots 1.1. nodaļā, to precizitāte absolūtā attāluma mērījumiem ir ierobežota. Tāpēc darbā ir piedāvāta alternatīva pieeja stiepes un lieces deformētu objektu formas rekonstrukcijai, kura neprasa speciālu sensoru izmantošanu 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 uz to, ka ķermeņa formai deformējoties (liecoties vai stiepjoties), mainās ķermenim piestiprinātās 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 matemātiskā modeļa pamatā ir

parametriska līnija $\mathbf{C}_a(s_a) = [x(s_a), y(s_a), z(s_a)]^T$, kas raksturo struktūras formu un kurai orientācijas sensoru atrašanās punktos $s_{a,k}$ ir zināmas diskretas pieskaru orientācijas vērtības. Struktūras formas rekonstrukciju no sensoru nolasēm veic ar kādu no 1.1. nodaļā aprakstītas pieejām, kuras rekonstruē struktūras formu raksturojošās līnijas atvasinājuma funkciju $\mathbf{C}'_a(s_a)$ un, skaitliski integrējot, iegūst struktūras formu raksturojošo funkciju $\mathbf{C}_a(s_a)$.

Zinot, ka līnijas $\mathbf{C}_a(s_a)$ ar $\mathbf{C}_b(s_b)$ ir savienotas diskretos punktos $s_{a,m}$ un $s_{b,m}$, no struktūras formu raksturojošās līnijas iegūst diskretas punktu nolases $\mathbf{C}_b(s_{b,m})$, kas pieder interesējošā ķermeņa virsmai. Iegūtās nolases var izmantot ķermeņa virsmai piederošas līnijas $\mathbf{C}_b(s_b)$ formas rekonstrukcijai ar parametriskiem polinomiem vai splineu līknēm, kuras parametrizētas, piemēram, pēc hordas garuma (*chord length*) vai centrtrieces (*centripetal*) metodes [18].

Virsmas rekonstrukcijai no līnijām uz ķermeņa virsmas var izmantot globālo virsmas rekonstrukcijas metodi [17], bet no savienojumu punktu mākoņiem – "Alfa formas" [16], lodes pagriešanas [7] vai Puasona [28] virsmas rekonstrukcijas algoritmus.

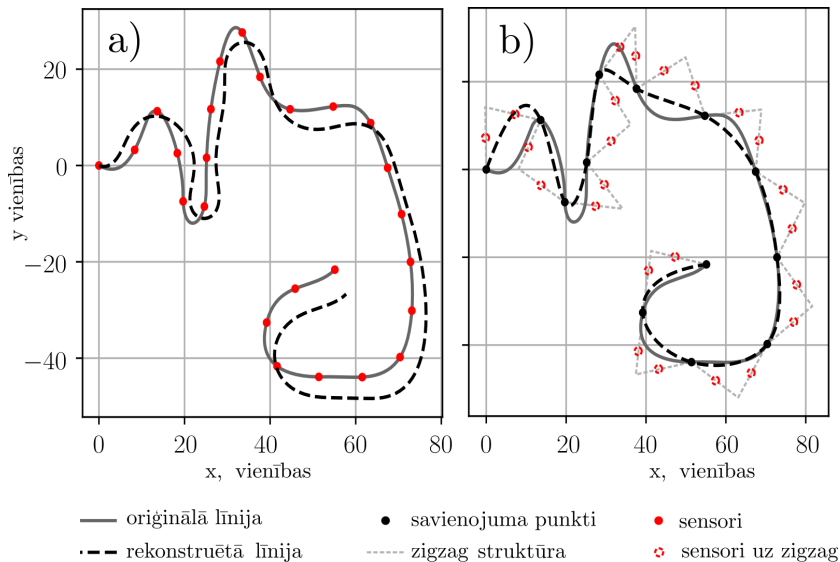
2.2. Piedāvātās metodes īpašības

Piedāvātā formas rekonstrukcijas pieeja ar orientācijas sensoriem struktūrās sastāv no diviem etapiem: 1) struktūras formas rekonstrukcija no orientācijas sensoru orientācijas datiem, izmantojot zināmās pieejas ar fiksētu attālumu starp sensoriem, un 2) ķermeņa formas rekonstrukcija no diskretiem struktūras savienojumiem, izmantojot zināmās pieejas virsmas un līniju interpolēšanai. Šāda pieeja sniedz divus lietderīgus pienesumus: pirmkārt, attālums starp ķermeņa un struktūras savienojuma punktiem var brīvi mainīties noteiktās robežās, kuras nosaka struktūras mehāniskās īpašības, un, otrkārt, savienojumu punktu rekonstrukcijas kļūda ir atkarīga no struktūras nevis ķermeņa formas.

Zināmajām pieejām ķermeņa formas rekonstrukcijai ar orientācijas sensoriem, kā parādīts 2.2a. attēlā, ir raksturīga rekonstrukcijas kļūdas uzkrāšanās, kas saistīta ar nepietiekamu sensoru nolašu skaitu. Lai gan abās situācijās 2.2. attēlā, rekonstrukcija tiek veikta ar ideāliem sensoru datiem, rekonstrukcijā ar sensoriem uz līnijas vērojama izteikta rezultāta nobīde, pieaugot līnijas garuma parametram. Tas ir skaidrojams ar to, ka, lai gan līnijas atvasinājuma dati sensoru punktos ir ideāli, interpolētās vērtības starp šiem punktiem atšķiras. Attiecīgi nolašu integrēšanas rezultātā (1.3. vienādojums) par sākumpunktu izvēloties $s = 0$ šīs atšķirības uzkrājas, pieaugot s vērtībai. Teorētiski rekonstrukcijas precizitāti iespējams uzlabot, izvēloties līnijas formai piemērotāku interpolācijas metodi, taču tam ir nepieciešamas papildus zināšanas par ķermeņa formas īpašībām, kuras praksē bieži ir sarežģīti vai neiespējami pietiekami kvalitatīvi novērtēt.

Savukārt, kā redzams 2.2b. attēlā, lai gan rekonstruētā līnija starp savienojuma punktiem vietām ievērojami atšķirties no uzdotās līnijas, savienojuma punktos rekonstruēto punktu koordinātes precīzi sakrīt ar uzdotās līnijas punktiem neatkarīgi no attāluma līdz rekonstrukcijas sākumpunktam $s = 0$. Tas ir saistīts ar to, ka izvēlētās zigzag struktūras

rekonstrukcijas precizitāte nav atkarīga no tās ieņemtās formas. Šī nianse piedāvātajai pieejai dod potenciālu priekšrocību attiecībā pret citām apskatītajām pieejām, ja tiek izmantotas struktūras, kuru formas ir ievērojami vienkāršākas (līniju atvasinājumi ir precīzāk interpolējami), kā ķermeņa formas.



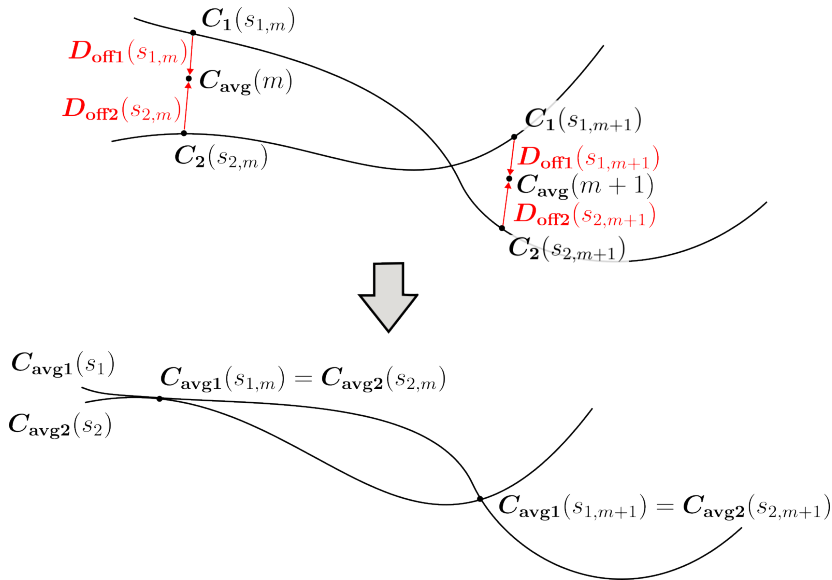
2.2. att. Sintētiski uzdotas 2D līnijas rekonstruētas ar ideālām sensoru nolasēm: a) sensori ir uz līnijas un b) sensori ir uz zīgzag struktūras.

Ar piedāvāto metodi pieļaujamo ķermeņa formas izmaiņu diapazonu nosaka struktūras mehāniskās īpašības. Pirmkārt, ņemot vērā, ka struktūras elementi starp savienojuma punktiem nav stiepjami, hordas attālums starp savienojuma punktiem nevar pārsniegt struktūras attiecīgā posma līnijas garumu. Otrkārt, struktūras mehāniskās īpašības ietekmē tās mehāniskā realizācija – lokanība, fiziskie izmēri un mijiedarbība ar cietiem fiziskajiem objektiem. Turklāt, jāņem vērā, ka struktūras savienojot ar ķermeni, var tikt izmainītas arī paša ķermeņa mehāniskās īpašības.

Struktūras formas rekonstrukcijai nepieciešamo sensoru daudzumu un izvietojumu nosaka struktūras formas īpašības. Analogiski pieejām, kurās orientācijas sensorus izvietoto uz ķermeņa, izvietojot orientācijas sensorus uz struktūrām, ar iegūtajām nolasēm ir jāpieiet precīzai nolašu interpolēšanai. Piemēram, ja orientācijas sensoru nolašu interpolēšanai izmanto Šenona interpolāciju ar $\text{sinc}(s)$ funkcijām, rekonstrukcijai piemērotu sensoru attālumu var noteikt pēc Naikvista-Šeneona nolašu teorēmas: $f_s > 2B$, kur f_s – sensoru telpiskā frekvence (apgriezts lielums vidējam sensoru savstarpējam attālumam) un B – līnijas pieskaru orientāciju raksturojošo lielumu maksimālā frekvence attiecībā pret līnijas garuma parametru.

Konstruējot struktūras ķermeņa formas noteikšanai, atsevišķus struktūru savienojuma punktus var stratēģiski apvienot, veidojot līniju krustpunktus. Lai gan, ņemot vērā

iespējamās sensoru struktūru formas rekonstrukcijas kļūdas, pēc rekonstrukcijas iegūto struktūru līniju koordinātes šajos krustpunktos var atšķirties, kā parādīts 2.3. attēlā ar $C_1(s_{1,m})$ 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.

Ņemot vērā, ka savienojuma punktos punktu koordinātem var būt vairāki atšķirīgi novērtējumi $C_1, C_2, \dots$, patieso aprēķina, kā punktu svēro vidējo:

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

kur w – svāri atbilstoši punkta attālumam līdz rekonstrukcijas sākumpunktam.

Attiecīgi nobīdes vektorus iegūst sekojoši:

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

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

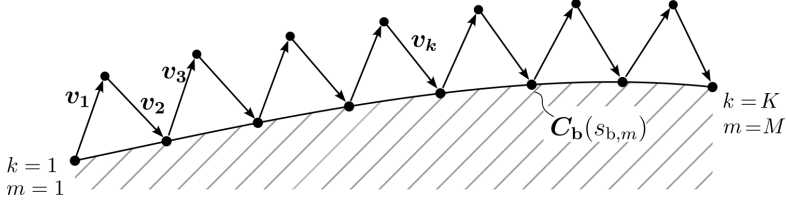
Iegūtos nobīdes vektorus $D_{\text{off1}}(s_{1,m})$ un $D_{\text{off2}}(s_{2,m})$ interpolējot, iegūst līkņu nobīdes $D_{\text{off1}}(s_1)$ un $D_{\text{off2}}(s_2)$, kuras var izmantot līniju punktu korekcijai, lai salāgotu savienojuma savienojuma punktu koordinātes:

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

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

2.3. Speciālgadījums ar zigzag struktūru

Darba ietvaros padziļinātāk ir apskatītas zigzag struktūras, kas piestiprinātas ķermenim, kā parādīts 2.4. attēlā. Šīm struktūrām ir vairākas pozitīvas īpašības, kas tās padara piemērotas formas rekonstrukcijai mobilajās iegultajās sistēmās. Pirmkārt, zigzag struktūras formas rekonstrukcijai ir galīgs orientācijas sensoru skaits, kas ir neatkarīgs no struktūras formas. Otrkārt, tās var rekonstruēt, izmantojot vienkāršu lineāru interpolāciju, kas neprasa daudz skaitļošanas resursu.



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

Zigzag struktūras modeli veido vektori $\mathbf{v}_k$ ar garumu $L_k = \|\mathbf{v}_k\|$ un stiprinājuma punkti $\mathbf{C}_b(s_{b,m})$. Zinot rotācijas matricas zigzag segmentu rotācijai $\mathbf{R}_k$ attiecībā pret noteiktiem atskaites stāvokļiem $\mathbf{v}_k^*$, stiprinājuma punktu koordinātes var aprēķināt sekojoši:

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

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

Rotācijas matricu $\mathbf{R}_k$ 2D uzdod ar rotācijas leņķi α_k sekojošā formā :

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_k) & -\sin(\alpha_k) \\ \sin(\alpha_k) & \cos(\alpha_k) \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Par atskaites stāvokli izmantojot horizontālās ass virzienu, atskaites vektori ir $\mathbf{v}_k^* = [L_k, 0]^\top$, un stiprinājuma punktu koordinātes, kur $m > 1$, var izteikt sekojoši:

$$\mathbf{C}_b(s_m) = \sum_{k=1}^{2(m-1)} \mathbf{R}_k \mathbf{v}_k^* = \sum_{k=1}^{2(m-1)} L_k \begin{bmatrix} \cos(\alpha_k) & -\sin(\alpha_k) \\ \sin(\alpha_k) & \cos(\alpha_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{2(m-1)} L_k \begin{bmatrix} \cos \alpha_k \\ \sin \alpha_k \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Parametriskas 3D virsmas $\mathbf{C}(u,v)$, kur u un v ir virsmu raksturojošie parametri, formas noteikšanai var veidot telpiskas zigzag struktūras, kā parādīts 2.5. attēlā. Savienojumu punktu rekonstrukciju veic, izvēloties vienu atskaites punktu $\mathbf{C}(0,0) = [0,0,0]^\top$, kurš

Zigzag struktūru svarīgais raksturojošais parametrs ir zigzag segmentu garums. Tas ietekmē, cik lielas deformācijas (liekšanu, stiepšanu un saspiešanu) struktūra pieļauj. Ņemot vērā zigzag struktūru 2.4. attēlā, hordas garums starp diviem blakus esošiem savienojumu punktiem nevar pārsniegt savienojošo zigzag struktūras posmu garumu. Attiecīgi 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.

Pie praktiskās realizācijās jāņem vērā, ka pieļaujamās formu izmaiņas ietekmē arī realizācijai specifiskas īpašības: segmentu savienojumu mehāniskās brīvības pakāpes, ie-

robežots savstarpējais segmentu lenķa diapazons u.c. Lai gan tas ierobežo pieļaujamo ķermeņa deformāciju diapazonu, to var izmantot, lai novērtētu un kompensētu žiroskopu orientācijas dreifu. D. Lēmans *et al.* [30] piedāvā pieeju, kas, balstoties uz struktūras mezglu kinemātisko modeli ar taisniem, cietiem segmentiem, ļauj noteikt ilgtermiņā stabilas segmentu relatīvās orientācijas bez magnetometriem. Līdz ar to piedāvātā pieeja ar IMU zigzag struktūrās ķermeņa formas noteikšanai, potenciāli varētu būt piemērota formas noteikšanai vidēs, kurās magnetometrus nevar izmantot fiksēta horizontālā virziena noteikšanai.

2.4. Secinājumi

Stiepes un lieces deformētu ķermeņu formas noteikšanai var izmantot IMU struktūrās, kas, savienotas ar ķermeni atsevišķos punktos. Šādas struktūras noteiktās robežās pieļauj lieces un stiepes deformācijas, neizmanot attālumu starp sensoriem struktūrās. Piedāvātā pieeja ķermeņa formas rekonstrukciju sadala divos etapos: 1) struktūras formas rekonstrukcija no IMU orientācijas datiem un 2) ķermeņa formas rekonstrukcija no diskrētiem punktiem, kas atbilst ķermeņa un struktūras savienojumiem. Salīdzinot piedāvāto pieeju ar zināmajām pieejām, kurās sensorus izvieto uz ķermeņa, tiek iegūti divi lietderīgi ieguvumi: pirmkārt, attālums starp ķermeņa un struktūras savienojuma punktiem var mainīties noteiktās robežās, neietekmējot sensoru attālumus uz struktūras, un, otrkārt, struktūras var tikt veidotas no ģeometriskajām formām, kuras var precīzāk interpolēt, kā pašu ķermeņa formu. Tātad atšķirībā no līdzšinējām pieejām var izvairīties no rekonstrukcijas kļūdas uzkrāšanās, kas ir saistītas ar nepietiekamu sensoru skaitu precīzai ķermeņa tangenciālo nolašu interpolēšanai, potenciāli nodrošinot mazāku rekonstrukcijas kļūdu sarežģītiem ķermeņiem.

IMU struktūru formas izvēle ir atkarīga no pielietojuma un pieejamajiem resursiem. Mobilajām iegultajām sistēmām, tai skaitā KST, ņemot vērā ierobežotos skaitļošanas resursus, kā piemērotākās tika piedāvātas zigzag formas struktūras. Tika piedāvāta pieeja gan līnijas, gan virsmas formas rekonstrukcijai ar šīm struktūrām.

Ņemot vērā, ka orientācijas sensoriem piedāvātajā formas rekonstrukcijas pieejā var būt dažādas fiziskās topoloģijas (līnija, režģis ar kopīgiem savienojuma punktiem), ir nepieciešams izveidot atbilstošu sistēmas arhitektūru, kas piemērota ne tikai efektīvai komunikācijai ar lielu skaitu KST mezgliem, bet arī optimālai vadu savienojumu izveidei daudzveidīgām tīkla mezglu fiziskajām topoloģijām.

3. PIEDĀVĀTĀ PIEEJA ĶERMEŅA SENSORU DATU IEGUVEI

Sensoru sistēmas detalizētai ķermeņa formas rekonstrukcijai var saturēt vairākus desmitus [23] un potenciāli vairākus simtus sensoru mezglu, tāpēc ir svarīgi izstrādāt piemērotu sistēmas arhitektūru, kas ļauj ātri un droši nolasīt sensoru mezglu datus un tai pašā laikā nodrošinot energoefektivitāti un netraucētu kustību brīvību. Zināmajās KST sistēmās, lai izvairītos no ar vadiem saistītajām ierobežojumiem, saziņai ar tīkla mezgliem pārsvarā izmanto bezvadu komunikācijas risinājumus, taču, cik zināms, tajos iesaistīto KST mezglu skaits ir samērā neliels (< 10). Mezglu skaitam un blīvumam pieaugot, pilnīgas bezvadu sistēmas īstenošanu apgrūtinā neizbēgama nepieciešamība pēc individuāliem mezglu enerģijas avotiem un individuālām radio ķēdēm, kas pie liela mezglu skaita ne tikai ievērojami palielina sistēmas kopējās izmaksas un aparātūras sarežģītību, bet arī samazina lietošanas ērtumu, jo tīkla mezgli ir fiziski lielāki un smagāki. Turklāt sistēmās, kurās kā mezglu enerģijas avoti tiek izmantotas baterijas, tās periodiski ir jāuzlādē vai jānomaina.

Līdz ar to KST ar lielu mezglu skaitu (vairāki desmiti un simti) tīkla mezglu savienošanai potenciāli piemērotāki ir vadu risinājumi. Neskatoties uz to, ka saziņa pa vadiem ir attīstījies jau salīdzinoši ilgu laiku³, kā tika noskaidrots 1.3. nodaļā, efektīva vadu komunikācijas risinājuma izstrāde KST ar potenciāli lielu mezglu skaitu, joprojām ir samērā izaicinošs uzdevums, kura risinājumi ir maz pētīti.

Šajā nodaļā ir piedāvāta un detalizēti aprakstīta pieeja sensoru datu ieguvei KST ķermeņa formas rekonstrukcijai. Tā ietver arhitektūru, kas piemērota datu nolasīšanai no mezglu grupām ar lielu skatu funkcionāli vienādiem sensoriem, kas savienoti ar vadu savienojumiem. Piedāvātās sistēmas arhitektūras izstrādē, kā galvenie aspekti tika ņemti vērā lietošanas ērtums, mērogojamība un uzticama sistēmas darbība reāllaika pielietojumiem.

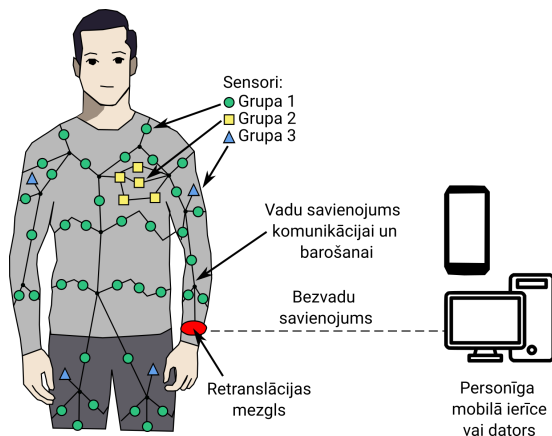
3.1. Sistēmas kopējā arhitektūra

Kā parādīts 3.1. attēlā, piedāvātā sistēma ķermeņa formas rekonstrukcijai satur sensoru mezglus pa visu ķermeni. Tā paredz, ka funkcionāli līdzīgus sensorus var iedalīt vienā vai vairākās grupās, kuru mezgliem ir kopīgs nolases laiks. Sensori ir savienoti ar vismaz trim vadu savienojumiem barošanas sprieguma nodrošināšanai un datu signālu izplatīšanai. Vadu fiziskā topoloģija nodrošina brīvu savienojumu veidošanu, lai optimizētu vadu garumu, lietošanas ērtumu un sistēmas uzticamu darbību.

Sensoru mezgli ir savienoti ar retranslācijas mezglu, kas nodrošina visam tīklam kopīgu enerģijas avotu un bezvadu raidītāju, lai pārraidītu iegūtos datus uz ārējām ierīcēm, neierobežojot kustību brīvību. Centralizētā pieeja ļauj vienkāršot sensoru mezglu elektriskās shēmas un optimizēt to fiziskos izmērus. Papildus tam retranslācijas mezgls veic tīklā savienoto sensoru mezglu nolašu laiku sinhronizāciju un organizē datu savākšanu pār-

³Uzskata, ka pirmos principus saziņai pa vadiem sāka pētīt Stefans Grejs, kurš jau 1729. gadā atklāja, ka elektrību pa izolētiem vadītājiem var pārraidīt lielos attālumos.

raidei uz ārēju ierīci tālākām operācijām (apstrāde, glabāšanai, atgriezeniskā saite u.c.). Pirms datu nosūtīšanas uz ārēju ierīci retranslācijas mezgls arī pats var veikt lokālu datu priekšapstrādi, kompresiju vai šifrēšanu, taču, ņemot vērā, ka iegultajām valkājamām sistēmām ir ierobežoti resursi, apjomīgākos apstrādes uzdevumus ir paredzēts veikt uz ārējās personīgās skaitļošanas ierīces.



3.1. att. Piedāvātās sistēmas kopējā arhitektūra.

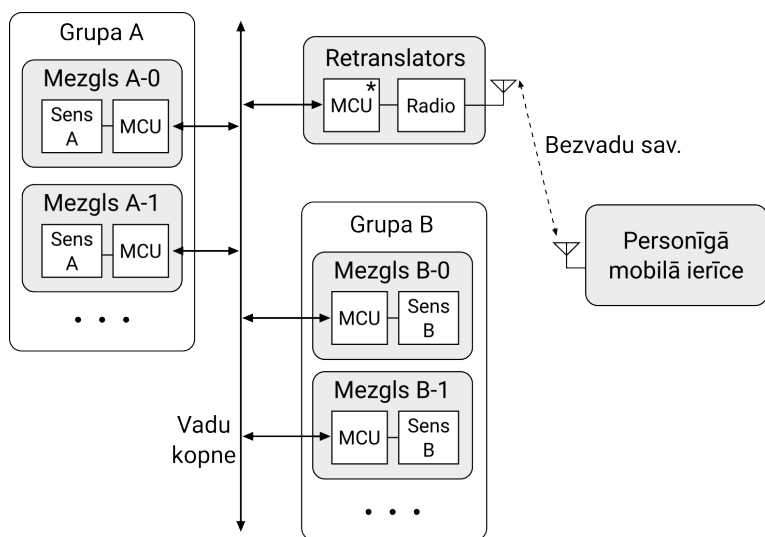
Datu pārraidei pa vadiem izmanto pusdupleksas kopnes tīkla topoloģiju, kuras blokslēma ir ilustrēta 3.2. attēlā. Tīkla mezglos, lai nodrošinātu augstu elektronisko komponentu integrācijas pakāpi, tiek izmantotas komerciāli pieejamas zema enerģijas patēriņa integrālās komponentes: MEMS IMU sensori un MCU. Tajās izplatīti komunikācijas interfeisi ir I2C, SPI un UART, kuru konfigurācijas saziņai kopnes topoloģijā ir apskatītas 1.4. nodaļā. Tā kā vadu savienojumos, lai sasniegtu augstākus pārraides ātrumus, piemērotāki ir interfeisi ar divtaktu izejām, mezgliem dīkstāves laikā savas izejas ir jāvar atslēgt no kopnes (izeju pakāpes tiek pārslēgtas augstas pretestības stāvoklī).

Lai kopnē izvairītos no tīkla mezglu ziņojumu sadursmēm, saziņai izmanto vedējsēkotāja principu. Piedāvātajā tīkla arhitektūrā vedējmezgla funkciju pilda retranslators 3.2. attēlā atzīmēts ar zvaigznīti), kurš attiecīgi organizē saziņas kārtību starp pārējiem tīkla mezgliem (sekotājmezgļiem) un to grupām.

Ņemot vērā, ka piedāvātajā arhitektūrā kopnei jānodrošina vienlaicīga saziņa ar ievērojami lielu sensoru skaitu, pašreizējās vadu komunikācijas pieejas ar individuālo adresāciju katram mezglim ir neefektīvas. Līdz ar to, lai uzlabotu saziņas efektivitāti un sistēmas veiktspēju piedāvātajai KST arhitektūrai, tika izstrādāta jauna saziņas pieeja, kas ietver lielām sensoru grupām pielāgotu vadu saziņas protokolu.

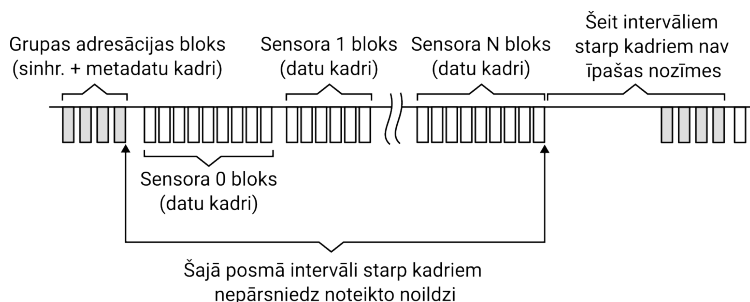
3.2. Vadu saziņas protokols

Piedāvātais protokols efektīvai saziņai ar sensoru grupām, kurās visus mezglus var adresēt vienlaicīgi, kā redzams 3.3. attēlā, sastāv no komunikācijas kadriem, kuru secības veido



3.2. att. Piedāvātās arhitektūras blokshēma

adresācijas un sensoru datu blokus.



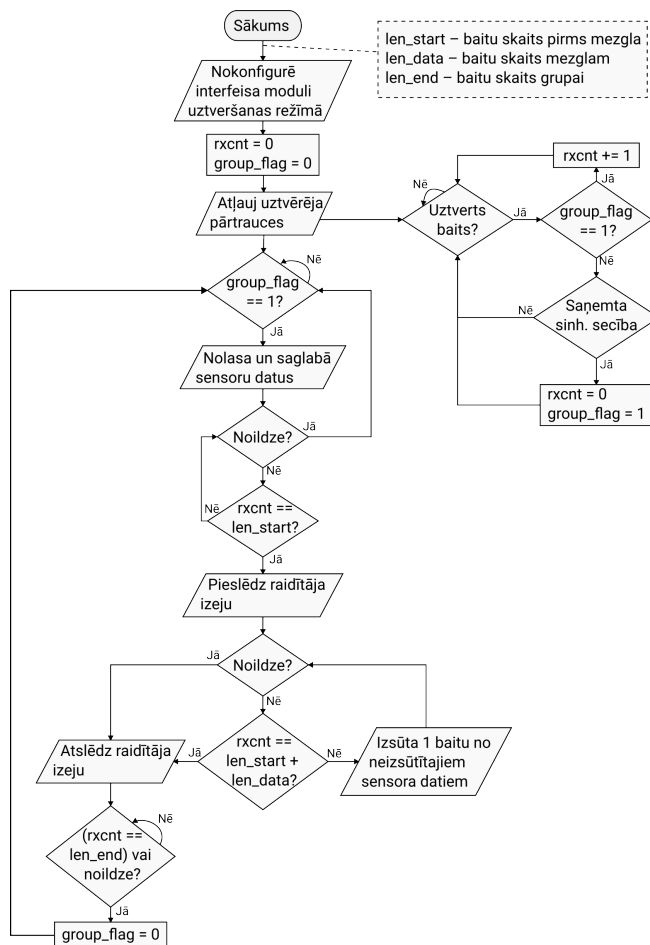
3.3. att. Piedāvātā saziņas protokola komunikācijas kadru diagramma.

Adresācijas bloks satur unikālu sinhronizācijas kadru secību, kas nodrošina grupu bloku sinhronizāciju. To ģenerē vedējmezgls un pēc nepieciešamības papildus sinhronizācijas kadriem adresācijas bloks var saturēt metadatu kadrus, piemēram, norādi uz konkrētas grupas identifikatoru vai pēc adresācijas bloka sagaidāmo datu garumu. Tā kā adresācijas bloks tiek adresēts konkrētām sensoru grupām, to var izmantot, lai sinhronizētu sensoru datu vienlaicīgu nolasīšanu.

Pēc adresācijas bloka noraidīšanas tiek pieņemts, ka kopne ir aizņemta, un noteiktā secībā tiek sagaidīti grupas sensoru atbildes datu bloki. Lai izvairītos no tā, ka kāds no sensoru mezgliem pārāk ilgi aizkavē pārējos mezglus, no brīža, kad tiek saņemts adreses bloks, starp kadriem stājas spēkā noildzes laiks, kuru pārsniedzot, visi iesaistītie mezgli pieņem, ka saziņa ar attiecīgo grupu ir beigusies un kopne ir atkal brīva.

Piedāvātais komunikācijas algoritms ir parādīts 3.4. attēlā. Tajā ir iekļauta senso-

ru datu nolasīšana uzreiz pēc grupas sinhronizācijas secības saņemšanas un pārsūtīšana, atbilstoši promocijas darbā piedāvātā komunikācijas protokola nosacījumiem. Piedāvātā algoritma darbībai ir nepieciešams zināt kadru skaitu, kas tiek noraidīts pirms konkrētā mezgla, kadru skaitu, ko noraida konkrētais mezgls un kadru skaitu, kuru paredzēts noraidīt visai grupai kopumā.



3.4. att. Sekotāimezгла programmas blokslēma

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

1. UART psudupleksajā konfigurācijā (UART_pdupl) sinhronizācijai var brīvi izvēlēties tīklam vienotu sinhronizācijas kadru secību;
2. UART adreses bita konfigurācijā (UART_addr) sinhronizācijai izmanto kadru ar aktīvu adreses bitu;

3. UART dīkstāves kadra konfigurācijā (UART_idle) sinhronizācijai izmanto datu līnijas dīkstāves laiku;
4. SPI pusdupleksajā konfigurācijā (SPI_pdupl) sinhronizācijai izmanto CS signāla vadošo fronti.

Lai salīdzinātu piedāvāto saziņas pieeju ar klasiskajām (individuālajām) pieejām, kas apskatītas 1.4. nodaļā, pieņemsim, ka, nemainot pārējos saziņas parametrus, adresācija, kas tiek piemērota individuālajiem mezgliem, bez papildus virstēriņa var tikt piemērota arī grupu adresācijai ar piedāvāto protokolu. Rezultātā iegūstam, ka, izmantojot piedāvāto protokolu, bloku pārraides laiks grupās ar n_{nodes} mezgliem ir:

$$t_{uart_idle}^* = (20 + 1,25 \cdot n_{data} \cdot n_{nodes}) / f_b \quad (3.1)$$

$$t_{uart_addr}^* = (11 + 1,375 \cdot n_{data} \cdot n_{nodes}) / f_b \quad (3.2)$$

$$t_{spi_pdupl}^* = (8 + n_{data} \cdot n_{nodes}) / f_b \quad (3.3)$$

Piedāvātā protokola virstēriņa samazinājumu μ var izteikt sekojoši:

$$\mu = \frac{t_{virsterins}}{t_{virsterins}^*} = \frac{t_{protokols} - n_{data} / f_b}{t_{protokols}^* - n_{data} / f_b} \quad (3.4)$$

Attiecīgi SPI un UART pusdupleksajām kopņu topoloģijās grupām ar n_{nodes} mezgliem:

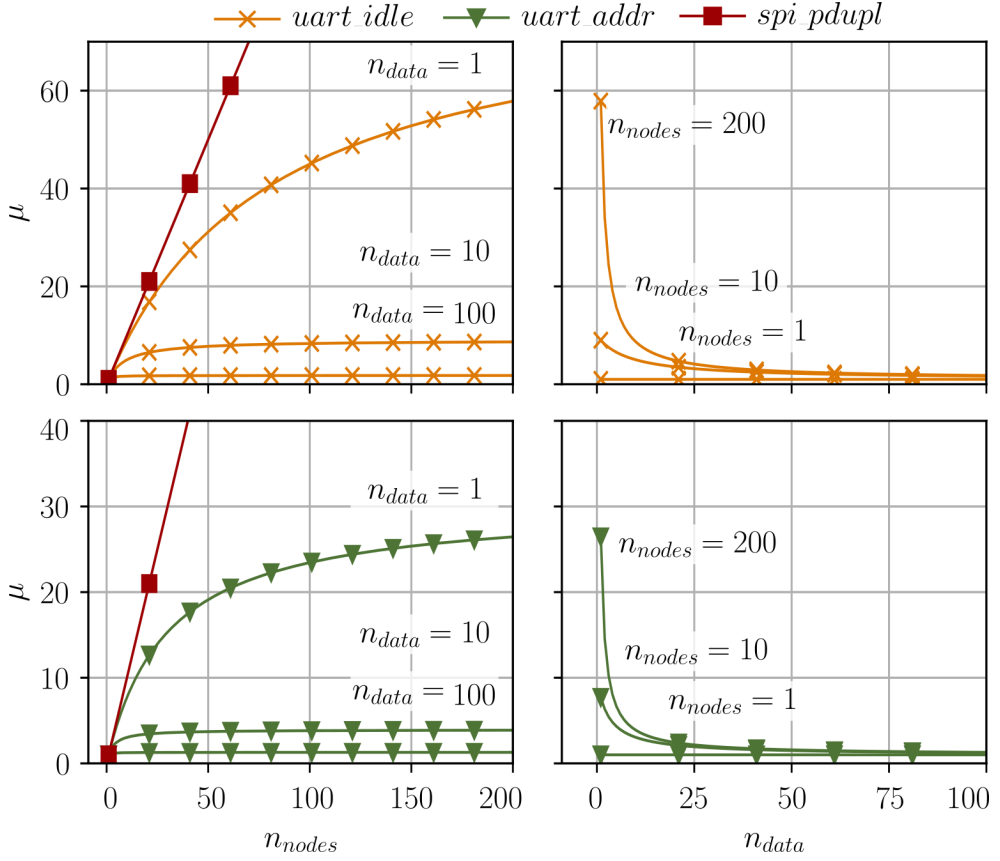
$$\mu_{uart_idle} = \frac{20 \cdot n_{nodes} + 0,25 \cdot n_{nodes} \cdot n_{data}}{20 + 0,25 \cdot n_{nodes} \cdot n_{data}} \quad (3.5)$$

$$\mu_{uart_addr} = \frac{11 \cdot n_{nodes} + 0,375 \cdot n_{nodes} \cdot n_{data}}{11 + 0,375 \cdot n_{nodes} \cdot n_{data}} \quad (3.6)$$

$$\mu_{spi_pdupl} = \frac{8 \cdot n_{nodes}}{8} = n_{nodes} \quad (3.7)$$

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 uzskatāmi parāda grafiki 3.5. attēlā. Tā kā UART konfigurācijās kopējo virstēriņu veido ne tikai protokols, bet arī UART kadru simboli, virstēriņa samazinājums ar piedāvāto protokolu ir ievērojami mazāks, kā ar SPI. Neskatoties uz to, kad mezglu skaits ir liels, bet sensoru individuālo datu daudzums neliels, UART dīkstāves kadru formātā potenciālais virstēriņa samazinājums var būt vairāk kā 10 reižu ($n_{data} < 8$, $n_{nodes} > 150$). Ņemot vērā 3.5. attēla grafikos redzamās sakarības, UART potenciālie pielietojumi 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 $n_{nodes} > 25$, $\mu > 3,8$.

Reāllaika sistēmās svarīgs komunikācijas parametrs ir aizkave – laika intervāls starp datu iegūšanu un datu pārraidīšanu līdz adresātam. Ar piedāvāto pieeju, pieņemot, ka dati tiek iegūti uzreiz pēc adresācijas bloka un nekādas citas aizkaves nav jāņem vērā,



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

grupas mezglu datu aizkave $\tau_{protokols}$ ir atkarīga tikai no pirms konkrētā mezgla ierindotajiem mezgliem atvēlētaj datu daudzuma n_{data_pirms} (bitos) un izmantotā datu pārraides interfeisa konfigurācijas.

Attiecīgi SPI un UART konfigurācijām pusdupleksajā režīmā novērtētās aizkaves ar promocijas darbā piedāvāto pieeju ir sekojošas:

$$\tau_{uart_idle} = \frac{1,25 \cdot n_{data_pirms}}{f_b} \quad (3.8)$$

$$\tau_{uart_addr} = \frac{1,375 \cdot n_{data_pirms}}{f_b} \quad (3.9)$$

$$\tau_{group_spi} = \frac{n_{data_pirms}}{f_b} \quad (3.10)$$

Kā redzams, protokola aizkaves ir tieši proporcionālas n_{data_pirms} , līdz ar to dati no mezgliem, kas ir ierindoti pirmie, tiks saņemti ātrāk. Kopējā grupas datu aizkave, kas

tiek mērīta no datu ieguves brīža līdz visi grupas dati ir nonākuši līdz adresātam, no tā nav atkarīga.

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).

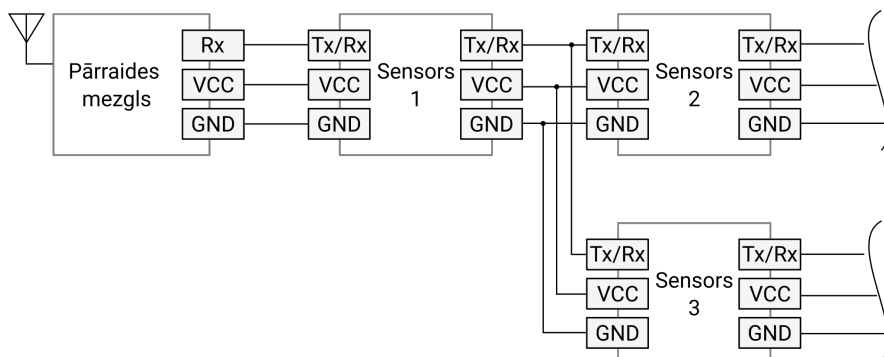
Lai nodrošinātu 3.1. tabulā izvirzītās prasības (T.1., T.2., R.1.), tiek piedāvāts izmantot 3.6. attēlā parādīto KST fizisko topoloģiju. Tā ir balstīta uz 3 vadu savienojumiem, no kuriem 2 ir mezglu barošanas nodrošināšanai (VCC – barošanas spriegums, GND – zeme). Pārraidē mezgls satur bezvadu raidītāju datu pārraidei uz ārējām ierīcēm, bet komunikācijai ar sensoru mezgliem tiek izmantots viena vada savienojums (Tx/Rx). Tā kā sensora individuālo datu daudzums nav liels (orientāciju kvaternionu formā apraksta 4 skaitļi), bet sensoru mezglu daudzums var sasniegt 100 (S.1.), promocijas darbā piedāvātais protokols ar UART pusdupleksas kopnes konfigurāciju nodrošina ievērojamu saziņas efektivitātes uzlabojumu, salīdzinot ar klasiskajiem UART daudz-procesoru saziņas formātiem. Ņemot vērā UART pusdupleksas kopnes daudz-procesoru formātu kadru pārraidē laikus (3.2. un 3.1. vienādojumi), zema patēriņa mikrokontrolleros iegūstamie simbolu pārraidē ātrumi (115200 Bd/s, 460800 Bd/s) ir teorētiski pietiekami, lai nodrošinātu T.6. un S.1. prasībām atbilstošu informācijas caurlaides spēju.

3.1. tabula

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



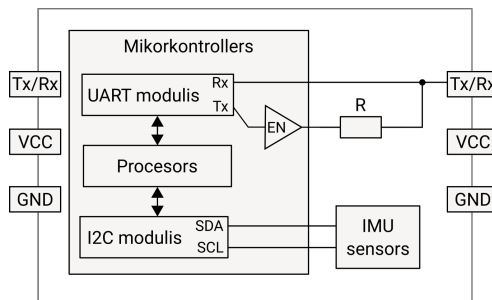
3.6. att. Piedāvātā KST mezglu fiziskā topoloģija.

Sensoru mezgls, kā parādīts 3.7. attēlā, satur mikrokontrolleri un IMU sensoru. Savienojumiem ar citiem tīkla mezgliem tam ir 3 izvadi: Tx/Rx, VCC un GND. Pēc vajadzības šos izvadus var izvietot vairākkārt, nodrošinot ērtāku savienojumu izveidi ar blakus esošajiem mezgliem.

Sensoru mezgla mikrokontrollera uzdevums ir IMU sensora datu nolasīšana un ar lokālo orientāciju saistīto datu pārraide, izmantojot UART pusduplekso konfigurāciju un 3.2. nodaļā aprakstīto protokolu. UART pusdupleksās konfigurācijas īstenošanai pa vienu vadu, UART moduļa raidītāja un uztvērēja izvadi tiek apvienoti. Raidītāja atļaujošais signāls (EN) tiek izmantots, lai brīžos, kad mezgls nesūta datus, raidītājs tiktu atslēgts no kopnes un tā tiktu atbrīvota lietošanai citiem mezgliem. Rezistors raidītāja izejā ierobežo izejas strāvas, ja gadās sadursmes starp vairākiem mezgliem un tie cenšas raidīt vienlaicīgi. Papildus tam rezistors arī slāpē svārstības datu signālos, kas rodas, strauji pārslēdzoties signālu līmeņiem, vadu induktivitātes un kapacitātes dēļ.

IMU sensors nodrošina inerciālo signālu iegūšanu un ciparošanu. Pēc nepieciešamības šis mezgls var saturēt akselerometru, magnetometru, žiroskopu vai kādu no šo sensoru kombinācijām. Sensoru datu nolasīšanai mezgla ietvaros izmanto, kādu no ciparu saziņas interfeisiem. Komerciāli pieejamos sensoru čipos saziņai spiestās plātes ietvaros izplatīts ir I2C. Pēc vajadzības, sensora mezgla mikrokontrollera skaitļošanas jaudu var izmantot lokālai sensoru datu priekšapstrādei (sensoru datu sapludināšanas algoritmi, trokšņu filtrēšana).

Retranslācijas mezgls, kā parādīts 3.8. attēlā, satur *UART/Bluetooth* retranslatoru, sprieguma pārveidotāju, litija-polimēra bateriju un *USB* standartam atbilstošu ligzdu.

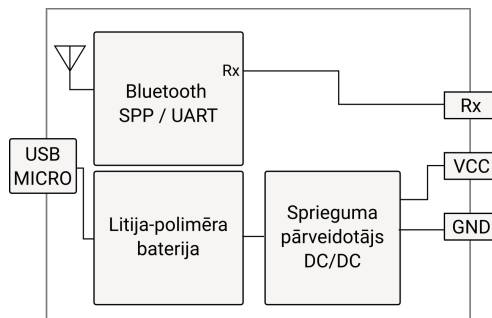


3.7. att. Sensoru mezgla uzbūves shēma

UART/Bluetooth retranslators nodrošina *UART* signālu nolasīšanu no komunikācijas kopnes un pārraidi uz ārējām ierīcēm, izmantojot *Bluetooth SPP* ((*Serial Port Profile*)) protokolu (R.3.).

Sprieguma pārveidotājs nodrošina efektīvu baterijas sprieguma pārveidošanu stabilā barošanas spriegumā (*VCC*) ar jaudu, kas atbilst tīkla mezglu kopējai patērētajai jaudai (R.1.). Baterijas parametri ir atkarīgi no pieļaujamajiem retranslācijas mezgla izmēriem un potenciālā sistēmas lietošanas ilguma. *USB* savienojuma bloks nodrošina standartizētu baterijas uzlādes ligzdu un komponentes baterijas uzlādes nodrošināšanai (R.2.).

Nepieciešamības gadījumā bloku var papildināt ar, piemēram, mikrokontrolleri lokālai datu apstrādei un atmiņas karti lokālai datu saglabāšanai, ja savienojums ar ārējām ierīcēm nav iespējams.



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

Piedāvātajai pieejai ir vairākas priekšrocības salīdzinājumā 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 parazītisko 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 ķermeņu sensoru datu ieguvei no grupām ar lielu skaitu funkcionāli vienādiem sensoru mezgliem. Piedāvātā pieeja, lai apmierinātu prasības attiecībā uz mezglu skaitu, lietošanas ērtumu, mērogojamību, materiālu izlietojumu un uzticamību, ietver jaunu sistēmas arhitektūru, kurā komunikācija ar KST mezgliem ir balstīta uz vadu savienojumiem un zema enerģijas patēriņa MCU izmantotiem saziņas interfeisiem ar divtaktu tranzistoru izejām (SPI, UART).

Papildus tam piedāvātā pieeja ietver jaunu saziņas protokolu, kas SPI un UART pusdupleksajām konfigurācijām ievērojami samazina datu pārraides virstēriņu un uzlabo efektivitāti, ja vienlaicīgi jānolasa datus no tīkla ar grupām, kas satur lielu mezglu skaitu. Iegūtais virstēriņa samazinājums ar piedāvāto protokolu ir atšķirīgs dažādām interfeisu konfigurācijām un var būt atkarīgs gan no pieslēgto mezglu skaita, gan sensoru datu simbolu daudzuma. Vispārīgi SPI gadījumā datu virstēriņa samazinājums ir lielāks kā UART. Tas ir tieši proporcionāls nolasīto mezglu skaitam neatkarīgi no datu simbolu skaita.

Pielietojumiem, kur mazāks vadu daudzums ir svarīgāks par mazāku simbolu pārraides virstēriņu, UART pusdupleksā konfigurācija ir potenciāli piemērotāka, kā SPI, jo divu signālu (dati un takts) vietā pietiek ar vienu (tikai dati). UART virstēriņa samazinājums ar piedāvāto protokolu ir atkarīgs gan no mezglu skaita, gan datu simbolu skaita. Balstoties uz iegūtajām formulām un raksturlielņiem 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 funkcionālās un ekspluatācijas prasības, kas tika izvirzītas sistēmai ķermeņa formas rekonstrukcijai, tīklu mezglu arhitektūra tika pielāgota saziņai, izmantojot UART interfeisa pusduplekso konfigurāciju. Salīdzinot piedāvāto pieeju ar citām līdz šim zināmajām pieejām cilvēka ķermeņa sensoru datu ieguvei caru vadu savienojumiem, iezīmējas vairākas piedāvātās pieejas priekšrocības: ar izvēlēto kopnes topoloģiju ir samazināts vadu izlietojums un uzlabota savienojumu veidošanas brīvība, ar izvēlēto saziņas interfeisu ir samazināta kopnes parazītisko parametru ietekme uz signālu kvalitāti un ar izvēlēto protokolu ir samazināts saziņā izmantotais simbolu virstēriņš.

4. SIMULĀCIJAS UN EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Šīs nodaļas mērķis ir novērtēt 2. un 3. nodaļās aprakstītās pieejas. Formas rekonstrukcijas pieejas novērtēšanai ir veiktas skaitliskas simulācijas ar nejaušām, sintētiski uzdotām 2D līnijām un atbilstošiem sensoru datiem. Veiktās simulācijas ļauj novērtēt sensoru skaita, sensoru mērījumu kļūdas un zigzag struktūras nogriežņu garuma ietekmi uz savienojumu punktu rekonstrukcijas precizitāti. Paralēli simulācijām ar zigzag struktūrām, tika veiktas simulācijas ar formas rekonstrukcijas metodi, kura ir pētīta vairākos avotos [47],[23].

Eksperimentālajiem pētījumiem un piedāvātās pieejas validācijai cilvēka ķermeņa daļu formas rekonstrukcijai ir izstrādāts apģērba makets ar zigzag struktūru savienojumu punktu rekonstrukcijai uz rokas. Nodaļā ir detalizēti aprakstīts eksperimentālā maketa dizains un tā testēšana. Analizējot kopnes datu signāla laika diagrammas, ir novērtēta iegūtā arhitektūras veiktspēja un datu simbolu pārraides efektivitāte, un, salīdzinot savienojumu punktu rekonstrukcijas rezultātus ar rezultātiem no optiskās marķieru sekošanas sistēmas, ir novērtētas izstrādātā eksperimentālā maketa rekonstrukcijas kļūdas robežas.

4.1. Formas rekonstrukcijas simulācijas

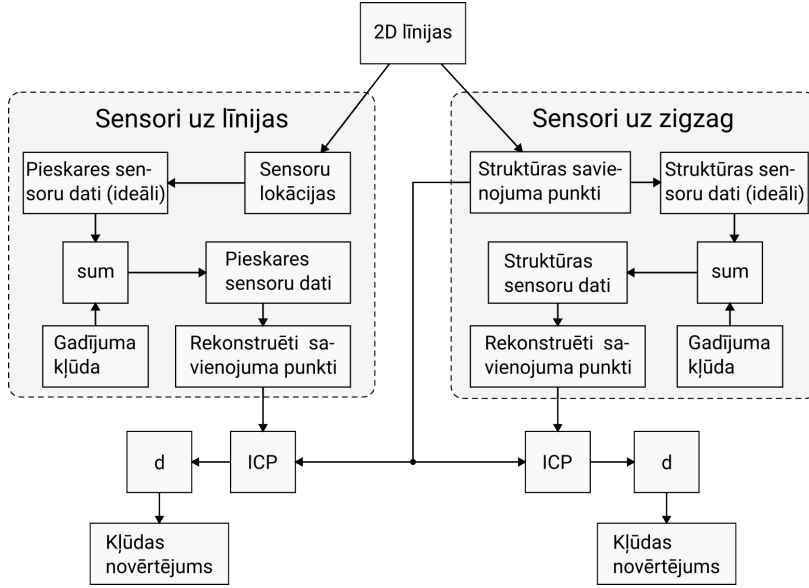
Lai izpētītu, kā promocijas darbā piedāvātās metodes ar zigzag struktūrām formas rekonstrukcijas rezultātu ietekmē: 1) rekonstruētā ķermeņa forma, 2) sensoru izvietošanas biežums, 3) sensoru mērījumu kļūda un 4) zigzag struktūru segmentu garums, tika veiktas skaitliskas simulācijas ar sintētiskiem sensoru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

Kā redzams simulācijas blokshēmā 4.1. attēlā, vispirms tiek sintezētas 2D līnijas. Tās tiek konstruētas vienu vienību garas no vienmērīgi izvietotām nejaušām leņķa funkcijas nolasēm, kas interpolētas ar kubiskajiem splainiem, minimizējot leņķa funkcijas izliekuma izmaiņas [36], un integrētas pēc 1.3. formulas. Izvēlētais leņķa funkcijas nejaušo nolašu skaits K_{gen} nosaka, cik sarežģīta būs iegūtā leņķa funkcija un cik nolases būs nepieciešamas tās formas rekonstrukcijai.

Zigzag struktūru simulēšanai tiek izmantots 2.4. attēlā redzamais modelis, kurā struktūras un ķermeņa savienojuma punkti ir izkārtoti vienmērīgi: līnijas segmentu garumi d_m starp savienojuma punktiem ir vienādi. Tā kā uz katra zigzag struktūras segmenta ir pa vienam sensoram, sensoru skaitu n_{sens} un savienojuma punktu skaitu n_{conn} saista sekojoša sakarība:

$$n_{conn} = \lfloor n_{sens}/2 + 1 \rfloor \quad (4.1)$$

Pieņemot, ka zigzag struktūru segmenti ir vienāda garuma L , var konstruēt zigzag struktūras ar noteiktu stiepes koeficientu $\lambda = s_{conn_max}/s_{conn} = 2L/s_{conn}$, kur s_{conn_max} – struktūras maksimālais pieļaujamais attālums starp savienojuma punktiem. Attiecīgi



4.1. att. Formas rekonstrukcijas simulāciju blokshēma.

konstruētajiem zigzag struktūru segmentiem var sintezēt atbilstošus sensoru datus – leņķus α_k , kurus zigzag segmentu vektori veido ar horizontālo asi. Simulācijās pirms zigzag struktūras formas un savienojumu punktu rekonstrukcijas ar 2.3. nodaļā aprakstīto pieeju, sensoru datiem pieskata gadījuma kļūdu $\Delta\alpha_k$, kuru reāliem sensoriem rada mērījumu nenoteiktība.

Rekonstruētās savienojuma koordinātes tiek salāgotas ar sākotnējām, izmantojot *Iterative Closest Point* (ICP) algoritmu [8], un rekonstrukcijas kļūda starp salāgotajiem 2D punktiem tiek novērtēta, aprēķinot Eiklīda attālumu d :

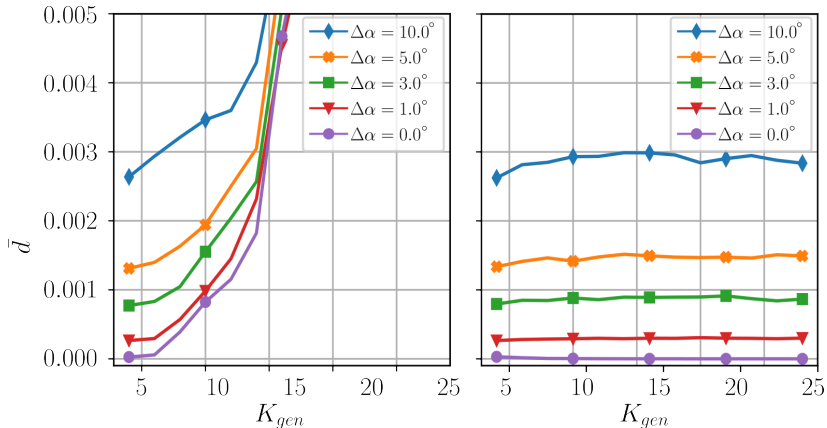
$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (4.2)$$

kur x_1, y_1 ir viena punkta koordinātes un x_2, y_2 – otra punkta koordinātes.

Iegūtie rezultāti tiek salīdzināti ar metodi, kurā sensori ir izvietoti uz rekonstruētās līnijas. Izmantojot to pašu sensoru skaitu, līnijas garums tiek sadalīts $n_{sens} - 1$ vienādos posmos, kuru galapunkti pieņemti par sensoru nolašu punktiem, kuros iegūst līnijas pieskares orientācijas datus – leņķus α_k , kurus pieskares vektori veido ar horizontālo asi. Orientācijas datiem pieskaitot gadījuma kļūdu $\Delta\alpha_k$, tiek simulēti sensoru dati, kas tālāk izmantoti līnijas formas un savienojumu punktu rekonstrukcijai. Līdzīgi, kā iepriekš, savienojuma koordinātes tiek salāgotas ar sākotnējām, izmantojot ICP algoritmu [8], un rekonstrukcijas kļūda tiek novērtēta, aprēķinot Eiklīda attālumu starp salāgotajiem punktiem (4.2. formula).

Veicot $N_{rand} = 100$ skaitu simulācijas ar fiksētu sensoru skaitu $n_{sens} = 30$, zigzag struktūru stiepes koeficientu $\lambda = 1$ un ar mainīgu līniju sintezēšanai izmantoto leņķa nolašu

skaitu $K_{gen} \in [4, 24]$, var novērtēt, kā līnijas formas sarežģītība ietekmē rekonstrukcijas rezultāta kļūdu⁴. Kā redzams 4.2. attēlā, 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 ķermeni aprakstošās līnijas; b) rekonstrukcija ar sensoriem uz zigzag struktūru aprakstošās līnijas. Fiksētie parametri: $n_{sens} = 30$, $\lambda = 1$, $N_{rand} = 100$.

Veicot simulācijas ar dažādiem sensoru skaitiem n_{sens} , iegūtie rezultāti ir parādīti 4.3. attēlā⁵. 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. Kļūdas atkarība no sensoru skaita ir skaidrojama ar to, ka, lai nodrošinātu stiepes koeficientu $\lambda = 1$, samazinoties sensoru skaitam, zigzag struktūras segmentu garums palielinās. Simulējot stiepes koeficienta (proporcionāls zigzag segmentu garumam) ietekmi uz rekonstrukcijas kļūdu, kā redzams 4.4. attēlā, tika noskaidrots, ka palielinot segmentu garumu, palielinās arī vidējā rekonstrukcijas kļūda.

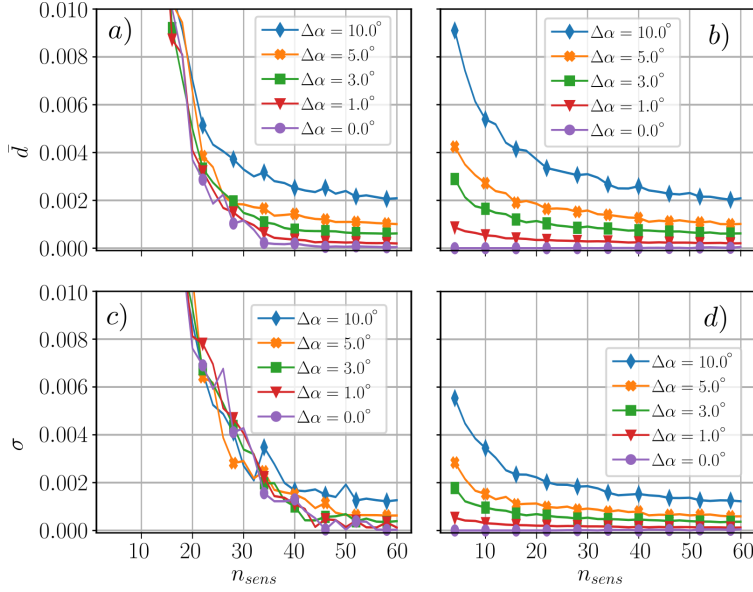
Analizējot rezultātus piedāvātās pieejas alternatīvai ar sensoriem uz līnijas (4.3a. attēls), redzams, ka tai rekonstrukcijas kļūda strauji pieaug kad $n_{sens} < 20$. Tas, kā tika noskaidrots simulācijās iepriekš, ir saistīts ar līniju ģenerēšanai izmantoto nolašu skaitu K_{gen} .

Veicot simulācijas ar dažādiem stiepes koeficientiem λ un no 10 nejaušām leņķiskajām nolasēm sintezētām 2D līnijām, tika iegūti 4.4. attēlā redzamie rezultāti⁶. Kā redzams 4.4b. 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

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

⁵https://pubgit.edi.lv/armands-phd/simulations/-/blob/master/RandSim_1.py

⁶https://pubgit.edi.lv/armands-phd/simulations/-/blob/master/RandSim_2.py

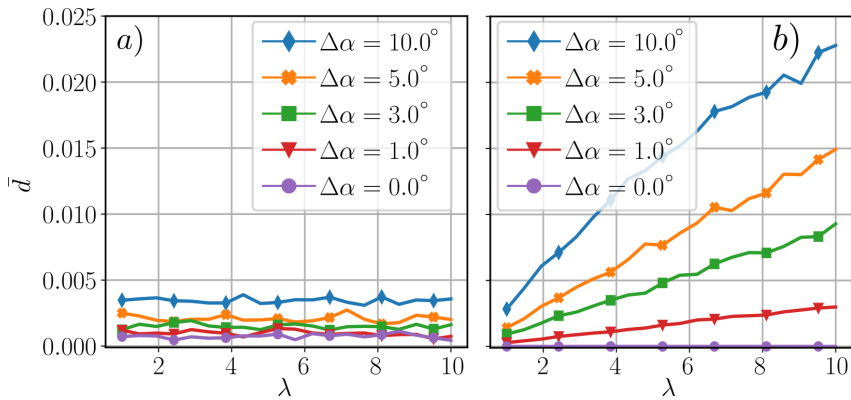


4.3. att. Savienojumu punktu rekonstrukcijas vidējā kļūda atkarībā no sensoru skaita:

a) rekonstrukcija ar sensoriem uz ķermeņa; b) rekonstrukcija ar sensoriem zigzag struktūrās. Rekonstrukcijas kļūdas standartnovirze σ : c) rekonstrukcija ar sensoriem uz ķermeņa; d) rekonstrukcija ar sensoriem zigzag struktūrās. Fiksētie parametri:

$$K_{gen} = 10, \lambda = 1, N_{rand} = 100.$$

Zigzag struktūras ķermeņa formas rekonstrukcija, lai minimizētu savienojuma punktu rekonstrukcijas kļūdu, tiek rekomendēts izmantot pēc iespējas mazākus zigzag posmu garumus.



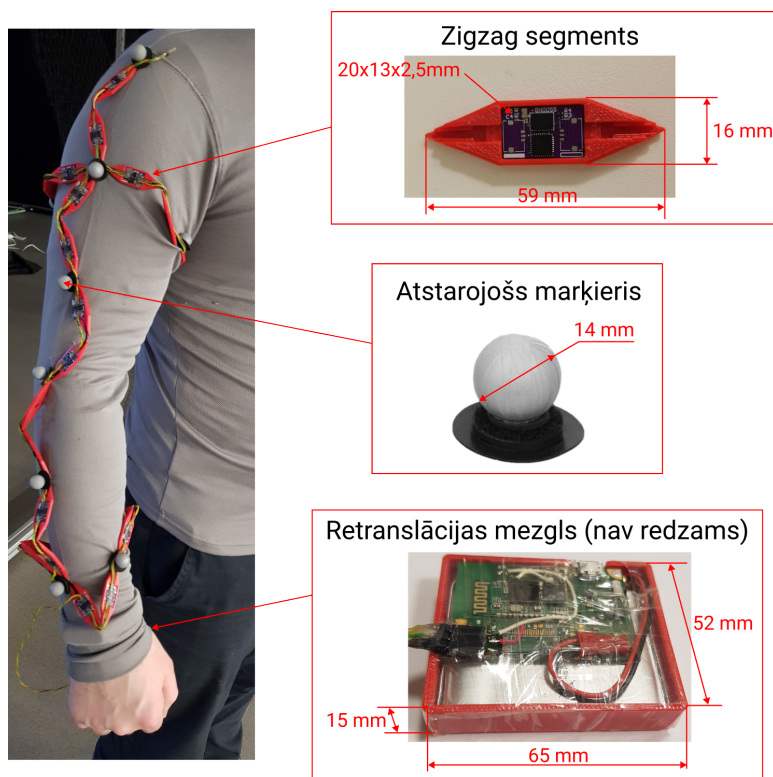
4.4. att. Savienojumu punktu rekonstrukcijas kļūda atkarībā no zigzag struktūras stiepes koeficienta: a) rekonstrukcija ar sensoriem uz ķermeņa; b) rekonstrukcija ar sensoriem zigzag struktūrās. Fiksētie parametri: $K_{gen} = 10, n_{sens} = 30, N_{rand} = 100$.

4.2. Eksperimentālais makets rokas formas rekonstrukcijai

Šajā nodaļā 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 plates un ar 3D printeri izgatavotas detaļas.

Izgatavotais makets, kā redzams 4.5. attēlā, satur zigzag struktūru, kas fiksētos punktos savienota ar pieguļošu apģērbu rokas formas rekonstrukcijai (savienojuma punktos ir piestiprināti marķieri). Kopumā zigzag struktūru veido 26 posmi, tās kopējais garums ir 1,534 m un tai ir 12 savienojuma punkti ar ķermeni.

Zigzag posmu korpusi ir izgatavoti ar Stratasys Dimension® 1200es 3D printeri (slāņu biezums 0,254 mm), un katrā posmā ir pa vienam IMU. Posmu savienojumiem izmantota 1,5 mm aukla, kas pielīmēta posmiem. Novērtējot posmu savienojumu precizitāti, tiek pieņemts ka posmu galapunkti sakrīt ar $\pm 2,5$ mm nenoteiktību.



4.5. att. Eksperimentālais makets rokas formas rekonstrukcijai ar zigzag struktūrām.

Sensoru tīkla izstrāde ir balstīta uz 3.2. nodaļā aprakstītā protokola un 3.3. nodaļā aprakstītās mezglu arhitektūras. Saziņai tiek izmantots savienojums ar 3 vadiem (GND,

0	1	2	3	4–5
0x55	0xAA	0x55	0xAA	LEN (LSB)

4.6. att. Eksperimentālā maketa saziņas protokola adresācijas bloka kadru secība.

0	1–8	9	10–11
ID	W,X,Y,Z (LSB)	KALIB.	CRC16 (MSB)

4.7. att. Eksperimentālā maketa sensora datu kadru secība.

VCC, Tx/Rx) atbilstoši UART pusdupleksās kopnes pamata konfigurācijai. Asinhronajai komunikācijai tiek izmantots sekojošs 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 (4.6. attēls) no 6 baitiem, kuros ir iekļauti metadati par sekojošo kadru skaitu (LEN). Katra sensora dati tiek pārsūtīti pa vadu tīklu izmantojot 12 kadrus (4.7. att.), kas satur sensora identifikatoru (kārtas numuru) grupā (ID), kvaterniona nolasī (W, X, Y, Z), sensora fona kalibrācijas statusu (KALIB) un ciklisko redundances pārbaudi (CRC16). Katram sensoram piešķirtais ID ir piesaistīts tā lokācijai zigzag struktūrā un secībai, kādā sensoru mezgli sūta datus pēc grupas adresācijas bloka saņemšanas.

Ar aprakstīto UART kadru formātu, adresācijas bloka struktūru (4.6. att.) un sensoru datu struktūru (4.7. att.) 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:

$$\begin{aligned} \min\{t_{frames}\} &= n_{frames} \cdot 10/f_b = (6 + n_{nodes} \cdot 12) \cdot 10/f_b = \\ &= 318 \cdot 10/460800 \approx 6,9ms \end{aligned} \quad (4.3)$$

un maketa maksimālā visu kadru pārraides frekvence:

$$f_{frames_max} = \frac{1}{\min\{t_{frames}\}} \approx 144,9Hz \quad (4.4)$$

Zigzag segmentos integrēto sensoru mezglu elektriskā shēma ir atrodama 1 pielikumā un pilns spiestās plates projekts – Gitlab⁷. Sensoru mezgls satur *BNO055* IMU čipu, kurš nodrošina sensoru datu sapludināšanu orientācijas datus, izmantojot ražotāja iegultos algoritmus. *BNO055* orientācijas sinhronai nolasīšanai un pārsūtīšanai uz retranslācijas mezglu ar 3. nodaļā aprakstīto pieeju sensoru mezglis satur MSP430G2553 mikrokontrolleri ar aparātprogrammatūru, kuras pseidokods atrodams 3 pielikumā un *Code Composer Studio* projekts ar C kodu MSP430G2553 mikrokontrolleram – *Gitlab*⁸.

Pirmajam sensoram (ID=0) programma ir modificēta, lai tas pildītu vedēja funkciju un ar fiksētu laika intervālu (20 ms) ģenerētu komunikācijas sākuma secību. Attiecīgi

⁷<https://pubgit.edi.lv/armands-phd/sensor-node-pcb>

⁸<https://pubgit.edi.lv/armands-phd/sensor-node-bus-fw>

modificēts sensoru vedēj-mezgla pseidokods ir atrodams 4 pielikumā un *Code Composer Studio* projekts ar C kodu MSP430G2553 mikrokontrolleram – *Gitlab* ⁹.

Bezvadu pārraides mezgls tika realizēts atbilstoši 3.8. attēlā parādītajai blokshēmai. Bezvadu pārraidi nodrošina HC-05 UART/Bluetooth modulis, kura datu lapa pieejam Internetā¹⁰. HC-05 ir nokonfigurēts atbilstoši izmantotajiem asinhronās komunikācijas parametriem: 1 sākuma un beigu simbols, 0 paritātes simboli, 8 datu simboli, 460800 Bd/s simbolu pārraides ātrums. Stabila 3,3 V barošanas sprieguma nodrošināšanai mezgls satur 2000 mAh litija-polimēra bateriju un impulsveida līdzsprieguma regulatoru. Retranslācijas mezgls satur arī *USB Micro* kontaktligzdu, kas ļauj veikt uzlādi ar standartizētiem *USB* lādētājiem.

4.3. Komunikācijas protokola novērtējums

Lai novērtētu izstrādātā eksperimentālā maketa vadu komunikācijas protokola veiktspēju, datu signāls "Tx/Rx" protokola darbības laikā tika analizēts ar "DSLogic U3Pro16"¹¹ loģisko analizatoru (nolašu frekvence 1 GHz), ar kuru tika noteikti 4.8. attēlā parādītie laika intervāli: t_1 – laiks grupas adresācijas blokam, t_2 – laiks lokālai sensoru nolašu iegūšanai, t_3 – laiks sensoru datu bloku pārraidei pēc visu mezglu lokālās sensoru nolasīšanas, t_4 – laiks, kurā kopne ir brīva. Visu minēto laiku summa veido sensoru datu nolasīšanas periodu $T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$. Papildus tam katrā laika intervālā tika piefiksēts nosūtīto kadru skaits, kuru izmanto, lai aprēķinātu vidējo viena kadra noraidīšanai nepieciešamo laiku t_{kads} . 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 μs	0.016 μs	130.720 μs	130.770 μs
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_kads}	21.79 μs	0.003 μs	21.787 μs	21.795 μs
t_{3_kads}	22.79 μs	0.018 μs	22.771 μs	22.833 μs

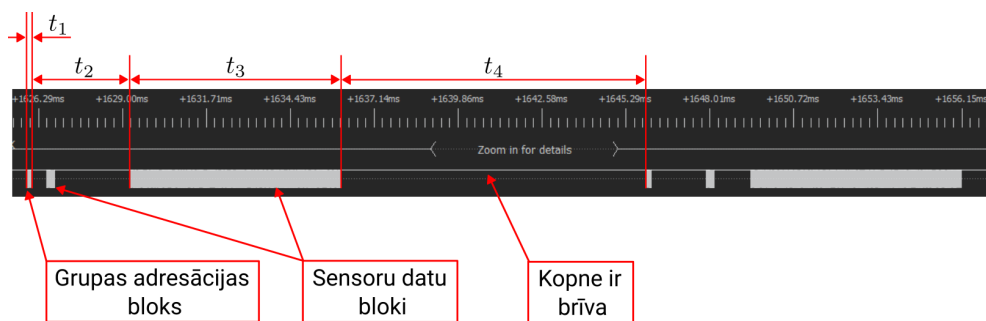
Kā redzams 4.1. tabulā, kadru pārraides laiki t_{1_kads} un t_{3_kads} ir ļoti tuvi maksimāli iespējamajam: $t_{kads} = 10/460800 = 21,70 \mu s$. Attiecīgi datu pārraides fāzē

⁹<https://pubgit.edi.lv/armands-phd/sensor-node-bus-fw/-/tree/master-node>

¹⁰[https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/HC-05%](https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/HC-05%20Datasheet.pdf)

20Datasheet.pdf

¹¹<https://www.dreamsourcelab.com/shop/logic-analyzer/dslogic-u3pro16/>



4.8. att. Eksperimentālā maketa datu līnijas digitālais signāla ekrānšāviņš.

(t_3) laika virstēriņš, kas rodas mikrokontrollera programmas aizkavju dēļ ir $\approx 5\%$, un, nesamazinot tīkla nolašu frekvenci (50 Hz), sensoru mezglu skaitu var palielināt pat $\lfloor (t_{4\min}/t_{3_kadrs\max} - 6)/12 \rfloor = 35$, kopā ļaujot tīklā saslēgt un nolasīt 61 sensoru mezglus.

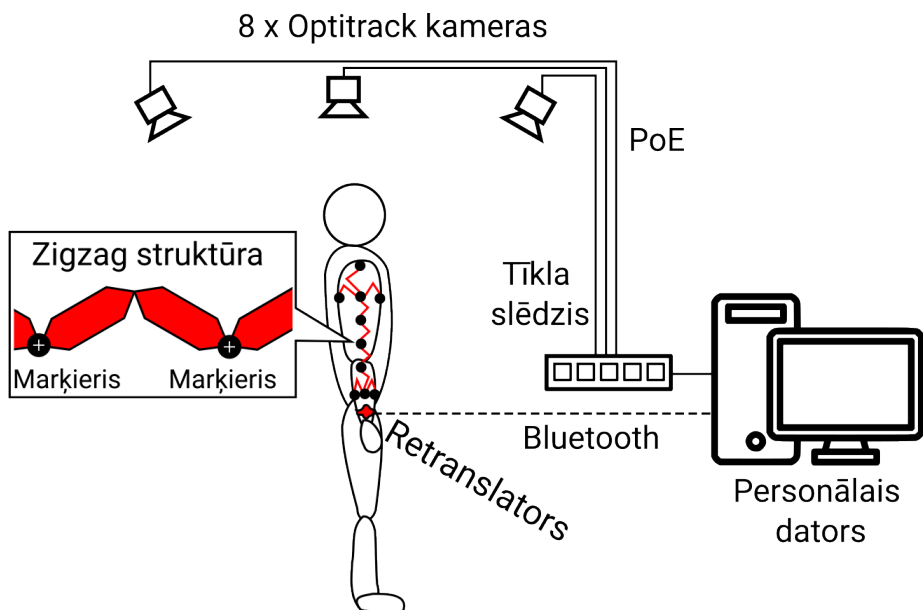
Izmantojot 4.1. tabulas datus, maketam varam novērtēt arī visu kadru pārraides frekvenci $f_{frames\max}^* = \frac{1}{t_{1\max} + t_{2\max} + t_{3\max}} \approx 93\text{ Hz}$, kas ir $\approx 64\%$ no teorētiski iespējamās ar izmantoto protokolu.

4.4. Savienojuma punktu rekonstrukcijas precizitātes novērtējums

Lai novērtētu izstrādātā eksperimentālā maketa savienojuma punktu rekonstrukcijas precizitāti, ar zigzag struktūru iegūtās savienojuma koordinātes tika salīdzinātas ar marķieru koordinātēm, kas iegūtas ar Optitrack™ optisko marķieru izsekošanas sistēmu. Optitrack marķieru 3D koordinātu noteikšanas ātrums ir 120 reizes sekundē un precizitāte līdz 0,2 mm [6].

Kā parādīts 4.9. attēlā, eksperimentā tika izmantotas sekojošas ierīces: personālais dators, 4.2. nodaļā aprakstītais zigzag struktūru eksperimentālais makets ar 12 savienojuma punktiem rokas formas rekonstrukcijai, Optitrack sistēma ar 8 infrasarkanajām kamerām un 12 atstarojoši marķieri 14 mm diametrā, kas piestiprināti zigzag struktūru savienojuma punktos. Marķieru fizisko izmēru dēļ, to centru koordinātes, kas tiek noteiktas ar kameru sistēmu, ir nobīdītas no zigzag struktūru savienojumu punktiem. Ņemot vērā, ka marķieri ir piestiprināti, lai to virsmas pieskartos savienojuma punktiem, tiek pieņemts, ka Optitrack marķieru centru koordinātes un ar zigzag struktūru iegūtās stiprinājuma punktu koordinātes sakrīt ar $\pm 7\text{ mm}$ nenoteiktību, kas atbilst marķieru rādiusam.

Pirms mērījumu datu ievākšanas tika veikta Optitrack sistēmas kalibrēšana un zigzag struktūras izgrozīšana dažādos stāvokļos, lai nokalibrētu BNO055 sensoru mezglus. Eksperimenta laikā zigzag struktūras eksperimentālais makets tika filmēts ar Optitrack kameru sistēmu, kamēr zigzag struktūras 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:



4.9. att. Eksperimenta instalācija zigzag struktūras maketa punktu rekonstrukcijas precizitātes novērtēšanai.

- Iztaisnota roka (Poza 1): roka un plauksta ir pilnībā izstiepta taisnā līnijā. Šī poza ļauj validēt sistēmu salīdzinoši vienkāršu formu rekonstrukcijai.
- Iztaisnota, svērpta roka (Poza 2): roka ir izstiepta tāpat, kā pozā ar iztaisnotu roku, taču plauksta ir pagriezta par 180 grādiem. Šī poza ļauj validēt sistēmu svērptu formu rekonstrukcijai.
- Saliekta roka (Poza 3): 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.

Pēc vienlaicīgas datu ierakstīšanas ar eksperimentālo maketu un Optitrack sistēmu ieraksti tika manuāli sadalīti pa posmiem, pēc atbilstošajām statistiskajām pozām, iegūstot divas kopas ar savienojuma punktu vidējām koordinātēm, kuru standartklūda ir mazāka par 0,2 mm.

Optitrack datu ierakstīšanai un priekšapstrādei (punktu marķēšana) tika izmantota Optitrack™ (2022. gada 7. jūnijs) "Motive 3.0.1 Final" datorprogramma¹², ar kuru apstrādātie datu kadri ar atbilstošiem laika zīmogiem tika eksportēti uz CSV failu. Savukārt zigzag struktūras maketa sensoru datu ierakstīšanai tika izstrādāts speciāls rīks¹³, kas nodrošina IMU datu nolasīšanu un kadru saglabāšanu CSV formātā ar atbilstošiem laika

¹²<https://optitrack.com/support/downloads/motive.html>

¹³<https://pubgit.edi.lv/armands-phd/loggingtool>

zīmogiem.

Zigzag struktūras stiprinājumu punktu rekonstrukcijai no *BNO055* sensoru orientācijas datiem tika izmantota 2.3. nodaļā aprakstītā pieeja. Iegūtās struktūras stiprinājuma punktu relatīvās koordinātes (attiecībā pret citiem stiprinājuma punktiem) globālajā atskaites sistēmā, kuru veido magnētiskie ziemeļi un vertikālais virziens. Tā kā ar Optitrack iegūtie mērījumi tiek iegūti citā – Optitrack kameru koordinātu sistēmā –, lai nodrošinātu to, ka punktu koordinātes pārklājas un abu sistēmu mērījumi ir salīdzināmi, ir jānodrošina abu koordinātu sistēmu salāgošana. Tā paveikšanai tika izmantots ICP algoritms[8].

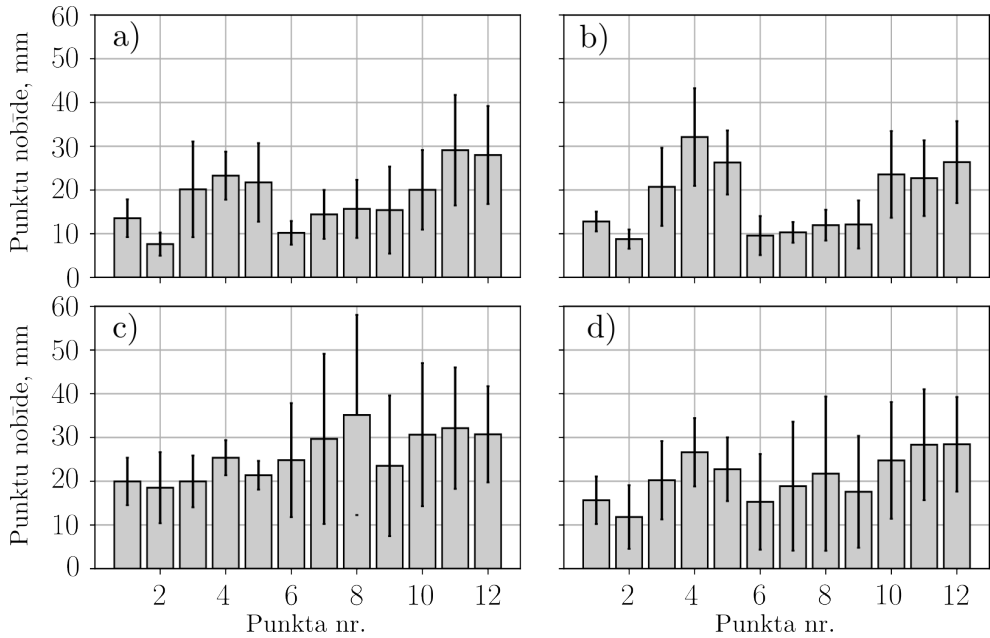
4.2. tabula

Atšķirība starp savienojuma punktu koordinātēm, kas iegūtas ar zigzag struktūras eksperimentālo maketu un Optitrack marķieru izsekošanas kameru sistēmu. Vērtības ir norādītas milimetros.

Punkta nr.	Poza 1		Poza 2		Poza 3		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

Atšķirību novērtēšanai starp zigzag struktūras un Optitrack sistēmas iegūtajām savienojumu punktu koordinātēm pēc to salāgošanas ar ICP algoritmu izmanto 4.2. vienādojumu Eiklīda attāluma aprēķinam. Rezultātu vērtības milimetros ir apkopotas 4.2. tabulā un 4.10. 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 zigzag struktūras garuma ($1,53 \text{ m}$). Šo atšķirību potenciāli var samazināt, uzlabojot zigzag struktūras posmu savienojumu precizitāti ($\pm 2,5 \text{ mm}$), samazinot nobīdi starp zigzag struktūras savienojuma punktiem un Optitrack marķieru centriem ($\pm 7 \text{ mm}$) un samazinot nesakritību starp zigzag segmentu un orientācijas sensoru lokālajām koordinātu sistēmām.

Lai novērtētu eksperimentālā maketa zigzag struktūras stiepes koeficientu eksperi-



4.10. att. Attālums starp zigzag struktūras maketa savienojuma punktiem un Optitrack marķieriem statistisku objektu formas rekonstrukcijā. a) Poza 1: roka iztaisnota, b) Poza 2: roka savērpta, c) Poza 3: roka saliekta elkonī, d) kopā ņemot visām pozām

mentos, tika aprēķināts vidējais līnijas garums, kuru 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 $\Delta\alpha_{\text{BNO055}} = 4,61^\circ$ [31], 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 zigzag struktūras savienojuma punktu vidējā kļūda, ko rada *BNO055* sensora mērījuma nenoteiktība ir $\approx 3,8 \text{ mm}$.

4.5. Secinājumi

Veicot skaitliskās simulācijas ar nejauši uzdotām līnijām, tika noskaidrots, ka ar piedāvāto metodi nosakāmā ķermeņa forma savienojuma punktu rekonstrukcijas precizitāti ietekmē daudz mazāk, kā pieejas ar sensoriem uz ķermeņa. Tika noskaidrots arī, ka ar sensoriem uz līnijas un sensoriem zigzag struktūrās, savienojumu punktu rekonstrukcijas precizitāte ir apgriezti proporcionāla sensoru skaitam, taču pieejai ar sensoriem uz līnijas kļūdas pieaugums sensoru skaitam zem noteiktas robežas ir stipri lielāks, kā piedāvātajai pieejai ar sensoriem zigzag struktūrās. Turklāt gadījumā ar sensoriem zigzag struktūras, sensoru

mērījumu kļūdai samazinoties, rekonstrukcijas kļūda konverģē uz nulli, visā sensoru skaita diapazonā. Šī ir būtiska priekšrocība pielietojumiem, 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 zigzag segmentu garumu) ietekmi uz rekonstrukcijas precizitāti, tika noskaidros, ka tos saista lineāra korelācija – jo lielāks stiepes koeficients un zigzag struktūras 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 zigzag segmentu garumus.

Eksperimentālajiem pētījumiem izstrādātais makets rokas formas rekonstrukcijai ar 26 zigzag struktūras posmiem ļauj noteikt koordinātes 12 savienojuma punktiem, kuru lokācijas ir izvēlētas rokas formas noteikšanai visā tās garumā. Savienojuma punktu rekonstrukcijai izstrādātais makets nolasa zigzag segmentu orientācijas kvaternionu formā un pārsūta tos uz ārēju ierīci ar 50 Hz frekvenci, kuru 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. Nemainot izmantoto orientācijas sensora čipu, nobīdi potenciāli var samazināt līdz noteiktai robežai (3,8 mm), kura tika aptuveni novērtēta, balstoties uz eksperimentālā maketa parametriem un veiktajām simulācijām. 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 zigzag segmentu 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 izvirzīto 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 IMU 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 uz orientācijas sensoru izvietojumu nevis uz ķermeņa virsmas, bet uz zigzag struktūrām, 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), izvirzītā hipotēze par samazinātu ķermeņa formas ietekmi uz rekonstrukcijas rezultātu apstiprinājās. 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 zigzag struktūras 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 attiecīgas ķermeņa sensoru tīklu komunikācijas tehnoloģijas un to piemērotība liela skaita sensoru tīkla izveidei. Tika secināts, ka pašlaik dominē bezvadu risinājumi, taču pielietojumiem ar lielu skaitu un 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 izplatītus interfeisus ar divtaktu tranzistoru izejām (UART, SPI).

Piedāvātā pieeja ietver gan pielāgotu vadu tīkla arhitektūru ar 3 vadu savienojumiem (datu signāls un barošana) optimizētam vadu izlietojumam sarežģītām mezglu topoloģijām, gan saziņas protokolu, kas ļauj būtiski uzlabot simbolu pārraides efektivitāti. Veicot saziņas protokola analīzi, tika aprēķināts, ka ar piedāvāto saziņas protokolu grupu saziņas protokolu virstēriņu var samazināt proporcionāli sagrupēto mezglu skaitam.

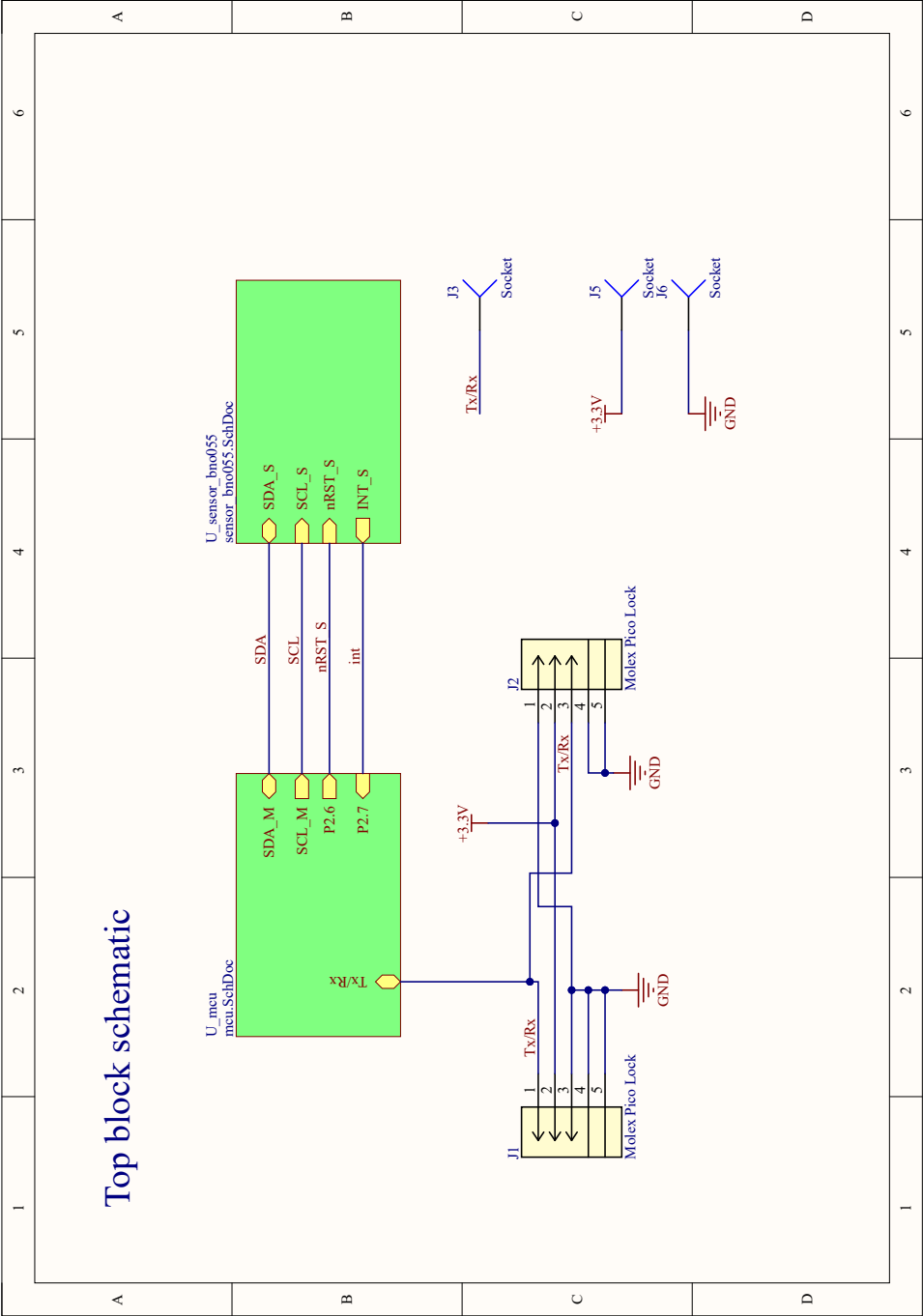
Praktiskiem eksperimentiem, lai novērtētu darbā piedāvātās KST arhitektūras un ķermeņa formas rekonstrukcijas pieejas, tika izstrādāts zigzag struktūras eksperimentālais makets rokas formas noteikšanai. Makets satur 26 zigzag segmentus ar IMU, kas ar ķermeni veido 12 savienojuma punktus. Maketā tika īstenota darbā piedāvātā pieeja sensoru datu ieguvei un barošanai ar 3 vadu savienojumiem kopnes topoloģijā. Veicot komunikācijas signāla analīzi tika noskaidrots, 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 realizējam ar komerciāli pieejamām zema enerģijas patēriņa komponentēm un ir pielietojama reāllaika sistēmām.

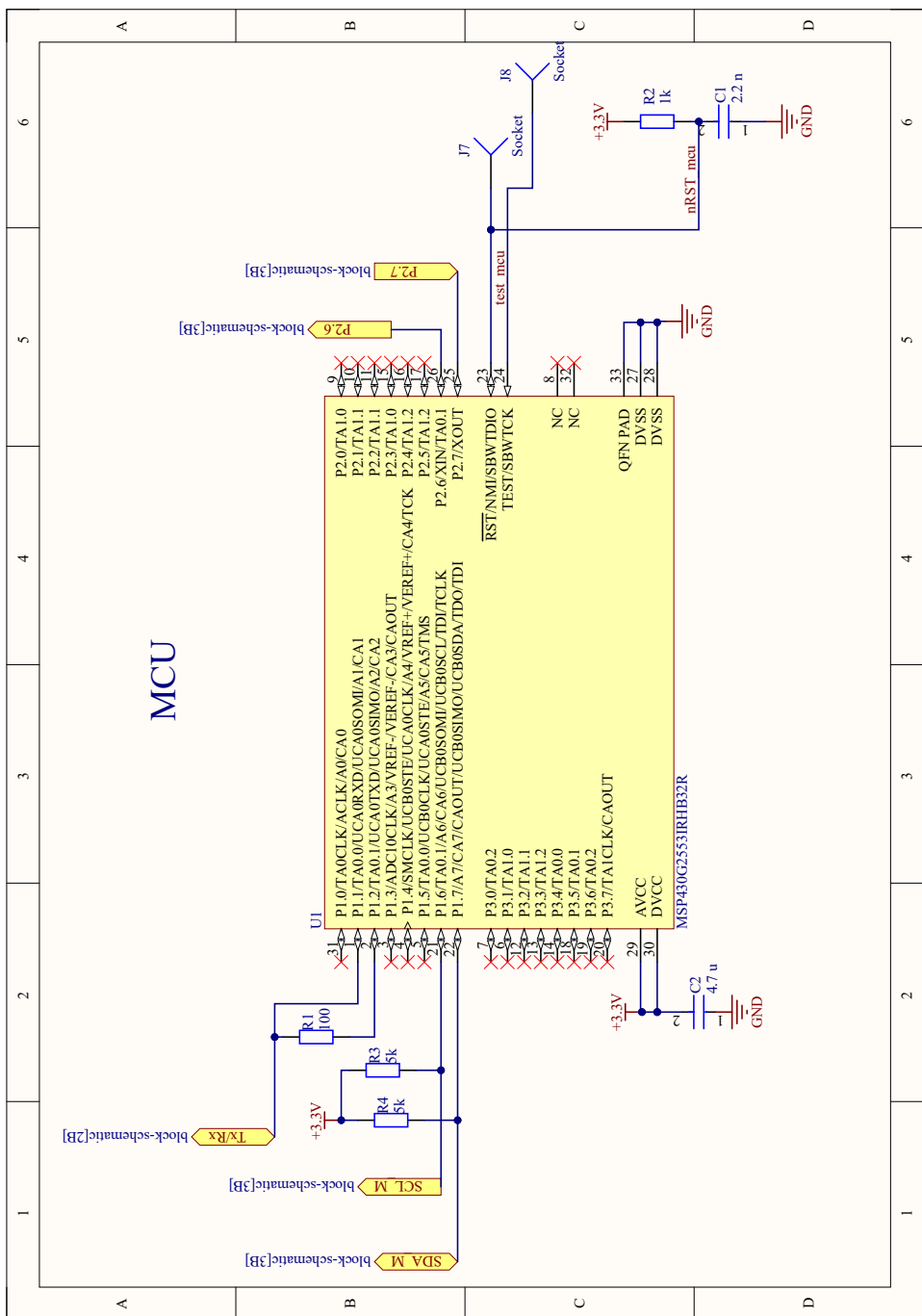
Salīdzinot izstrādāto eksperimentālo maketu ar Optitrack marķieru izsekošanas sistēmu dažādu ķermeņa pozu noteikšanai, vidējā atšķirība starp iegūto savienojuma punktu koordinātēm ir $\pm 19,9$ mm. Ņemot vērā, ka lielāko daļu no tās veido segmentu savienojumu neprecizitātes ($\pm 2,5$ mm), Optitrack 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.

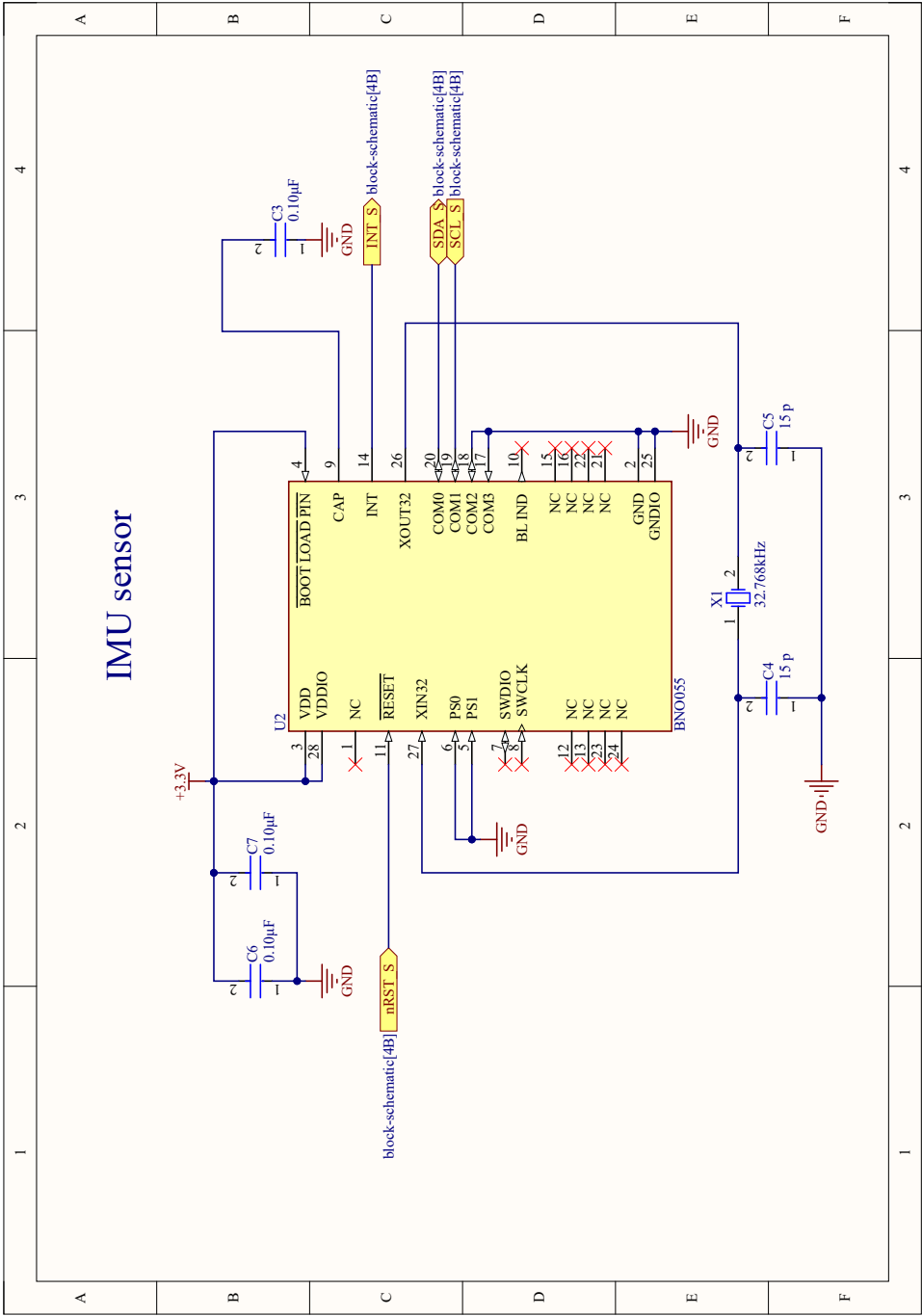
Kopumā veiktās simulācijas un eksperimenti apstiprina piedāvātās formas rekonstrukcijas metodes piemērotību ķermeņu formas rekonstrukcijai no orientācijas sensoru datiem, turklāt tai ir identificētas vairākas priekšrocības, salīdzinot ar citām zināmajām metodēm. Piedāvātā pieeja, kas ietver sistēmas 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 apskatītos zema enerģijas patēriņa MCU saziņas interfeisus.

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

PIELIKUMI



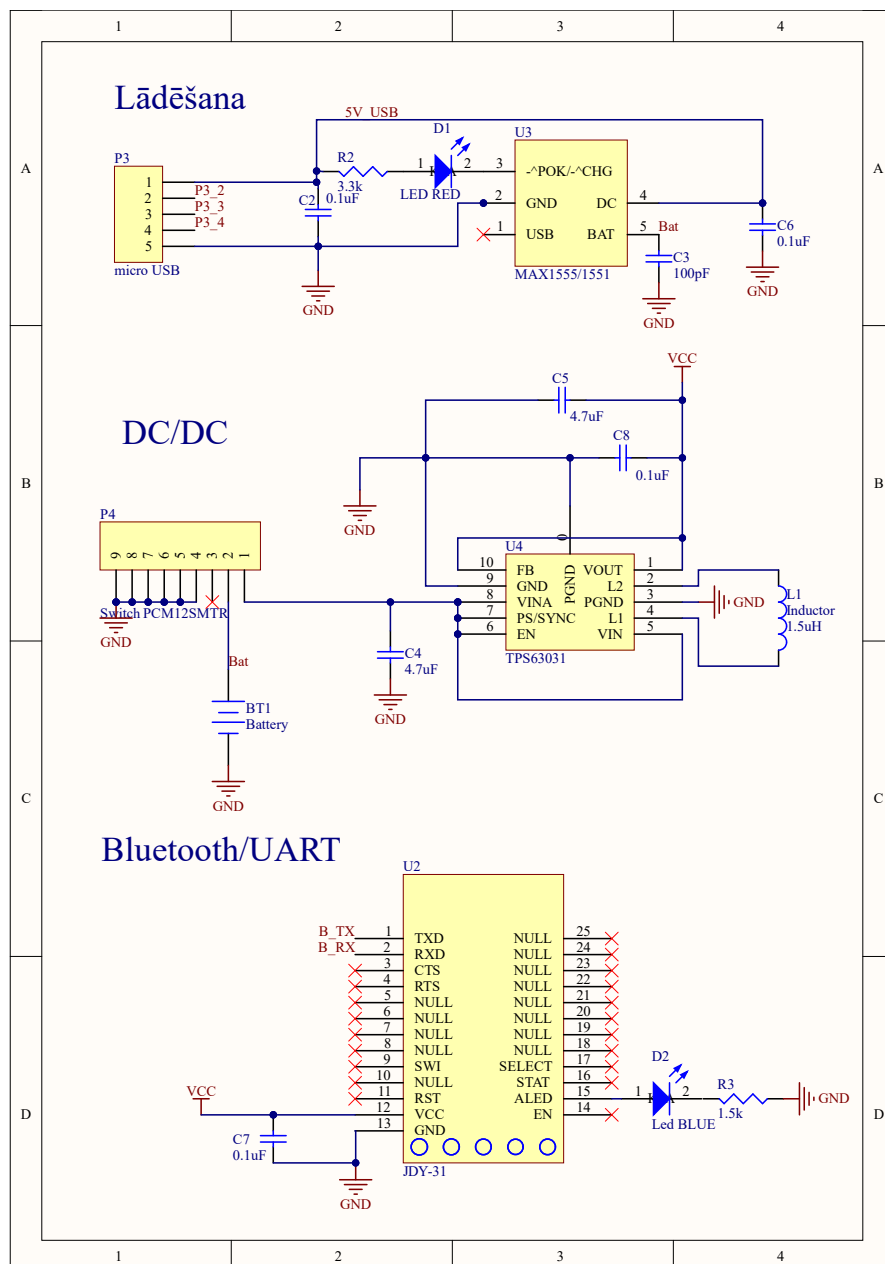




Komponentu saraksts

Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
2.2 n	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0402	C1	C_0402_MFG	C_0402	1
4.7 u	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0402	C2	C_0402_MFG	C_0402	1
0.10µF	CAP CER 16V 0402	C3, C6, C7	C_0402_MFG	C_0402	3
15 p	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0402	C4, C5	C_0402_MFG	C_0402	2
Molex Pico Lock	Molex Pico Lock, 3 pin, 1mm	J1, J2	CON_5037630391	5037630391	2
Socket	Socket	J3, J5, J6, J7, J8	SOCKET-SMT	Socket	5
100		R1	R_0402_L	R_0402	1
1k		R2	R_0402_L	R_0402	1
5k		R3, R4	R_0402_L	R_0402	2
MSP430G2553RHB32 R	16 MHz Mixed Signal Microcontroller with 16 KB Flash, 512 B SRAM and 24 GPIOs, - 40 to 85 degC, 32-pin QFN (RHB), Green (RoHS & no Sb/Br)	U1	RHB0032E_V	MSP430G2553RHB32 R	1
BNO055	IMU ACCEL/GYRO/MAG I2C 28LGA	U2	FP-BNO055-MFG	BNO055	1
32.768kHz	Low Profile Crystal, 32.768 KHz, 20 PPM, 12.5 pF	X1	ABRA-ABS06-2_V	Low Profile Crystal	1

Retranslācijas mezgla pilna elektriskā shēma



```

1: isSync  $\leftarrow$  0                                ▷ sinhronizācija: 0-nav, 1-ir
2: isTimeout  $\leftarrow$  0                            ▷ noildze: 0-nav, 1-ir
3: cntRx  $\leftarrow$  0                                ▷ UART saņemto baitu skaits
4: procedure MAIN(nPass, nGroup)                  ▷ Param.:baiti pirms, baiti kopā
5:   Inicializē UART ar atslēgtu raidītāju, ātrumu 460800 un 1 start/stop bitu
6:   Inicializē I2C master režīmā ar ātrumu 400000
7:   Nokonfigurē BNO055 sensoru 'NDOF' režīmā
8:   Inicializē stāvošu taimeru, kas izsauc TIMERIRQ ik pēc 10ms.
9:   Iespējo pārtrauces: UARTRXIRQ, TIMERIRQ
10:  loop
11:    while isSync = 0 do                          ▷ Gaida sinhronizāciju
12:    end while
13:    data  $\leftarrow$  [id, Quat(8), Stat(1), CRC16(2)]    ▷ Sagatavo sens. datus
14:    while (cntRx < nPass) & (isTimeout = 0) do    ▷ Gaida savu kārtu
15:    end while
16:    Pieslēdz UART raidītāju
17:    for all d  $\in$  data do
18:      if isTimeout = 0 then                          ▷ Ja būs noildze, nekas sūtīts netiks
19:        UARTTX(d)                                     ▷ Pa baitam izsūta sensora datus
20:      end if
21:    end for
22:    Atslēdz UART raidītāju, kad dati izsūtīti
23:    while (cntRx < nGroup) & (isTimeout = 0) do
24:      Tukšs cikls. Gaida, kamēr grupa pārraida visus datus
25:    end while
26:    Apstādina un nonullē Taimeru

```

```

27:      isSync  $\leftarrow$  0
28:  end loop
29: end procedure
30: procedure UARTRXIRQ(rxByte)
31:   Nonullē Taimeri
32:   cntRx  $\leftarrow$  cntRx + 1
33:   if isSync = 0 then ▷ Pārbauda vai nav saņemta secība
34:     if Sinhronizācijas secība saņemta then
35:       isSync  $\leftarrow$  1
36:       isTimeout  $\leftarrow$  0
37:       Palaiž Taimeri
38:     else
39:       cntRx  $\leftarrow$  0
40:     end if
41:   end if
42: end procedure
43: procedure TIMERIRQ
44:   Apstādina un nonullē Taimeri
45:   isTimeout  $\leftarrow$  1
46:   isSync  $\leftarrow$  0
47: end procedure

```

```

1: isSync  $\leftarrow$  0                                 $\triangleright$  sinhronizācija: 0-nav, 1-ir
2: isTimeout  $\leftarrow$  0                             $\triangleright$  noildze: 0-nav, 1-ir
3: cntRx  $\leftarrow$  0                                 $\triangleright$  UART saņemto baitu skaits
4: procedure MAIN(nGroup)                         $\triangleright$  Param.:baiti pirms, baiti kopā
5:   Inicializē UART ar atslēgtu raidītāju, ātrumu 460800 un 1 start/stop bitu
6:   Inicializē I2C master režīmā ar ātrumu 400000
7:   Nokonfigurē BNO055 sensoru 'NDOF' režīmā
8:   Inicializē stāvošu taimeru, kas izsauc TIMERIRQ1 ik pēc 10ms.
9:   Inicializē ejošu taimeru, kas izsauc TIMERIRQ2 ik pēc 20ms.
10:  Iespējo pārtrauces: UARTRXIRQ, TIMERIRQ1, TIMERIRQ2
11:  loop
12:    while isSync = 0 do                         $\triangleright$  Gaida sinhronizāciju
13:    end while
14:    Iespējo UART raidītāju
15:    Pa UART nosūta kadra sākuma secību un kārtas numuru
16:    Nonullē un palaiž noildzes taimeru (10ms)
17:    data  $\leftarrow$  [0, Quat(8), Stat(1), CRC16(2)]     $\triangleright$  Sagatavo sens. datus
18:    Pieslēdz UART raidītāju
19:    for all d  $\in$  data do
20:      UARTTX(d)                                 $\triangleright$  Pa baitam izsūta sensora datus
21:    end for
22:    Atslēdz UART raidītāju, kad dati izsūtīti
23:    while (cntRx < nGroup)&(isTimeout = 0) do
24:      Gaida, kamēr grupa pārraida visus datus
25:    end while
26:    Apstādina un nonullē Taimeri

```

```

27:      isSync ← 0
28:  end loop
29: end procedure
30: procedure UARTRXIRQ(rxByte)
31:   Nonullē Taimeri
32:   cntRx ← cntRx + 1
33: end procedure
34: procedure TIMERIRQ1
35:   Apstādina un nonullē Taimeri
36:   isTimeout ← 1
37:   isSync ← 0
38: end procedure
39: procedure TIMERIRQ2
40:   isSync ← 1
41: end procedure

```

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] Alexander M. Aurand, Jonathan S. Dufour, and William S. Marras. Accuracy map of an optical motion capture system with 42 or 21 cameras in a large measurement volume. *Journal of Biomechanics*, 58:237–240, 2017.
- [7] F. Bernardini, J. Mittleman, H. Rushmeier, C. Silva, and G. Taubin. The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4):349–359, 1999.
- [8] 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.
- [9] Bosch Sensortec. *BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor*, 11 2014. Rev. 1.2.
- [10] Marco Caruso, Angelo Maria Sabatini, Daniel Laidig, Thomas Seel, Marco Knaflitz, Ugo Della Croce, and Andrea Cereatti. Analysis of the accuracy of ten algorithms for orientation estimation using inertial and magnetic sensing under optimal conditions: One size does not fit all. *Sensors*, 21(7), 2021. Cited by: 24; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access.
- [11] R. Cavallari, F. Martelli, R. Rosini, C. Buratti, and R. Verdone. A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(3):1635–1657, 2014. cited By 487.

- [12] Nerea De Acha, Abián B. Socorro-Leránoz, César Elosúa, and Ignacio R. Matías. Trends in the design of intensity-based optical fiber biosensors (2010–2020). *Biosensors*, 11(6), 2021. Cited by: 11; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access.
- [13] Haiting Di, Ying Xin, and Jinquan Jian. Review of optical fiber sensors for deformation measurement. *Optik*, 168:703–713, 2018.
- [14] Isaac M. Di Napoli and Casey M. Harwood. Design and benchmarking of a robust strain-based 3d shape sensing system. *Ocean Engineering*, 201, 2020. Cited by: 1.
- [15] Yichun Ding, Tao Xu, Obiora Onyilagha, Hao Fong, and Zhengtao Zhu. Recent advances in flexible and wearable pressure sensors based on piezoresistive 3d monolithic conductive sponges. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(7):6685 – 6704, 2019. Cited by: 185.
- [16] H. Edelsbrunner, D. Kirkpatrick, and R. Seidel. On the shape of a set of points in the plane. *IEEE Transactions on Information Theory*, 29(4):551–559, 1983.
- [17] John Fisher, John Lowther, and Ching-Kuang Shene. Curve and surface interpolation and approximation. volume 36, page 146, 06 2004.
- [18] 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.
- [19] Pedro Fonseca, Merel M. Van Gilst, Mustafa Radha, Marco Ross, Arnaud Moreau, Andreas Cerny, Peter Anderer, Xi Long, Johannes P. Van Dijk, and Sebastiaan Overeem. Automatic sleep staging using heart rate variability, body movements, and recurrent neural networks in a sleep disordered population. *Sleep*, 43(9):1 – 10, 2020. Cited by: 15.
- [20] Naoki Furutani, Tetsuya Takahashi, Nobushige Naito, Takafumi Maruishi, Yuko Yoshimura, Chiaki Hasegawa, Tetsu Hirosawa, and Mitsuru Kikuchi. Complexity of body movements during sleep in children with autism spectrum disorder. *Entropy*, 23(4), 2021. Cited by: 2.
- [21] Kevin C. Galloway, Yue Chen, Emily Templeton, Brian Rife, Isuru S. Godage, and Eric J. Barth. Fiber optic shape sensing for soft robotics. *Soft Robotics*, 6(5):671–684, 2019. PMID: 31241408.
- [22] 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.

- [23] Atis Hermanis. *Shape sensing based on embedded sensors for mobile cyber-physical systems*. Theses, Riga Technical University, 2016.
- [24] S. Zohreh Homayounfar and Trisha L. Andrew. Wearable sensors for monitoring human motion: A review on mechanisms, materials, and challenges. *SLAS Technology*, 25(1):9–24, 2020. Special Issue: Flexible Analytical Devices for Point-of-Care Testing.
- [25] Takayuki Hoshi and Hiroyuki Shinoda. 3d shape measuring sheet utilizing gravitational and geomagnetic fields. In *2008 SICE Annual Conference*, pages 915–920, 2008.
- [26] Mathieu Huard, Rida T. Farouki, Nathalie Sprynski, and Luc Biard. C2 interpolation of spatial data subject to arc-length constraints using pythagorean-hodograph quintic splines. *Graphical Models*, 76(1):30 – 42, 2014. Cited by: 18; All Open Access, Green Open Access.
- [27] Mathieu Huard, Nathalie Sprynski, Nicolas Szafran, and Luc Biard. Reconstruction of quasi developable surfaces from ribbon curves. *Numerical Algorithms*, 63(3):483 – 506, 2013. Cited by: 11.
- [28] Michael Kazhdan, Matthew Bolitho, and Hugues Hoppe. Poisson Surface Reconstruction. In Alla Sheffer and Konrad Polthier, editors, *Symposium on Geometry Processing*. The Eurographics Association, 2006.
- [29] 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.
- [30] Dustin Lehmann, Daniel Laidig, Raphael Deimel, and Thomas Seel. Magnetometer-free inertial motion tracking of arbitrary joints with range of motion constraints. volume 53, page 16016 – 16022, 2020. Cited by: 3; All Open Access, Bronze Open Access, Green Open Access.
- [31] 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)*, pages 185–189, 2017.
- [32] Shovan Maity, Baibhab Chatterjee, Gregory Chang, and Shreyas Sen. Bodywire: A 6.3-pj/b 30-mb/s-30-db sir-tolerant broadband interference-robust human body communication transceiver using time domain interference rejection. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 54(10):2892 – 2906, 2019. Cited by: 26; All Open Access, Bronze Open Access.

- [33] Shovan Maity, Mayukh Nath, Gargi Bhattacharya, Baibhab Chatterjee, and Shreyas Sen. On the safety of human body communication. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 67(12):3392 – 3402, 2020. Cited by: 17; All Open Access, Bronze Open Access.
- [34] Sarvenaz Salehi Mourkani. *IMU-based Suit for Strength Exercises: Design, Calibration and Tracking*. doctoralthesis, Technische Universität Kaiserslautern, 2021.
- [35] Saguin-Sprynski N., Jouanet L., Lacolle B., and Biard L. Surfaces reconstruction via inertial sensors for monitoring. page 702 – 709, 2014. Cited by: 11.
- [36] 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.
- [37] Milad Nazarahari and Hossein Rouhani. 40 years of sensor fusion for orientation tracking via magnetic and inertial measurement units: Methods, lessons learned, and future challenges. *Information Fusion*, 68:67–84, 2021.
- [38] 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.
- [39] NXP Semiconductors. *I2C-bus specification and user manual*, 10 2021. Rev. 7.0.
- [40] Juris Ormanis and Atis Elsts. Towards body coupled communication for ehealth: Experimental study of human body frequency response. 2020. Cited by: 3.
- [41] Aidong Qiu, Qingxiu Jia, Huimin Yu, Jeong-A Oh, Danda Li, Hung-Yao Hsu, Nobuyuki Kawashima, Yan Zhuge, and Jun Ma. Highly sensitive and flexible capacitive elastomeric sensors for compressive strain measurements. *Materials Today Communications*, 26, 2021. Cited by: 9.
- [42] Chris Richter, Katherine A. J. Daniels, Enda King, and Andrew Franklyn-Miller. Agreement between inertia and optical based motion capture during the vu-return-to-play- field-test. *Sensors*, 20(3), 2020.
- [43] 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.
- [44] 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.

- [45] 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.
- [46] Ken Shoemake. Animating rotation with quaternion curves. In *Proceedings of the 12th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '85, page 245–254, New York, NY, USA, 1985. Association for Computing Machinery.
- [47] Nathalie Sprynski. *Reconstruction de courbes et surfaces à partir de données tangentielles*. Theses, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, July 2007.
- [48] Tibor Stanko. *Shape reconstruction of meshed smooth surfaces equipped with inertial sensors*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes, December 2017.
- [49] Qijun Sun, Wanchul Seung, Beom Joon Kim, Soonmin Seo, Sang-Woo Kim, and Jeong Ho Cho. Active matrix electronic skin strain sensor based on piezopotential-powered graphene transistors. *Advanced Materials*, 27(22):3411 – 3417, 2015. Cited by: 249.
- [50] Ayaka Tsuchiya, Hiroki Ora, Kohei Kameda, and Yoshihiro Miyake. Body movement synchrony captured by an omnidirectional camera predicts the degree of information transfer during dialogue: Toward automatic evaluation of verbal communication. page 215 – 220. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. Cited by: 0.
- [51] Fang Yi, Zheng Zhang, Zhuo Kang, Qingliang Liao, and Yue Zhang. Recent advances in triboelectric nanogenerator-based health monitoring. *Advanced Functional Materials*, 29(41), 2019. Cited by: 119.
- [52] Minglu Zhu, Zhiran Yi, Bin Yang, and Chengkuo Lee. Making use of nanoenergy from human – nanogenerator and self-powered sensor enabled sustainable wireless iot sensory systems. *Nano Today*, 36, 2021. Cited by: 107.



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 valkājamu sensoru izstrādi un izmantošanu, lai gūtu ieskatu par cilvēka ķermeņa darbību un sniegtu atgriezenisko saiti par sporta un medicīnas lietojumiem.