



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Magnetinio lauko duomenų apdorojimo metodų tyrimas žandikaulio judėjimui sekti**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Jokūbas Dranginis**

Projekto autorius

**Doc. dr. Darius Jegelevičius**

Vadovas

**Dr. Mantas Jucevičius**

Konsultantas

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Magnetinio lauko duomenų apdorojimo metodų tyrimas žandikaulio judėjimui sekti**

Baigiamasis magistro projektas

Biomedicininė inžinerija (6211EX002)

---

**Jokūbas Dranginis**

Projekto autorius

**Doc. dr. Darius Jegelevičius**

Vadovas

**Dr. Mantas Jucevičius**

Konsultantas

**Doc. Andrius Rapalis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Jokūbas Dranginis

## **Magnetinio lauko duomenų apdorojimo metodų tyrimas žandikaulio judėjimui sekti**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad

- 1) baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
- 2) baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
- 3) įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu
- 4) suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Jokūbas Dranginis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Dranginis Jokūbas

Magnetinio lauko duomenų apdorojimo metodų tyrimas žandikauliui sekti. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Darius Jegelevičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): Bioinžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: nuolatinis magnetas, magnetinis laukas, erdvinė pozicija, lokalizacija, koordinatės, mažiausių kvadratų pasikliautino regiono metodas, dalelių spiečiaus metodas, peržvalgos lentelė, neuroniniai tinklai, žandikaulis, žandikaulio sekimas.

Kaunas, 2023. 52 p.

### **Santrauka**

Žandikaulio biomechanika ir jo judesiai vaidina svarbų vaidmenį atliekant daugybę fiziologinių funkcijų, įskaitant kalbą, kramtymą ir kvėpavimą. Tikslus žandikaulio judesių stebėjimas turi didžiulę klinikinę reikšmę, suteikiant potencialių išvalgų apie tokias ligas kaip smilkininio apatinio žandikaulio sąnario sutrikimai, miego apnėja ir įvairūs kalbos sutrikimai. Šiame darbe aptariamas nuolatinio magneto magnetinio lauko panaudojimas žandikaulio judesiams sekti, daugiausia dėmesio skiriant duomenų apdorojimo metodams, naudojamiems erdvinei pozicijai nustatyti.

Nuolatinis magnetas įgalina nepastebimą ir neinvazinę metodiką, suteikiant galimybę nuolat stebėti žandikaulį, nepažeidžiant natūralių jo judesių. Tačiau dėl magnetinio lauko lygčių sudėtingumo reikia sudėtingų duomenų apdorojimo metodų, kad būtų galima išgauti prasmingą erdvinę padėtį iš magnetinio lauko duomenų. Šiame darbe nagrinėjami keturi tokie metodai: mažiausių kvadratų pasikliautino regiono, dalelių spiečių optimizacijos, peržvalgos lentelės ir neuroninio tinklo. Kiekviena technika suteikia unikalių duomenų apdorojimo pranašumų ir leidžia tiksliai bei greitai sekėti žandikaulio judesius.

Tyrimo metu empiriškai įvertintas kiekvieno metodo greitis ir tikslumas nustatant erdvinę padėtį. Rezultatai parodė išskirtines kiekvieno metodo veikimo charakteristikas su skirtingais skaičiavimo greičio ir erdvinio tikslumo kompromisais. Tiksliausiai erdvinė pozicija buvo nustatyta iš eksperimentiniu būdu užregistruotų duomenų su mažiausių kvadratų pasikliautino regiono metodu su 0,703 mm vidutine kvadratine paklaida, greičiausiai pasirodė neuroninių tinklų metodas nustatydamas erdvinę poziciją per 0,256 s. Šios išvados atskleidžia galimą kiekvienos technikos taikymą skirtinguose klinikiniuose scenarijuose, atsižvelgiant į reikiamą pusiausvyrą tarp apdorojimo greičio ir padėties tikslumo įvairiems diagnostikos ir gydymo tikslams. Tokiu tyrimu siekiama nustatyti galimas žandikaulio judesių sekimo aparatinės ir programinės įrangos tobulinimo kryptis, taip prisidedant prie susijusios klinikinės praktikos tobulinimo.

Dranginis, Jokūbas. Investigation of Magnetic Field Data Processing Methods for Jaw Motion Tracking. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Darius Jegelevičius Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Bioengineering, Engineering Sciences.

Keywords: permanent magnet, magnetic field, spatial position, localization, coordinates, least squares trust region reflective method, particle swarm method, look-up table, neural networks, jaw, jaw tracking.,

Kaunas, 2023. 52 p.

### **Summary**

The biomechanics of the jaw and its movements play an important role in many physiological functions, including speech, chewing and breathing. Thus, accurate monitoring of jaw movements is of great clinical importance, providing potential insights into health problems such as temporomandibular joint disorders, sleep apnea, and various speech disorders. This paper discusses the use of the magnetic field of a permanent magnet to track jaw movements, focusing on the data processing techniques used to determine spatial position.

The permanent magnet enables an unobtrusive and non-invasive technique, providing the opportunity to continuously monitor the jaw without disturbing its natural movements. However, the complexity of the magnetic field equations requires sophisticated data processing techniques to extract a meaningful spatial position from the magnetic field data. This paper examines four such methods: least-squares trust region reflective, particle swarm optimization, look-up table, and neural network. Each technique offers unique data processing advantages and allows accurate, fast tracking of jaw movements.

The research empirically evaluated the speed and accuracy of each method in determining the spatial position. The results showed distinct performance characteristics of each method with different trade-offs between computational speed and spatial accuracy. The most accurate spatial position was determined from the experimentally recorded data with the least squares trust region reflective method with a root mean square error of 0.703 mm, the neural network method proved to be the fastest by determining the spatial position in 0.256 s. These findings reveal the potential application of each technique in different clinical scenarios, considering the necessary balance between processing speed and positional accuracy for various diagnostic and therapeutic purposes. Such a study aims to identify possible directions for improving the hardware and software for tracking jaw movements, thus contributing to the improvement of related clinical practice.

## Turinys

<b>Santrumpų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Literatūros analizė.....</b>	<b>10</b>
1.1. Žandikaulio judesių stebėjimo medicininis pagrindas ir klinikinė svarba .....	10
1.1.1. Temporomandibulariniai sutrikimai.....	10
1.1.2. Kalbos sutrikimai.....	11
1.1.3. Miego sutrikimai .....	11
1.1.4. Odontologiniai sutrikimai.....	11
1.1.5. Ortodontija ir kaukolės chirurgija .....	12
1.1.6. Reabilitacija ir fizinė terapija .....	12
1.2. Žandikaulio sekimo technologijų ir metodų apžvalga.....	12
1.2.1. Optinė sistema .....	12
1.2.2. Elektromiograma paremta sistema .....	14
1.2.3. Ultragarso sistema .....	15
1.2.4. Magnetinė sistema .....	16
1.3. Duomenų apdorojimo metodai padėties nustatymui iš nuolatinio magneto magnetinio lauko	19
1.3.1. Mažiausių kvadratų pasikliautino regiono metodas .....	19
1.3.2. Dalelių spiečiaus metodas .....	20
1.3.3. Peržvalgos lentelės metodas .....	20
1.3.4. Neuroninių tinklų metodas .....	21
<b>2. Metodinė dalis.....</b>	<b>22</b>
2.1. Tyrimo aprašymas .....	22
2.2. Eksperimento ir naudotos įrangos aprašymas .....	23
2.2.1. Erdvinės pozicijos nustatymas erdvėje iš magnetinio lauko .....	23
2.2.2. Magnetinio lauko šaltinis .....	24
2.2.3. Nuolatinio magneto magnetinio lauko modeliavimas baigtinių elementų metodu .....	24
2.2.4. Magnetinio lauko modelio adekvatumo tyrimas .....	25
2.2.5. Žandikaulio judėjimo trajektorija atraminiams matavimams.....	25
2.2.6. Magnetinio lauko registravimas .....	26
2.2.7. Foninio magnetinio lauko įvertinimas.....	27
2.3. Erdvinės pozicijos įvertinimo metodai .....	27
2.3.1. Netiesinė optimizacija, mažiausių kvadratų algoritmas .....	27
2.3.2. Dalelių spiečiaus optimizacijos algoritmas .....	28
2.3.3. Peržvalgos lentelės algoritmas .....	29
2.3.4. Neuroninių tinklų algoritmas.....	30
2.3.5. Papildomas trajektorijų apdorojimas .....	32

<b>3. Rezultatai</b> .....	<b>33</b>
3.1. Pozicijos nustatymas mažiausių kvadratų metodu .....	33
3.2. Pozicijos nustatymas dalelių spiečiaus optimizacijos metodu .....	35
3.3. Pozicijos nustatymas peržvalgos lentelės metodu .....	38
3.4. Pozicijos nustatymas neuroninių tinklų metodu .....	40
3.5. Trajektorijų apdorojimas filtruojant .....	43
3.6. Metodų palyginimas ir diskusija .....	45
<b>Išvados</b> .....	<b>48</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>49</b>

## Santrumpų sąrašas

TMS – temporomandibularinis sąnarys;

TMSS – smilkininio apatinio žandikaulio sąnario sutrikimas;

MK – mažiausių kvadratų;

PR – pasikliautinas regionas;

DSO – dalelių spiečiaus optimizacija;

PL – peržvalgos lentelė;

NT – neuroninis tinklas;

EMG – elektromiograma;

3D – trimatė erdvė;

IKK – intraklasės koreliacijos koeficientas;

KPKT – kūgio pluošto kompiuterinė tomografija;

IMS – inercinis matavimo sistema;

MIA – maksimalus incizinis atsivėrimas;



## Įvadas

### Darbo aktualumas

Žandikaulio judesių sekimas yra naudingas įvairiose srityse, įskaitant odontologiją, kalbos terapiją, miego mediciną ir protezų gamybą. Tikslus žandikaulio judesių sekimas gali padėti diagnozuoti ir gydyti smilkininio apatinio žandikaulio sąnario (TMS) sutrikimus (TMSS), įvertinti kramtomųjų raumenų funkciją ir įvertinti ortodontinio gydymo efektyvumą [1]. Kalbos terapijoje žandikaulio judesių stebėjimas gali padėti suprasti kalbos artikuliaciją ir palengvinti kalbos sutrikimus [2]. Taip pat žandikaulio judesių stebėjimas atlieka lemiamą vaidmenį diagnozuojant ir gydant miego apnėją, kuri dažnai siejama su nenormalia žandikaulio padėtimi miego metu [3].

Tradiciniai žandikaulio judėjimo sekimo metodai apima mechanines ir optines sistemas. Mechaninėms sistemoms, pavyzdžiui, gnatografams dažnai reikia fizinio kontakto su tiriamuoju, o tai gali sukelti diskomfortą ir paveikti natūralų žandikaulio judėjimą. Kita vertus, optinėse sistemose naudojamos kameros ir atspindintys žymekliai, tačiau jos yra priklausomos nuo regėjimo linijos apribojimų ir reikalauja kontroliuojamos aplinkos [4].

Pastaraisiais metais atsirado vis didesnis susidomėjimas alternatyvių žandikaulio judėjimo stebėjimo metodų, pritaikant nuolatinis magnetus. Nuolatiniai magnetai turi keletą pranašumų lyginant su tradiciniais metodais. Jie yra neinvaziniai, jiems nereikia matymo linijos ir gali būti naudojami įvairiose aplinkose be didelių trukdžių. Be to, nuolatiniais magnetais paremti metodai yra ekonomiškai ir gana paprastai įgyvendinami.

Norint efektyviai naudoti nuolatinis magnetus žandikaulio judesiams sekti, reikia tikslių erdvinės padėties nustatymo metodų. Literatūroje erdvinės padėties nustatymo metodų galima rasti įvairių, tačiau jų našumas skiriasi tikslumu, skaičiavimo trukme ir įgyvendinimo paprastumu. Taigi, tokių metodų tyrimas ir palyginimas padėtų nustatyti tinkamiausią būdą stebėti žandikaulio judėjimą naudojant nuolatinis magnetus, kuris taip pat leistų sutrumpinti duomenų apdorojimo laiką.

Nuolatinis magnetų naudojimas stebint žandikaulio judesius yra perspektyvus, tačiau efektyviausio erdvinio padėties metodo nustatymas išlieka iššūkiu. Lyginant įvairius erdvinės padėties nustatymo metodus, tokius kaip mažiausių kvadratų (MK) pasikliautino regiono (PR), dalelių spiečių optimizavimo (DSO), peržvalgos lentelės (PL) ir neuroninių tinklų (NT), šiuo tyrimu siekiama nustatyti geriausią būdą tiksliai ir efektyviai sekti žandikaulio judėjimą, naudojant nuolatinis magnetus.

**Darbo tikslas** – ištirti erdvinės pozicijos nustatymo metodus, paremtus nuolatinio magneto magnetiniu lauku, skirtus žandikaulio pozicijai sekti.

### Darbo uždaviniai

1. Išanalizuoti literatūrą žandikaulio judėjimo stebėsenos technologijų srityje.
2. Įgyvendinti metodus erdvinės pozicijos nustatymui iš nuolatinio magneto magnetinio lauko, žandikaulio judėjimui sekti.
3. Kiekybiškai įvertinti metodų žandikaulio pozicijos nustatymo klaidą ir greitį.

## **1. Literatūros analizė**

### **1.1. Žandikaulio judesių stebėjimo medicininis pagrindas ir klinikinė svarba**

Tikslus žandikaulio judesių sekimas yra labai svarbus įvairiose medicininės diagnostikos, rehabilitacijos, kalbos analizės ir dantų tyrimų srityse. Medicinos srityje tikslus žandikaulio judesių sekimas gali padėti diagnozuoti ir gydyti TMSS, netaisyklingą sąkandį ir kitas su žandikauliu susijusias problemas [1]. Tikslus sekimas yra svarbus kalbos terapijoje ir kalbotyroje, nes padeda specialistams suprasti kalbėjimo biomechaniką ir kurti tikslines intervencijas [2]. Atliekant odontologinius tyrimus, žandikaulio judesių stebėjimas gali suteikti įžvalgų apie sąkandžio jėgas ir dinamiką kramtymo metu, taip prisidedant prie geresnių dantų protezų ir ortodontinio gydymo kūrimo [5].

#### **1.1.1. Temporomandibulariniai sutrikimai**

TMSS yra daugiau nei 30 būklių grupė, sukelti skausmą ir disfunkciją žandikaulio sąnaryje ir raumenyse, kurie kontroliuoja žandikaulio judėjimą. Daugelis TMSS trunka tik trumpą laiką ir išnyksta savaime, bet kai kuriais atvejais jie gali tapti lėtiniai arba ilgalaikiai. TMSS gali atsirasti atskirai arba kartu su kitais sveikatos sutrikimais, pavyzdžiui, galvos, nugaros skausmas, miego sutrikimai, fibromialgija ir dirgliosios žarnos sindromas. Remiantis [6] pateiktais duomenimis, maždaug 11-12 milijonų suaugusiųjų Jungtinėse Valstijose patyrė skausmą TMS srityje. Svarbu pabrėžti, kad daugelis orofacialinių ir ontologinių būklių gali imituoti TMSS. Ir atvirkščiai, darant prielaidą, kad TMSS yra paciento simptomų priežastis, gali būti nepastebėta sunkesnė patologija [7]. Tikslus žandikaulio sekimas gali padėti atpažinti nenormalius žandikaulio judesius ir suteikti vertingos informacijos individualiems gydymo planams. Iš judesio sekimo galima išskirti biomechanines savybes, pagal kurias galima klasifikuoti TMSS [1].

Kol kas nėra plačiai pripažinto standartinio testo TMSS diagnozuoti. Kadangi tikslios priežastys ir simptomai nėra aiškūs, gali būti sunku nustatyti šiuos sutrikimus. TMSS diagnozė daugiausia yra aprašomoji ir analitinė, įskaitant klausimynų naudojimą, chirurgines ir medicininės priemones, tokias kaip rentgenografija, kompiuterinė tomografija ir magnetinio rezonanso tomografija. Tačiau dažniausiai reikia patyrusio specialisto, kad teisingai nustatytų pagrindinę sutrikimo priežastį [6, 7].

TMS yra sinovinis sąnarys, kuriame yra sąnarinis diskas, leidžiantis atlikti lankstus ir slydimą. Šis sudėtingas judesių derinys leidžia neskausmingai ir efektyviai kramtyti, nuryti ir kalbėti. TMS sąnarius paviršius dengia pluoštinis jungiamasis audinys; ši kraujagyslių ir neįnervuota struktūra daugiau geba atsispirti degeneraciniams pokyčiams ir atsinaujinti nei kitų sinovinių sąnarių hialininė kremzlė. Žinant, kad sinovinė sąnario kapsulė ir aplinkiniai raumenys yra įnervuoti, manoma, kad tai pagrindinis skausmo šaltinis, sergant TMSS.

TMSS etiologija lieka neaiški, tačiau tikėtina, kad ji yra daugiafaktorinė. Kapsulės uždegimą ar pažeidimą ir raumenų skausmą ar spazmą gali sukelti nenormalus sąkandis, parafunkciniai įpročiai, stresas, nerimas, intraartikulinio disko anomalijos arba bruksizmas – sutrikimas, apibrėžiamas kaip pasikartojanti žandikaulio raumenų veikla, kuriai būdingas dantų sukandimas arba griežimas ir (arba) apatinio žandikaulio sustandinimas, arba stūmimas [6]. Ritminis arba nuolatinis žandikaulių uždarymo raumenų susitraukimas sukelia dantų judėjimą pacientui pačiam to nepastebint. Manoma, kad yra dviejų tipų bruksizmas su skirtinga etiopatogeneze: miegant ir esant pabudus. Pirmasis yra

pasikartojančių miego judesių sutrikimas, kuriam, pirmiausia, būdingas ritminis kramtymo raumenų aktyvumas ir retkarčiais griežimas dantimis ir yra susijęs su trumpalaikiu širdies veiklos sutrikimu bei smegenų reaktyvacija. Vietoj to, pabudusiam bruksizmui būdingas tik gniaužimo tipo aktyvumas ir jis yra susijęs su psichosocialiniais veiksniais. Bruksizmas yra labai dažna būklė ir manoma, kad 85–90 % visos Žemės gyventojų tam tikru metu yra pasireiškę tam tikro laipsnio nevalingas dantų griežimas arba kalenimas [9]. Žandikaulio judesių stebėjimas gali padėti aptikti bruksizmą, įvertinti jo sunkumą ir gydymo, pvz., burnos aparatų ar biologinio grįžtamojo ryšio terapijos, efektyvumą. Žandikaulio judesių stebėjimas gali padėti mokslininkams geriau suprasti bruksizmo priežastis ir sukurti tikslesnes gydymo galimybes [10].

### **1.1.2. Kalbos sutrikimai**

Logopedijoje žandikaulio judesių sekimas gali padėti įvertinti ir pagerinti kalbos artikuliaciją. Kalba yra sudėtingas motorinis elgesys, apimantis daugelio raumenų ir posisteminių kontrolę. Ankstyvojo kalbos garso kūrimo ir vystymosi metu žandikaulio raumenys atlieka svarbią funkciją. Žandikaulio kontrolė ir stabilumas yra susijęs su lūpų ir liežuvio judesiais ir yra laikoma beveik visų artikuliacinių padėčių burnoje sąlyga. Taigi, sudėtingai kalbai yra būtinas žandikaulio valdymas. Stebėdami žandikaulio judesius kalbos metu, terapeutai gali geriau suprasti kalbą ir teikti pritaikytas intervencijas asmenims, turintiems kalbos sutrikimų. Žandikaulio sekimas gali padėti sukurti pagalbinis komunikacijos įrenginius asmenims, turintiems kalbos sutrikimų [2].

### **1.1.3. Miego sutrikimai**

Kitas žandikaulio judesių stebėjimo pritaikymas gali būti naudingas gydant miego apnėją. Tai dažnas miego sutrikimas, kuriam būdingi pasikartojantys kvėpavimo sutrikimai miego metu. Klinikinis miego apnėjos apibrėžimas yra kvėpavimo judesių dydžio sumažėjimas, mažesnis nei 20 % pamatinės vertės ir trunkantis mažiausiai 10 sekundžių. Miego apnėja dažnai siejama su nenormaliomis žandikaulio padėtimis. Manoma, kad viršutiniams kvėpavimo takams susitraukiant ir oro slėgiui plaučiuose mažėjant, žandikaulis pasyviai nuleidžiamas dėl vadinamosios krūtinės traukos. Dėl šios priežasties burna atsiveria plačiau, taip atspindėdama didesnes pastangas kvėpuoti miego metu. Todėl yra manoma, kad žandikaulio judesiai gali parodyti pastangas kvėpuoti [3]. Tikslus žandikaulio judesių stebėjimas gali padėti diagnozuoti miego apnėją, stebint žandikaulio judėjimą ir padėti visą naktį, taip nustatant galimas kliūtis orui įkvėpti. Žandikaulio sekimas gali padėti įvertinti gydymo intervencijų, tokių kaip nuolatinio teigiamo kvėpavimo takų slėgio terapija ar geriamųjų preparatų, efektyvumą [11].

### **1.1.4. Odontologiniai sutrikimai**

Analizuodami žandikaulio judesius, odontologai gali nustatyti patologinius modelius, įvertinti disfunkcijos laipsnį ir suplanuoti tinkamas intervencijas, įskaitant ortodontinį gydymą, sąkandžio koregavimą ir dantų protezavimą. Pavyzdžiui, [5] aprašytas dantų protezų konstravimo metodas, kai praradus galinius dantis, sąkandžio plokštuma suyra dėl antagonistinių dantų trūkumo, o užpakalinės atramos trūkumas lemia stiprų likusių dantų nusidėvėjimą. Kai dėl per didelio danties susidėvėjimo vietos protezui neužtenka, būtinas protezavimo atstatymas toje vietoje, kur reikia atkurti pradinį vertikalų matmenį. Pagal burnos atidarymo ir uždarymo judesius galima rasti optimalų sąkandžio vertikalų matmenį, pagal kurį konstruojami dantų protezai.

### **1.1.5. Ortodontija ir kaukolės chirurgija**

Ortodontinis ir veido kaukolės chirurginis gydymas dažnai skirtas pagerinti žandikaulio funkciją, estetiką ir bendrą burnos sveikatą. Žandikaulio judesių stebėjimas gali suteikti vertingų įžvalgų apie paciento funkcinę būklę prieš gydymą ir padėti planuoti gydymą, nustatant tinkamiausią chirurginę ar ortodontinę intervenciją. Po gydymo žandikaulio judesių stebėjimas gali būti naudojamas, siekiant įvertinti intervencijos sėkmę, stebėti rezultatų stabilumą ir nustatyti galimas komplikacijas, kurioms gali prireikti tolesnio gydymo [12].

### **1.1.6. Reabilitacija ir fizinė terapija**

Reabilitacija ir fizinė terapija atlieka lemiamą vaidmenį, gydant įvairius su žandikauliu susijusius sutrikimus, įskaitant TMSS, atsigavimą po operacijos ir potraumines sąlygas. Žandikaulio judesių stebėjimas gali padėti gydytojams įvertinti pradinę funkciją, stebėti pažangą viso reabilitacijos proceso metu ir nustatyti konkrečių terapinių intervencijų efektyvumą. Pateikiant objektyvius duomenis apie žandikaulio judesius, stebėjimas gali padėti pritaikyti terapijos planus individualiems pacientams, užtikrinant, kad jie gautų tinkamiausią ir veiksmingiausią gydymą pagal jų specifinę būklę. Taip pat žandikaulio judesių stebėjimas gali būti naudojamas kaip biologinio grįžtamojo ryšio priemonė terapijos seansų metu, padedanti pacientams geriau suvokti ir kontroliuoti savo žandikaulio judesius [13].

## **1.2. Žandikaulio sekimo technologijų ir metodų apžvalga**

Mokslinėje literatūroje dažniausiai aprašomos sistemos žandikaulio judesiams sekti yra optinės, elektromiografijos (EMG), ultragarsinio vaizdavimo arba magnetinės [14].

### **1.2.1. Optinė sistema**

Optinės žandikaulio sekimo sistemos yra populiarius neinvazinio, bekontakčio žandikaulio judesių sekimo metodus. Jis remiasi žandikaulio vaizdų fiksavimu didelės spartos kameromis, optiniais jutikliais ir vaizdų analize, duomenims apie objekto padėtį ir orientaciją surinkti, žandikaulio erdvinei pozicijai nustatyti. Šios sistemos dažnai naudojamos moksliniuose tyrimuose ir klinikinėse situacijose dėl didelio tikslumo, stebėjimo realiuoju laiku ir paprasto naudojimo.

Optinės žandikaulio sekimo sistemos paprastai susideda iš tokių komponentų.

- Didelės spartos kameros: dvi ar daugiau sinchronizuotų kamerų naudojamos žandikaulio vaizdams iš skirtingų kampų užfiksuoti. Kameros aprūpintos didelės raiškos jutikliais ir specializuotais objektyvais, užtikrinančiais tikslų vaizdo fiksavimą.
- Šviesą atspindintys žymekliai: maži, sferiniai, atspindintys žymekliai yra pritvirtinti prie konkrečių anatominių orientyrų ant žandikaulio. Šie žymekliai yra lengvai aptinkami užfiksuotuose vaizduose ir naudojami kaip atskaitos taškai apskaičiuojant žandikaulio padėtį ir judėjimą.
- Apšvietimas: norint tiksliai užfiksuoti atspindinčius žymenis, labai svarbus tinkamas apšvietimas. Dažniausiai naudojamas infraraudonųjų spindulių apšvietimas, nes sumažina aplinkos šviesos trukdžius ir nėra matomas žmogaus akiai.
- Vaizdo apdorojimo programinė įranga: užfiksuoti vaizdai apdorojami realiuoju laiku, naudojant specializuotą programinę įrangą, kuri aptinka atspindinčius žymenis ir apskaičiuoja jų padėtį 3D erdvėje.

- Padėties skaičiavimo algoritmai: 3D žymeklių padėtys naudojamos žandikaulio padėčiai ir judesiams apskaičiuoti naudojant įvairius algoritmus [4].

Šiame straipsnyje [15] pateikiama techninė apatinio žandikaulio judėjimo sekimo procedūra, naudojant trimatį (3D) optinį skaitytuvą ir taikinio sekimo sistemą, kuri skaitmeniniu būdu vaizduoja apatinio žandikaulio ir smilkininio apatinio žandikaulio sąnarių judesius, sujungdama kūgio pluošto kompiuterinės tomografijos (KPKT) duomenis.

Metodas apima keturių neatspindinčių taikinių pritvirtinimą prie smilkinių labialinio paviršiaus nekolineariai. Tada apatinio žandikaulio judėjimas stebimas tiesiogiai naudojant 3D veido skaitytuvą ir taikinio sekimo programinę įrangą, kuri sujungia veido nuskaitymo duomenis, skaitmeninius duomenis, gautus iš diagnostinio gipso, ir KPKT nuskaitymo duomenis, pagrįstus keliais priekinių dantų orientyrais. Tiriamųjų apatinio žandikaulio judėjimo kelias konvertuojamas į KPKT pagrįstus duomenis, kad būtų patvirtintas tikrasis apatinio žandikaulio ir smilkininio apatinio žandikaulio sąnarių judėjimas.

Sekimo stabilumas šiame tyrime buvo 4,36  $\mu\text{m}$  apatinio žandikaulio tikslinėje srityje, 30,78  $\mu\text{m}$  kairiojo kondilo srityje ir 37,74  $\mu\text{m}$  dešiniojo kondilo srityje. Taikinio sekimo sistemos tikslumas, įvertintas lyginant atstumą tarp realių taikinių įvairių judesių metu, parodė 4,1–6,9  $\mu\text{m}$  reikšmę.

Autoriai daro išvadą, kad šis skaitmeninis apatinio žandikaulio judesio įgyvendinimas naudojant 3D optinį skaitytuvą ir taikinio sekimo sistemą leidžia išvengti apribojimų, būdingų mechaninei įrangai, todėl galima realiau rekonstruoti judesį (–ius). Ši technika gali būti naudojama įvairiose odontologijos srityse, susijusiose su apatinio žandikaulio judesiu, pavyzdžiui, gaminant dantų protezus, arba diagnozuojant ir gydant TMS ligas.

Kitame tyrime [16] aprašomas naujos apatinio žandikaulio kinematikos įgijimo darbo eigos kūrimas ir įvertinimas naudojant nešiojamą optinio sekimo sistemą odontologijoje. Tyrimu buvo siekiama įvertinti sveikų savanorių matavimų atkuriamumą *in vitro*, taip pat pakartojamumą *in vivo*.

Atliekant bandymus *in vitro* buvo atlikti numatyti kartotiniai judesiai trimis statmenomis kryptimis, o didžiausia matavimo paklaida buvo 0,54 mm, kai variacijos koeficientas 0,02.

Atliekant bandymus *in vivo*, apatinio žandikaulio maksimalaus atsivėrimo, kairiojo ir dešiniojo šoniškumo, išsikišimo ir atsitraukimo kinematika buvo užfiksuota atskirose trijų skirtingų operatorių sesijose. Gauti įrašai buvo aklaai išnagrinėti trijų stebėtojų ir apskaičiuotas intraklasės koreliacijos koeficientas (IKK), kad būtų galima įvertinti tarpusavio ir vertintojų patikimumą.

Apskritai tyrimas nustatė puikų kiekvieno kintamojo patikimumą tarp vertintojų (IKK > 0,90), bendrą puikų visų kintamųjų patikimumą (IKK = 1,00) ir gerą patikimumą (IKK > 0,75) tarp vertintojų testų. Mažesnis balas buvo gautas už retruziją su „vidutiniu patikimumu“ (IKK = 0,557) tarp vertintojų testuose.

Rezultatai rodo, kad išbandytas nešiojamas sekimo įrenginys ir sukurta darbo eiga pasižymi puikiu atsikartojamumu ir patikimumu optiniame pirminių judesių sekime, todėl tai yra vertinga priemonė analizuojant apatinio žandikaulio judesius diagnostiniais ir gydymo tikslais odontologijoje.

Optinių žandikaulio sekimo sistemos pasižymi šiais pranašumais: dideliu sekimo tikslumu, galimybe sekti realiuoju laiku, taip pat neinvaziškai ir be tiesioginio kontakto. Svarbu nepamiršti, kad optinės sekimo sistemos, nors ir labai tikslios, gali būti nepatogios, nes ant odos ar dantų reikia pritvirtinti žymeklius, ir yra jautrios okliuzijai bei apšvietimo sąlygoms [4,14, 17, 18].

### 1.2.2. Elektromiograma paremta sistema

EMG žandikaulio sekimo sistemos yra žandikaulio judesių stebėjimo būdas, matuojant raumenų, dalyvaujančių žandikaulių judėjime, elektrinį aktyvumą. Šios sistemos naudojamos moksliniuose tyrimuose ir klinikinėje aplinkoje, tiriant žandikaulio neuroraumeninę funkciją, įvertinti raumenų veiklos modelius ir padedant diagnozuoti bei gydyti įvairius sutrikimus.

EMG žandikaulio sekimo sistema paprastai susideda iš tokių komponentų.

- Paviršiniai elektrodai: maži, lipnūs elektrodai, dedami ant odos virš tam tikrų raumenų, dalyvaujančių žandikaulio judėjime. Šie elektrodai nustato elektrinį aktyvumą, kurį sukelia raumenų skaidulos susitraukimo metu.
- Stiprintuvai: elektrodų užfiksuoti elektriniai signalai dažnai yra silpni ir juos reikia sustiprinti, kad būtų galima juos apdoroti ir analizuoti. Stiprintuvai naudojami siekiant padidinti signalo stiprumą, nesukeliant didelio triukšmo ar iškraipymų.
- Duomenų rinkimo įrenginiai: sustiprinti signalai skaitmeninami ir įrašomi naudojant duomenų rinkimo įrenginius, kurie gali būti atskira įranga arba integruoti su kompiuteriu ar kita apdorojimo sistema.
- Signalų apdorojimo programinė įranga: įrašyti EMG signalai apdorojami naudojant specializuotą programinę įrangą, kuri filtruoja triukšmą, ištaiso ir išlygina signalus bei išgauna atitinkamas funkcijas, tokias kaip amplitudė, dažnis ar laiko informacija.
- Analizės algoritmai: apdorotiems EMG signalams gali būti taikomi įvairūs algoritmai, siekiant gauti informaciją apie žandikaulio padėtį, greitį arba raumenų aktyvacijos modelius [4].

Šio tyrimo [19] tikslas buvo sukurti konkrečiam dalykui skirtą apatinio žandikaulio modeliavimo sistemą, pagrįstą klinikiniais matavimais, įskaitant medicininius vaizdus, žandikaulių kinematiką ir EMG, kad būtų galima įvertinti apatinio žandikaulio dinamiką.

Raumenų įterpimo vietoms registruoti buvo naudojamas nestandartinis kartotinis artimiausio taško metodas, o lankstus kelių kūnų metodas buvo įvestas norint apibūdinti didelę žandikaulio raumenų deformaciją. Aktyviosioms jų jėgoms nustatyti buvo naudojami smilkininio ir kramtomojo raumenų EMG signalai, o žandikaulio atidarymo ir pterigoidinių raumenų aktyvacijai apskaičiuoti buvo pateikta grįžtamojo ryšio kilpa norimai apatinio žandikaulio kinematikai sekti. Tada buvo apskaičiuotos konkrečiam dalykui būdingos raumenų jėgos ir TMS apkrova žandikaulio atidarymo-uždarymo judesių metu, remiantis priekinės ir atvirkštinės sujungimo dinamikos procedūra. Septynių sveikų asmenų apatinio žandikaulio trajektorijos buvo prognozuojamos ir palygintos su eksperimentiniais duomenimis, siekiant patvirtinti siūlomą sistemą.

Rezultatai parodė netyčinį galvos ir kaklo komplekso judėjimą kartu su žandikaulio atidarymo ir šoninių pterigoidinių raumenų aktyvavimo modeliais skirtingiems žmonėms. Prognozuojama apatinio žandikaulio kinematika kiekvienam tiriamajam parodė stiprią koreliaciją ( $R^2 \geq 0,97$ ) su eksperimentiniais duomenimis. Žandikaulio kampo vidutinė kvadratinė paklaida buvo  $0,89 \pm 0,99$

laipsnio, rodanti patikimą modeliavimą. Siūloma sistema suteikia veiksmingą metodą, leidžiantį nuspėti ir suprasti subjektams būdingų apatinio žandikaulio sistemų dinamiką.

Kito mokslinio straipsnio [20] tikslas buvo išanalizuoti dvišalių paviršinių kramtymo ir priekinių smilkininių raumenų paviršiaus EMG aktyvumą kramtant dviem skirtingomis laikysenos sąlygomis: natūralia galvos laikysena ir maksimaliai palenkus į priekį sveikiems asmenims. Tyrime dalyvavo 15 tiriamųjų, o paviršinis EMG buvo naudojamas kramtymui ir priekiniam temporaliumi įvertinti abipusiai kramtant.

Tyrimo metu nustatytas reikšmingas kramtymo raumenų aktyvumo padidėjimas kramtymo metu, kai tiriamieji buvo maksimaliai palenkę galvą į priekį, palyginti su natūralia galvos padėtimi. Nebuvo rasta jokių reikšmingų skirtumų prie abiejų galvos pozicijų tarp smilkininių raumenų aktyvumo. Lyginant raumenų aktyvumą kramtymo metu tarp tiriamųjų, kurių galva buvo stačia, ir tuos, kurių galvos laikysena buvo į priekį, reikšmingų skirtumų nenustatyta, tačiau pastebėta tiek kramtomųjų, tiek smilkininių raumenų aktyvumo padidėjimo tendencija. Apskritai tyrimas parodė, kad galvos ir kaklo laikysena gali turėti įtakos kramtymo raumenų veiklai kramtymo metu.

Apibendrinant EMG žandikaulio sekimo sistemų pranašumai yra šie: tiesioginis raumenų aktyvumo matavimas gali suteikti informacijos apie neuromuskulinę funkciją, jokių matymo linijos reikalavimų. Visgi EMG pagrįstas sekimas priklauso nuo raumenų aktyvumo matavimo, kuris gali tiesiogiai neatitikti žandikaulio judesių ir gali būti paveiktas įvairių artefaktų kaip elektrodų išdėstymo [4, 14, 17, 18].

### **1.2.3. Ultragarso sistema**

Ultragarso žandikaulio sekimo sistemos yra neinvazinis žandikaulio judesių stebėjimo metodas, naudojant aukšto dažnio garso bangas, kad būtų galima sukurti žandikaulio ir aplinkinių struktūrų vaizdus realiuoju laiku. Šios sistemos yra naudojamos moksliniuose tyrimuose ir klinikinėje aplinkoje tiriant žandikaulio biomechaniką, diagnozuojant įvairius sutrikimus ir vadovaujant gydymo procedūroms.

Ultragarso žandikaulio sekimo sistema paprastai susideda iš tokių komponentų.

- Ultragarso keitiklis: rankinis prietaisas, skleidžiantis ir priimantis aukšto dažnio garso bangas. Keitiklis dedamas ant odos šalia žandikaulio, o garso bangos prasiskverbia į audinį, kad sukurtų pagrindinių struktūrų vaizdus.
- Ultragarso gelis: vandens pagrindu pagamintas gelis tepamas ant odos, kad pagerintų garso bangų perdavimą tarp keitiklio ir kūno. Gelis sumažina oro kišenes ir užtikrina gerą akustinį ryšį.
- Duomenų rinkimo įrenginiai: ultragarso signalai skaitmeninami ir įrašomi naudojant duomenų rinkimo įrenginius, kurie gali būti atskira įranga arba integruoti su kompiuteriu ar kita apdorojimo sistema.
- Vaizdo apdorojimo programinė įranga: užfiksuoti ultragarso vaizdai apdorojami realiuoju laiku naudojant specializuotą programinę įrangą, kuri pagerina vaizdo kokybę, filtruoja triukšmą ir išskiria tokias svarbias funkcijas kaip žandikaulio padėtis ar judesiai.
- Padėties skaičiavimo algoritmai: apdoroti ultragarso vaizdai naudojami žandikaulio padėčiai ir judesiams apskaičiuoti, naudojant įvairius algoritmus [4].

Ultragarsinės žandikaulio sekimo sistemų naudojimo pavyzdžiai: straipsnyje [21] buvo siekiama išanalizuoti apatinio žandikaulio judesio funkcijas bei santykį tarp smilkinių ir danties judėjimo parametrų žandikaulių atidarymo metu, naudojant ultragarsinį aparatą Arcus Digma. Tyrime dalyvavo 84 tiriamieji, kurių ligos istorijoje nebuvo dantų problemų ar rimtų ūminių ar lėtinių ligų. Dalyviams buvo atlikti ir klinikiniai tyrimai, ir instrumentiniai matavimai ultragarso aparatu Arcus Digma.

Naudotas metodas apėmė apatinio žandikaulio krašto judesių registravimą kaip stomatognatinės sistemos sveikatos būklės ir funkcinio efektyvumo rodiklius. Ultragarsinis aparatas Arcus Digma leido tiek kokybiškai, tiek kiekybiškai įvertinti apatinio žandikaulio judesius.

Rezultatai parodė, kad Helkimo Di = I balas buvo labiausiai paplitęs tarp dalyvių, o pacientams, kuriems buvo vienašalė kramtymo asimetrija, žymiai padidėjo kondilo judesių amplitudė retruzijos metu ir sumažėjo incizinio judesio diapazonas, atliekant žandikaulio atidarymo judesius. Teigiamą koreliaciją buvo nustatyta tarp atidarymo-uždarymo judesio ir kairiojo ir dešiniojo TMS judesių diapazono atidarymo judesio metu. Buvo parodyta didelė teigiama koreliacija tarp kairiojo ir dešiniojo TMS judesių diapazono atidarymo metu.

Apibendrinant galima pasakyti, kad ultragarsinis prietaisas Arcus Digma padėjo išanalizuoti apatinio žandikaulio judesių funkcijas, teikdamas duomenis apie TMS funkcijos sutrikimus, kurie gali būti neaptikti dalyviams, neturintiems klinikinių TMSS simptomų.

Kitas tyrimas [22] atliktas siekiant palyginti žandikaulio judesius asmenų, kuriems buvo atlikta viso sąnario keitimo operacija dėl TMS degeneracinių ligų, su kontroline sveikų asmenų grupe, naudojant sekimo sistemą SICAT JMT – elektroninė įrašymo sistema, pagrįsta 3D ultragarso matavimu, paverčianti kelių akustinių signalų sklidimo laikus į erdvinę informaciją.

Tyrime dalyvavo 15 pacientų, kuriems buvo atliktas TMS pakeitimas, ir 15 sveikų kontrolinių asmenų, ir nustatyta, kad nors TMS pakeitimo grupėje žymiai pagerėjo tokie simptomai kaip skausmas, gebėjimas kramtyti ir gyvenimo kokybė, jie taip pat parodė žymiai ribotus žandikaulio judesius, palyginti su kontroline grupe. Šie apribojimai buvo taikomi visuose judesių diapazonuose, įskaitant maksimalų žandikaulio atidarymą, šoninius judesius ir žandikaulį iškišant.

Tyrimo rezultatai parodė, kad vidutinės maksimalaus incizinio atsivėrimo (MIA), kairiojo ir dešiniojo šoninių judesių ir išsikišimo vertės buvo žymiai mažesnės tiriamojoje grupėje, palyginti su kontroline grupe. Tyrimo grupės MIA buvo  $33,5 \pm 5,5$  mm, o kontrolinės grupės –  $46,6 \pm 8,2$  mm. Kairysis šoninis judėjimas tiriamojoje grupėje buvo  $1,9 \pm 2,7$  mm, o kontrolinės grupės –  $9,7 \pm 1,4$  mm. Dešinysis šoninis judėjimas tiriamojoje grupėje buvo  $1,7 \pm 1,7$  mm, o kontrolinėje grupėje –  $9,7 \pm 1,6$  mm. Nustatyta, kad tiriamojoje grupėje išsikišęs judėjimas buvo  $2,83 \pm 2,05$  mm, o kontrolinėje grupėje –  $9,9 \pm 1,5$  mm. Visi šie skirtumai buvo statistiškai reikšmingi.

Ultragarso žandikaulio sekimo sistemų pranašumai yra šie: neinvazinis ir bekontaktis, vaizdo kūrimo realiuoju laiku galimybės, gali suteikti papildomos anatomicinės informacijos, bet reikia įvertinti tai, kad rezultatus gali riboti vaizdo kokybė, akustinis šešėlis ir kvalifikuoto operatoriaus poreikis, kuris gebėtų užfiksuoti ir interpretuoti vaizdus [4, 14, 17, 18].

#### **1.2.4. Magnetinė sistema**

Magnetinės žandikaulio padėties sekimo sistemos yra neinvazinė technologija, kuri užtikrina žandikaulio judėjimo ir orientacijos stebėjimą realiu laiku. Magnetinės sekimo sistemos naudoja



nuolatinio magneto arba elektromagnetinio šaltinio generuojamą magnetinį lauką, kad nustatytų objekto padėtį ir orientaciją. Paprastai magnetinis šaltinis yra pritvirtintas prie sekamo objekto (pvz., apatinio žandikaulio), o netoliese esantys jutikliai matuoja magnetinio lauko stiprumą ir kryptį. Remiantis šiais matavimais, algoritmai naudojami apskaičiuojant objekto padėtį ir orientaciją realiuoju laiku.

Magnetinė žandikaulio sekimo sistema paprastai susideda iš tokių komponentų.

- Magnetinis šaltinis: kaip magnetinis šaltinis naudojamas nuolatinis magnetas arba elektromagnetinė ritė. Žandikaulio sekimo atveju mažas nuolatinis magnetas dažnai pritvirtinamas prie apatinio žandikaulio arba odontologinio prietaiso.
- Jutikliai: magnetiniai jutikliai aptinka šaltinio generuojamą magnetinį lauką. Naudojami įvairių tipų jutikliai, tokie kaip Holo efekto jutikliai, magnetorezistiniai jutikliai arba fluxgate jutikliai. Jutikliai paprastai yra išdėstomi fiksuota konfigūracija aplink dominančią sritį (pvz., veidą) arba integruojami į nešiojamą įrenginį.
- Duomenų rinkimo sistema: duomenų rinkimo sistema surenka magnetinio lauko matavimus iš jutiklių ir perduoda duomenis į kompiuterį apdoroti.
- Padėties ir orientacijos skaičiavimo algoritmai: pagal jutiklio duomenis galima nustatyti objekto padėtį ir orientaciją, naudojant įvairius algoritmus.
- Vartotojo sąsaja ir vizualizacija: vartotojo sąsaja ir vizualizacijos sistema rodo stebimą žandikaulio padėtį ir orientaciją realiuoju laiku, todėl sveikatos priežiūros specialistai ar pacientai gali analizuoti ir interpretuoti.

Magnetinės sistemos ypatingos tuo, jog yra neinvazinės ir bekontaktės, nes joms nereikia fizinio kontakto su oda ar lipnių žymenų, todėl pacientui suteikiama patogesnė patirtis. Minimalūs šių sistemų trūkščiai: magnetinės sistemos yra mažiau linkusios į trikdžius iš aplinkos šviesos ar okliuzijų palyginti su optinėmis sistemomis, todėl įvairiose aplinkose galima patikimiau jas sekti. Sekimas realiuoju laiku yra toks: magnetinės sistemos gali pateikti realiu laiku grįžtamąjį ryšį apie žandikaulio judėjimą ir orientaciją, todėl yra galimybė nedelsiant atlikti korekcijas terapijos ar gydymo seansų metu. Magnetines sistemas galima derinti su kitais vaizdo gavimo būdais, pavyzdžiui, su Rentgeno spinduliais arba MRT, kad būtų galima gauti papildomos informacijos apie žandikaulio struktūras ir biomechaniką.

Šios sistemos taip pat turi ir trūkumų: jos jautrios magnetinio lauko trikdžiams: feromagnetinių medžiagų arba elektroninių prietaisų buvimas gali trikdyti magnetinį lauką ir turėti įtakos sekimo sistemos tikslumui. Ribota erdvinė skiriamoji geba gali būti mažesnė nei optinių sistemų, o tai gali apriboti jų gebėjimą aptikti subtilius žandikaulio judėjimo pokyčius. Dar vienas trūkumas yra algoritmų sudėtingumas: padėties ir orientacijos skaičiavimo algoritmai, naudojami magnetinėse sistemose, gali būti sudėtingi, todėl norint pasiekti optimalius rezultatus, reikia didelių skaičiavimo išteklių ir patirties jų įgyvendinimui [4, 14, 17, 18].

Magnetinio lauko duomenų apdorojimas yra perspektyvi alternatyva neinvaziniam ir tiksliam žandikaulio judesių sekimui. Magnetinio lauko duomenų apdorojimas buvo tiriamas ir taikomas įvairiose srityse, tokiose kaip navigacija, robotika, biomedicinos inžinerija. Kai kurie dėmesio verti šios srities tyrimai apima: patalpų lokalizavimo ir navigacijos sistemas, kuriose naudojami

magnetinio lauko duomenys iš kelių šaltinių, siekiant įvertinti mobiliųjų įrenginių ar robotų padėtį ir orientaciją aplinkoje, kurioje GPS signalai nepasiekiami arba nėra patikimi [23].

Svarbus yra padėties ir orientacijos stebėjimas virtualioje ir papildytoje realybėje, kur magnetinio lauko duomenys naudojami siekiant pagerinti ant galvos tvirtinamų ekranų ir valdiklių tikslumą bei reagavimą [24].

Svarbus yra ir biomedicininis magnetinių sistemų taikymas, pavyzdžiui, chirurginių instrumentų arba implantuojamų prietaisų padėties ir orientacijos stebėjimas, atliekant minimaliai invazines procedūras [25]. Galimybė sekti objektus padeda chirurgams ir radiologams intraoperacijų metu, gydyti tiksliai ir pagal planą [26]. Tokia objektų sekimo technologija plačiai pritaikoma brachiterapijos gydymo metu, leidžianti tiksliai nustatyti kateterių lokalizaciją, suteikiant galimybę sukurti ir pateikti dozimetrinius paskirstymus su stipriais gradientais ir sumažinti dozę kaimyniniams organams, taip juos apsaugant nuo pašalinio radiacinio poveikio [27]. Magnetinis objektų sekimas pritaikomas ir kraujagyslių intervencijų srityje, tokių kaip perkutaninė koronarinė intervencija ar prieširdžių virpėjimo abliacija, kai procedūrų metu reikia sekti intervencinių prietaisų, tokių kaip kateterių, kreipiamųjų laidų ir endoskopų naudojimą [28]. Dar viena susidomėjimą kelianti technologija yra endoskopinės kapsulės sekimas gastroscopijos tyrimams [29].

Magnetinės sistemos parodo magnetinio lauko duomenų apdorojimo potencialą įvairiose programose ir sudaro sąlygas jį naudoti stebint žandikaulio judesius. Literatūroje yra tyrimų apie naudojimą nuolatinio magneto erdvinės pozicijos sekimui, tačiau žandikaulio pozicijos nustatymui tokių tyrimų nėra daug.

Šio straipsnio [30] tikslas buvo pristatyti naują žandikaulio judesių sekimo metodą, kuris matuoja apatinio žandikaulio judesius šešiais laisvės laipsniais, suteikdamas lengviau prieinamą ir neribotą būdą stebėti natūralius žandikaulio judesius, nereikalaujant ant galvos ar ant dantų pritvirtintos įrangos.

Taikant šį metodą buvo naudojamas mažas, mažai energijos suvartojantis kompozitinis jutiklis, sumontuotas ant kandiklio, kuris sujungė nuolatinę magnetą ir Holo efekto magnetinį jutiklį, kad įvertintų santykinį atstumą tarp apatinio ir viršutinio žandikaulių. Naudojamame prietaise buvo integruotas mikroelektromechaninės sistemos orientacijos jutiklis, skirtas matuoti apatinio žandikaulio judesius trimatėje erdvėje.

Rezultatai parodė, kad jutiklis gali išmatuoti apatinio žandikaulio judėjimą su 1,5 mm paklaida sagitaliniame vaizde ir 2,0 mm priekiniame vaizde iki maksimalios burnos atvėrimo ribos, kuri siekė maždaug 30 mm. Prietaisas buvo išbandytas kartu su WinJMA sistema, esamu apatinio žandikaulio judėjimo sekimo įtaisu, ir parodė nedidelius sagitalinio ir priekinio vaizdo skirtumus, abu prietaisai judėjo beveik ta pačia trajektorija. Šis naujas sekimo metodas rodo potencialą tolesniam vystymuisi ir plačiai naudojamas įvairiose srityse, įskaitant dantų ir ortodontinį gydymą, kalbos terapiją ir žandikaulių biomechanikos tyrimus.

Kito tyrimo, aprašyto straipsnyje [31], tikslas buvo pristatyti patobulintą judesio sekimo sistemą liežuvio sekimo pritaikymui, kuri pašalina tradicinės nuolatinio magneto lokalizacijos trūkumus. Tikslas buvo sukurti praktiškesnę, nešiojamą ir nepastebimą sistemą, skirtą judesių stebėjimui be matymo linijos milimetriniu tikslumu.

Tiriant šiuo metodu, buvo naudojama inercinė matavimo sistema (IMS) kaip sekiklis, judantis vietiniame magnetiniame lauke, kurį sukuria magnetinė juostelė. IMS magnetometras išmatavo magnetinį lauką, o sekiklio orientacija buvo kompensuota, naudojant IMS akselerometrą ir giroskopą. Tada šie orientacijos kompensuoti magnetiniai matavimai buvo įtraukti į lokalizacijos algoritmą, kad būtų galima įvertinti sekiklio 3D padėtį.

Tyrimo rezultatai parodė, kad  $8 \times 8 \times 5$  cm<sup>3</sup> tūryje, kai žymeklis buvo pasuktas  $\pm 50^\circ$  apie savo žingsnį ir sukimasi, sistema pasiekė 1,6 mm (mediana) ir 2,4 mm (trečiasis kvartilis, Q3) padėties paklaidas. Šie rezultatai rodo, kad siūlomas metodas yra perspektyvus liežuvio sekimo programoms, siūlantis praktišką ir nešiojamą alternatyvą esamoms judesio sekimo sistemoms.

### **1.3. Duomenų apdorojimo metodai padėties nustatymui iš nuolatinio magneto magnetinio lauko**

Tiriant metodikas, skirtas erdvinės pozicijos nustatymui remiantis nuolatinio magneto magnetinio lauko duomenimis, mokslininkai atliko daugybę tyrimų, naudodami skirtingas technikas koordinatėms identifikuoti.

Remiantis [32] šaltiniu, aišku, kad nuolatinio magneto magnetinio lauko ypatybės yra netiesinė funkcija, susijusi su 5-D magneto padėties ir orientacijos parametrais. Šio tipo problemos sprendimui dažnai naudojamas netiesinis mažiausių kvadratų optimizavimo metodas. Vis dėlto šis metodas turi savo apribojimus. Prieš pradėdant optimalaus sprendimo paiešką, būtina apibrėžti parametrus (arba jų ribas). Kadangi matematinis magnetinio dipolio modelis turi daug lokalinių minimumų, netikslūs pradiniai parametrai gali trukdyti algoritmui rasti teisingą visuotinio sprendimo variantą. Ilgas paieškos procesas gali apriboti galimybę taikyti kitas signalo apdorojimo procedūras, kurios padėtų pagerinti sekimo tikslumą. Galiausiai, skaičiavimo sudėtingumas gali viršyti realaus laiko apdorojimo galimybes. Šios problemos kelia poreikį tobulinti pozicijos nustatymo metodus.

#### **1.3.1. Mažiausių kvadratų pasikliautino regiono metodas**

Vienas iš potencialių metodų galėtų būti MK PR algoritmas. PR algoritmas yra skaitmeninio optimizavimo metodas, skirtas netiesinių mažiausių kvadratų problemoms spręsti. Šis metodas sujungia PR technikas su ribines sąlygas atspindinčiomis ypatybėmis, leidžiančiomis sukurti atsparų ir efektyvų optimizavimo algoritmą. Šis metodas yra ypač vertingas, kai tradiciniai MK metodai yra nepakankami dėl įvairių apribojimų ar sudėtingų situacijų.

Šiame metode, vadinamame „pasitikėjimo regionu“, formuojamas apytikslis tikslo funkcijos modelis, o optimizavimas vykdomas šios zonos viduje. Pasitikėjimo regiono dydis koreguojamas atsižvelgiant į pasiektą progresą per kiekvieną iteracijos etapą. Jeigu modelis tiksliai prognozuoja tikslo funkciją, pasitikėjimo zona plečiasi; priešingu atveju, ji susitraukia. Šis mechanizmas leidžia algoritmui žengti didesnius žingsnius, kai jis pasitiki modelio tikslumu, ir mažesnius žingsnius, kai tokio pasitikėjimo neįvyksta.

Kalbant apie apribojimus, svarbu paminėti atspindinčią algoritmo charakteristiką. Jei optimizavimo įrankis bando žengti per didelį žingsnį ir išeiti už galimo regiono ribų, žingsnis atspindžio principu gražinamas atgal į regioną. Šis atspindys užtikrina, kad algoritmas neviršytų problemos ribų ir leidžia efektyviau iširti sprendimo erdvę [33].

### 1.3.2. Dalelių spiečiaus metodas

DSO, kurį 1995 metais sukūrė Jamesas Kennedy ir Russelas Eberhartas, yra populiacijos pagrįstas, gamtos įkvėptas optimizavimo metodas. Jis yra sukurtas, remiantis socialiniu elgesiu, būdingu paukščių pulkams, žuvų būriams ar vabzdžių kolonijoms. Siejant šiuos objektus, siekiama išspręsti problemą. Dėl savo paprastumo, lengvo diegimo ir gebėjimo rasti globalų optimalumą sudėtingose paieškos vietose, DSO dažnai naudojamas sprendžiant įvairias optimizavimo problemas.

DSO naudoja sprendimų rinkinį, vadinamą dalelėmis, kad ieškotų geriausio sprendinio paieškos erdvėje. Kiekviena dalelė turi poziciją ir greitį, kurie atitinkamai rodo galimą problemos sprendimą ir greitį, kuriuo ji juda paieškos erdvėje. Dalelės parametrai yra nuolat atnaujinami pagal šias taisykles:

- kiekvienos dalelės tinkamumo nustatymas, kuris rodo, kaip efektyviai dabartinė dalelės pozicija išsprendžia optimizavimo problemą;
- geriausios kiekvienos dalelės pozicijos nustatymas, tai yra geriausia vieta, kurią dalelė kada nors užėmė, tai vadinama "geriausia dalelės pozicija";
- geriausios visos populiacijos pozicijos nustatymas, tai yra geriausia vieta, kurią bet kuri dalelė kada nors užėmė, tai vadinama "geriausia globali pozicija".

Šis procesas kartojamas per daugelį iteracijų, kol yra pasiektas tam tikras stabdymo kriterijus, toks kaip maksimalus iteracijų skaičius, minimalus pasiekto progreso lygis arba pakankamai geras sprendimas.

Kadangi DSO yra populiacijos pagrįstas metodas, jis turi potencialą rasti globalų optimalumą, o ne tik vietinį, nes kiekviena dalelė juda per paieškos erdvę, atsižvelgdama į savo asmeninę patirtį ir bendrą populiacijos patirtį. Tačiau kaip ir kiti stochastiniai metodai, DSO gali nukrypti nuo optimalumo ir atsidurti ekstremaliuose taškuose, todėl gali būti reikalinga tam tikra parametru reguliavimo strategija, kad būtų užtikrintas geriausias sprendimas [34].

### 1.3.3. Peržvalgos lentelės metodas

PL strategija nėra įprastas optimizavimo algoritmas, toks kaip DSO ar PR atspindintis algoritmas. Priešingai, tai yra metodika, kuri yra sukurta siekiant efektyviau spręsti problemas arba modeliavimą, naudojant iš anksto apibrėžtus ir paieškos lentelėje saugomus rezultatus. Paieškos lentelės yra itin naudingos, siekiant sumažinti skaičiavimų sudėtingumą ir optimizuoti specializuotų algoritmų veiklą.

PL gali būti saugomos iš anksto apskaičiuotos magnetinio lauko reikšmės, atitinkančios skirtingas pozicijas, remiantis permanentinio magneto magnetinių laukų pozicijos vertinimu. Vertinant poziciją pagal konkretų magnetinio lauko matavimą, paieškos lentelėje yra galimybė efektyviai surasti poziciją, kurios magnetinio lauko reikšmė yra artimiausia matuojamai, todėl padėties vertinimas tampa greitesnis ir tikslus.

Svarbu pažymėti, kad paieškos lentelių metodai turi tam tikrų ribojimų, tokių kaip jautrumas lentelės detalizacijai ir dydžiui, ir gali reikalauti didelės atminties talpos saugoti detalioms lentelėms. Be to, paieškos lentelės gali būti neefektyvios sprendžiant problemas, kurios susijusios su dinamiškai kintančia aplinka arba reikalauja didelio adaptacijos lygio [35].

### 1.3.4. Neuroninių tinklų metodas

Dirbtiniai NT yra specifinė mašininio mokymosi modelio klasė, kurios architektūra yra įkvėpta žmogaus smegenų struktūros ir funkcionavimo principų. Jie susideda iš dirbtinių neuronų, arba mazgų, kurie yra tarpusavyje sujungti ir sudėlioti į sluoksnius. NT yra ypač efektyvūs, išmokstant sudėtingas netiesines ryšių tarp įvesties ir išvesties duomenų, todėl jie turi platų taikymo spektrą, įskaitant modelių identifikavimą, natūralios kalbos apdorojimą, vaizdų įskaitant modelių identifikavimą, natūralios kalbos apdorojimą, vaizdų ir garsų atpažinimą, bei žaidimų kūrimą.

Standartinis dirbtinio neuroninio tinklo modelis susideda iš trijų pagrindinių sluoksnių:

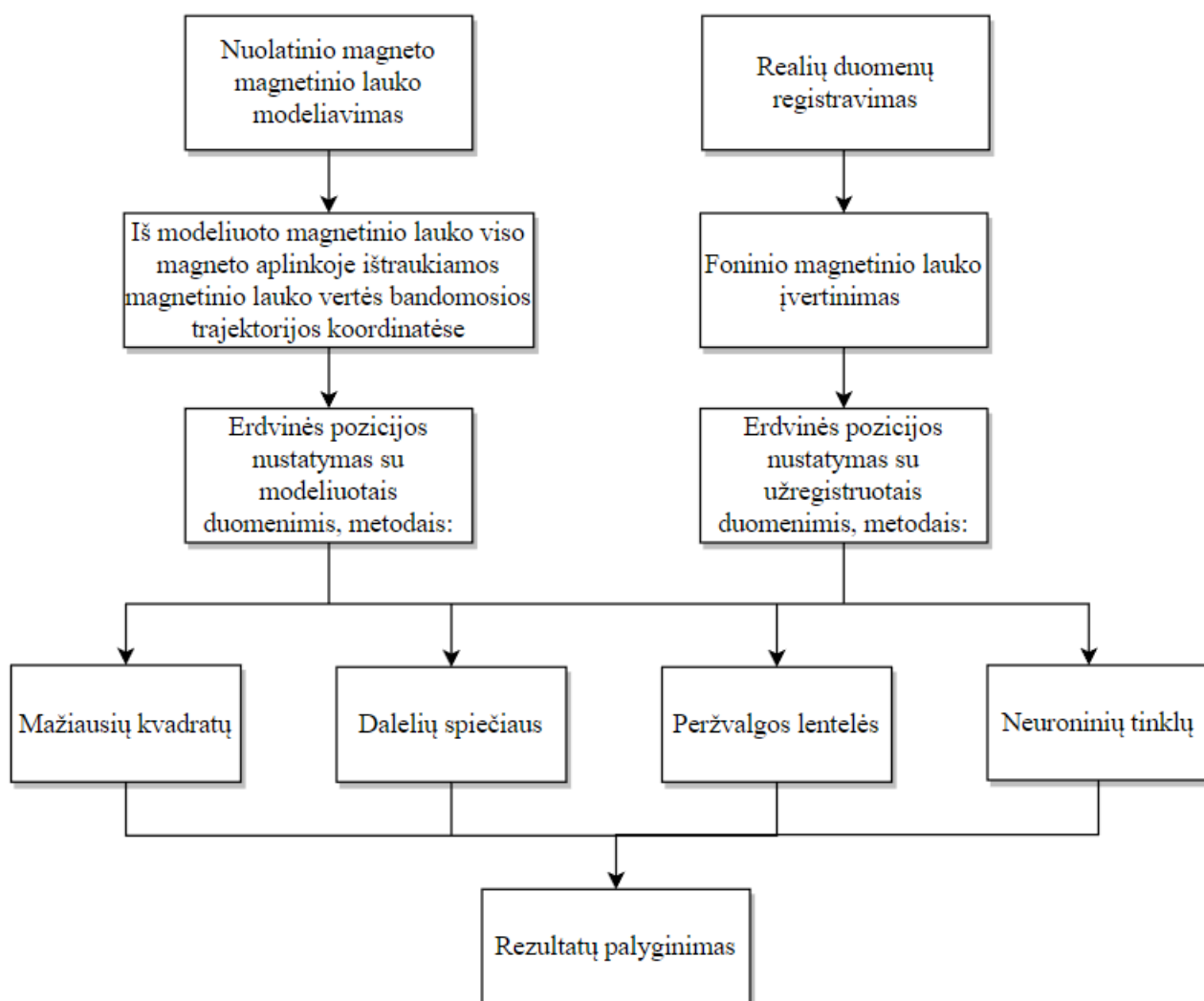
- Įvesties sluoksnis, kuris priima įvesties duomenis ir perduoda juos toliau per tinklą. Įvesties duomenų dimensijos tiesiogiai susijusios su mazgų skaičiumi įvesties sluoksnyje.
- Paslėpti sluoksniai, kurie yra tarp įvesties ir išvesties sluoksnių ir atlieka didžiąją dalį skaičiavimų. Neuroninis tinklas gali turėti vieną ar daugiau paslėptų sluoksnių, kuriuose yra daug mazgų. Kiekvienas paslėptame sluoksnyje esantis mazgas gauna svorio koeficientais suderintas įvestis iš ankstesnio sluoksnio mazgų, apdoroja šias įvestis, naudodamas aktyvavimo funkciją ir perduoda rezultatą toliau į kitą sluoksnį.
- Išvesties sluoksnis, kuris generuoja galutinį neuroninio tinklo išvestį. Išvesties sluoksnio mazgų skaičius priklauso nuo sprendžiamos problemos, pavyzdžiui, klasių skaičiaus klasifikavimo užduotyje arba išvesties dimensijos regresijos atveju.

Mokant NT, mazgų tarpusavio ryšių svoriai yra reguliuojami, siekiant sumažinti klaidą tarp tinklo prognozės ir tikrojo rezultato. Tai dažniausiai pasiekama, naudojant atgalinio sklidimo metodą, kuris apima klaidos gradientų skaičiavimą svorių atžvilgiu, naudojant grandinės taisyklę ir svorių atnaujinimą, naudojant optimizavimo algoritmą, tokią kaip stochastinis gradientų nusileidimas arba jo variantą [36].

## 2. Metodinė dalis

### 2.1. Tyrimo aprašymas

Tyrimo metu buvo sumodeliuotas nuolatinio magneto magnetinio lauko modelis, kuriame žinomose koordinatėse buvo įvertintas magnetinio lauko tankio pokytis. Iš magneto modelio buvo sugeneruota trajektorija, imituojanti žandikaulio judėjimą, kuri naudojama kaip atraminė trajektorija tyrimo metu. Erdvinės pozicijos skaičiavimas atliktas su modeliuotais duomenimis, remiantis metodais pozicijai nustatyti iš magnetinio lauko duomenų: MK, DSO, PL, NT. Taip pat erdvinės pozicijos įvertinimas atliktas ir su eksperimentiniu būdu užregistruotais duomenimis, iš kurių iškompensuojamas aplinkos magnetinis laukas. Tyrimo pabaigoje pateikiami rezultatai ir jų palyginimas tarp simuliuotų ir eksperimentiniu būdu registruotų ir apskaičiuotų rezultatų. Rezultatams palyginti naudojami pozicijos nustatymui sugaištos laiko trukmės, parodysiančios metodų greitaveiką, matavimai ir vidutinės kvadratinės paklaidos, nusakančios metodų vidutinį skirtumą tarp modelio numatytų verčių ir faktinių verčių. Apibendrinta tyrimo eiga iliustruota 1 pav. pateiktoje diagramoje.



1 pav. Tyrimo eigą iliustruojanti diagrama

## 2.2. Eksperimento ir naudotos įrangos aprašymas

### 2.2.1. Erdvinės pozicijos nustatymas erdvėje iš magnetinio lauko

Magnetinio srauto tankis ( $B$ ) erdvėje aplink cilindro formos magnetinį dipolį gali būti įvertinamas matematinio modeliu, pavaizduotu 2 pav. Modelis aprašytas [37] straipsnyje:

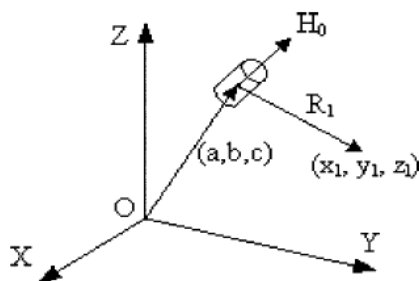
$$B = B_T \left( \frac{3(H_0 \cdot X)X}{R^5} - \frac{H_0}{R^3} \right), \quad (1)$$

kur  $\vec{H}_0 = (m, n, p)$  yra normalizuotų vienetų, magnetizmo krypties, vektorius, apibūdinantis magneto magnetizmo orientaciją ir yra lygus  $(0, 1, 0)$  orientacijai aukštyn mūsų atveju.  $X = ((x - a), (y - b), (z - c))$  yra magnetometro vieta, nuolatinio magneto vietos atžvilgiu, kuri yra  $(a, b, c) = (0, 0, 0)$ .  $R$  yra normalizuotas  $X$  vektorius, suskaičiuotas naudojant (2) formulę, ir  $B_T$  yra konstanta, suskaičiuota pagal (3) formulę:

$$R = \sqrt{((x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2)}, \quad (2)$$

$$B_T = \frac{\mu_r \mu_0 r^2 \pi L M_0}{4\pi}, \quad (3)$$

kur  $\mu_r$  yra santykinis terpės pralaidumas (oras),  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (T · m A) yra magnetinė konstanta,  $L$  yra magneto ilgis (m),  $r$  yra spindulys magneto (m), ir  $M_0$  yra magneto įmagnetinimo amplitudė (A/m).



**2 pav.** Magneto lokalizacijos koordinačių sistema:  $a, b, c$  yra magneto pozicija,  $H_0$  magneto kryptis,  $x, y, z$  reiškia erdvinį tašką [32]

Modelis (1) gali būti išplečiamas norint apskaičiuoti kiekvieną magnetinio lauko ašies vektorių:

$$B_x = B_T \left( \frac{3[m(x - a) + n(y - b) + p(z - c)](x - a)}{R^5} \right) - \frac{m}{R^3}, \quad (4)$$

$$B_y = B_T \left( \frac{3[m(x - a) + n(y - b) + p(z - c)](y - b)}{R^5} \right) - \frac{n}{R^3}, \quad (5)$$

$$B_z = B_T \left( \frac{3[m(x - a) + n(y - b) + p(z - c)](z - c)}{R^5} \right) - \frac{p}{R^3}. \quad (6)$$

Taigi pagal šias formules galima apskaičiuoti magnetinio lauko vertes, jeigu yra žinomos objekto koordinatės ir orientacija.

### 2.2.2. Magnetinio lauko šaltinis

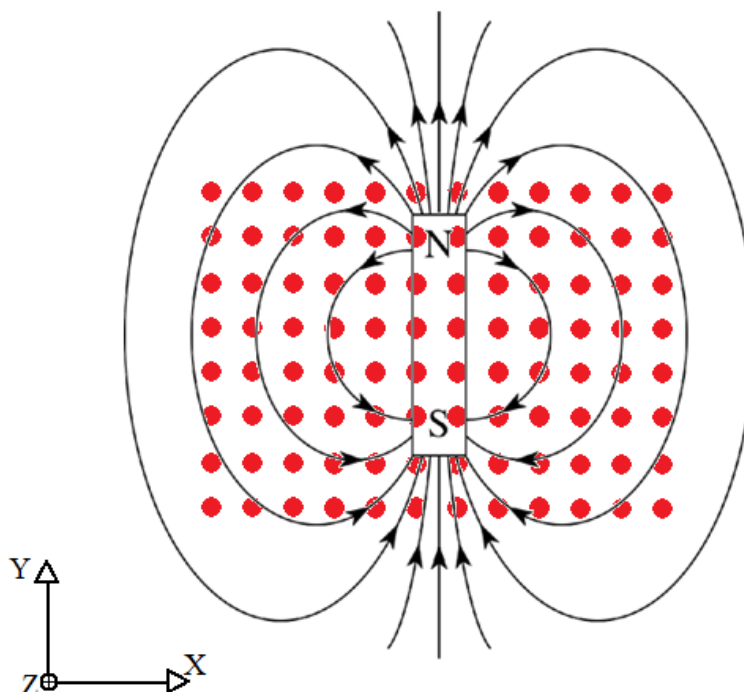
Magnetiniam laukui išgauti buvo naudojamas cilindro formos magnetas 3 pav., turintis radialiai simetrišką magnetinį lauką aplinkui vieną sukimosi ašį. Dėl stipraus magnetinio lauko ir mažo dydžio (2 mm ilgio ir 1 mm spindulio) buvo pasirinktas NdFeB magnetas su liekamuoju magnetinio srauto tankiu 1,4 T, sukuriančiu magnetinio lauko stiprį  $M_0$ , kurios vertė lygi 1,114048 A/m, išilgai sukimosi ašies kryptimi.



3 pav. 2x1 mm neodimio magnetas prie 2 euro centų monetos

### 2.2.3. Nuolatinio magneto magnetinio lauko modeliavimas baigtinių elementų metodu

Erdvinės padėties nustatymo algoritmų įvertinimui, buvo sumodeliuotas nuolatinio magneto modelis, naudojant programinę įrangą „Comsol Multiphysics 5.1“ (COMSOL, Stokholmas, Švedija). Modelis simuliuoja tikro magneto magnetinį lauką, esantį erdvėje. Jis sudarytas iš magnetinio lauko vektorių reikšmių  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ , kiekvienoje koordinatėje X,Y,Z 0,001 mm žingsniu erdvėje (40 x 40 x 20 mm). Modelio iliustracija pavaizduota 4 pav.



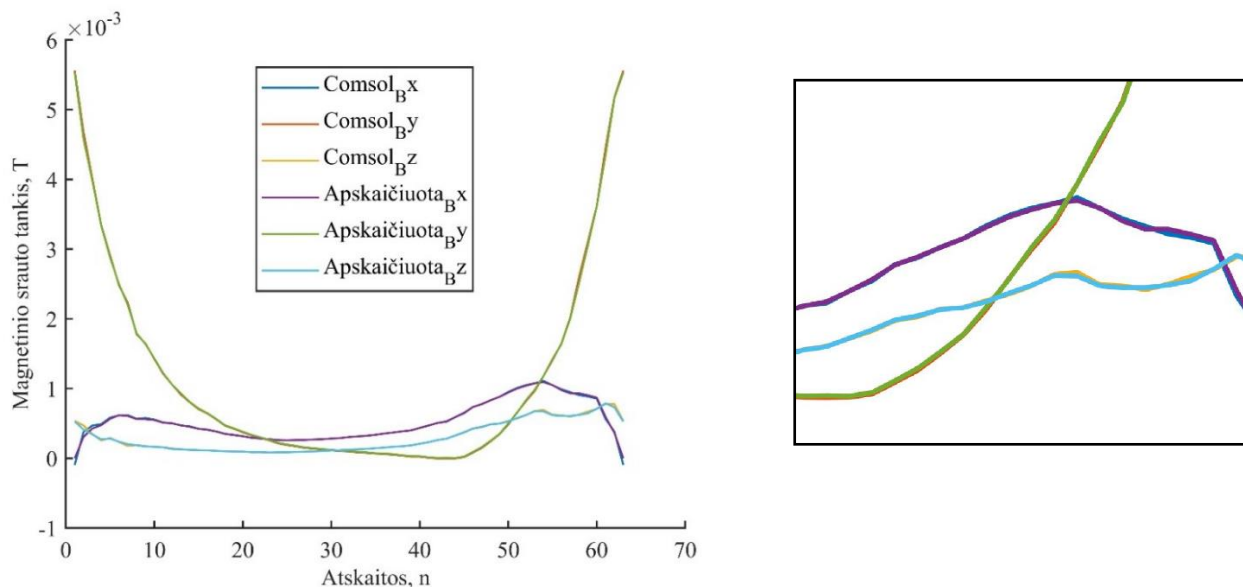
4 pav. Sumodeliuotas nuolatinio magneto modelis: raudoni taškeliai iliustruoja x, y, z koordinates 0,001 mm žingsniu, kuriose yra magnetinio lauko vektorių  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  vertės

Sumodeliuotas modelis sudarė rezultatų masyvą iš 33929201x6 verčių. Masyvo failo dydis siekė 4,73 GB.



## 2.2.4. Magnetinio lauko modelio adekvatumo tyrimas

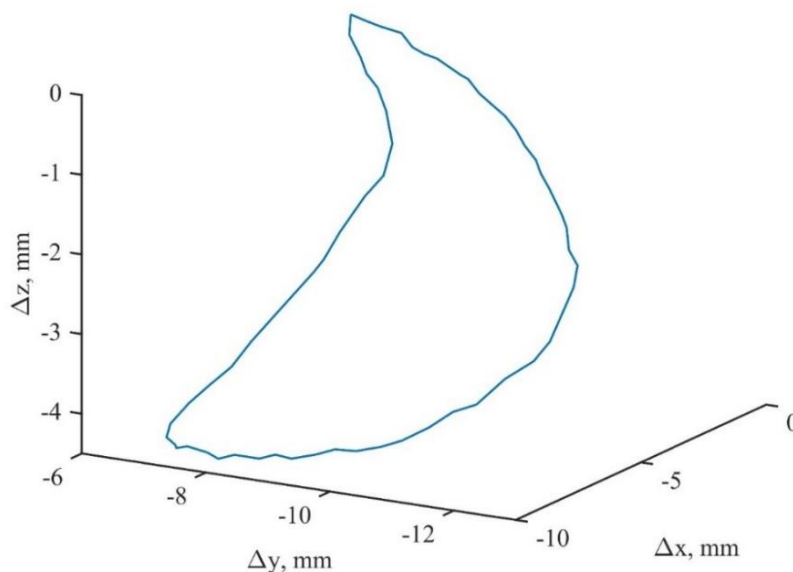
Norint įsitikinti ar sumodeliuotas magnetinis laukas atitinka realybę ir yra sumodeliuotas teisingai, pagal magnetinio modelio formules (1-6), aprašytas 2.2.1 skyriuje, palyginimui apskaičiuotas magnetinio srauto tankis, kuris kaip pavaizduota 5 pav. beveik idealiai sutampa su sumodeliuotu magneto magnetinio lauko srautu ir patvirtina sumodeliuoto magnetinio lauko patikimumą.



5 pav. Sumodeliuotų su Cx, Cy, Cz komponentais ir apskaičiuotų pagal formules magnetinio srauto tankių palyginimas, dešinėje vaizdas iš arčiau

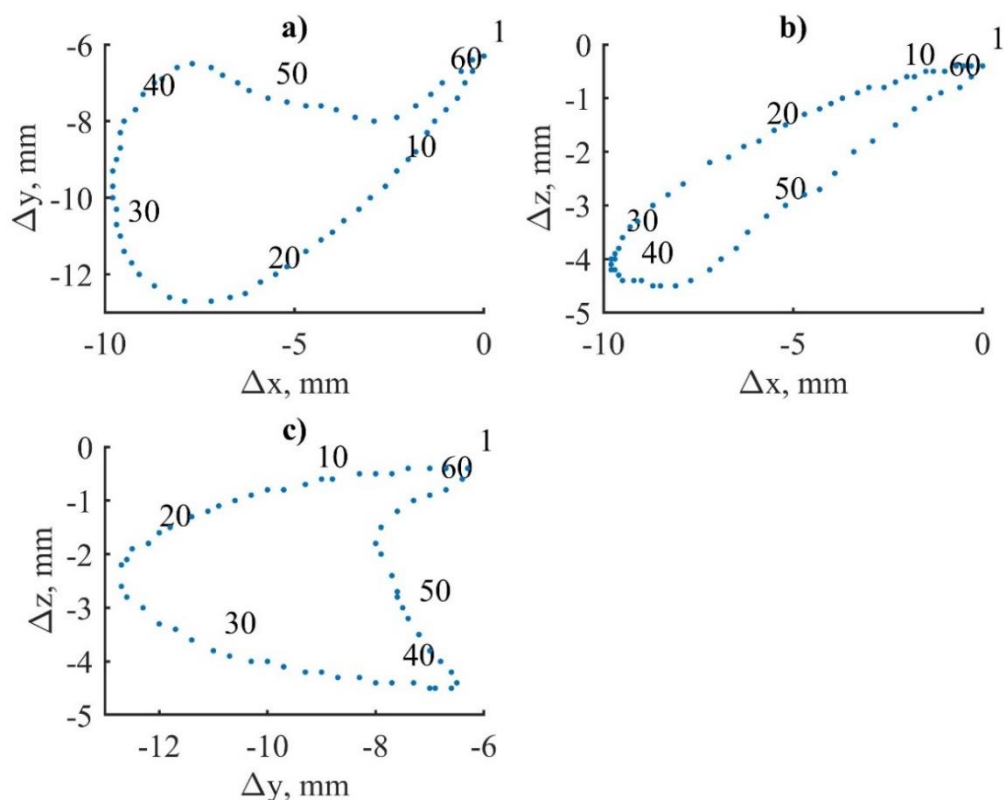
## 2.2.5. Žandikaulio judėjimo trajektorija atraminiams matavimams

Pozicijos nustatymo klaidai įvertinti iš magneto modelio duomenų buvo parinkti taškai, pagal [37] aprašytą trajektoriją ( $10 \times 7 \times 5$  mm), kurie sudarė žmogaus žandikaulio judėjimo ciklo imitaciją, kramtymo metu, kuri pavaizduota 6 pav.



6 pav. Naudojama trajektorija, imituojanti žandikaulio kramtymo ciklą tyrimų metu

Kreivę sudaro 63 taškai, kurie atvaizduoti iš X – Y, X – Z ir Z – X, pusių, kaip parodyta 7 pav.



**7 pav.** Žandikaulio kramtymą imituojanti kreivė, pavaizduota iš a) X – Y, b) X – Z, c) Z – X pusių, kur skaičiai reiškia kiekvieno kreivės taško numerį

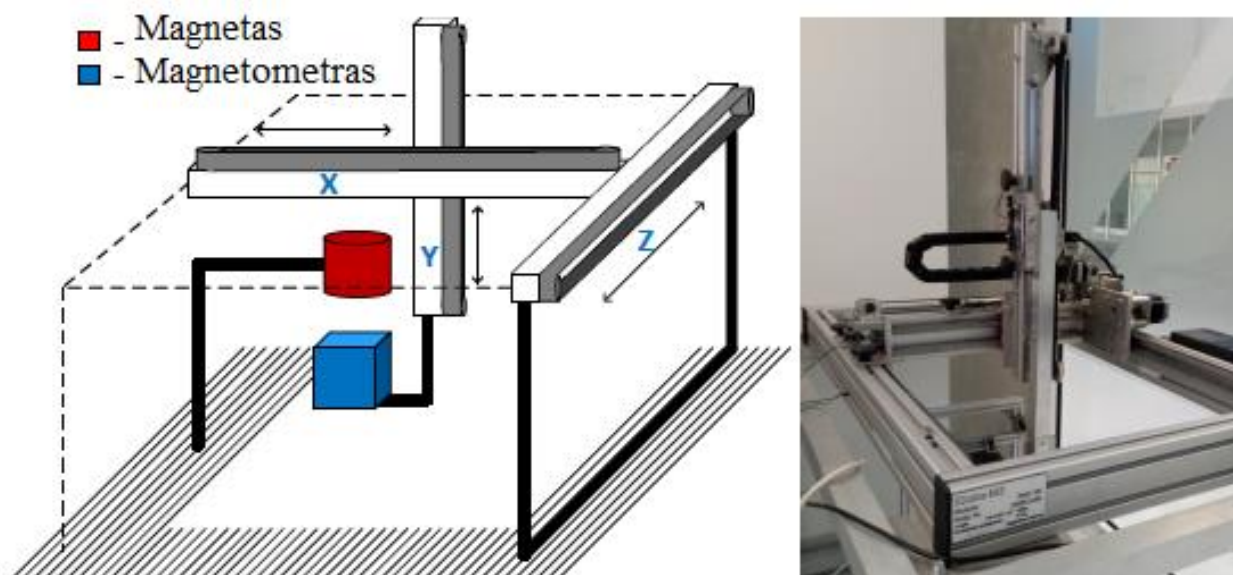
## 2.2.6. Magnetinio lauko registravimas

Magnetinio lauko matavimai buvo atlikti naudojant MPU–9250, 9 laisvės laipsnių inercinio matavimo modulį, turintį 3 ašių skaitmeninį magnetometrą, kurio veikimas paremtas Holo jutiklio technologija su matavimo dinamiiniu diapazonu lygiu  $\pm 4912 \mu\text{T}$ , 8 pav.



**8 pav.** MPU–9250 inercinio matavimo prietaisas, turintis 3 ašių magnetometrą ir naudotas magnetiniam laukui registruoti

Eksperimentai buvo atlikti, naudojant 3D pozicionavimo sistemą EMS 301 (Elintos Matavimo Sistemos) su 0,1 mm žingsnio pozicionavimo rezoliucija, kontroliuojama per „Matlab“ (Matlab, Kalifornija, JAV.) programą. Magnetą buvo pritvirtintas nejudančioje vietoje, kol pozicionavimo sistema judino jutiklį. Eksperimento struktūra pavaizduota 9 pav.



9 pav. Kairėje eksperimento įgyvendinimo principas, dešinėje 3D pozicionavimo sistema EMS 301

Pozicijos įvertinimo klaidos nustatymui buvo naudojama trajektorija, imituojanti žmogaus žandikaulio kramtymo ciklą. Matuojant kiekviename taške, kiekviena magnetinio lauko vertė buvo suvidurkinta iš 10 matavimų. Taip pat gautos magnetinio lauko reikšmės buvo pakoreguotos atimant iš jų aplinkos magnetinio lauko vertes, gautas prieš tyrimą. Klaidos buvo paskaičiuotos tarp jutiklio pozicijos, nustatytos iš magnetinio lauko reikšmių ir tikrų jutiklio pozicijų, esančių pozicionavimo sistemoje. Naudojamų metodų trajektorijos tikslumui įvertinti, buvo naudojama vidutinė kvadratinė paklaida ir skaičiavimo greitis.

### 2.2.7. Foninio magnetinio lauko įvertinimas

Prieš atliekant pozicionavimo eksperimentus, svarbu įvertinti aplinkos magnetinio lauko įtaką. visos išmatuotos vertės turi Žemės magnetinio lauko dedamąją. Žinant, kad Žemės magnetinis laukas svyruoja tarp 25 ir 65  $\mu\text{T}$  [38], prieš atliekant eksperimentą buvo išmatuotas foninis magnetinis laukas su inerciniu matavimo prietaisu. Kadangi magnetiniams laukams galioja superpozicijos principas, užtenka išmatuotas foninio lauko vertes prieš tyrimą atimti iš jutikliu išmatuotų verčių. Svarbu yra išlaikyti jutiklio orientaciją nepasikeitusią ir matavimus atlikti iš karto vienas po kito, kad foninis magnetinis laukas nespėtų pasikeisti.

## 2.3. Erdvinės pozicijos įvertinimo metodai

Šiame skyriuje aprašomi metodai naudoti erdvinei pozicijai nustatyti. Visi skaičiavimai trajektorijoms nustatyti buvo atlikti naudojant kompiuterinę įrangą turinčią AMD Ryzen 5 4600H su radeon graphics 3.00 GHz procesoriumi ir 8.00 GB RAM atminties. NT apmokymui su visu 4,73 GB magnetinio lauko modelio failu naudota kompiuterinė įranga turinti 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5 – 1135G7 2.40 GHz procesoriumi ir 32.0 GB RAM atminties.

### 2.3.1. Netiesinė optimizacija, mažiausių kvadratų algoritmas

Iš (2.2.1 skyriuje) aprašyto modelio galima apskaičiuoti magnetinio lauko vertes, jeigu yra žinomos objekto koordinatės ir orientacija. Tačiau užduotyje yra per daug tarpusavyje susijusių kintamųjų, kad juos būtų galima išreikšti atgal į koordinates nuo  $B$  verčių. Tokiai užduočiai spręsti buvo

pasirinkta naudoti netiesinės optimizacijos metodą pagal (1) formulę. Lygčių skaičiavimui buvo pasirinktas MK klaidų PR atspindintis algoritmas. Algoritmas koordinacių skaičiavimui iš išmatuotų  $B$  reikšmių buvo įgyvendintas naudojant Matlab programą.

MK metodas yra standartinis regresinės analizės metodas, skirtas aproksimuoti per daug nustatytų sistemų (lygčių rinkinių, kuriose lygčių yra daugiau nei nežinomųjų) sprendimą, sumažinant klaidų kvadratų sumą (klaidos dalis yra skirtumas tarp stebėtos vertės ir modelio pateiktos pritaikytos vertės), padarytos kiekvienos atskiros lygties rezultatuose ir gali būti išreikštas:

$$\min_x \|F(x)\|_2^2 = \min_x \sum_i F_i^2(x) \quad (7)$$

Atliekant matematinį optimizavimą, patikimumo sritis yra tikslo funkcijos srities poaibis, kuris aproksimuojamas naudojant modelio funkciją (dažnai kvadratinę). Jei pasitikėjimo regione randamas adekvatus tikslo funkcijos modelis, tai regionas išplečiamas. Ir atvirkščiai, jei aproksimacija prasta, tai regionas susitraukia.

Atitikimas įvertinamas lyginant numatomo pagerėjimo santykį pagal modelio aproksimaciją su faktiniu tikslo funkcijos pagerėjimu. Paprastas santykio slenkstis naudojamas kaip išsiplėtimo ir susitraukimo kriterijus – modelio funkcija „pasitikima“ tik tame regione, kur ji pateikia pagrįstą apytikslę vertę.

Pritaikius PR formules,  $\delta$  apibrėžiamas kaip atstumas nuo  $x_k$ , kuriame vietinį modelį galima patikėti adekvačiam modeliui  $f$ .

$$m(x_k + s) = f(x_k) + \nabla f(x_k)^T s + \frac{1}{2} s^T H_k s \quad (8)$$

PR apibūdinamas, kaip apskritimas aplink  $x_k$ , taip kad  $\|x - x_k\|_2 = \|s\| \leq \delta$ , kur  $\delta$  yra PR plotas.

Norima pasiekti optimalų tašką, kuris geriausiai sumažina vietinį modelį tiek, kad būtų sukurtas tam tikras pasitikėjimo modeliu lygis, kurį atspindi  $\delta$ . Matematiškai sumažinant

$$\min_s m(x_k + s) = f(x_k) + \nabla f(x_k)^T s + \frac{1}{2} s^T H_k s \quad (9)$$

Atsižvelgiant į  $\|s\|_2 \leq \delta$ .

Toks sprendinys naudojamas kaip žingsnis link kito bandymo taško. Tikrinant žingsnį ir patikimumo srities plotą, nusprendžiama ar priimti bandomąjį tašką [39].

Šiuo metodu buvo nustatyta trajektorija iš magnetinio lauko verčių ir palyginta su sumodeliuota ir eksperimentiškai užregistruota trajektorijomis.

### 2.3.2. Dalelių spiečiaus optimizacijos algoritmas

DSO - kiekvienas sprendimas paieškos erdvėje yra vadinamas “dalele”. Spiečius tokių dalelių juda per paieškos erdvę tam, kad surastų optimalią poziciją. Kiekviena dalelė turi poziciją  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$  ir greitį  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})$   $N$  matmenų probleminėje erdvėje, kur  $i$  reiškia  $i$ -tąją dalelę ir  $N$  reiškia problemos dimensiją arba nežinomų kintamųjų skaičių. DSO inicijuojamas su grupe

atsitiktinių dalelių ir ieško optimalumo, atnaujinant kartas. Kiekvienos iteracijos metu kiekviena dalelė atnaujinama pagal dvi “geriausias vertes”. Pirma yra geriausio sprendinio pozicijos, kurią ši dalelė pasiekė iki šiol, padėtis vektorius. Kita “geriausia” padėtis, kurią seka dalelių spiečiaus optimizavimo priemonė, yra geriausia bet kurios populiacijos dalelės padėtis gauta iki šiol. Radus dvi geriausias reikšmes, dalelių padėtis ir greitis atnaujinami šiomis dviem lygtimis:

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i^t + \vec{v}_i(t+1), \quad (10)$$

$$\vec{v}_i(t+1) = w\vec{v}_i(t) + c_1r_1(\vec{p}_i(t) - \vec{x}_i(t)) + c_2r_2(\vec{g}(t) - \vec{x}_i(t)). \quad (11)$$

kur  $x_i$  reiškia  $i$ -tąją spiečiaus dalelę,  $v_i$  yra  $i$ -osios dalelės greitis, apibrėžiantis dalelės žingsnio dydį ir kryptį,  $t$  yra diskretaus laiko žingsnis, parodantis algoritmo iteracijos skaičių,  $w$  yra inercijos koeficientas,  $c_1$  ir  $c_2$  yra pagreičio koeficientai,  $r_1$  ir  $r_2$  yra atsitiktinai sugeneruotos reikšmės tolygiai paskirstytos intervale nuo 0 iki 1,  $p_i(t)$  ir  $g(t)$  yra geriausios dalelės [40].

Šiuo metodu buvo nustatyta trajektorija iš magnetinio lauko verčių ir palyginta su sumodeliuota ir eksperimentiškai užregistruota trajektorijomis.

### 2.3.3. Peržvalgos lentelės algoritmas

PL lentelė yra duomenų masyvas, susiejantis įvesties reikšmes su išvesties reikšmėmis, taip apytiksliai nustatydamas matematinę funkciją. Atsižvelgiant į įvesties reikšmių rinkinį, peržvalgos operacija nuskaityto atitinkamas išvesties vertes iš lentelės. Kadangi lentelės paieška ir paprasti įvertinimai gali būti greitesni nei matematiniai funkcijų įvertinimai, naudojant paieškos lentelės blokus galima pagreitinti modeliuojamo modelio įgyvendinimą.

Erdvinės pozicijos nustatymui duomenys iš sugeneruoto magnetinio lauko duomenų failo (2.2.3 skyrius), kuris sudarė 339292011x6 vertes, buvo panaudotos kaip PL lentelės duomenų masyvas.

Euklidiniai atstumai buvo paskaičiuoti tarp kiekvienos žinomos trajektorijos magnetinio lauko reikšmės ir visų PL duomenų masyvo magnetinio lauko reikšmių pagal formulę:

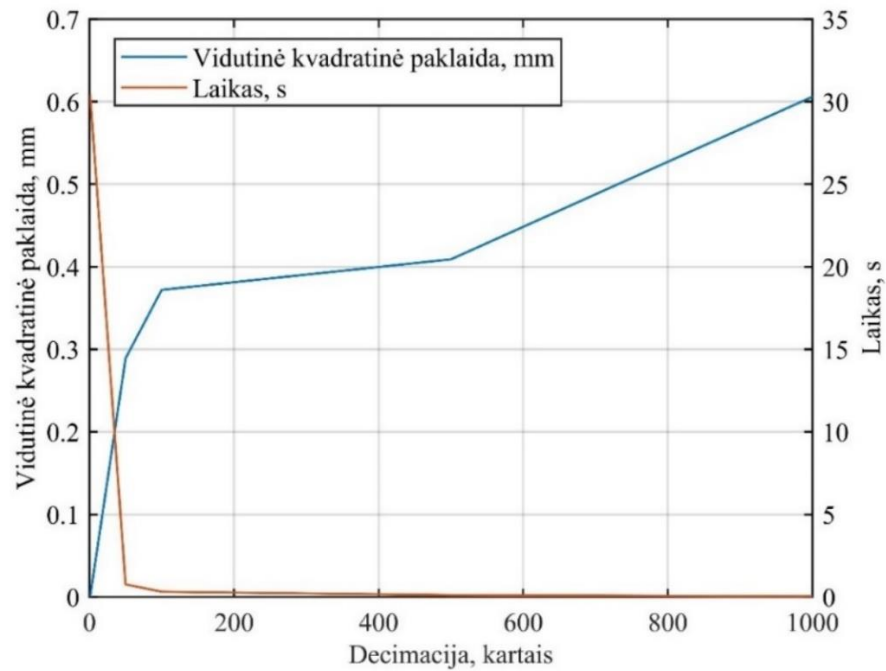
$$E = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2 + (p_z - q_z)^2}, \quad (12)$$

kur  $E$ , dviejų taškų  $P=(p_x, p_y, p_z)$  ir  $Q=(q_x, q_y, q_z)$  trimatėje erdvėje Euklidinis atstumas.

Rasti sprendiniai su mažiausiais Euklidiniais atstumais buvo parinkti kaip trajektorijos sprendiniai pozicijai nustatyti.

Šiuo metodu buvo nustatyta trajektorija iš magnetinio lauko verčių ir palyginta su sumodeliuota ir eksperimentiškai užregistruota trajektorijomis.

Taip pat pastebėta, kad keičiant duomenų masyvo informacijos kiekį, ženkliai keičiasi tikslumas ir skaičiavimo greitis. Taip pat atliktas eksperimentas tikslumo priklausomybei nuo informacijos kiekio patikrinimui. Iš 10 paveiksle pateiktos informacijos galima įžvelgti, kad decimuojant duomenis, skaičiavimo procesas greitėja, tačiau atsiranda vis didesnė skaičiavimo klaida.



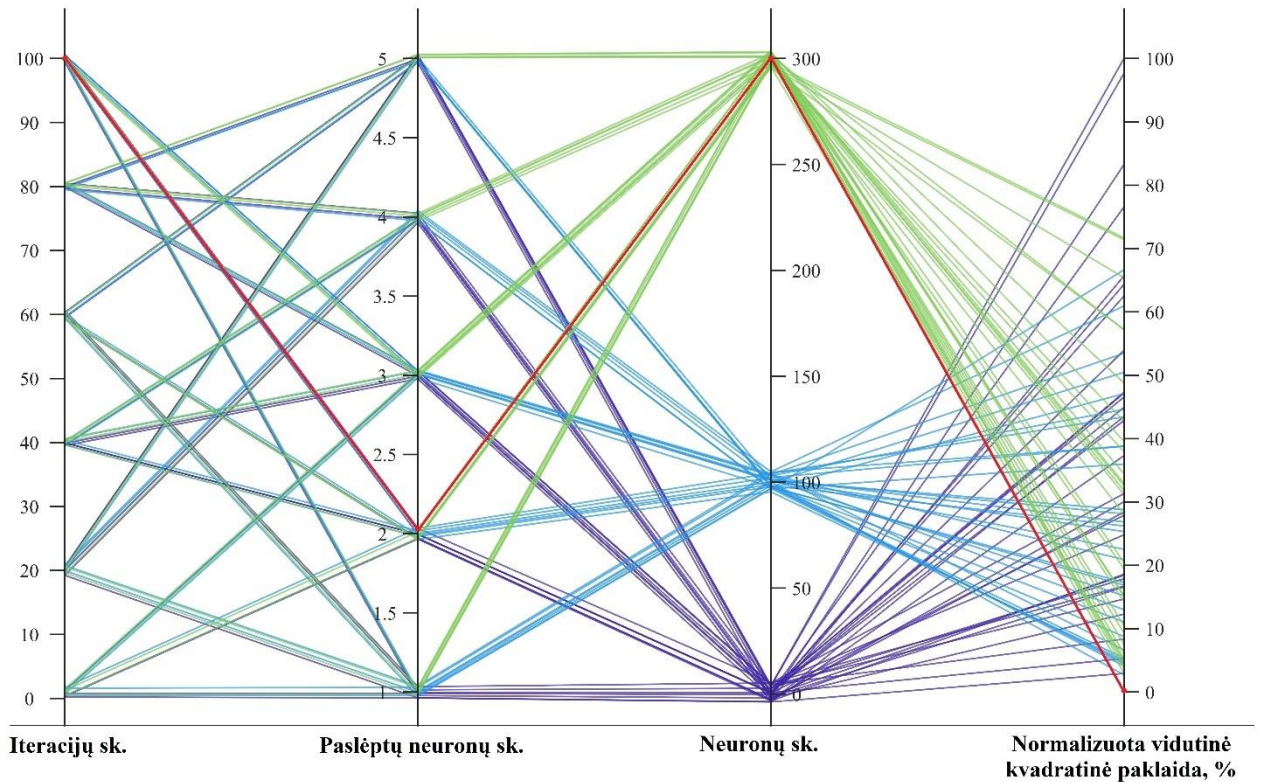
**10 pav.** PL metodo skaičiavimo greičio trukmės ir tikslumo priklausomybė erdvinės pozicijos nustatymui, decimuojant duomenis

#### 2.3.4. Neuroninių tinklų algoritmas

NT apmokymo sėkmingumas priklauso nuo daug skirtingų faktorių: apmokymui skiriamos informacijos kiekio, neuroninių tinklų, naudojamų apmokymui struktūros ir neuronų skaičiaus bei apmokymui skiriamų iteracijų skaičiaus. Taigi, nėra bendrai apibrėžtų taisyklių, kokius parametrus naudoti, norint apmokyti NT, taip pat dažnu atveju NT naudojami skirtingoms užduotims įgyvendinti. Svarbu paminėti ir tai, kad NT apmokymas su dideliais informacijos kiekiais, daug laiko ir kompiuterio atminties resursų reikalaujantis procesas. Teoriškai yra žinoma, kad didėjant neuronų ir jų sluoksniams bei apmokymo iteracijų skaičiui NT geba vis geriau atlikti reikiamas užduotis, tačiau per didelis jų skaičius gali tinklą permokinti.

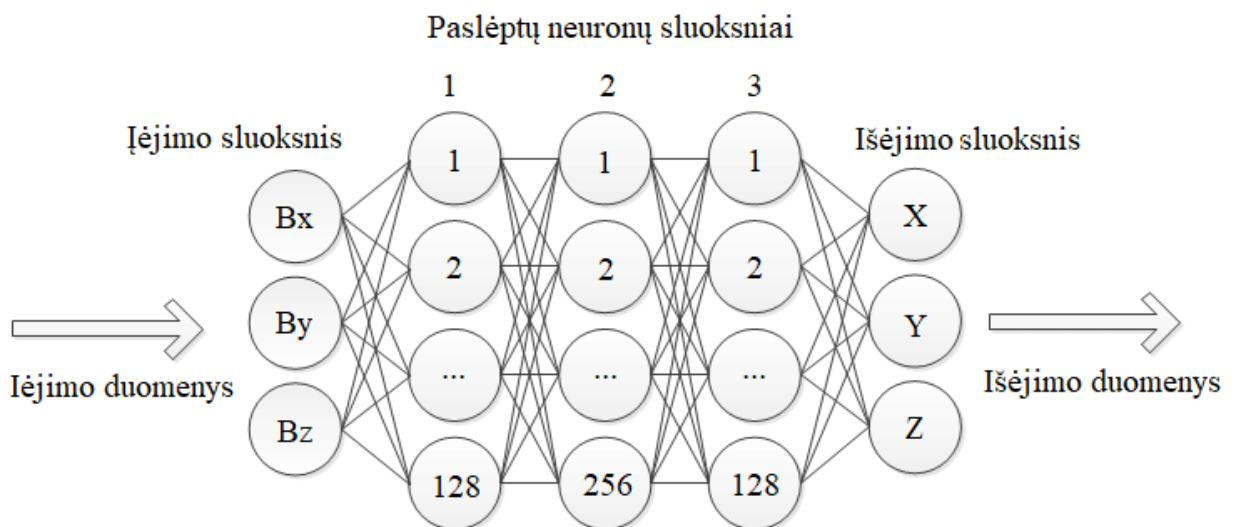
Norint geriau suprasti NT veikimą ir nustatyti kokie parametrai būtų optimaliausi jo apmokymui su dideliu duomenų failu, buvo ištirtas NT tikslumas sudarant skirtingas NT konfigūracijas ir jas apmokant. Iš (2.2.3 skyriuje) aprašyto magneto modelio failo, kurį sudaro virš 33 mln. eilučių masyvas buvo išrinktos 1000 eilučių, iš kurių 80 % buvo panaudotos NT apmokymui, o kitos 20 % jų testavimui.

NT apmokymui naudotos priklausomybės, pagal kurias remiantis buvo parinkta struktūra NT apmokymui naudojant pilną magnetinio lauko modelį, pavaizduotos 11 pav. Galima pamatyti, kad yra daugybė struktūrų tipų, kuriais buvo pasiekti neblogi rezultatai, tačiau raudona linija vaizduoja struktūrą, su kuria buvo pasiekta mažiausia normalizuota vidutinė kvadratinė paklaida (%). Ją sudarė 100 skaičiavimo iteracijų, 2 paslėpti neuronų sluoksniai ir 300 neuronų.



**11 pav.** NT vidutinės kvadratinės paklaidos priklausomybė nuo skirtingų struktūrų parametrų konfigūracijų, kur raudona linija žymi struktūrą, su kuria gauta mažiausia paklaida, o kitų spalvų linijos kitas struktūras

Erdvinės pozicijos nustatymui buvo pasirinktas tiesioginio sklidimo NT, sudarytas iš trijų paslėptų neuronų sluoksnių, kuriuose atitinkamai buvo 128, 256 ir 128 neuronai. Taip pat apmokymui buvo pasirinkta 100 iteracijų. NT buvo apmokytas su sumodeliuotu nuolatinio magneto modeliu (2.2.3 skyrius), kaip įėjimo duomenis panaudojant magnetinio lauko vektorių  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  reikšmes, o tinklo išėjime numatyti duomenys gauti  $X, Y, Z$  koordinatės. NT struktūra pavaizduota 12 pav. Prieš apmokant NT, įėjimo duomenys buvo normalizuoti intervale  $[-1 \ 1]$ , pagal mažiausią ir didžiausią reikšmes apmokymo masyve.



**12 pav.** Neuroninio tinklo struktūra, naudota tinklui apmokyti, su visu magnetinio lauko modeliu, kurią sudaro įėjimo sluoksnis iš trijų magnetinio lauko duomenų, 3 paslėptų neuronų sluoksniai, turintys po 128, 256 ir 128 neuronus bei duomenų išėjimo sluoksnis, išvedantis koordinatinių reikšmes

NT apmokyti buvo naudojamas didelis duomenų failas, todėl jis buvo apmokomas partijomis po 32 duomenų mėginius. Po kiekvieno apmokymo kas 32 duomenų pavyzdžius tinklas atnaujino savo svorius, atsižvelgdamas į tų 32 pavyzdžių padarytą klaidą. Mokymo procesas tęsiamas, kartojant visą mokymo duomenų rinkinį, apmokant po 32 mėginius, kol visi mėginiai bus apdoroti. Tai sudaro vieną iteraciją. Kiekvienoje paskesnėje iteracijoje modelis vėl pereina visą mokymo duomenų rinkinį 32 mėginių partijomis ir toliau atnaujina savo svorius, kol pasiekiamas nurodytas iteracijų skaičius 100. NT buvo apmokytas su 4,73 GB magnetinio lauko modelio failu.

Apmokytas NT išbandytas erdvinės pozicijos nustatymui su sumodeliuota atramine trajektorija ir eksperimentiškai užregistruota trajektorija.

### **2.3.5. Papildomas trajektorijų apdorojimas**

Norint patikrinti, ar įmanoma dar labiau pagerinti rezultatus, nustatytų erdvinės pozicijos koordinacių, nutarta pabandyti gautas trajektorijas papildomai apdoroti, jas filtruojant. Šiam tikslui buvo pasirinkta naudoti Savitzky – Golay filtrą. Šis filtras yra skaitmeninis ir naudoja judantį duomenų taškų langą, pritaiko prie šių taškų žemo laipsnio polinomą ir įvertina reikšmes lango centre. Ši technika efektyviai išlygina duomenis, išsaugant svarbias charakteristikas, tokias kaip trajektorijos viršūnių aukštį, plotį bei padėtis.

Šiuo atveju, dirbant su numatomomis trajektorijomis, kuriose gali būti tam tikrų triukšmų ar nelygybių, Savitzky – Golay filtro įdiegimas gali padėti išlyginti šias kreives ir padaryti jas lengviau interpretuojamas, neiškraipant pagrindinių duomenų tendencijų. Tai gali būti ypač naudinga, jei bandoma nustatyti konkrečias trajektorijų ypatybes, pavyzdžiui, viršūnes ar vingio taškus.

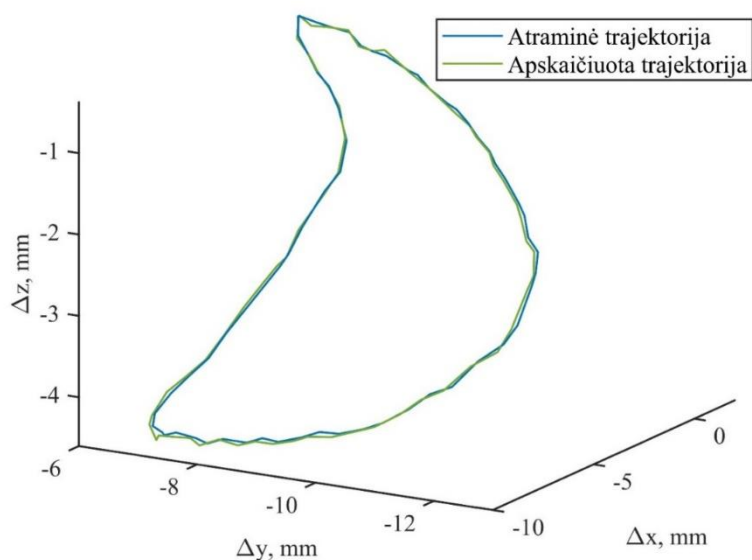
Gautoms trajektorijoms iš eksperimentiškai užregistruotų duomenų ir apdorotų MK PR, DSO, PL ir NT metodais nufiltruoti buvo pasirinktas 3 laipsnio polinomo dydis ir 11 taškų judantis duomenų langas. Rezultatams įvertinti buvo skaičiuojamas kiekvieno metodo tikslumas ir laikas, per kurį filtras apdorojo trajektorijas.



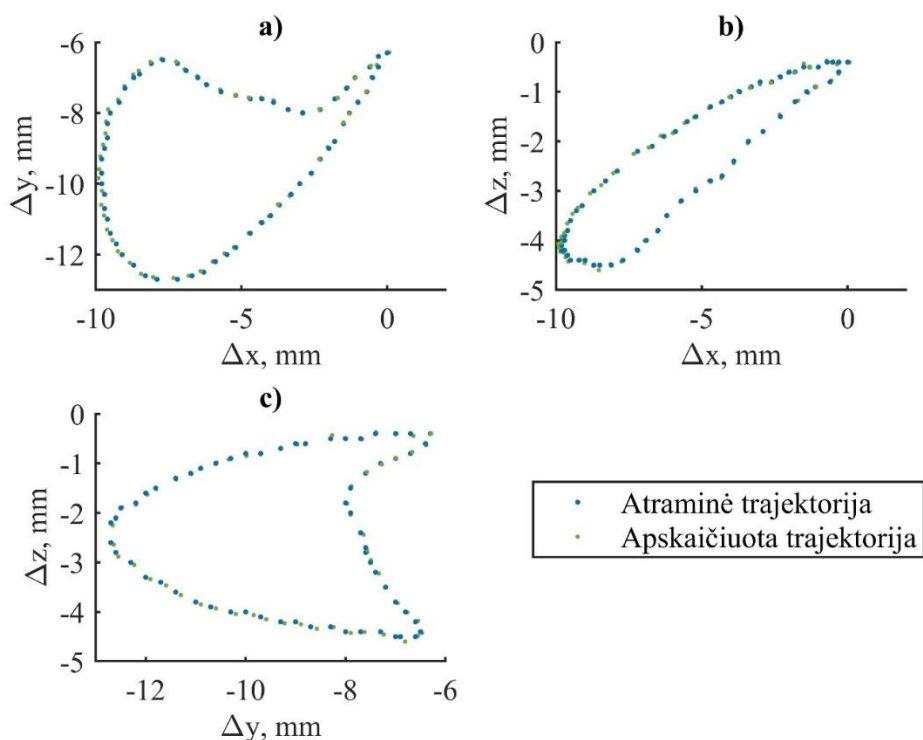
### 3. Rezultatai

#### 3.1. Pozicijos nustatymas mažiausių kvadratų metodu

Grafikuose 13 pav. ir 14 pav. pateikiami nustatytų erdvinės pozicijų rezultatai su sumodeliuoti nuolatinio magneto magnetiniu lauku ir eksperimentiškai užregistruotu 15 pav. ir 16 pav., naudojant MK PR metodo algoritmą. Gauti duomenys palyginti su atramine žandikaulio judesį imituojančia trajektorija.

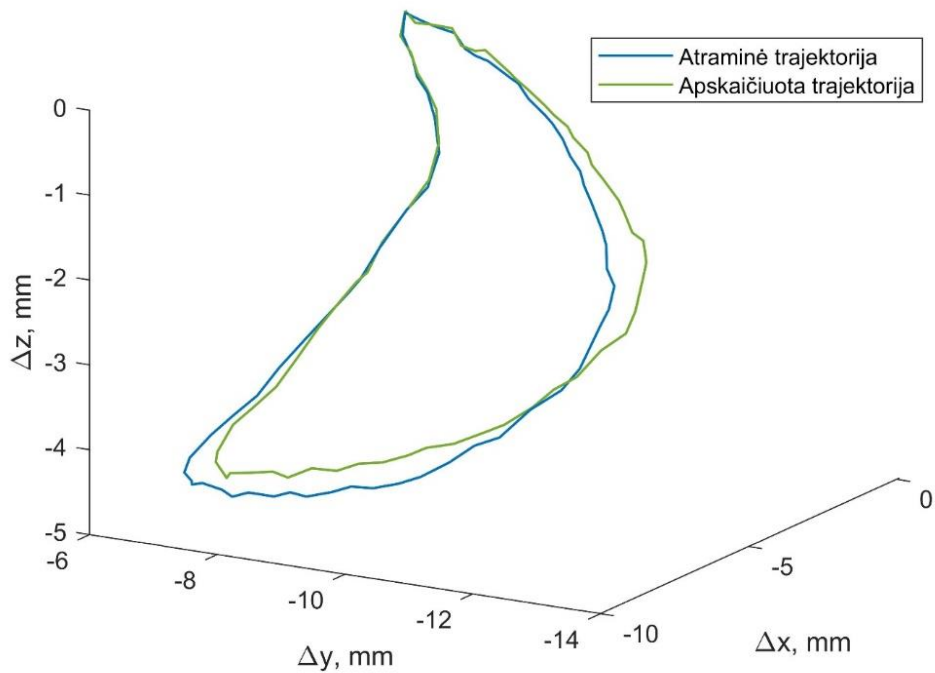


13 pav. Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (žalia) su MK PR metodo algoritmu iš magneto modelio

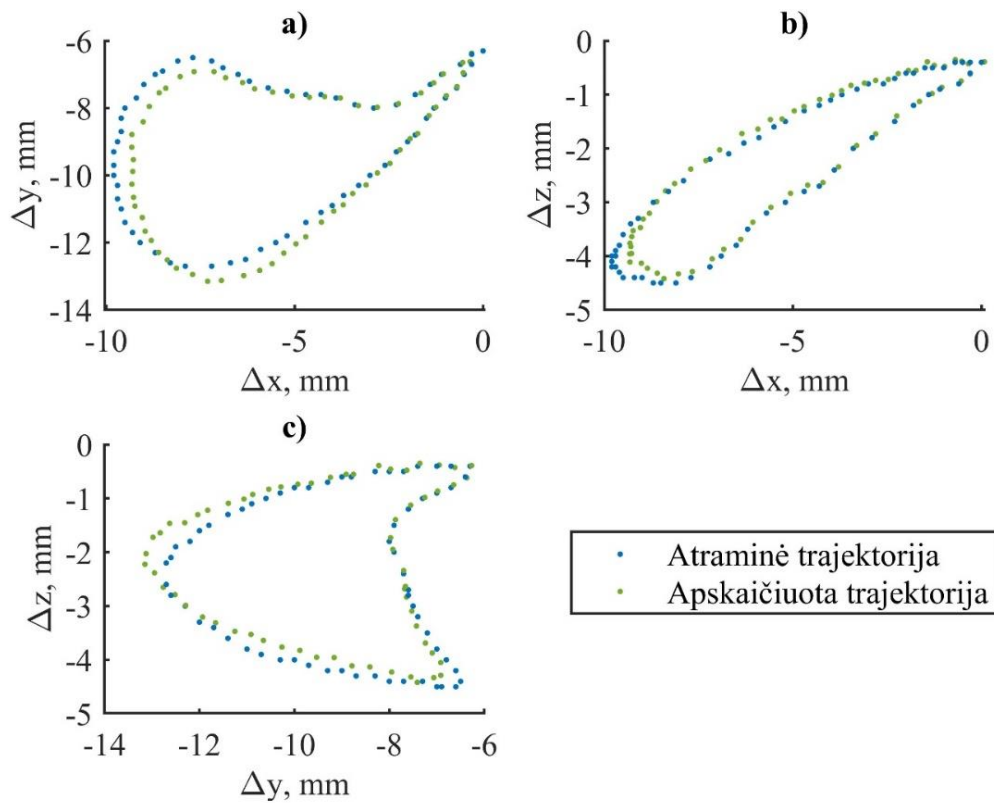


14 pav. Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (žalia) su MK PR metodo algoritmu iš magneto modelio, pavaizduota iš a) X – Y, b) X – Z, c) Z – X pusių

Pozicijos nustatymo skaičiavimai su modeliuotais duomenimis vidutiniškai truko 0,415 s, o vidutinė kvadratinė paklaida siekė 0,098 mm.

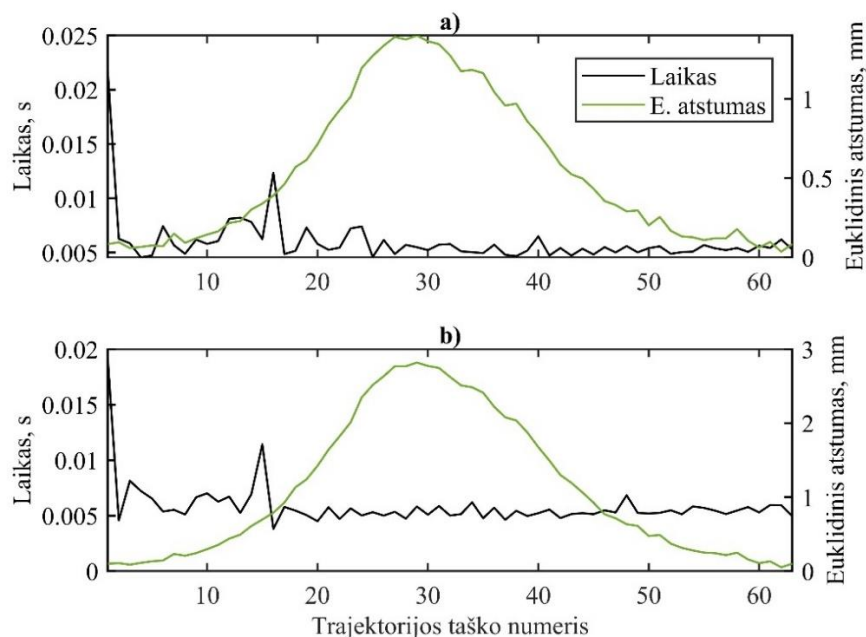


**15 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (žalia) su MK PR metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų



**16 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (žalia) su MK PR metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų, pavaizduota iš a) X – Y, b) X – Z, c) Z – X pusių

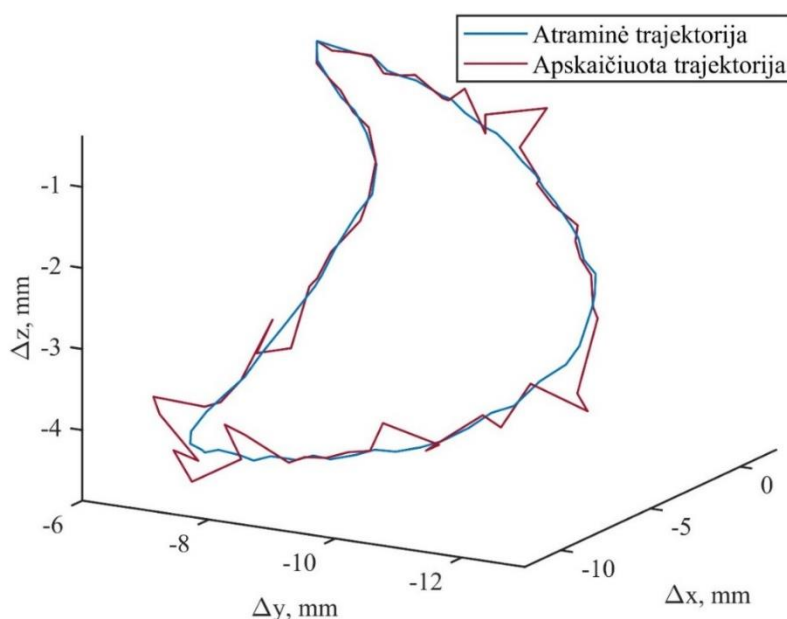
Su eksperimentiškai užregistruotais duomenimis skaičiavimai vidutiniškai truko 0,493 s, o vidutinė kvadratinė paklaida siekė 0,703 mm. 17 pav. pateikiami kiekvieno trajektorijos taško nustatymo trukmės ir tikslumo įvertinimo paklaidos palyginimo rezultatai.



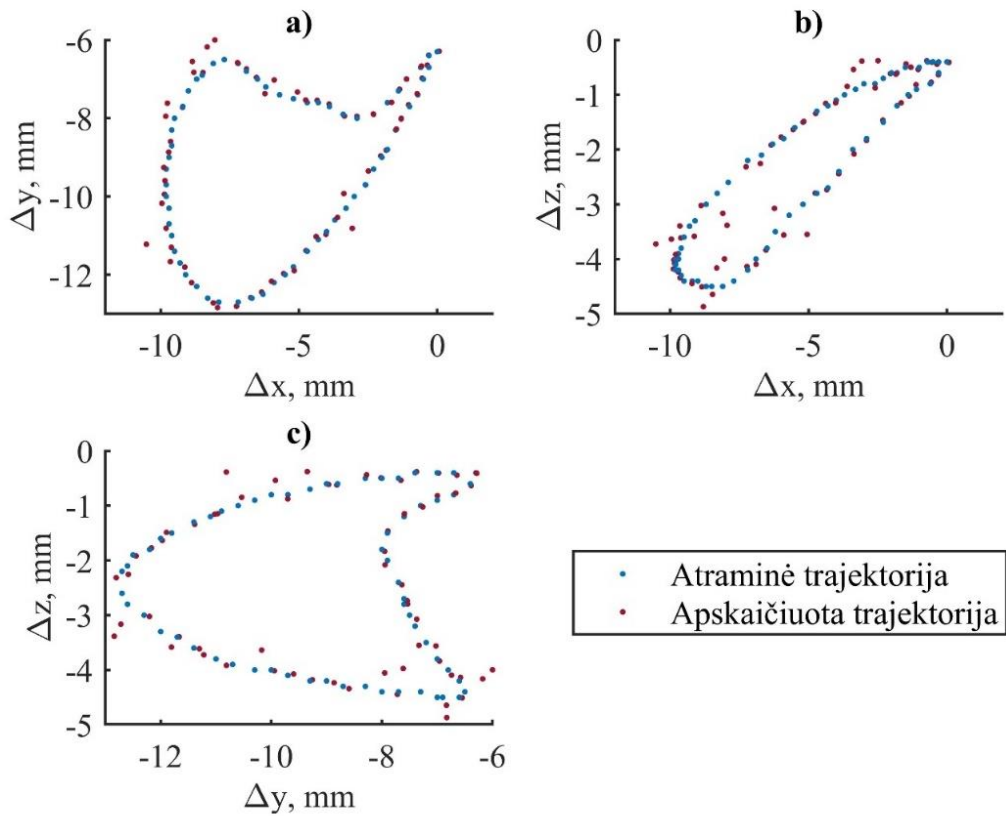
**17 pav.** Kiekvieno trajektorijos taško nustatymo MK PR metodu laiko trukmės ir tikslumo įvertinimo (Euklidinis atstumas) palyginimas, kur a) su modeliuotais duomenimis b) su eksperimentiškai užregistruotais

### 3.2. Pozicijos nustatymas dalelių spiečiaus optimizacijos metodu

Grafikuose 18 pav. ir 19 pav. pateikiami nustatytų erdvinės pozicijų rezultatai su sumodeliuoti nuolatinio magneto magnetiniu lauku ir eksperimentiškai užregistruotu 20 pav. ir 21 pav., naudojant DS metodo algoritmą. Gauti duomenys palyginti su atramine žandikaulio judesį imituojančia trajektorija.

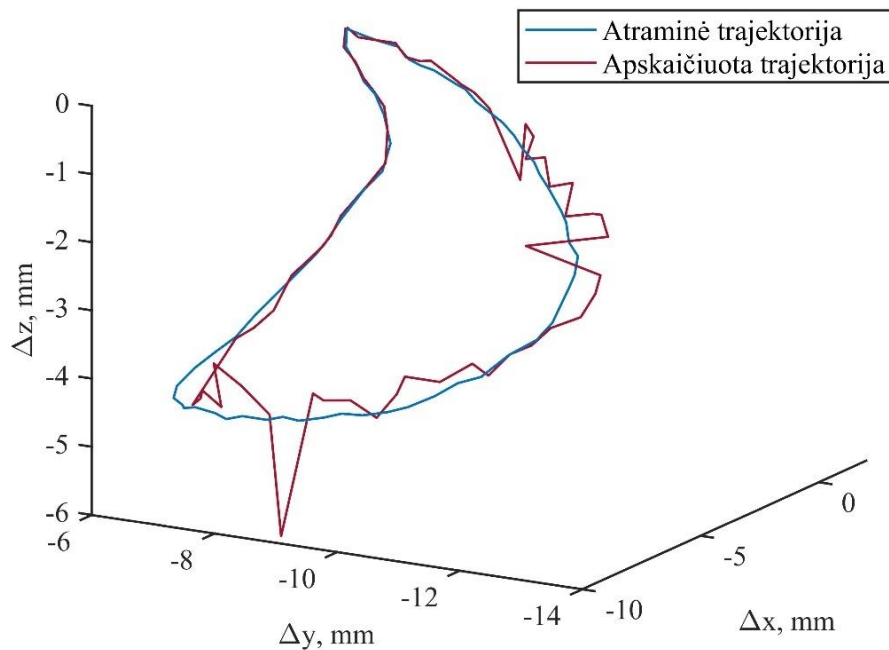


**18 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (raudona) su DS metodo algoritmu iš magneto modelio

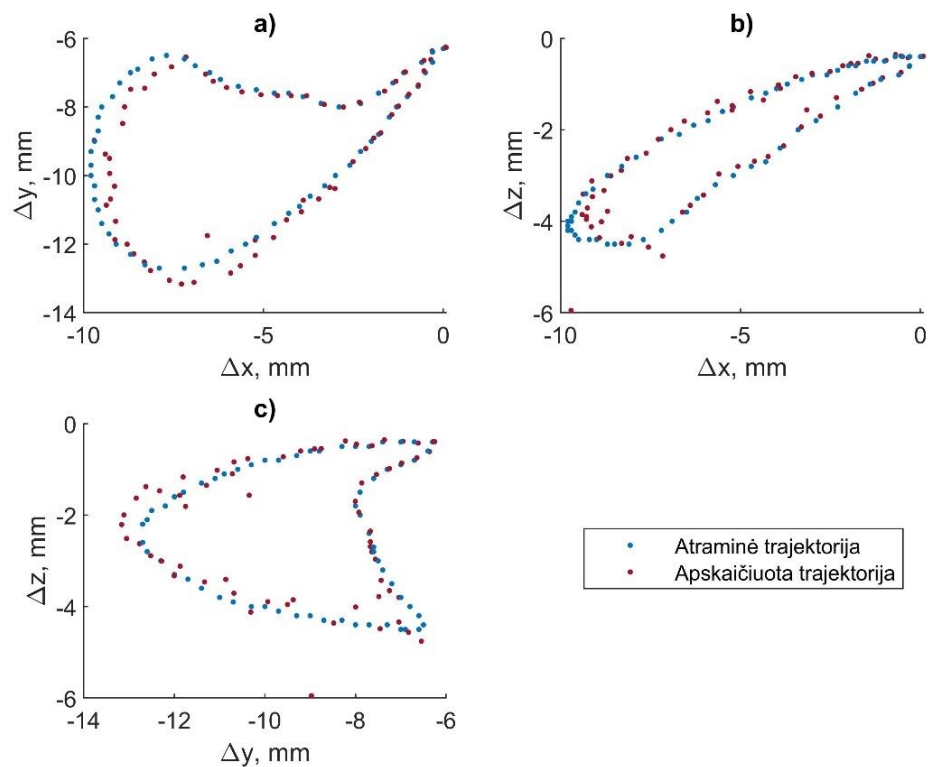


**19 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (raudona) su DS metodo algoritmu iš magneto modelio, pavaizduota iš a) X – Y, b) X – Z, c) Z – X pusių

Pozicijos nustatymo skaičiavimai su modeliuotais duomenimis vidutiniškai truko 1,606 s., o vidutinė kvadratinė paklaida siekė 0,33 mm.

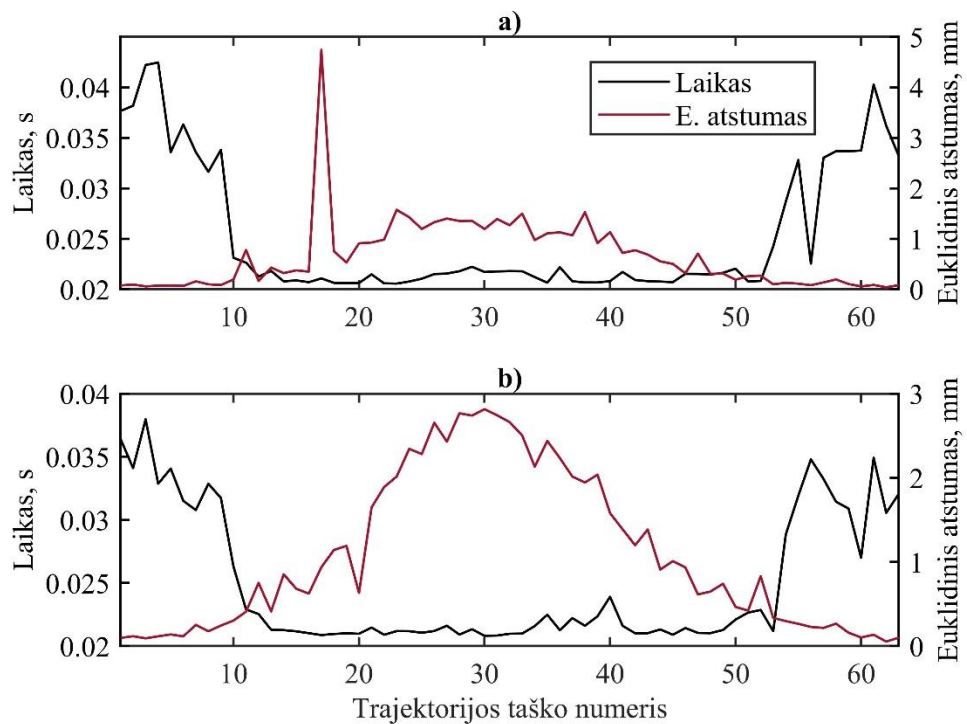


**20 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (raudona) su DS metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų



**21 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (raudona) su DS metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų, pavaizduota iš a) X – Y, b) X – Z, c) Z – X pusių

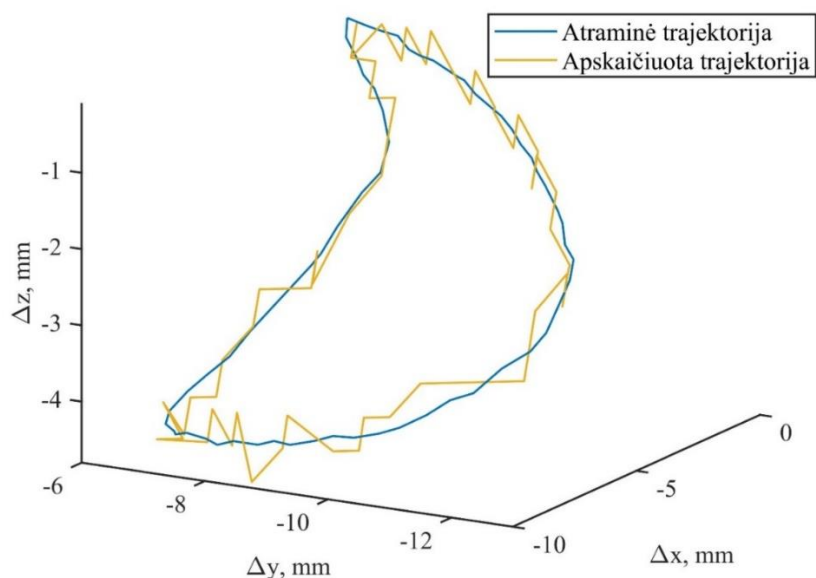
Su eksperimentiškai užregistruotais duomenimis skaičiavimai vidutiniškai truko 1,712 s, o vidutinė kvadratinė paklaida siekė 0,768 mm. 22 pav. pateikiami kiekvieno trajektorijos taško nustatymo trukmės ir tikslumo įvertinimo paklaidos palyginimo rezultatai.



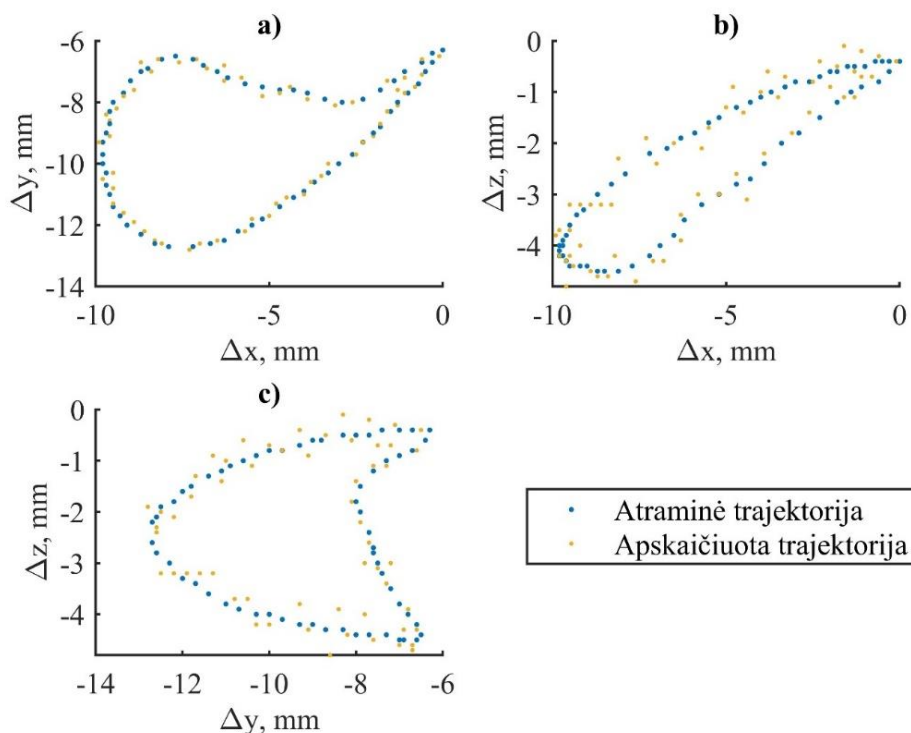
**22 pav.** Kiekvieno trajektorijos taško nustatymo DSO metodu laiko trukmės ir tikslumo įvertinimo (Euklidinis atstumas) palyginimas, kur a) su modeliuotais duomenimis b) su eksperimentiškai užregistruotais.

### 3.3. Pozicijos nustatymas peržvalgos lentelės metodu

Grafikuose 23 pav. ir 24 pav. pateikiami nustatytų erdvinės pozicijų rezultatai, kurie yra sumodeliuoti su nuolatinio magneto magnetiniu lauku ir eksperimentiškai užregistruoti 25 pav. ir 27 pav., naudojant PL metodo algoritmą su 50 kartų decimuotu duomenų failu. Gauti duomenys palyginti su atramine žandikaulio judesį imituojančia trajektorija.

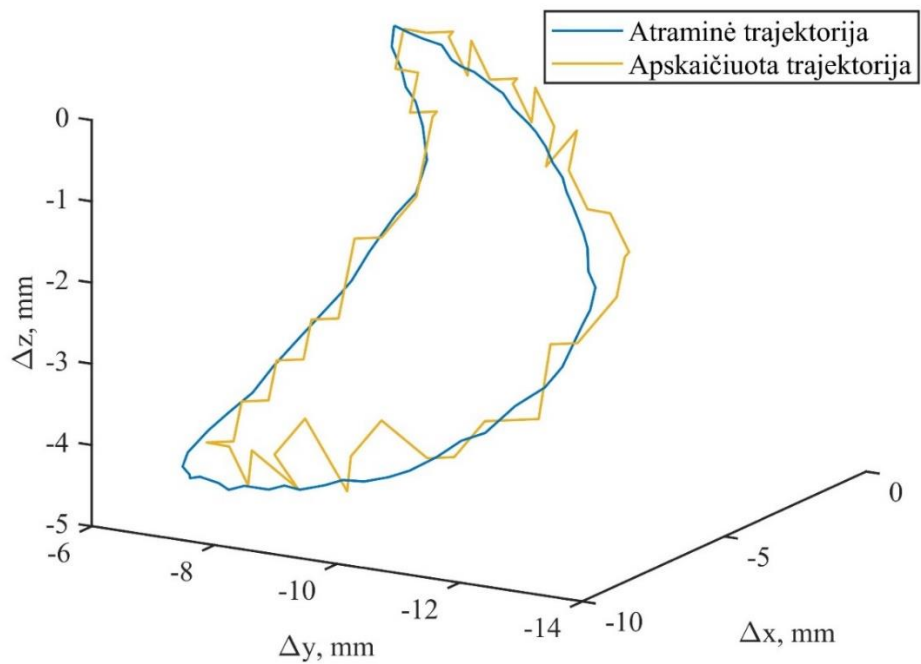


**23 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (geltona) su PL metodo algoritmu iš magneto modelio

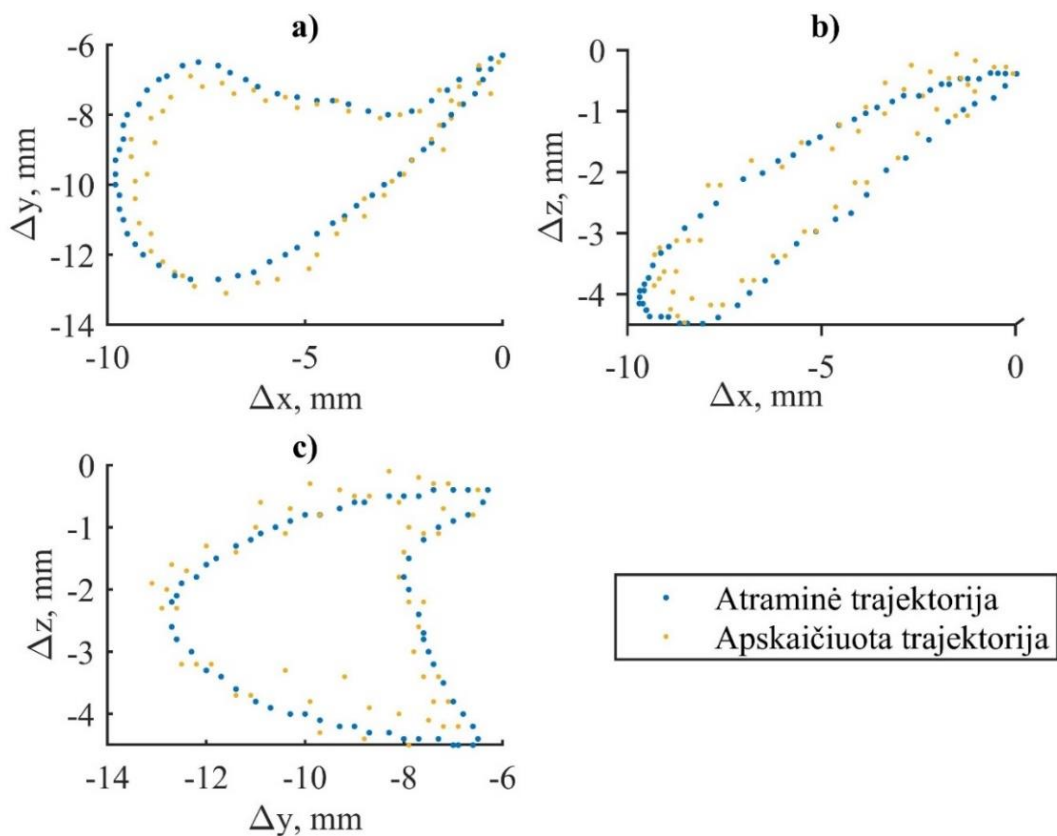


**24 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (geltona) su PL metodo algoritmu iš magneto modelio, pavaizduota iš a) X – Y, b) X – Z, c) Z – X pusių

Pozicijos nustatymo skaičiavimai su modeliuotais duomenimis vidutiniškai truko 0,624 s, o vidutinė kvadratinė paklaida siekė 0,289 mm.

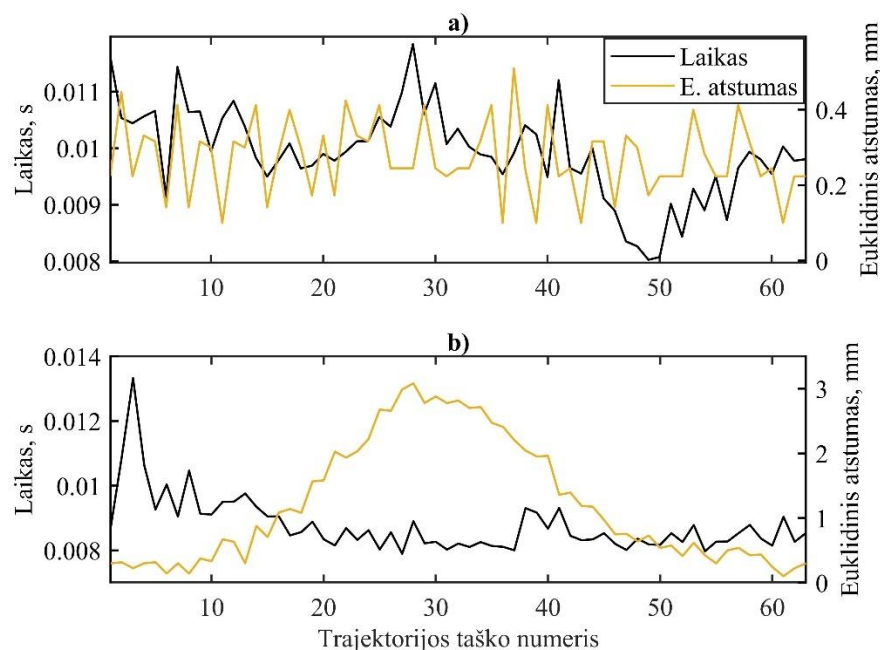


**25 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (geltona) su PL metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų



**26 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (geltona) su PL metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų, pavaizduota iš a)  $X - Y$ , b)  $X - Z$ , c)  $Z - X$  pusių

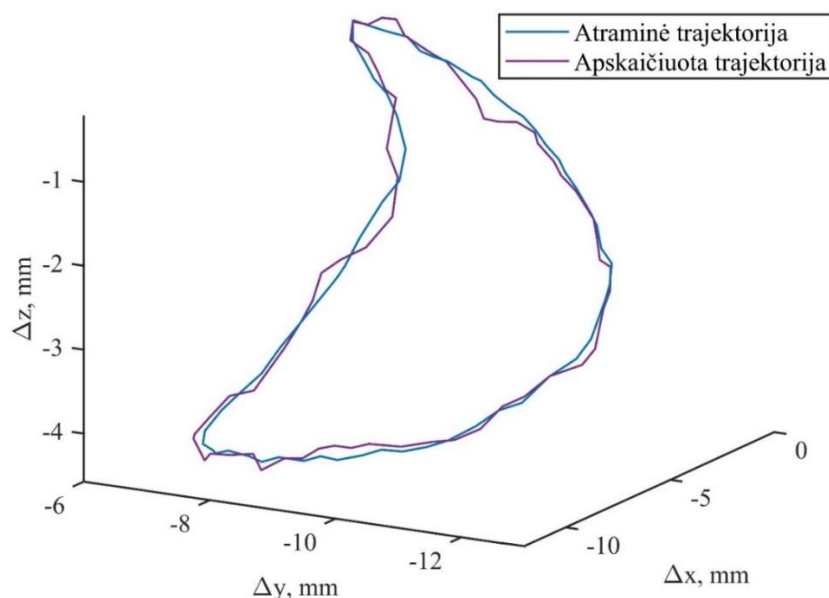
Su eksperimentiškai užregistruotais duomenimis skaičiavimai vidutiniškai truko 0,826 s, o vidutinė kvadratinė paklaida siekė 0,645 mm. 27 pav. pateikiami kiekvieno trajektorijos taško nustatymo trukmės ir tikslumo įvertinimo paklaidos palyginimo rezultatai.



**27 pav.** Kiekvieno trajektorijos taško nustatymo PL metodu laiko trukmės ir tikslumo įvertinimo (Euklidinis atstumas) palyginimas, kur a) su modeliuotais duomenimis b) su eksperimentiškai užregistruotais.

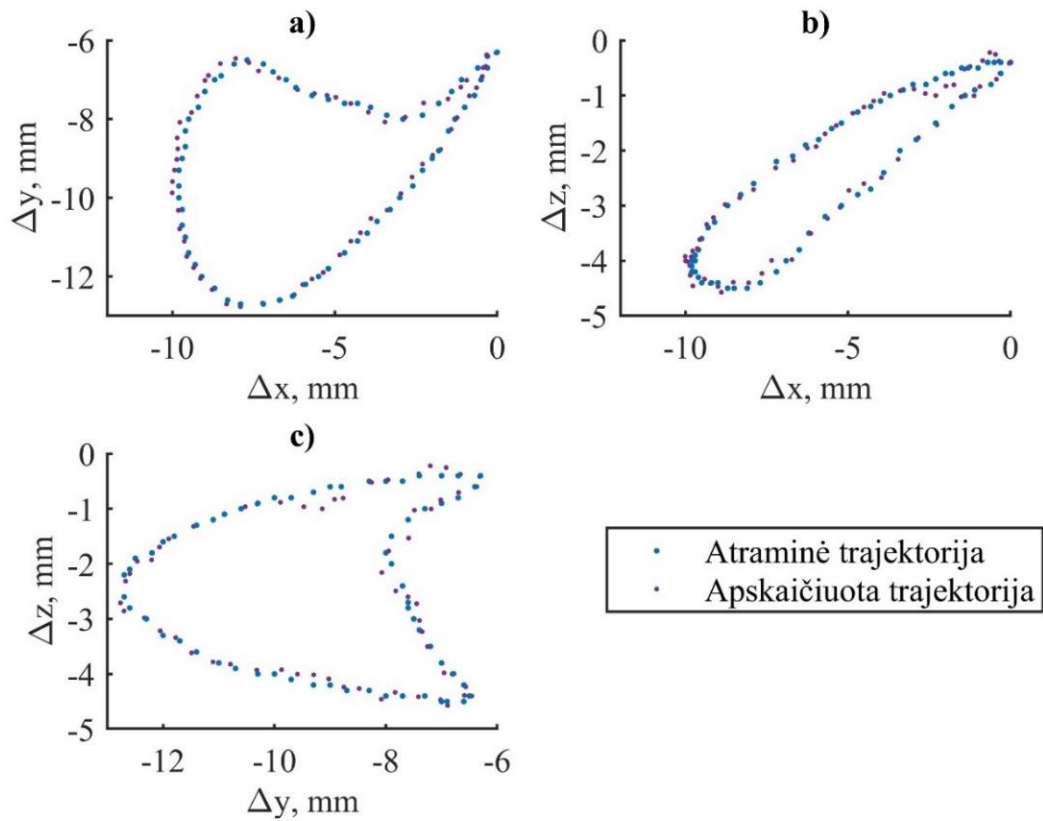
### 3.4. Pozicijos nustatymas neuroninių tinklų metodu

Grafikuose 28 pav. ir 29 pav. pateikiami nustatytų erdvinės pozicijų rezultatai, sumodeliuoti nuolatinio magneto magnetiniu lauku ir eksperimentiškai užregistruoti 30 pav. ir 31 pav., naudojant NT metodo algoritmą. Gauti duomenys palyginti su atramine žandikaulio judesį imituojančia trajektorija. Svarbu paminėti, kad NT modelio apmokymas su visu modelio failu truko virš 24 val.



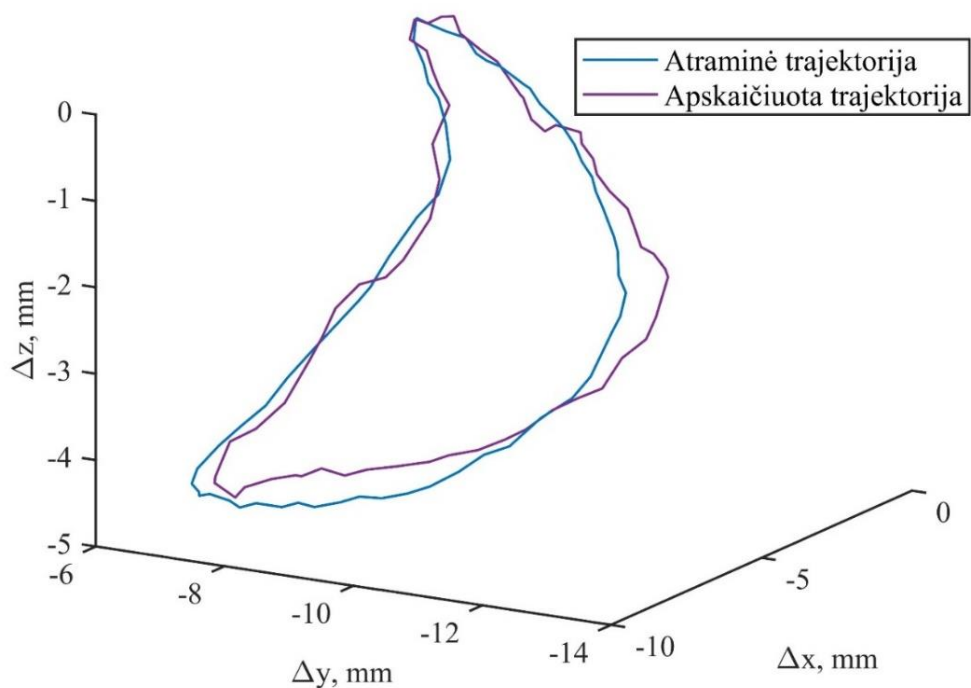
**28 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (violetinė) su NT metodo algoritmu iš magneto modelio.



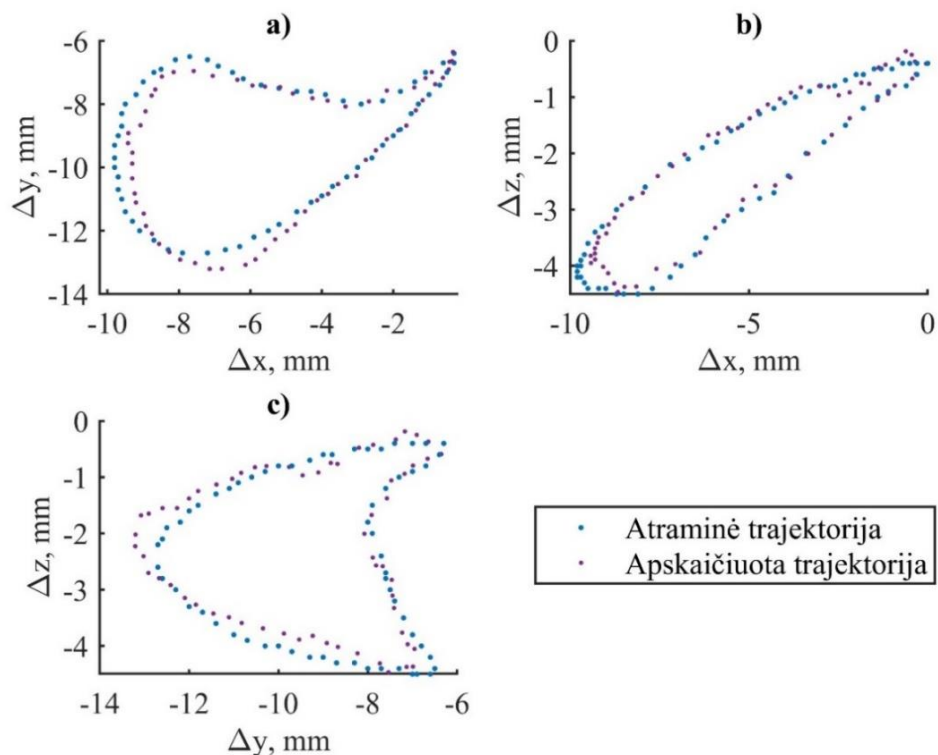


**29 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (violetinė) su NT metodo algoritmu iš magneto modelio, pavaizduota iš a) X – Y, b) X – Z, c) Z – X pusių.

Pozicijos nustatymo skaičiavimai su modeliuotais duomenimis vidutiniškai truko 0,237 s, o vidutinė kvadratinė paklaida siekė 0,229 mm.

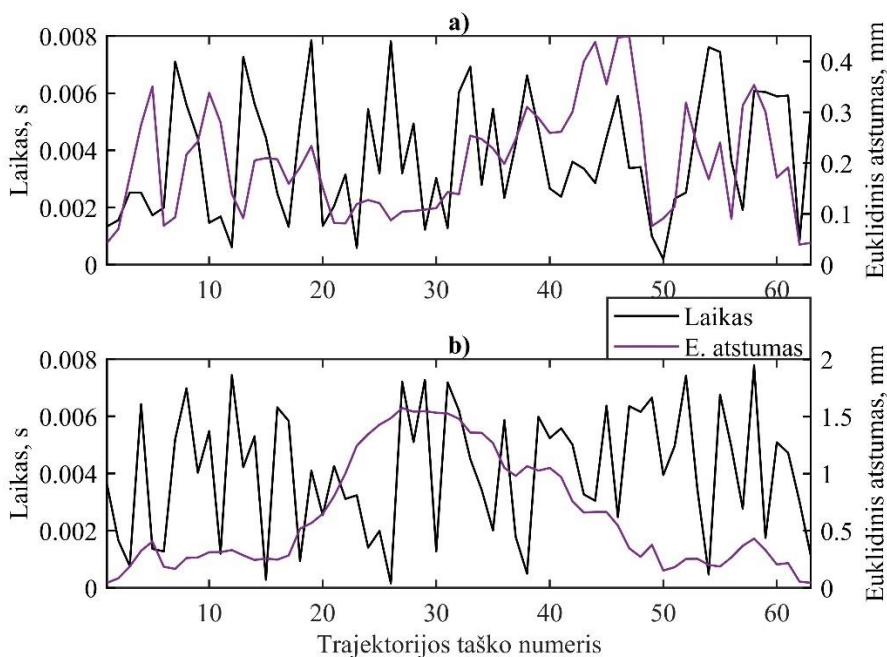


**30 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (violetinė) su NT metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų



**31 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija ir nustatyta (violetinė) su NT metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų, pavaizduota iš a) X–Y, b) X–Z, c) Z–X pusių.

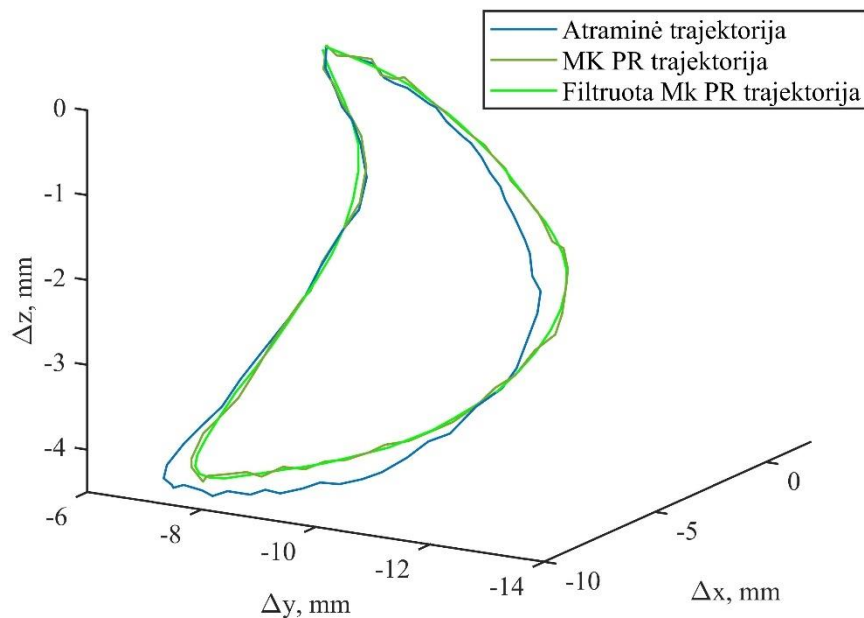
Su eksperimentiškai užregistruotais duomenimis skaičiavimai vidutiniškai truko 0,801 s, o vidutinė kvadratinė paklaida siekė 0,256 mm. 32 pav. pateikiami kiekvieno trajektorijos taško nustatymo trukmės ir tikslumo įvertinimo paklaidos palyginimo rezultatai.



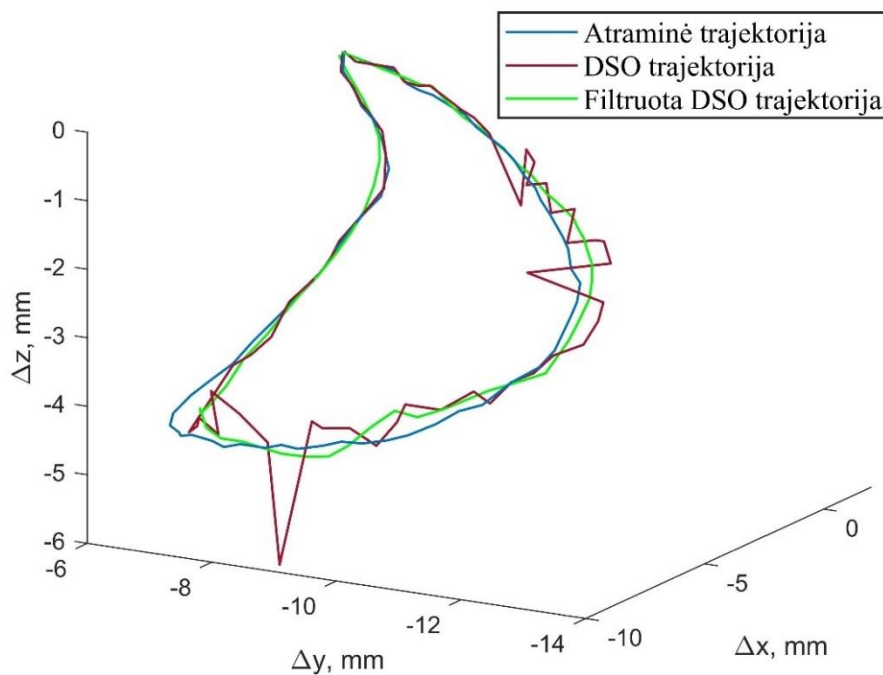
**32 pav.** Kiekvieno trajektorijos taško nustatymo NT metodu laiko trukmės ir tikslumo įvertinimo (Euklidinis atstumas) palyginimas, kur a) su modeliūtais duomenimis b) su eksperimentiškai užregistruotais.

### 3.5. Trajektorijų apdorojimas filtruojant

Nufiltravus gautas trajektorijas su MK PR, DSO, PL ir NT metodais, naudojant Savitzky – Golay filtrą, galima pastebėti, kad jos atrodo daug glotniau ir nėra didelių nukrypimų. Rezultatai pateikiami žemiau 33 pav. MK PR metodu gautos trajektorijos filtravimas, 34 pav. DSO trajektorijos filtravimas.

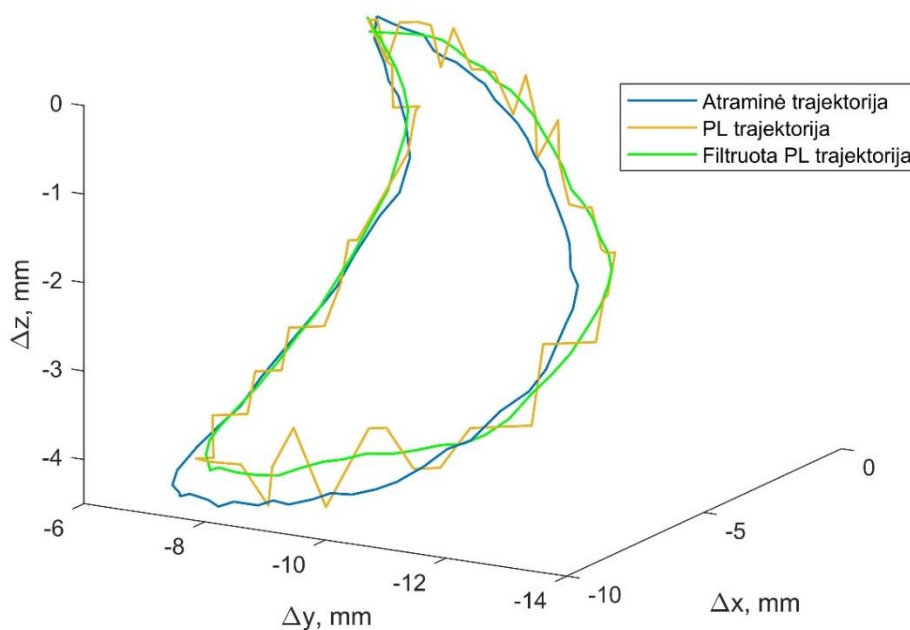


**33 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija, nustatyta (tamsiai žalia) su MK PR metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų ir nufiltruota su Savitzky – Golay filtru (šviesiai žalia).

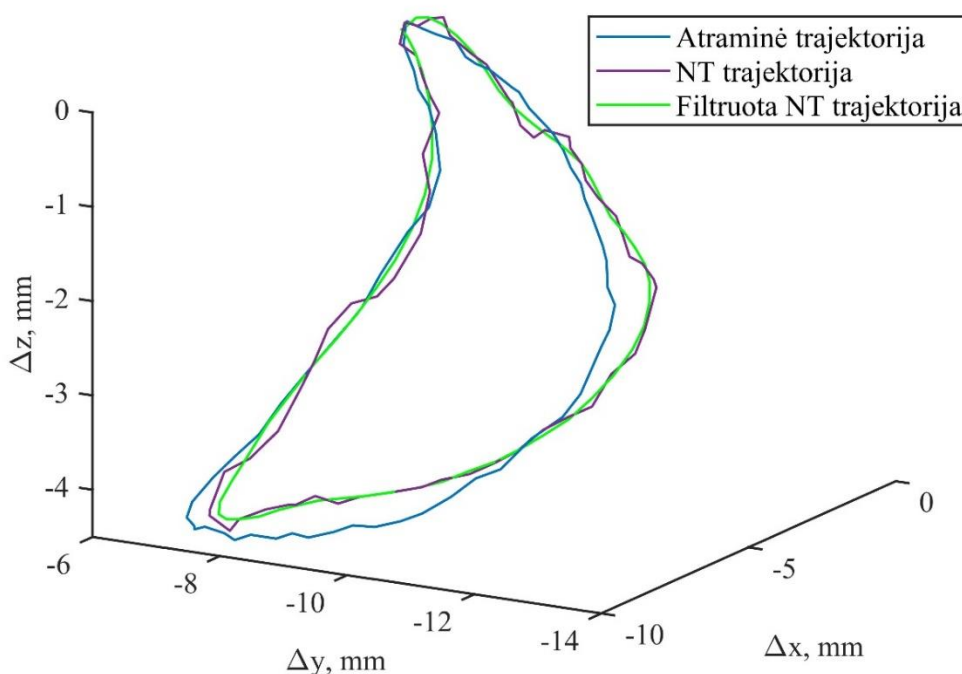


**34 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija, nustatyta (raudona) su DSO metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų ir nufiltruota su Savitzky – Golay filtru (šviesiai žalia).

35 pav. ir 36 pav. PL ir NT metodai gautų trajektorijų iš eksperimentiškai užregistruotų duomenų apdorojimas filtru.



**35 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija, nustatyta (geltona) su PL metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų ir nufiltruota su Savitzky – Golay filtru (šviesiai žalia).



**36 pav.** Atraminė (mėlyna) trajektorija, nustatyta (violetinė) su NT metodo algoritmu iš eksperimentinių duomenų ir nufiltruota su Savitzky – Golay filtru (šviesiai žalia).

Po filtravimo kiekvieno metodų MK PR, DSO, PL ir NT vidutinės kvadratinės paklaidos reikšmės buvo gautos 0,707, 0,697, 0,792 ir 0,797 mm.

### 3.6. Metodų palyginimas ir diskusija

Šiame skyriuje pateikti tyrimo apibendrinti rezultatai. Visose lentelėse žemiau pateikti rezultatai suvidurkinti iš 10 matavimų. Analizuojant rezultatus, bandyta suprasti ir paaiškinti tendencijas, taip pat identifikuoti priežastis, kurios lėmė tokių rezultatų gavimą.

Erdvinės pozicijos nustatymo skaičiavimų rezultatai pateikti 1 lentelėje, galima teigti, kad greičiausiai skaičiavimus pavyko atlikti naudojant NT metodą, kuriuo žandikaulio trajektorijos nustatymas truko 0,237 s, o tiksliausiai poziciją įvertinti pavyko su MK PR algoritmu su 0,098 mm vidutine kvadratine paklaida. Prasčiausiai pasirodė DSO algoritmas, juo pozicijos nustatymo skaičiavimai truko 1,606 s, o tikslumas siekė 0,33 mm vidutinės kvadratinės paklaidos. Lyginant PL metodą, juo skaičiavimai truko 0,289 s, o paklaida siekė 0,624 mm.

**1 lentelė.** Mažiausių kvadratų pasikliautino regiono (MK PR), dalelių spiečiaus optimizacijos (DSO), peržvalgos lentelės (PL) ir neuroninių tinklų erdvinės pozicijos nustatymo rezultatai su modeliuotais duomenimis

Erdvinės pozicijos nustatymas su modeliuotais duomenimis				
	MK PR	DSO	PL (decimuota 50 kartų)	NT
Vidutinė kvadratinė paklaida, mm	0,098	0,33	0,289	0,229
Skaičiavimo greitis, s	0,415	1,606	0,624	0,237

Lyginant rezultatus, gautus su eksperimentiškai nustatytais duomenimis, pateiktais 2 lentelėje, pastebima, kad trukmė išliko panaši lyginant su 1 lentelės duomenimis, o pozicijos įvertinimo tikslumas ženkliai sumažėjo. Greičiausiai skaičiavimus atliko NT metodas, o tiksliausiai MK PR, rezultatai atitinkamai siekė 0,256 s ir 0,703 mm. DSO metodu skaičiavimai vėl truko ilgiausiai –1,712 s, tačiau tikslumas buvo šiek tiek geresnis ir lygus 0,768 mm vidutinei kvadratinei paklaidai. Prasčiausiai erdvinę poziciją pavyko nustatyti PL metodu, 0,826 mm tikslumu, per 0,645 s.

**2 lentelė.** Mažiausių kvadratų pasikliautino regiono (MK PR), dalelių spiečiaus optimizacijos (DSO), peržvalgos lentelės (PL) ir neuroninių tinklų erdvinės pozicijos nustatymo rezultatai su eksperimentiškai užregistruotais duomenimis

Erdvinės pozicijos nustatymas su eksperimentiškai užregistruotais duomenimis				
	MK PR	DSO	PL (decimuota 50 kartų)	NT
Vidutinė kvadratinė paklaida, mm	0,703	0,768	0,826	0,801
Skaičiavimo greitis, s	0,493	1,712	0,645	0,256

Vertinant, kuris metodas buvo greičiausias ir tiksliausias, svarbu paminėti ir tai, kad PL metodo rezultatai labai priklauso nuo duomenų decimacijos. Taigi galima matyti iš 3 lentelėje pateiktos pozicijos nustatymo rezultatų priklausomybės nuo decimacijos, kad PL metodu poziciją pavyko nustatyti idealiai su  $2 \cdot 10^{-15}$  mm vidutine kvadratine paklaida, tačiau toks nustatymas truko itin ilgai - 30,44 s, o, mažinant duomenų kiekį, pozicijos nustatymo laiką pavyko sutrumpinti iki 0,031 s, tačiau tikslumas taip pat ženkliai sumažėjo – iki 0,606 mm vidutinės kvadratinės paklaidos.

**3 lentelė.** Peržvalgos lentelės (PL) metodo priklausomybės nuo duomenų failo decimacijos rezultatai erdvinės pozicijos nustatymui su modeliuotais duomenimis

Peržvalgos lentelės metodo priklausomybė nuo decimacijos					
Decimacija, kartais	1	50	100	500	1000
Vidutinė kvadratinė paklaida, mm	$2 \cdot 10^{-15}$	0,289	0,372	0,409	0,606
Skaičiavimo greitis, s	30,44	0,76	0,315	0,11	0,031

Atlikus filtravimą trajektorijoms gautoms iš eksperimentiniu būdu gautų duomenų ir juos apdorojus skirtingais metodais (MK PR, DSO, PL, NT) vidutinės kvadratinės paklaidos ir skaičiavimo greičio rezultatai pateikiami 4 lentelėje.

**4 lentelė.** Mažiausių kvadratų, pasikliautino regiono (MK PR) dalelių spiečiaus optimizacijos (DSO), peržvalgos lentelės (PL) ir neuroninių tinklų erdvinės pozicijos nustatymo rezultatai su eksperimentiškai užregistruotais duomenimis po filtravimo Savitzky – Golay skaitmeniniu filtru.

Erdvinės pozicijos nustatymas su eksperimentiškai po filtravimo				
	MK PR	DSO	PL (decimuota 50 kartų)	NT
Vidutinė kvadratinė paklaida, mm	0,707	0,712	0,792	0,797

Iš 4 lentelėje pateiktų duomenų galima pastebėti, kad MK PR metodo tikslumas šiek tiek suprastėjo, kitų metodų DSO, PL ir NT duomenys pagerėjo lyginant prieš ir po filtravimo. MK PR tikslumo pokytis buvo -0,003 mm, DSO +0,056 mm, PL +0,034 mm ir NT +0,004 mm. Taikant filtravimą, visais metodais skaičiavimas truko vidutiniškai po 0,011 s kiekvienu metodu, suvidurkinant 10 skaičiavimų, tai reiškia, jeigu būtų taikomas filtravimas, tai prailgintų bendrą erdvinės pozicijos nustatymo laiką. Iš rezultatų galima pastebėti, kad kuo geriau metodas nustato poziciją, tuo mažiau yra naudingas papildomas filtravimas, tačiau kai kuriais atvejais gali būti naudingas.

Mažiausių kvadratų pasitikėjimo regiono atspindžio metodas (MK PR) yra žinomas dėl savo atsparumo ir tikslumo, sprendžiant netiesinius mažiausių kvadratų uždavinius. Aukštas tikslumas, kurį jis parodė tyrimo metu (vidutinė kvadratinė paklaida 0,098 mm), atitinka jo projektavimo tikslą.

Tačiau jo greitis nėra jo stiprioji pusė, ir jis nebuvo greičiausias atliktame tyrime. Skaičiavimo sudėtingumas gali būti pagrindinis faktorius, prisidėjęs prie ilgesnio skaičiavimo laiko.

Dalelių spiečiaus optimizavimo metodas (DSO) yra metaeuristinis metodas, įkvėptas paukščių būrių ar žuvų mokyklų socialinio elgesio. Jo stiprybė yra gebėjimas ieškoti didelių kandidatų sprendimų erdvių, tačiau kartais jis gali įstrigti lokaliuose optimumo vietose, kas gali paaiškinti palyginti mažesnę tikslumą tyrimo rezultatuose. Spiečiaus pobūdžio algoritmas ir jo iteracinis pobūdis gali padaryti jį skaičiavimo požiūriu intensyvu, kas ir galėjo prisidėti prie ilgo skaičiavimo laiko.

Peržvalgos lentelės (PL) metodo našumas priklauso nuo iš anksto užprogramuotų duomenų kokybės ir išsamumo. Atsižvelgiant į tai, kad abiejuose tyrimo testuose buvo didelė kvadratinė paklaida, gali būti, kad naudojama lentelės diskretiškumas nebuvo pakankamai tikslus. Duomenų decimavimas turi didelę įtaką šio metodo tikslumui. Kompromisas tarp skaičiavimo laiko ir tikslumo yra dažnas daugelio programų iššūkis, todėl, naudojant šį metodą, reikia atidžiai tai apsvarstyti.

Neuroniniai tinklai (NT) buvo plačiai naudojami dėl jų gebėjimo mokytis ir apibendrinti iš duomenų. NT metodo greitis tyrime greičiausiai susijęs su tuo, kad kai neuroninis tinklas yra išmokytas, jis gali labai greitai prognozuoti. Neuroninio tinklo tikslumas priklauso nuo mokymo duomenų kokybės ir tinklo architektūros. NT metodas parodė pakankamą tyrimo tikslumą, tačiau jis nebuvo pats tiksliausias. Tai gali būti dėl tokių veiksnių kaip per didelis pritaikymas, nepakankamas pritaikymas arba nepakankamo apmokymo duomenų kiekio.

Apibendrinant galima teigti, kad geriausias erdvinės padėties nustatymo iš nuolatinio magnetinio lauko žandikaulio judėjimo sekimo metodas priklauso nuo konkrečių atliekamos užduoties reikalavimų. Jei greitis yra svarbiausias veiksnys, NT metodas atrodo tinkamiausias. Jeigu tikslumas yra svarbiausias, MK PR metodas gali būti geriausias pasirinkimas. PL metodas gali būti svarstomas, jei yra išsami ir tiksli lentelė, o skaičiavimo ištekliai yra riboti. Galiausiai, DSO gali būti naudojamas, kai paieškos erdvė yra didelė ir labai svarbu rasti visuotinį optimalumą.

Šių metodų veikimas taip pat gali būti tobulinamas toliau gerinant ir optimizuojant. Pavyzdžiui, NT metodo tikslumą galima padidinti naudojant daugiau mokymo duomenų arba kitokią tinklo architektūrą, o MK PR metodo greitį galima pagerinti naudojant efektyvesnius algoritmus arba galingesnius skaičiavimo išteklius. PL metodui būtų galima panaudoti išsamesnę ir smulkiau diskretizuotą lentelę, o DSO metodo veikimas galėtų būti gerinamas geriau derinant parametrus.

## Išvados

1. Literatūros analizė apie žandikaulio judesių sekimo technologijas atskleidė įvairius metodus, naudojamus erdvinei padėčiai iš nuolatinio magneto magnetinio lauko nustatyti. Kiekvienas metodas turi savo stipriąsias ir silpnąsias puses, atsižvelgiant į įgyvendinimo sudėtingumą ir erdvinės pozicijos nustatyto tikslumą bei greitį, todėl pasirenkant metodą reikia vadovautis konkrečiais atliekamos užduoties tikslumo ir greitaveikos reikalavimais.
2. Sėkmingai pavyko įgyvendinti erdvinės padėties nustatymo iš nuolatinio magneto magnetinio lauko metodus, skirtus žandikaulio judėjimo sekimui. Kiekvienas metodas parodė skirtingą tikslumo ir skaičiavimo trukmės lygį. Tiksliausias buvo mažiausių kvadratų pasitikėjimo regiono atspindėjimo metodas (MK PR), o neuroninių tinklų (NT) metodas buvo greičiausias, tačiau, atsižvelgiant į visų metodų rezultatus, šiuo atveju labiausiai priimtinas metodas žandikaulio pozicijai sekti yra (MK PR) dėl savo tikslumo ir palyginus neblogų laiko sąnaudų.
3. Kiekybinis metodų įvertinimas parodė, kad nei vienas metodas nepasižymėjo ir geriausiu skaičiavimo greičiu bei tikslumu. Atliekant konkrečią užduotį, reikalingas kompromiso ieškojimas tarp greičio ir tikslumo. NT metodas, nors ir buvo greičiausias, nebuvo pats tiksliausias, o MK PR metodas, nors ir buvo tiksliausias, nebuvo greičiausias. Peržvalgos lentelės (PL) metodo veikimui didelę įtaką turėjo duomenų išskaidymas, o dalelių spiečiaus optimizavimo (DSO) metodas, nors ir galintis apdoroti dideles kandidatų sprendimų vietas, parodė mažiausią tikslumą ir greitį. Šios išvados rodo, kad tolesnis šių metodų optimizavimas ir tobulinimas gali pagerinti jų veikimą.



## Literatūros sąrašas

1. CALIL, B.C., DA CUNHA, D.V., VIEIRA, M.F. *et al.* Identification of arthropathy and myopathy of the temporomandibular syndrome by biomechanical facial features. *BioMed Eng OnLine* 19, 22 (2020) [žiūrėta 2023-05-15]. <https://doi.org/10.1186/s12938-020-00764-5>.
2. ÅSA MOGREN, ANITA MCALLISTER & LOTTA SJÖGREEN (2022) Range of motion (ROM) in the lips and jaw during vowels assessed with 3D motion analysis in Swedish children with typical speech development and children with speech sound disorders, *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 47:4, 219-229, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: 10.1080/14015439.2021.1890207.
3. F. SENNY, J. DESTINE AND R. POIRRIER, "Midsagittal Jaw Movement Analysis for the Scoring of Sleep Apneas and Hypopneas," in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 55, no. 1, pp. 87-95, Jan. 2008, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: 10.1109/TBME.2007.899351.
4. William R. Sherman, Alan B. Craig. Chapter 4 - Input: Interfacing the Participant(s) With the Virtual World. In *The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics,. Understanding Virtual Reality (Second Edition)*. Morgan Kaufmann. 2018, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800965-9.00004-0>.
5. LEE, HWA-JUNG, JUNE-SUNG SHIM, HONG-SEOK MOON, and JONG-EUN KIM. 2021. "Alteration of the Occlusal Vertical Dimension for Prosthetic Restoration Using a Target Tracking System" *Applied Sciences* 11, no. 13: 6196, [žiūrėta 2023-05-15] .doi: <https://doi.org/10.3390/app11136196>.
6. TMD (Temporomandibular Disorders) (2023) National Institute of Dental and Craniofacial Research. [žiūrėta 2023-05-15]. Prieiga per internetą: <https://www.nidcr.nih.gov/health-info/tmd>
7. LOMAS J., T. GURGENCI, C. JACKSON, C. DUNCAN. Temporomandibular dysfunction. *Australian Journal for General Practitioners*, 2018, vol. 47(4) [žiūrėta 2023-05-15], doi: 10.31128/AFP-10-17-4375.
8. ERIC M. MATHESON, MD, MS, JOLI D. FERMO, PharmD, AND RUSSELL S. BLACKWELDER, MD, MDiv. Temporomandibular Disorders: Rapid Evidence Review. *Journal of American Family Physician*. 2023, vol. 107(1), [žiūrėta 2023-05-15]. Prieiga per internetą: <https://www.aafp.org/pubs/afp/issues/2023/0100/temporomandibular-disorders.html>
9. COMMISSO, M. S., MARTÍNEZ-REINA, J., & MAYO, J. (2014). A study of the temporomandibular joint during bruxism. *International journal of oral science*, 6(2), 116–123, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1038/ijos.2014.4>.
10. JEAN-BENOIT MARTINOT, NHAT-NAM LE-DONG, VALÉRIE CUTHBERT, STÉPHANE DENISON, DAVID GOZAL, GILLES LAVIGNE & JEAN-LOUIS PÉPIN (2021) Artificial Intelligence Analysis of Mandibular Movements Enables Accurate Detection of Phasic Sleep Bruxism in OSA Patients: A Pilot Study, *Nature and Science of Sleep*, 13:, 1449-1459, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: 10.2147/NSS.S320664.
11. MARCOS GARCÍA, JUAN A. CABRERA, ALEX BATALLER, JAVIER VILA, PEDRO MAYORAL. Mandibular movement analysis by means of a kinematic model applied to the design of oral appliances for the treatment of obstructive sleep apnea. *Sleep Medicine*. 2020, vol. 73, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2020.04.016>.

12. SUKEGAWA, S., KANNO, T. (2021). Computer-Assisted Navigation Surgery in Oral and Maxillofacial Surgery. In: Bonanthaya, K., Panneerselvam, E., Manuel, S., Kumar, V.V., Rai, A. (eds) Oral and Maxillofacial Surgery for the Clinician. Springer, Singapore. [žiūrėta 2023-05-15]. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1346-6\\_41](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1346-6_41).
13. EDMOND A. BEDROSSIAN, EDMOND BEDROSSIAN, JOHN C. KOIS, MARTA REVILLA-LEÓN. Use of an optical jaw-tracking system to record mandibular motion for treatment planning and designing interim and definitive prostheses: A dental technique. The Journal of Prosthetic Dentistry. 2022,. [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.08.036>.
14. MARTA REVILLA-LEÓN, JONATHAN M. ZEITLER, MIGUEL GÓMEZ-POLO, JOHN C. KOIS. Utilizing additively manufactured custom devices to record mandibular motion by using optical jaw tracking systems: A dental technique. The Journal of Prosthetic Dentistry. 2022, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.03.035>.
15. JOO HYUN KWON, SUNGBIN IM, MINHO CHANG, JONG-EUN KIM, JUNE-SUNG SHIM. A digital approach to dynamic jaw tracking using a target tracking system and a structured-light three-dimensional scanner. Journal of Prosthodontic Research. 2019 vol. 63(1), [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2018.05.001>.
16. FARRONATO M, TARTAGLIA GM, MASPERO C, GALLO LM, COLOMBO V. In Vitro and In Vivo Assessment of a New Workflow for the Acquisition of Mandibular Kinematics Based on Portable Tracking System with Passive Optical Reflective Markers. *Applied Sciences*. 2021; 11(9):3947, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.3390/app11093947>.
17. WILLIAM R. SHERMAN, ALAN B. CRAIG. CHAPTER 3 - Interface to the Virtual World — Input. In The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics, Understanding Virtual Reality. 2003, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-155860353-0/50004-5>.
18. SARAH C. WOODFORD, DALE L. ROBINSON, ALBERT MEHL, PETER V.S. LEE, DAVID C. ACKLAND. Measurement of normal and pathological mandibular and temporomandibular joint kinematics: A systematic review. Journal of Biomechanics. 2020, vol. 111. [žiūrėta 2023-05-15], doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109994>.
19. JIANQIAO GUO, JUNPENG CHEN, JING WANG, GEXUE REN, QIANG TIAN, CHUANBIN GUO. EMG-assisted forward dynamics simulation of subject-specific mandible musculoskeletal system. Journal of Biomechanics. 2022, vol. 139, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.111143>.
20. INAE GADOTTI, KIMANI HICKS, ERIC KOSCS, BRYANNA LYNN, JANSEN ESTRAZULAS, FERNANDA CIVITELLA. Electromyography of the masticatory muscles during chewing in different head and neck postures - A pilot study. Journal of Oral Biology and Craniofacial Research. 2020 vol. 10(2), [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2020.02.002>.
21. SÓJKA, A., HUBER, J., KACZMAREK, E. AND HĘDZELEK, W. (2017), Evaluation of Mandibular Movement Functions Using Instrumental Ultrasound System. Journal of Prosthodontics, 26: 123-128, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1111/jopr.12389>.
22. RAHMAN F, FEMIANO F, LOUIS PJ, KAU CH. An Evaluation of Jaw Tracking Movements in Patients with Total Joint Replacements versus a Control Group. *Medicina*. 2022; 58(6):738, [žiūrėta 2023-05-15], doi: <https://doi.org/10.3390/medicina58060738>.

23. S. -C. YEH, W. -H. HSU, W. -Y. LIN AND Y. -F. WU, "Study on an Indoor Positioning System Using Earth's Magnetic Field," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 3, pp. 865-872, 2020, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: 10.1109/TIM.2019.2905750.
24. P. MEIER, K. ROHRMANN, M. SANDNER AND M. PROCHASKA, "Application of magnetic field sensors for hand gesture recognition with neural networks," 2019 IEEE 1st Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), Osaka, Japan, 2019, pp. 200-203, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: 10.1109/LifeTech.2019.8884006
25. M. FRANZ, T. HAIDEGGER, W. BIRKFELLNER, K. CLEARY, T. M. PETERS AND L. MAIER-HEIN, "Electromagnetic Tracking In Medicine—A Review of Technology, Validation, and Applications," in *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 33, no. 8, pp. 1702-1725, Aug. 2014, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: 10.1109/TMI.2014.2321777.
26. BERNHARD PREIM, CHARL BOTHA, Chapter 18 - Image-Guided Surgery and Augmented Reality, Editor(s): Bernhard Preim, Charl Botha, *Visual Computing for Medicine (Second Edition)*, Morgan Kaufmann, 2014, Pages 625-663, [žiūrėta 2023-05-15]. ISBN 9780124158733, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415873-3.00018-3>.
27. SHYAM BHARAT, CYNTHIA KUNG, EHSAN DEGHAN, ANANTH RAVI, NIRANJAN VENUGOPAL, ANTONIO BONILLAS, DOUG STANTON, JOCHEN KRUECKER, Electromagnetic tracking for catheter reconstruction in ultrasound-guided highdose-rate brachytherapy of the prostate, *Brachytherapy*, Volume 13, Issue 6, 2014, Pages 640- 650, [žiūrėta 2023-05-15]. ISSN 1538-4721, <https://doi.org/10.1016/j.brachy.2014.05.012>.
28. HWANG, J., KIM, JY. & CHOI, H. A review of magnetic actuation systems and magnetically actuated guidewire- and catheter-based microrobots for vascular interventions. *Intel Serv Robotics* 13, 1–14 (2020), [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1007/s11370-020-00311-0>.
29. W. WANG, "A Study on RF Based Wireless Capsule Endoscope," 2006 International Conference on Mechatronics and Automation, 2006, pp. 1663-1667, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: 10.1109/ICMA.2006.257446.
30. MORIKAWA K, ISOGAI R, NONAKA J, YOSHIDA Y, HAGA S, MAKI K. A New Intraoral Six-Degrees-of-Freedom Jaw Movement Tracking Method Using Magnetic Fingerprints. *Sensors*. 2022; 22(22):8923. [žiūrėta 2023-05-15]. <https://doi.org/10.3390/s22228923>.
31. N. SEBKHI, A. BHAVSAR, D. V. ANDERSON, J. WANG AND O. T. INAN, "Inertial Measurements for Tongue Motion Tracking Based on Magnetic Localization With Orientation Compensation," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 6, pp. 7964-7971, 2021, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: 10.1109/JSEN.2020.3046469.
32. C. HU, M. Q. . -H. MENG AND M. MANDAL, "A Linear Algorithm for Tracing Magnet Position and Orientation by Using Three-Axis Magnetic Sensors," in *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 43, no. 12, pp. 4096- 4101. Smith, J., 1998. The book, The publishing company. London, 2nd edition. Dec. 2007, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: 10.1109/TMAG.2007.907581
33. YUAN, YX. Recent advances in trust region algorithms. *Math. Program.* 151, 249–281 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10107-015-0893-2>.

34. GAD, A.G. Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review. *Arch Computat Methods Eng* 29, 2531–2561 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4>
35. JIAN ZHANG, SEI-ICHIRO KAMATA, A generalized 3-D Hilbert scan using look-up tables, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Volume 23, Issue 3, 2012, Pages 418-425, ISSN 1047-3203, <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2011.12.005>.
36. CUOMO, S., DI COLA, V.S., GIAMPAOLO, F. *et al.* Scientific Machine Learning Through Physics-Informed Neural Networks: Where we are and What's Next. *J Sci Comput* 92, 88 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10915-022-01939-z>
37. D. RAABE, A. HARRISON, K. ALEMZADEH, A. IRELAND AND J. SANDY, "Capturing motions and forces of the human masticatory system to replicate chewing and to perform dental wear experiments," 2011 24th International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS), Bristol, UK, 2011, pp. 1-6, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: 10.1109/CBMS.2011.5999149.
38. M. ANISSIMOV, How Strong is the Earth's Magnetic Field? 2023, [žiūrėta 2023-05-15]. Prieiga per internetą: <https://www.allthescience.org/how-strong-is-the-earths-magnetic-field.htm>
39. B.W. BADER. 1.16 - Constrained and Unconstrained Optimization. *Comprehensive Chemometrics*. Elsevier. 2009, [žiūrėta 2023-05-15]. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-044452701-1.00035-1>.
40. MAJID JABERIPOUR, ESMAILE KHORRAM, BEHROOZ KARIMI, Particle swarm algorithm for solving systems of nonlinear equations, *Computers & Mathematics with Applications*, Volume 62, Issue 2, 2011, Pages 566-576, [žiūrėta 2023-05-15]. ISSN 0898-1221, <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.05.031>.