

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Eugenijus MAČERAUSKAS

TRAJEKTORIJOMIS JUDANČIŲ
PJEZOMECHANINIŲ MIKROROBOTŲ
VALDYMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
INFORMATIKOS INŽINERIJA (T 007)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNICA 2019

Disertacija rengta 2011–2019 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Genadijus KULVIETIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, informatikos inžinerija – T 007)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Informatikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

doc. dr. Nikolaj GORANIN (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, informatikos inžinerija – T 007).

Nariai:

prof. habil. dr. Rimantas BARAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, informatika – N 009),

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Vilniaus universitetas, informatikos inžinerija – T 007),

prof. dr. Miguel Angel FERNANDEZ SANJUAN (Rey Juan Carlos universitetas, Ispanija, informatika – N 009),

prof. habil. dr. Rimvydas SIMUTIS (Kauno technologijos universitetas, informatikos inžinerija – T 007).

Disertacija bus ginama viešame Informatikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2019 m. gegužės 31 d. 9 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva. Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt.

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2019 m. balandžio 30 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva) ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2019-012-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-164-5

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2019

© Eugenijus Mačerauskas, 2019

eugenijus.macerauskas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Eugenijus MAČERAUSKAS

CONTROL OF PIEZOMECHANICAL
MICROROBOTS MOVING IN
TRAJECTORIES

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES
INFORMATICS ENGINEERING (T 007)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2019

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2011–2019.

Supervisor

Prof. Dr Habil. Genadijus KULVIETIS (Vilnius Gediminas Technical University, Informatics Engineering – T 007).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Informatics Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Assoc. Prof. Dr Nikolaj GORANIN (Vilnius Gediminas Technical University, Informatics Engineering – T 007),

Prof. Dr Habil. Rimantas BARAUSKAS (Kaunas University of Technology, Informatics – N 009),

Prof. Dr Habil. Gintautas DZEMYDA (Vilnius University, Informatics Engineering – T 007),

Prof. Dr Miguel Angel FERNANDEZ SANJUAN (Rey Juan Carlos University, Spain, Informatics – N 009),

Prof. Dr Habil. Rimvydas SIMUTIS (Kaunas University of Technology, Informatics Engineering – T 007).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Informatics Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **9 a. m. on 31 May 2019**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 30 April 2019.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania) and the library of Kaunas University of Technology (K. Donelaičio st. 20, LT-44239 Kaunas, Lithuania).

Reziumė

Plokštumoje judantys pjezomechaniniai mikrorobotai – tai įrenginiai, kurių judesys formuojamas atvirkštiniu pjezoefektu veikiančiais ir mechaninį judesį generuojančiais pjezomechaniniais keitikliais. Disertacijoje tiriamieji pjezorobotai neturi papildomų judesį generuojančių mechanizmų, tokių kaip ratai kojos ar panašius įtaisai, o tik tiesioginius kontakto su statine plokštuma taškus. Tokiems pjezomechaniniams mikrorobotams judesiui formuoti klasikiniai judėjimo trajektorija formavimo metodai netinka. Tokiam judėjimui reikalingas sudėtinis atskirų pjezoelektrinių keitiklių aktyvių segmentų valdymas siekiant nukreipti pjezoroboto judėjimą reikiama trajektorija.

Mokslinių tyrimų tikslas – sukurti ir iširti naujus trajektorijomis judančių pjezorobotų valdymo metodus ir algoritmus.

Darbe sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai: pjezoroboto konstrukcijos parinkimas, pjezorobotų judesio generavimo metodų analizė, pjezorobotų valdymo algoritmų sudarymas, aparatinės įrangos pjezorobotų valdymui parinkimas ir sistemos sudarymas, programinės įrangos, skirtos plokštumoje judantiems pjezorobotams, sukūrimas, judančių pjezorobotų trajektorijų atkartojimo tikslumo ir greičio matavimai, analizė ir valdymo metodų parinkimas konkrečioms judėjimo užduotims.

Įvadiniame skyriuje formuluojama problema, aptariamas darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, formuluojami ginamieji teiginiai. Pirmajame skyriuje analizuojama literatūra, pateikti judesio generavimo ir judėjimo trajektorijomis formavimo metodai. Antrajame skyriuje formuluojami pjezoroboto judesio trajektorijos formavimo uždaviniai, nagrinėjami detalūs trajektorijų formavimo algoritmai. Trečiajame skyriuje aprašomas pjezorobotų valdymo sistemos sukūrimas. Pateikiama sukurta valdymui skirta programinė įranga. Ketvirtame skyriuje aprašomi autoriaus atlikti praktiniai eksperimentai. Atlikta pjezorobotų trajektorijos atkartojamumo ir greičio parametrų analizė pjezorobotą valdant trimis skirtingais metodais. Pateikiamos išvados apie valdymo metodų tinkamumą pjezorobotų judėjimui trajektorijomis realizuoti. Disertacijos tema paskelbti 8 straipsniai, perskaityti 5 pranešimai Lietuvos bei tarptautinėse konferencijose.

Didžioji dalis mokslinių tyrimų buvo finansuojama LMA projektų MIP – 075/2012 ir MIP-084/2015.

Abstract

Piezomechanical microrobots moving on a plane have their movement formed by inverse piezomechanical effect and mechanical movement generating piezomechanical actuators. Piezorobots that are analyzed in this dissertation have no additional movement generating components such as wheels or legs. They have only direct points of contact with the static plane. Classical methods for creating movement in trajectories are not suitable for piezomechanical microrobots moving in trajectories on a plane. A complex movement requires an integrated control of active segments of the piezoelectric actuator so that piezorobot is directed in the desired path.

The aim of the research is to create and explore new control methods and algorithms for piezorobots moving in trajectories.

In order to achieve the objective, the following tasks had to be solved: to determine a suitable construction of a piezorobot for movement in trajectories in a plane, to determine piezorobots movement generating methods, to create piezorobots control algorithms, to develop piezorobots control system hardware and software, to measure precision and velocity of moving piezorobot trajectories, analyze and create control methods for individual movement tasks.

The introduction presents the investigated/formulated problem, importance of the thesis, the object of research, purpose, and tasks of the paper, scientific novelty, the practical significance of results and defended statements. In the first chapter literature on moving robots using piezoelectric motion actuators is presented. In the second chapter, the problem of forming piezorobot motion trajectory is formulated, and detailed algorithms of trajectory formation are studied. The third chapter describes the design of the control system for piezorobots. Described hardware, and designed control software of the system. In the fourth chapter, practical experiments are described. Measurement accuracy and speed of motions experiments carried out using three different control methods were analyzed. The conclusions about the applicability of control methods for piezorobot movement in the trajectories are presented. Eight articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published, five presentations on the subject have been given in conferences at national and international level.

The main part of the research for the dissertation has been funded by the Research Council of Lithuania, Projects No. MIP – 075/2012 and MIP-084/2015.

Žymėjimai

Simboliai

- A_{max} – maksimali amplitudė;
 c – pjezoroboto elektrodų segmentų kiekis;
 d – pjezoroboto kontakto skersmuo;
 D – pjezoroboto posūkio kryptis (neigiamas arba teigiamas);
 \vec{F}_a – atstojamosios jėgos vektorius;
 $\vec{F}_{c_1}, \vec{F}_{c_2}, \vec{F}_{c_3}$ – atskirų elektrodų segmentų generuojamos jėgos;
 G_i – i – toji ribinė funkcija;
 J – pjezoroboto elektrodų segmento numeris;
 k – tiesės krypties koeficientas;
 l – pjezoroboto elektrodų segmentų perjungimo numeris;
 M – pjezoroboto masė;
 N – mazgų kiekis;
 q_1, q_2, q_3 – pjezoroboto kontaktiniai taškai;
 r – suplanuotos trajektorijos kartojimo kiekis;
 R_J – J – tojo elektrodų segmento simetrijos ašies judesio kryptis;
 r_{vid} – vidinis pjezoroboto spindulys;

- S_1, S_2, S_3 – pjezroboto elektrodų segmentai;
 S_i – i – toji suplanuotos trajektorijos funkcija;
 t_i – valdymo signalo veikimo laikas i -tajame segmente;
 T_{ri} – i – toji judesio kryptis tarp mazgų;
 $U(t)$ – valdymo signalo amplitudės pokytis;
 $u_i(t)$ – i – tojo signalo amplitudės pokytis;
 v – pjezroboto judėjimo greitis;
 x_{km} – m – toji kontrolinio taško x koordinatė;
 x_{rl}, y_{rl} – l -toji pjezroboto judesio koordinatė;
 x, y – mazgų koordinatės Dekarto koordinatinių sistemoje;
 x_g, y_g – ribinės koordinatės;
 γ – J – tojo segmento simetrijos ašies kampas su x ašimi;
 y_{km} – m – toji kontrolinio taško y koordinatė;
 x_S, y_S – suplanuotos trajektorijos koordinatės;
 α – pirmojo elektrodų segmento simetrijos ašies kampas su x ašimi;
 β – kampas tarp elektrodų segmentų simetrijos ašių;

 ϕ_i – i – tosios tarp mazgų esančios tiesės kampas su x ašimi;
 ΔP – pjezroboto poslinkio ilgis;
 ΔP_{min} – pjezroboto judesio skyra;
 $\Delta \phi_{max}$ – maksimali fazė;
 ε – atsilenkimas nuo suplanuotos trajektorijos;
 θ – pjezroboto posūkio kampas;
 θ_{min} – pjezroboto posūkio skyra;
 κ – suplanuotos kreivės kreivis;
 $\bar{\kappa}$ – vidutinis suplanuotos kreivės kreivis;
 λ – pjezroboto posūkio lanko ilgis
 σ_κ – kreivės kreivio standartinis nuokrypis;
 τ_i – i – tojo segmento aktyvumo trukmė;
 ω – pjezroboto segmentų žadinimo kampinis dažnis;

Santrumpos

- BEM – baigtinių elementų metodas;
- DAQmx – (*angl. Data Acquisition Multiplication*) – „National Instruments“ sukurta duomenų įvesties–išvesties sistema;
- LabVIEW – (*angl. Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) – „National Instruments“ techniniams uždaviniams spręsti skirta grafinė programavimo platforma;
- M1 – pjezorobotų valdymo metodas neatliekant sukamojo judesio
- M2 – pjezorobotų valdymo metodas su sukamuju judesiu
- M3 – pjezorobotų valdymo metodas atstojamosios jėgos principu
- MATLAB – (*angl. MATrix LABoratory*) – daugiaplatformė MathWorks programinė įranga, skirta įvairių mokslo šakų matematiniais uždaviniams spręsti;
- MINIMAN – (*angl. Miniaturised Robot for Micro Manipulation*) – plokštumoje judantys mikrorobotas;
- NI – (*angl. National Instrumrnts*) – specializuotą, valdymui skirtą aparatinę įrangą ir programines priemones gaminanti JAV įmonė.
- PXI – (*angl. Peripheral Component Interconnect Extensions for Instrumentation*) – NI sukurta pramininčių kompiuterių platforma.
- PZT – PbZrTi – švino cirkonio titanatas;
- PZT-4 – pjezokeraminės medžiagos (švino cirkonio titanato) tipas;
- SOLID5 – baigtinio elemento, naudojamo, modeliavimui tipas.
- UML – (*angl. Unified Modeling Language*) – unifikauta modeliavimo grafinė kalba;
- VISA – (*angl. Virtual Instrument Software Architecture*) – virtualių prietaisų programinė sistema;

Turinys

ĮVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika.....	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Autoriaus asmeninis indelis.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
1. PJEZOROBOTŲ JUDĖJIMO PRINCIPŲ IR VALDYMO METODŲ ANALIZĖ	7
1.1. Pjezoefektinio reiškinių ir pjezomechaninių įrenginių apžvalga.....	8
1.1.1. Pjezoefektinio reiškinių apžvalga.....	8
1.1.2. Mokslinių tyrimų apžvalga.....	9
1.2. Plokštumoje judančių pjezomechaninių keitiklių analizė.....	12
1.2.1. Plokštumoje judančių cilindrinų pjezomechaninių keitiklių analizė	12
1.2.2. Judančio žiedinio pjezokeitiklio konstrukcija ir veikimo principas.....	14
1.2.3. Judančio kevalinio pjezokeitiklio konstrukcija ir veikimo principas.....	16

1.3. Vaikštančio tipo judesio keitiklių pjezorobotai ir jų valdymas	17
1.3.1. Vaikščiojantis pjezomechaninis įrenginys ir jo valdymas	17
1.3.2. Plokštumoje judantis pjezorobotas MINIMAN ir jo valdymas	21
1.3.3. Pjezorobotų judėjimo trajektorijų planavimas.....	28
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	31
2. TRAJEKTORIJOMIS JUDANČIŲ PJEZOROBOTŲ TRAJEKTORIJŲ FORMAVIMAS.....	33
2.1. Judančio pjezoroboto trajektorijų formavimo uždaviniai	34
2.2. Judančių pjezorobotų trajektorijų formavimo algoritmų taksonomija.....	36
2.2.1. Trajektorijos formavimas neatliekant sukamojo judesio	36
2.2.2. Trajektorijos formavimo metodas su sukamuoju judesiu	45
2.3.3. Trajektorijos formavimo jėgų atstojamosios metodu	51
2.3. Antrojo skyriaus išvados	56
3. PLOKŠTUMOJE JUDANČIŲ PJEZOROBOTŲ VALDYMO SISTEMOS SUKŪRIMAS.....	57
3.1. Plokštumoje judančių pjezorobotų valdymo sistema	58
3.1.1. Valdymo modelio sudarymas	58
3.1.2. Valdymo sistemos struktūros sudarymas.....	60
3.1.3. Aparatinė valdymo sistemos įranga.....	62
3.2. Programinės valdymo sistemos įrangos sukūrimas	68
3.2.1. Programinės įrangos koncepcija ir architektūra.....	68
3.2.2. Pjezoroboto valdymo ir trajektorijos matavimo programinės įrangos sukūrimas	70
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	82
4. TRAJEKTORIJOMIS JUDANČIŲ PJEZOROBOTŲ JUDĖJIMO TYRIMAI	83
4.1. Eksperimentinės sistemos derinimas ir kalibravimas	84
4.1.1. Trajektorijos sekimo sistemos kalibravimas.....	84
4.1.2. Eksperimentinis pjezoroboto kinematinų parametrų nustatymas	86
4.2. Trajektorijomis judančio pjezoroboto judėjimo savybių tyrimai.....	87
4.2.1. Pjezoroboto valdomo metodu be sukamojo judesio trajektorijos tyrimas ..	88
4.2.2. Pjezoroboto trajektorijos su sukamuoju judesiu tyrimas	94
4.2.3. Pjezoroboto valdomo jėgų atstojamosios metodu trajektorijos tyrimas	97
4.3. Skirtingais metodais judančio pjezoroboto trajektorijų lyginamoji analizė.....	100
4.4. Ketvirto skyriaus išvados	103
BENDROSIOS IŠVADOS	105
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	107
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	113

SUMMARY IN ENGLISH	115
PRIEDAI ¹	131
A priedas. Matavimų rezultatų skaitiniai duomenys	132
B priedas. LabVIEW programos failai	144
C priedas. MATLAB metodų failai	145
D priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija	148
E priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą daktaro disertacijoje.....	149
F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	150

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the thesis	2
Research object	3
Objective of the thesis	3
Tasks of the thesis	3
The research methods.....	3
Scientific novelty.....	4
Practical value of the research findings.....	4
Defended statement.....	4
Approval of the research results.....	5
The structure of the dissertation	5
1. ANALYSIS OF PIEZOROBOT’S MOVEMENT PRINCIPLES AND THEY CONTROL METHODS.....	7
1.1. The piezoelectric effect and piezoelectric devices overview	8
1.1.1. Overview of the piezo effect	8
1.1.2. An overview of applied research	9
1.2. Analysis of piezomechanical actuators moving on a plane	12
1.2.1. Analysis of plane cylindrical piezomechanical actuators moving on a plane	12

1.2.2. Construction and operation principle of the ring–type piezomechanical actuators moving on a plane	14
1.2.3. Construction and operation principle of the hemispheric piezomechanical actuators moving on a plane	15
1.3. Walking piezoactuators and they applications	17
1.3.1. Walking piezomechanical actuator and its control.....	17
1.3.2. On The plane walking piezorobot MINIMAN ant its control	21
1.3.3. Trajectory planning of piezorobots.....	28
1.4. First chapter Conclusions and dissertation objectives	31
2. PATH PLANNING ALGORITHM FOR CYLINDRICAL PIEZOELECTRIC MOBILE PIEZOROBOT	33
2.1. Trajectories formation problems for mobile piezorobots	34
2.2. Taxonomy of trajectories formation algorithms for mobile piezorobot	36
2.2.1. Trajectory formation method when piezorobot not rotating.....	36
2.2.2. Tangents trajectory formation method with rotational motion	45
2.2.3. Tangents trajectory formation method when piezorobot moves on a plane by total forces.....	51
2.3. Second chapter conclusions.....	56
3. THE DEVELOPER OF CONTROL SYSTEM FOR MOBILE PIEZOROBOTS MOVING ON A PLAIN	57
3.1. Control system for mobile piezorobots moving on a plain	58
3.1.1. Design of a control model and system architecture.....	58
3.1.2. Design of a control system structure	60
3.1.3. Design of a control system hardware.....	62
3.2. The developer of control system software.....	68
3.2.1. The concept and architecture of control system software	68
3.2.2. Piezorobot control and trajectory registration software.....	70
3.3. Third chapter conclusions	82
4. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MOBILE PIEZOROBOTS TRAJECTORIES MOVING ON A PLAIN.....	83
4.1. Setup and calibration of the experimental system	84
4.1.1. Calibration of the trajectory registration system.....	84
4.1.2. Determination of kinematic parameters of the mobile piezorobot	86
4.2. TInvestigation of mobile characteristics of the trajectory moving piezorobot ..	87
4.2.1. Investigation of piezoelectric trajectory when piezorobot controlled by the method when piezorobot not rotating	94
4.2.2. Investigation of piezoelectric trajectory when piezorobot controlled by the tangent method with rotational motion.....	97
4.2.3. Investigation of piezoelectric trajectory when piezorobot controlled by the total forces method	100
4.3. Comparative analysis of piezorobot trajectories controlled by different methods.....	103

4.4. Fourth chapter conclusions..... 103

GENERAL CONCLUSIONS 105

REFERENCES 107

AUTHOR’S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF
DISSERTATION 113

SUMMARY IN ENGLISH..... 115

ANNEXES² 131

Annex A. Numerical data of measurement results. 132

Annex B. Control software LabVIEW files 144

Annex C. Control software MATLAB methods files..... 145

Annex D. Dissertation author's declaration on honor 148

Annex E. Agreements of scientific publications by the author on the topic of
the disertation 149

Annex F. Copies of the author’s scientific publications on the dissertation..... 150

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc

Įvadas

Problemos formulavimas

Inovatyviai vystantis mokslui ir technologijoms, iškyla poreikis turėti mažų matmenų robotus, galinčius judėti plokštumoje suplanuota trajektorija dideliu tikslumu ir greičiu. Todėl vis dažniau preciziniuose pramoniniuose manipuliatoriuose, robotuose, mokslinio tyrimo įrenginiuose naudojami pjezomechaniniai judesio keitikliai, kurie leidžia tokiems robotams dirbti greitai ir efektyviai. Kuriant tokio tipo pjezrobotus, ypač daug pasauliniu mastu šioje srityje yra pasiekę Lietuvos mokslininkai.

Klasikiniam robotams taikytini klasikiniai valdymo metodai, kurių rezultatai yra funkcijos, aprašančios judančio objekto būsenas tam tikru laiko momentu, netinka dėl visiškai kitokio pačių įrenginių valdymo principo. Pjezrobotai neturi papildomų judesį generuojančių struktūrų, o tik tiesioginius kontakto su statine plokštuma taškus. Nepriklausomai nuo judėjimo trajektorijos, jie gali būti valdomi sudėtingais elektriniais signalais ir judėti duotąja trajektorija su primityniu tikslumu.

Iki šiol, daugiausia Lietuvos mokslininkų, sukurti valdymo metodai yra įgyvendinti tik dalinai, daugumoje atvejų realizuoti tik teoriniais skaičiavimais ir ma-

tematiniu modeliavimu (Drukteinienė A. 2011). Tokių sprendimų tikslas yra priversti pjezorobotą judėti plokštumoje atkartojant tam tikrą matematiškai aprašomą trajektoriją.

Praktiniai tokių pjezorobotų valdymo eksperimentai skiriasi nuo teorinių skaičiavimų dėl netikslių prognozuojamo pačių pjezomechaninių keitiklių veikimo principo, histerezės efekto, deformacijos priklausomybės nuo įtampos funkcijų ir kitų. Didelę įtaką daro pjezoroboto konstrukcijos netikslumas, kuris realiomis sąlygomis nebus idealus bei mechaninis kontaktas su stacionaria plokštuma, kur tiek kontakto paviršius, tiek pati plokštuma negali būti vienareikšmiškai aprašomi.

Disertacijoje numatoma ne tik sukurti naujus pjezomechaninių įrenginių valdymo metodus bei algoritmus, sprendžiančius anksčiau aprašytas problemas, bet ir atlikti eksperimentinius tyrimus juos realizuojant. Taip pat numatoma sukuriant naują pjezorobotų valdymo ir trajektorijų tikslumo matavimo programinę įrangą eksperimentams atlikti.

Darbo aktualumas

Trajektorijomis plokštumoje judančio pjezoroboto valdymo problema aktuali tuo, kad šiuos įrenginius galima ne tik tiksliai (su kelių dešimčių manometrų skyra) pozicionuoti, bet ir nepakeičiant judesio parametrų pernešti objektus (Bansevicius, R. 2009). Tikslus pjezomechaninių įrenginių pozicionavimas kartu su keičiamo laisvės laipsnių skaičiaus manipulatoriais sukuria naujas galimybes kurti visai kitos kartos robotus, galinčius atlikti tikslias ir sudėtingas operacijas. Tokios pjezorobotų panaudojimo galimybės yra ypač aktualios mokslinių tyrimų sistemose, medicinoje ir kitur, kur reikalinga atlikti tikslius veiksmus, o aplinkos sąlygos gali neprognozuojamai keistis.

Atlikus Lietuvos ir užsienio mokslininkų darbų analizę ir robototechninių sistemų vystymo tendencijas galima teigti, kad trijų laisvės laipsnių žiediniai, cilindriniai ir hemisferiniai pjezomechaniniai įrenginiai tinkami pozicionavimui plokštumoje (Drukteinienė A. 2011). Šiems trims pjezoįrenginių tipams galima taikyti šiek tiek pakoreguotus, bet panašius valdymo metodus, kas leidžia toliau vystyti maksimaliai tikslias ir greitas, pjezoelektriniu principu paremtas, robotizuotas sistemas. Sukūrus pakankamai efektyvią programinę įrangą, kuri leistų tokio tipo pjezorobotus valdyti atsižvelgiant į kintančias aplinkos sąlygas, galima tikėtis jų komercinio pritaikymo moksliniuose tyrimuose, pramonėje, medicinoje ir kitose srityse.

Tyrimų objektas

Plokštumoje trajektorijomis judančių pjezorobotų su trimis atramos taškais, valdymo metodai ir algoritmai.

Darbo tikslas

Sukurti ir ištirti naujus trajektorijomis judančių pjezorobotų valdymo metodus ir algoritmus.

Darbo uždaviniai

Tiksliui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti informacijos analizę apie trajektorijomis plokštumoje judančius pjezorobotus, jų veikimo principus, ir judesio generavimo metodus.
2. Sukurti plokštumoje judančių pjezorobotų valdymo metodus ir algoritmus.
3. Sukurti trajektorijomis judančių pjezorobotų valdymo sistemą. Sukurti programinę įrangą trajektorijomis judantiems pjezorobotams valdyti.
4. Atlikti sukurtais valdymo metodais trajektorijomis judančių pjezorobotų judėjimo praktinius eksperimentus ir nustatyti metodų tinkamumą skirtingiems taikomiesiems uždaviniams spręsti.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti analitiniai, skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimų metodai.

Informacijos šaltinių analizė atlikta tiriant pjezorobotų konstrukcijas, judesio generavimo principus ir trajektorijų formavimo metodus. Matematinio modeliavimo metodai buvo taikomi skaitinių algoritmų sudarymui ir analizei. Lyginamosios analizės metodai taikyti tiriant pjezoroboto judėjimo suformuota trajektorija kokybines charakteristikas.

Valdymo sistemai sukurti buvo taikyta MATLAB programinė įranga kartu su LABView. Sistema buvo su realizuota National Instruments aparatine įranga.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti, ir praktiškai įgyvendinti šie informatikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Remiantis ankstesniais mokslininkų teoriniais skaičiavimais pirmą kartą buvo įgyvendintas cilindrinio pjezoroboto, turinčio tris kontaktinius taškus judėjimas plokštuma pagal duotą trajektoriją.
2. Sukurti ir praktiškai patikrinti nauji plokštumoje judančių pjezorobotų valdymo metodai. Metodai leidžia valdyti plokštuma judantį pjezomechaninį robotą su trimis kontaktiniais taškais pagal iš anksto žinomą ir matematiškai aprašytą trajektoriją.
3. Sukurti nauji plokštumoje judančių pjezorobotų valdymo algoritmai, realizuojantis pjezorobotų su trimis kontaktiniais taškais valdymą elektriniais signalais.
4. Naujai sukurti metodai ir algoritmai yra universalūs ir tinkami visų tipų plokštumoje judantiems pjezorobotams su trimis kontaktiniais taškais.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Gauti tyrimų rezultatai taikyti LMT aukštųjų technologijų projektuose „Masteliuojamų nanometrų skyros pjezorobotų modeliavimas ir trajektorijų valdymas“ MIP-075/2012, ir „Naujos straublio tipo robotų klasės sukūrimas, teorija ir tyrimai“ MIP-084/2015. projektų vadovas prof. habil. dr. Genadijus Kulvietis.

Sukurti trajektorijomis judančių pjezorobotų valdymo metodai yra universalūs ir gali būti taikomi tolesniuose moksliniuose tyrimuose.

Trajektorijomis judančių pjezorobotų valdymo ir trajektorijų registravimo programinė įranga gali būti taikoma kitiems pjezorobotams bei robotizuotoms sistemoms.

Trijų kontaktinių taškų pjezorobotą galima taikyti kaip pagrindą kuriant robotus su manipulatoriais. Taikant sukurtus metodus nanometrinės skiros mikro-robotams galima tikėtis gerų rezultatų tikslaus pozicionavimo sistemose. Plokštumoje pozicionuojantys ir krovinį galintys pernešti pjezorobotai turi perspektyvą taikant juos mikroskopų mapimuliatoriuose biologiniuose tyrimuose, ląstelių matavimo sistemose taikant kartu su atominių jėgų mikroskopu.

Ginamieji teiginiai

1. Pjezoroboto judėjimo trajektorija neatliekant sukamojo judesio metodas, yra tinkamas pjezorobotui valdyti, kai yra aktualus atkartojamos trajektorijos tikslumas.
2. Pjezoroboto judėjimo trajektorija su sukamuoju judesiu metodas yra tinkamas pjezorobotui valdyti, kai yra aktualus pjezoroboto judėjimo greitis.
3. Pjezoroboto judėjimo trajektorija atstojamųjų jėgų principu metodas yra tinkamas pjezorobotui valdyti, kai reikalinga vienu metu keisti pjezoroboto judėjimo kryptį ir greitį.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra paskelbti septyni moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI sąrašą; du – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų medžiagose Thomson Reuters duomenų bazėje ISI Proceedings, trys kituose recenzuojamuose leidiniuose, įtrauktuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose:

- Respublikinėje konferencijoje „Mechanika“ 2016 m. Kaunas Lietuva;
- Tarptautinėje konferencijoje Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences „eStream“ – 2017m. Vilnius, Lietuva.
- Respublikinėje konferencijoje „Mokslo taikomųjų tyrimų įtaka šiuolaikinių studijų kokybei“ – 2017 m., 2016 m., 2015 m. Vilnius Lietuva.

Autoriaus asmeninis indelis

Sukurta pjezorobotų valdymo eksperimentinė sistema/stendas.

Realizuoti kolegų sukurti teoriniai trajektorijomis judančių pjezorobotų trajektorijų formavimo metodai realizuojant juo valdymo metodais LabVIEW aplinkoje. Pirmą kartą šie metodai realizuoti praktiškai.

Sukurtas atstojamųjų jėgų principu trajektorijų formavimo metodas ir bei realizuotas valdymo metodas eksperimentinėje sistemoje.

Disertācijas struktūra

Disertāciju sudaro ģvadas, keturi skyriai, bendrosios iřvados ir řeři priedai.

Darbo apimtis be santraukos yra 113 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudoti 94 paveikslai ir 3 lentelės, tekste panaudotos 44 numeruotos formulės.

Pjezorobotų judėjimo principų ir valdymo metodų analizė

Mechaninėje sistemoje naudojamas atvirkštinis pjezoefektas leidžia transformuoti elektros energiją į mechaninę ir panaudoti ją išorinio objekto slenkamųjų ir sukamųjų judesių generavimui.

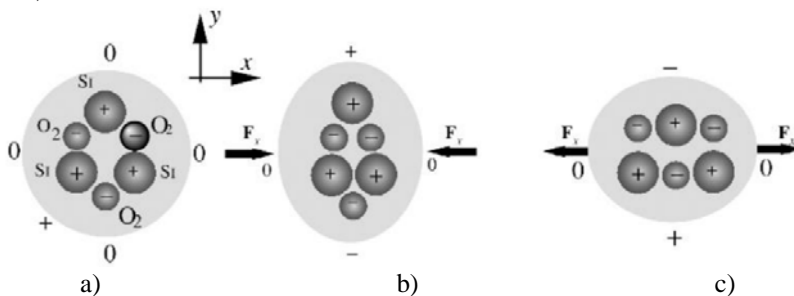
Pjezomechaniniu keitikliu laikomas įrenginys, pagamintas iš pjezokeramikos, kuris elektrinį signalą keičia mechaniniu judesiu. Paprastesni pjezokeitiklių atvejai yra pjezovarikliai ir pjezopavaros, sudėtingesni – įrenginiai, vykduantys tam tikras išankstiniu algoritmu apibrėžtas funkcijas, kuriuos galima laikyti pjezoelektriniais robotais (Bansevičius, R. 2009). Skyriuje pateikta trumpa informacija apie pjezoelektrinį efektą, kokybinius pjezoelektrinių medžiagų parametrus, trumpai apžvelgiami pasaulio mokslininkų pasiekimai pjezomechaninių judesio keitiklių ir pjezorobotų srityje. Skyriuje taip pat atlikta plokštumoje judančių pjezomechaninių įrenginių analizė, atlikta detali pjezorobotų taikomųjų mokslinių tyrimų analizė (Bansevičius R., 2007; Bansevičius R., 2008).

1.1. Pjezoefektinio reiškinio ir pjezomechaninių įrenginių apžvalga

Pjezomechaniniai įrenginiai – tai tokie įtaisai, kurių veikimas pagristas pjezoefektu, t. y. medžiagos savybe keisti formą veikiant elektros srovei. Pagal veikimo pobūdį pjezoįrenginiai skirstomi į pjezoelektrinius – kurių veikimo principas paremtas elektros generavimu veikiant išorinei jėgai ir pjezomechaninius, kurie generuoja mechaninę jėgą, kai pjezomedžiaga teka elektros srovė.

1.1.1. Pjezoefektinio reiškinio apžvalga

Pjezoelektrinėmis savybėmis pasižymi natūraliai randami kristalai, tokie kaip kvarcas, turmalinas, topazas ir segneto druskos, kurie plačiai taikomi elektromechaniniuose keitikliuose. Tam, kad kristalai pasižymėtų pjezoelektrinėmis savybėmis, jų gardelė privalo būti nesimetriška. Veikiant tokios struktūros kristalą tempimo ar gniuždymo jėga, atstumai tarp gardelės teigiamo ir neigiamo krūvių dalių keičiasi, todėl kristalo paviršiuose modifikuojama elektrinė poliarizacija. Šis efektas yra beveik tiesinis, t. y. poliarizacija yra tiesiogiai proporcinga veikiamai jėgai ir priklauso nuo veikimo krypties. Taigi tempimo ir gniuždymo jėgos generuoja elektrinį lauką ir priešingo poliškumo įtampą. Šis reiškinys yra abipusis, t. y. jei kristalą veiksim elektriniu lauku, tai priklausomai nuo kristalo poliarizacijos krypties, jis ilgės arba trumpės (Koch, J. 1988). Kai kvarco kristalas veikiamas jėga, tai jo ašyse atsiranda elektrinis potencialas – tiesioginis pjezoefektas. Tokį patį potencialą perduodant kvarco kristalui jo ašyse sukuriama adekvati jėga (1.1 pav.).



1.1 pav. Tiesioginio ir atvirkštinio pjezoefekto iliustracija (Koch, J. 1988):

a) – neutrali kristalinė gardelė, b) – kristalinė gardelė veikiamą išorinės jėgos,

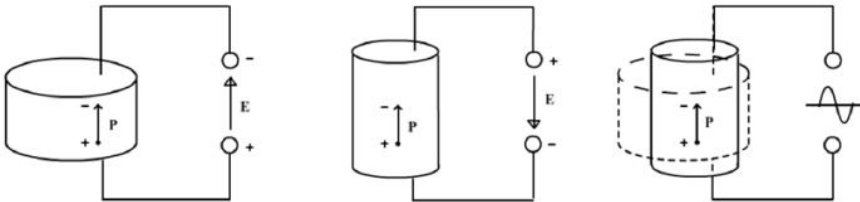
c) – kristalinė gardelė veikiamą elektrinio potencialo

Fig. 1.1. Direct and inverse piezo effect (Koch, J. 1988):

a) – neutral crystalline lattice, b) – crystalline lattice exposed to external forces,

c) – crystalline lattice with applied electrical potential

Be anksčiau paminėtų pjezoelektrines savybes turinčių kristalų, svarbią pjezoelektrinių medžiagų grupę sudaro pjezoelektrinė keramika. Plačiausiai naudojama PZT keramika (PbZrTi – švino cirkonio titanatas). Tai polikristalinė feroelektrinė medžiaga, turinti perovskito kristalų struktūrą. Paveikus iš tokios pjezokeramikos pagamintą kietą kūną, pvz., cilindrą, elektros srove, yra sukuriama jo deformacija (1.2 pav.)



1.2 pav. Pjezoelektrinis efektas pjezoelektrinės keramikos cilindriniam (Koch, J. 1988)

Fig. 1.2. The piezoelectric effect in a cylindrical body of piezoelectric ceramic (Koch, J. 1988)

Jei elektrodus paveiksime priešingo poliškumo įtampa nei cilindro poliarizacija, cilindras susitrauks, o jei tokio pat poliškumo – cilindras pailgės. Tai pjezomechaninio keitiklio veikimo pavyzdžiai, kai elektrinė energija verčiama į mechaninę (Kocli, 1988).

1.1.2. Mokslinių tyrimų apžvalga

Pjezoelektrinių medžiagų savybės praktiškai pradėtos taikyti gana seniai. Dar praėjusio amžiaus septintajame dešimtmetyje, ėmus diegti pjezoelektrinių medžiagų sintezės ir gamybos technologijas, atsirado galimybė kurti pjezomechaninius įrenginius. Tuo metu buvo pradėti ir intensyvūs pjezokeraminių judesio keitiklių tyrimai. Pirmieji tokiais tyrimais susidomėjo JAV ir Rusijos mokslininkai. Svarbių rezultatų pasiekė KTU ir VGTU mokslininkai, kurių pastangomis buvo sukurta fundamentinė vibromechanikos teorija, vibracinių įrenginių matematiniai modeliai, nauji skaitiniai metodai (Snitka, V. et al.1996). Japonijos mokslininkai ypač daug nuveikė, kurdami pjezomechanines sistemas bei pritaikydami jas komercinėms rinkoms. Pjezokeraminiai elementai šiuo metu naudojami gaminant automatinius fokusavimo mechanizmus fotoaparatuose bei išmaniųjų telefonų fotokameros, rašalinių spausdintuvų galvutes, BlueRay diskų skaitytuvų lazerio sekimo mechanizmuose, relėse. Pjezomechaninės sistemos taikomos biologijoje ir medicinoje.

Pjezokeitiklių analizė yra daugialypė, o kadangi čia yra sintezuojami mechaniniai ir elektriniai poveikiai, kyla jų tarpusavio sąveikos bei valdymo problemų. Naudojant pjezokeitiklius vibraciniuose įrenginiuose, galima kontroliuoti

bei per trumpą laiką keisti sistemos struktūrą, įskaitant ir mechaninių laisvės laipsnių skaičių, kurti grįžtamojo ryšio sistemas, o tai aktualu precizinėje inžinerijoje. Todėl pjezomechaninių sistemų tyrimai yra atliekami kompleksiskai įvertinant elektrines ir mechanines savybes.

Teoriniams tyrimams priskiriami fundamentiniai vibromechanikos, deformuojamų kūnų virpesių teorijos, sistemų optimalaus valdymo ir projektavimo teorijos, medžiagotyros darbai. Atliekant skaitinius pjezomechaninių sistemų tyrimus, kuriami ir analizuojami skaitiniai pjezokeitiklių modeliai, adekvačiai aprašantys fizikinius procesus, vykstančius sistemoms funkcionuojant. Taip pat nagrinėjamos pjezokeitiklių geometrinių formų, elektrodų konfigūracijos optimizavimo problemos, kuriami skaitiniai sistemų analizės metodai, taip pat analizuojamos valdymo sistemos su grįžtamoju ryšiu ir sistemos, turinčios dirbtinio intelekto elementus.

Dar 1963 m. rusų mokslininkas M. E. Archangelskij pirmasis suformulavo teorinius principus, kaip pakeisti tampriojo strypo virpesius į kontaktuojančio kūno sukamąjį arba tiesiaieįjį judesį. Jis analizavo strypo virpesius, teigdamas, jog egzistuoja strypo išilginių ir lenkimo virpesių superpozicija, dėl kurios strypo kontakto taškas juda elipsės formos trajektorija ir gaunamas pertraukiamo tipo mechaninis kontaktas. 1964 m. Ukrainos mokslininkas V. V. Lavrinenko, remdamasis teoriniais darbais, sukūrė sukamojo judesio vibracinį variklį, naudodamas pjezokeraminį elementą. 1971 m. KTU ir mokslinės draugijos „Vibrotechnika“ mokslininkai sukūrė pirmuosius veikiančius pjezoelektrinių mechanizmų pavyzdžius (Ragulskis, K., et al. 1988; Bansevičius R. et al. 1985, Burbulis, A; Jūrėnas, V; 2008, Snitka, V. et al.1996). „Vibrotechnikos“ mokslininkų ir jos įkūrėjo bei ilgamečio vadovo akademiko K. Ragulskio atlikti pjezokeitiklių virpesių tyrimai turėjo įtakos kuriant fundamentinius teorinius vibromechanikos darbus.

Akademikai R. Bansevičius ir K. Ragulskis tyrė vibracinių variklių veikimo bei konstravimo principus, teoriją bei schemas, naudodami įvairias pjezokeitiklių konstrukcijas. Nagrinėtos stripinių pjezokeitiklių, atliekančių daugiamačius virpesius, elektrodų konfigūracijos, užtikrinančios paprastą ir reversinį išėjimo grandies judesį. Sukurtos stripinių pjezokeitiklių konstrukcijos, naudojant kintamą poliarizacijos kryptį, dėl ko pavyksta sužadinti sudėtingus net keturių komponentų pjezokeitiklio virpesius (Lietuvos mokslas 1998). Plačiau nagrinėti cilindro formos ašinę ir radialinę poliarizaciją turintys pjezokeitikliai, jų elektrodų išdėstymas, žadinant išilginius–sukamuosius, lenkimo–sukamuosius virpesius. Sukurti originalūs stovinčiosios ir bėgančiosios bangos tipo pjezokeitikliai, turintys žiedo sektoriaus, žiedo bei kitas kreivines geometrines formas. Akademikas R. Bansevičius sukūrė naują aktyvios kinematinės poros sąvoką mechatronikoje ir sukūrė veikiančias konstrukcijas su kintamuoju laisvės laipsnių skaičiumi. Tyrimai buvo

vykdomi ir vėlesniais metais tobulinant anksčiau skurtas konstrukcijas bei jas kombinuojant (Bansevicius, R., et al. 2017).

R. Barauskas, G. Kulvietis pirmieji pradėjo taikyti skaitinius metodus pjezokeitiklių tyrimams. Mokslininkai plačiai taikė baigtinių elementų metodą, sukūrė tokius pjezoelektrinius baigtinius elementus: erdvinį aštuonių mazgų, plokštelės tipo bimorfinį–asimetrinį bei kevalo tipo bimorfinį–asimetrinį, atliko įvairių pjezokeitiklių konstrukcijų skaičiavimus. Šių keitiklių judėjimo trajektorijomis teorinėse galimybės aprašytos G. Kulviečio ir A. Drukteinienės darbuose 2011 m.

P. Vasiljevas nagrinėjo ultragarsines sistemas, kuriose buvo naudojami sudėtiniai laiptuotos formos pjezokeraminiai keitikliai. Buvo sukurta teorija ir skaičiavimo metodika išilginiams rezonansiniams virpesiams minėtuose pjezokeitikliuose sužadinti (Lietuvos mokslas 1998).

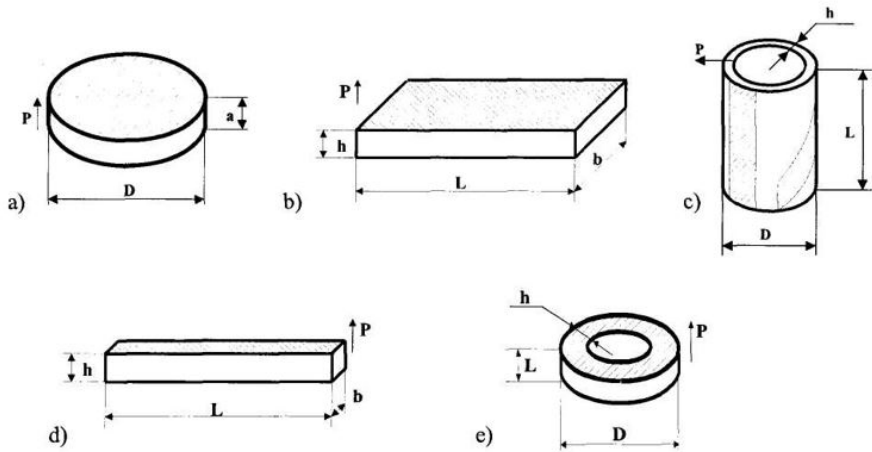
Didelių pasiekimų, precizinių pjezomechaninių įrenginių tyrimuose, turi Japonijos mokslininkai. Jų pastangomis sukurti vibraciniai varikliai, purkštuvai, skeneriai jau plačiai naudojami pramoniniuose ir buitiniuose įrenginiuose. K. Uchino, Y. Sashida S. Ueha buvo pirmieji Japonijos mokslininkai, sukūrę ir išsarinęję impulsinius ir ultragarsinius vibrovariklius, jų veikimo principus, pjezokeitiklių konstrukcijas, elektrodų formas ir topologiją (Torii A., et al. 2011). Įdomūs, dar ir šiandien aktualūs, eksperimentai buvo atlikti kompanijoje Meico Co. (Japonija). Šioje kompanijoje buvo sukurta mikromobili mašina, naudojant pjezokeraminės plokšteles mechaniniams virpesiams generuoti. Plokštelėse sužadinami lenkimo virpesiai perduodami smeigtuko tipo „kojoms“ ir tokiu būdu visa konstrukcija juda plokštumoje (Cuevas, E., et al. 2004.).

Pjezoelektriniai įrenginiai, kurie veikia atvirkštinio pjezoelekto pagrindu, yra suprantami kaip elektriniu signalu valdomi, mechaninį poveikį generuojantys įtaisai. Tokie įrenginiai keičia elektrinę energiją į mechaninę, todėl juos galima vadinti keitikliais (Mažeika D. 1999, 2011). Konstrukcinio požiūriu, daugiamačiai pjezokeitikliai apibrėžiami kaip griežtos geometrinės formos pjezokeraminiai kūnai, kurių paviršiuje sudaryti elektrodai. Pjezokeitikliuose žadinamų rezonansinių virpesių charakteristikos priklauso nuo: fizikinių pjezokeraminės medžiagos savybių; geometrinių pjezokeitiklio charakteristikų; tvirtinimo sąlygų; elektrodų konfigūracijos; poliarizacijos dydžio ir krypties (Augustaitis A., et al. 2018).

Vibraciniu principu veikiančiuose pjezomechaniniuose įrenginiuose naudojami įvairių geometrinių formų pjezokeitikliai. Paprasčiausi iš jų yra stačiakampės plokštelės, strypai, juostos, sukimosi kūnai – žiedai, diskai, cilindrai, sferos (Kulvietis G. 2012., Woern H., et al. 2000).

Galimi ir specialių formų pjezokeitikliai: trikapiai, pusiau sferos bei sudėtiniai elementai: daugiasluoksniai su pridėtomis masėmis ir be jų.

Pagrindinės pjezokeitiklių konstrukcijos pateiktos 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Pagrindinės pjezokeitiklių konstrukcijos:

a) diskas, b) stačiakampė plokštelė, c) cilindras, d) strypas, e) žiedas

Fig. 1.3. The main types of the piezoelectric actuators:

a) disk type b) rectangular plate c) cylinder d) shaft, e) ring

Keičiant elektrodų geometrinę formą ir išdėstymą bei keičiant žadinimo įtampos fazę, gaunami skirtingi pjezokeitiklio rezonansinių virpesių dažniai ir virpesių formos.

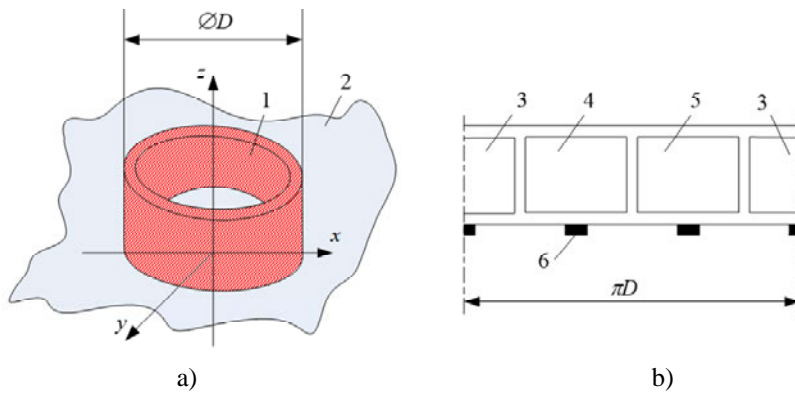
1.2. Plokštumoje judančių pjezomechaninių keitiklių analizė

1.2.1. Plokštumoje judančių cilindrinų pjezomechaninių keitiklių analizė

Vieni iš perspektyviausių pjezomechaninių keitiklių, galinčių judėti plokštuma, yra cilindriniai. Cilindrinį pjezokeitiklį sudaro tuščiaaviduris pjezokeraminis cilindras ir trys atraminiai kontaktiniai cilindrai, priklijuoti prie pjezokeraminio cilindro apatinės dalies (žr. 1.4 pav.). Keitiklio kontaktinės zonos – trijų metalinių cilindrų paviršiai, kurie juda elipsės formos trajektorijomis, žadinant elektrodus kintama įtampa. Pjezokeitiklio elektrodai dengia visą cilindro išorinį paviršių ir yra suskirstyti į tris 120 laipsnių sektorius. Toks padalinimas naudojamas tam, kad pjezokeitiklis generuotų slankiklio poslinkius plokštumoje bet kuria kryptimi.

Anksčiau minėto aukštųjų technologijų projekto metu buvo naudojama schema su trimis kontakto zonomis ir trimis elektrodų sektoriais, kurių viduryje

suformuotos kontakto zonos. Pradiniai tyrimai parodė šių schemų tinkamumą pozicionavimo plokštumoje uždaviniams spręsti.



1.4 pav. Aktyvi kinematinė pora pjezoelektrinis cilindras – plokštuma:
a) – bendra schema; b) – cilindro išorinio paviršiaus išsklotinė.

1 – pjezoelektrinis cilindras su radikalia poliarizacija ir elektrodais, suformuotais ant išorinių ir vidinių cilindro paviršių, 2 – pasyvi plokštuma, 3–5 – elektrodų konfigūracija (Bansevicius 2007)

Fig. 1.4. Active kinematic pair piezoelectric cylinder – passive plane:
a) general scheme; b) layout of outer surface of the cylinder.

1 – Piezoelectric cylinder with radical polarization and electrodes formed on outer and inner surface of the cylinder, 2 – passive plane
3–5 – configuration of electrodes, 6 – contacts (Bansevicius 2007)

Šio projekto metu buvo realizuotas $35 \times 30 \times 28$ mm ($D \times d \times h$) judantis cilindrinis įrenginys, pagamintas iš CTS–23 keramikos. Judėjimui realizuoti buvo naudojamas 65 kHz dažnio ir 90 V amplitudės sinusinis elektrinis signalas. Keitiklio prototipo bendras vaizdas pateiktas 1.5 paveiksle.



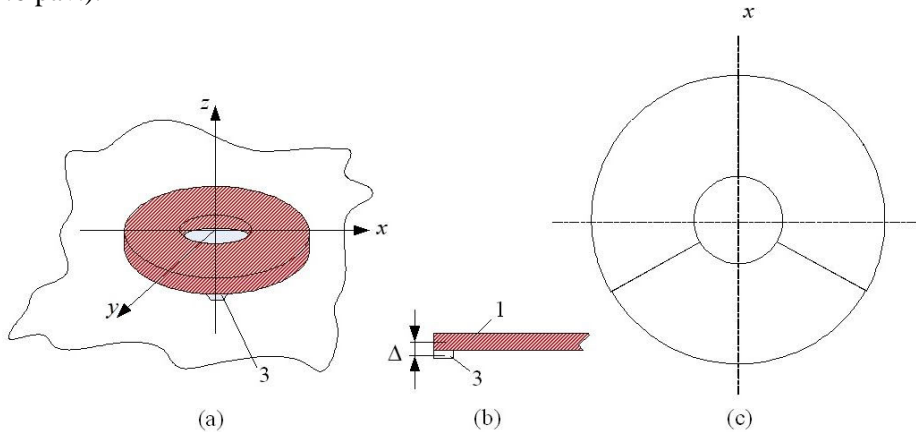
1.5 pav. Cilindrinio keitiklio prototipas (Bansevicius 2007)

Fig. 1.5. A prototype of the cylinder–type piezoactuator (Bansevicius 2007)

Elipsinės kontaktinių zonų virpesių trajektorijos cilindro formos pjezokeitklyje pasiekiamos naudojant modų superpozicijos principą, kai naudojamos išilginė ir radialinė modos, išilginė ir sukimo. (Bansevicius R., 2009).

1.2.2. Judančio žiedinio pjezokeitklio konstrukcija ir veikimo principas

Labai panaši pozicionavimo sistema realizuojama su pjezoelektriniais žiedais, poliarizuotais ašine kryptimi ir turinčiais elektrodus, suformuotus ant plokštumų (1.6 pav.).



1.6 pav. Aktyvi kinematinė pora pjezoelektrinis žiedas – pasyvi plokštuma (Bansevicius R., 2007): a) – bendra schema, b) – atraminių elementų tvirtinimas, c) – elektrodų sekcionavimo schema.

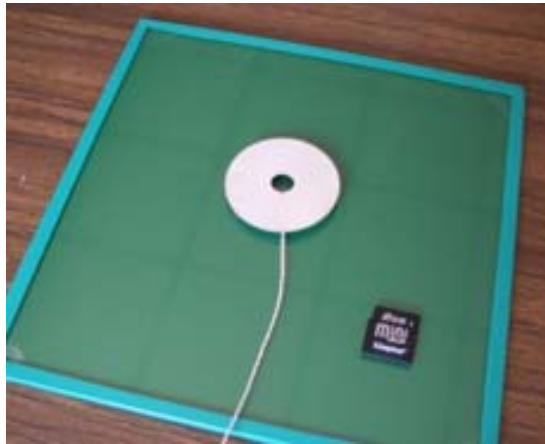
1 – pjezoelektrinis žiedas, 2 – pasyvi plokštuma, 3 – kontaktinis taškas

Fig. 1.6. Active kinematic couple – piezoelectric cylinder – passive plane (Bansevicius R., 2007): a) common scheme; b) layout of electrodes.

1 – Piezoelectric ring, 2 – passive plane 3 – contact point

Žiedinio pjezokeitklio modelį sudaro: žiedo formos pjezokeraminė plokštelė ir trys įmagnetinti metaliniai cilindrai, kurie pritvirtinti prie pjezokeraminės plokštelės. Keitiklio kontaktinė zona – trijų cilindrų viršutiniai paviršiai, kurie žadinimo metu juda elipsės formos trajektorijomis. Pjezokeitklio elektrodai dengia visą žiedo apatinį plotą ir yra padalinti į tris segmentus po 120 laipsnių. Toks padalinimas naudojamas tam, kad pjezokeitklis generuotų poslinkius plokštumoje bet kuria kryptimi (Bansevicius R., 2007).

Pjezoelektrinio keitiklio, generuojančio trijų kryptių judesį plokštumoje žiedinis prototipas pateiktas 1.7. paveiksle. (Bansevicius R., 2007).



1.7 pav. Trijų krypčių judesį generuojantis žiedinis pjezoelektrinis keitiklis
(Bansevicius R., 2007)

Fig. 1.7. The three-way movement generates ring-type piezoelectric actuator
(Bansevicius R., 2007)

2007 m. atliktas jų detalus tyrimas, taip pat panaudojant interferencines hologramas. Šių schemų ypatumas – galimybė realizuoti didesnes masę keliančius pozicionavimo įrenginius (žr. 1.8. pav.) (Bansevicius R., 2007).



a)



b)

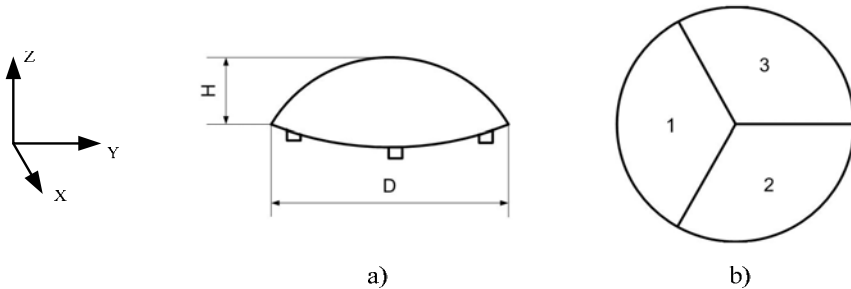
1.8 pav. Žiedinis pjezokeitiklis su papildoma apkrova (Bansevicius R., 2007):
a) pjezoelektrinis žiedas, b) papildoma 2 kg apkrova

Fig. 1.8. Ring-type actuator with additional load (Bansevicius R., 2007):
a) ring-type actuator, b) 2 kg mass additional load

1.2.3. Judančio kevalinio pjezokeitiklio konstrukcija ir veikimo principas

2008 metais atlikti eksperimentai su kevaliniu pjezokeitikliu parodė šio tipo keitiklių privalumus, taikant juos nanoskyros pozicionavimo įtaisams: paprasta konstrukcija, lengvai nustatomi keitiklio tvirtinimui reikalingi virpesių mazgai, didelė galimų konstrukcijų įvairovė (Bansevicius R., 2008).

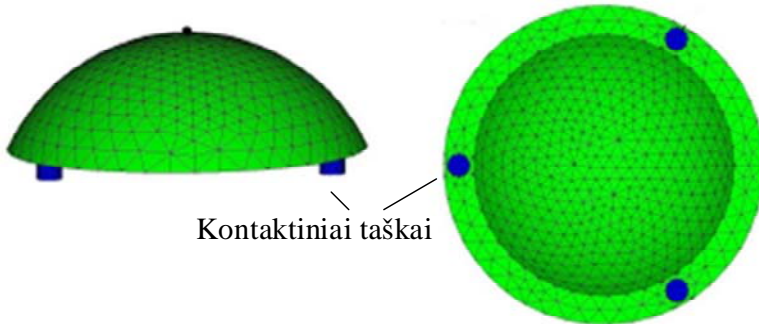
Kevalinį pjezokeitiklį sudaro nupjautos sferos formos pjezokeraminis elementas dalis ir trys cilindro formos kontaktiniai elementai (žr. 1.9 pav.). Keitiklio matmenys: $D = 0,04$ m, $H = 0,01$ m.



1.9 pav. Kevalinis pjezokeitiklis (Bansevicius R., 2008):
a) – konstrukcija, b) – elektrodų išdėstymas

Fig. 1.9. Hemispheric piezoelectric actuator:
a) – structure, b) – electrodes layout (Bansevicius R., 2008)

Kevalinio keitiklio BEM modelis pateiktas 1.10 paveiksle.



1.10 pav. Kevalinio pjezoelektrinio keitiklio BEM modelis (Drukteinienė A. 2011)
Fig. 1.10. Hemispheric piezoelectric actuator model (Drukteinienė A. 2011)

Vėlesniuose Lietuvos mokslininkų tyrimuose buvo suformuoti pagrindiniai teoriniai kevalinio keitiklio valdymo metodai (Drukteinienė A. 2011).

1.3. Vaikštančio tipo judesio keitiklių pjezrobotai ir jų valdymas

Robotas suvokiamas kaip, mechaninis įrenginys, galintis atlikti užprogramuotas fizines užduotis. Robotas gali būti užprogramuotas tiesiogiai arba veikti valdomas išorinio kompiuterio (Oxford English Dictionary 2016). Šiuolaikiniai robotai suprantami kaip mechatroniniai įrenginiai ir jų pagrindinė konstrukcijos dalis yra mechaninė sistema. Judančių robotų mechaninė sistema sudaryta iš judėjimo mechanizmo (pvz., ratai, kojos ir pan.). Taip pat šie robotai gali turėti ir manipuliavimo įrenginius. Mechaninei sistemai dinamiškai keistis bei judėti erdvėje padeda judesio keitikliai – mechaniniai įrenginiai, verčiantys vienos energijos rūšį į kitos rūšies energiją (Siciliano, et al. 2009). Judesio keitikliai, kurių pagrindą sudaro pjezokeraminės medžiagos, vadinami pjezoelektriniais judesio keitikliais (Sofla, M. S., et al. 2011).

Šiame skyriuje analizuojami judantys robotai, kurių judesio keitiklius sudaro pjezoelektrinės medžiagos. Analizuojami užsienio ir Lietuvos mokslininkų atlikti darbai, kuriant robotus su pjezoelektriniais judesio keitikliais.

Taikant atvirkštinį pjezoeftą galima priversti kūnus, pagamintus iš pjezoelektrinės medžiagos, keisti savo formą priklausomai nuo perduodamo elektrinio signalo. Sudėtingesni tokie įrenginiai gali ne tik formuoti tam tikrą baigtinį mechaninį judėjimą, bet ir atlikti sudėtingą manipuliavimą. Remiantis disertacijos tematika ir tyrimų objektu, toliau bus aprašomi įrenginiai, kurių veikimas remiasi atvirkštinių pjezoeftu ir turi galimybę judėti plokštuma. Plokštumoje judantys pjezomechaniniai įrenginiai turi 3 laisvės laipsnius: koordinatės x , y ir sukimosi apie z ašį galimybę.

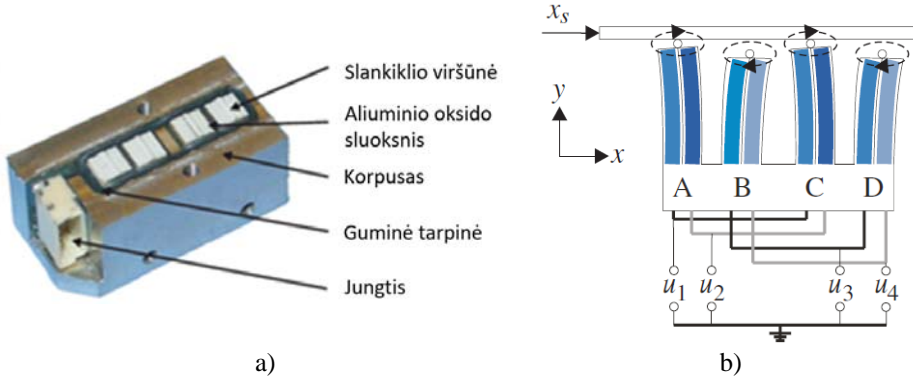
Pjezrobotus, kurie turi judesio keitiklius savo funkcionalumu panašius į kojas ir galinčius jomis betarpiškai atlikti judesį plokštumoje, galima laikyti vaikščiojančiais robotais (Hariri H.; Bernard A; Razek A. 2010).

1.3.1. Vaikščiojantis pjezomechaninis įrenginys ir jo valdymas

Įrenginius, kurie judesį formuoja remiantis mechaniniais elementais, panašiais į kojas, galima laikyti vaikščiojančiais.

Vienas iš tokių įrenginių yra nanometrines skyros pozicionavimo įrenginys, skirtas formuoti judesį viena koordinačių ašimi (angl. walking piezo actuator) yra pateiktas 1.11 paveiksle. (Roel J., et al. 2009, 2014). Pjezoelektrinio judesio keitiklio sistema sudaryta iš keturių pjezoelektrinių judesio keitiklių – pjezroboto kojų (žr.1.11 pav. a). Kiekviena koja sudaryta iš dviejų, atskirai valdomų pjezoelektrinių dalių, kurios gali išlinkti į vieną arba į kitą pusę, priklausomai nuo veikiamo signalo poliariškumo. Veikiant sinusiniam elektriniam signalui

kiekviena koja viršūnėje formuoja elipsės formos judesį, ir taip generuoja plokštumos poslinkį x ašimi (žr. 1.11 pav. b).



1.11 pav. Žingsniuojantis pjezorobotas (Changhai R., et al. 2007):

a) – konstrukcija, b) – veikimo schema

Fig. 1.11. Walking piezobot (Changhai R., et al. 2007):

a) – the piezoelectric motor b) – the working principle

Toks pjezoelektrinis keitiklis gali judinti plokštumą abejomis kryptimis. Valdymas vyksta keičiant signalo $u_i(t)$, kur $i \in \{1, 2, 3, 4\}$, čia t – laikas. Kojos dirba poromis A su C ir B su D (2.1 pav. b). koordinačių kitimas aprašomas tokiomis lygtimis: (Hariri H.; et al. 2010):

$$\begin{aligned} x_{p1}(t) &= c_1 [u_1(t) - u_2(t)], \\ x_{p2}(t) &= c_1 [u_3(t) - u_4(t)], \\ y_{p1}(t) &= c_2 [u_1(t) + u_2(t)], \\ y_{p2}(t) &= c_2 [u_3(t) + u_4(t)], \end{aligned} \quad (1.1)$$

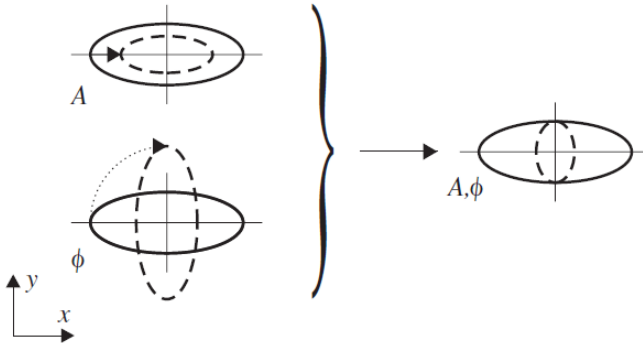
čia $x_{p1}(t)$, – pirmos kojų poros (A, C) ir $x_{p2}(t)$ – ir antros kojų poros (B, D) kontaktinių taškų x koordinačių kitimas, $y_{p1}(t)$, $y_{p2}(t)$ – y koordinačių kitimas, atitinkamai. c_1 ir c_2 – koeficientai apsprendžiantys įtampos vertę judėjimui generuoti (m/V).

Elipsinės koordinatės gaunamos kai:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= A \sin(\alpha(t)), \\ u_2(t) &= A \sin(\alpha(t) + \pi/2 + \phi(t)), \\ u_3(t) &= A \sin(\alpha(t) + \pi), \\ u_4(t) &= A \sin(\alpha(t) + 3\pi/2 + \phi(t)), \end{aligned} \quad (1.2)$$

čia A – signalo amplitudė, $\alpha(t)$ – pradinė fazė, $\phi(t)$ – fazių skirtumas tarp $u_1(t)$ ir $u_2(t)$. Kojų kontaktinio taško elipsių valdymas vyksta keičiant įtampas $A(V)$ ir fazes ϕ (rad).

Pagal algoritmą veikiančio judesio keitiklio valdymo schema pateikta 1.12 pav. Čia keičiant valdymo signalo amplitudę keičiamas elipsės aukštis, keičiant fazę.



1.12 pav. Pjezkeitiklio vienos kojos formuojama trajektorija, kai kinta: a) amplitudė $A(V)$, b) – fazė (rad) (Changhai R., et al. 2007.)

Fig. 1.12. Influence of the amplitude A (V) and phase – (rad) on the elliptical trajectory of the tip of the drive leg (Changhai R., et al. 2007.).

Kojų kontaktinių porų taškų judėjimo koordinatės aprašomos kampiniais vektoriumi $\Omega(t)=d\alpha(t)/dt$.

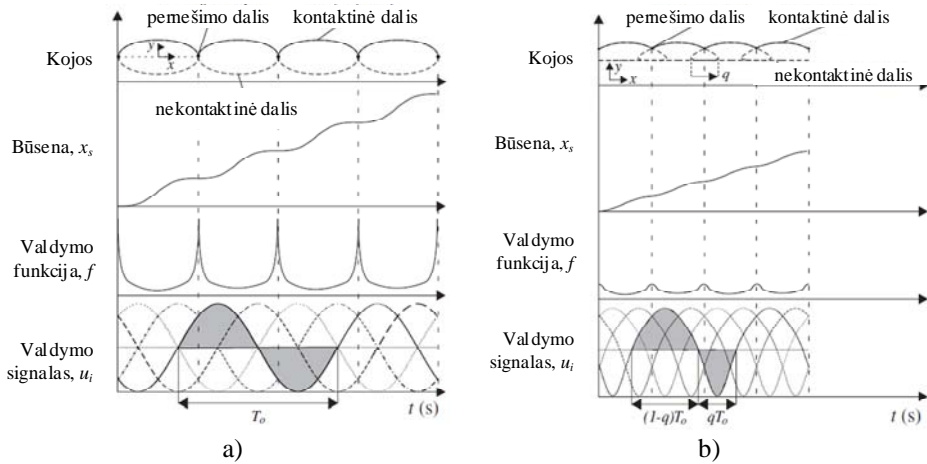
Vaikštančio pjezokeitiklio valdymas vykdomas sinusiniu signalu (1.13a pav.), kai nueitas kelias formuojamas iš pilnų lyginio skaičiaus sinusoidžių žingsnių ir nesimetriniu signalu (1.13 b pav.), kur tiksliai judesiu suformuoti užtenka dalies sinusoidės, tuomet valdymo funkciją galima užrašyti kaip kompleksinę:

$$K(A, \phi) = K_A(A)K_\phi(\phi), \quad (1.3)$$

čia amplitudės valdymo funkcija $K_A(A)$ ir fazės valdymo funkcija $K_\phi(\phi)$ išreiškiamos priklausomai nuo koeficientų K .

Nagrinėjant atvejį, kai valdymas vyksta pilna sinusoide (1.13 a pav.) valdoma tik keičiant amplitudę $K_A(A)$. Čia signalo pradinė fazė yra lygi $T_0 = \frac{1}{f} = const.$, kur f – valdymo signalo dažnis, kuris sutampa su keitiklio rezonansiniu dažniu. Pjezoroboto koja juda atsiremdama kai tarpinis momentas, sukuriamas pernešimo judesys. Judėjimo trajektorija išreiškiama per x_s , signalo dažnis – f , valdymo signalo amplitudė – u_i . Kitu atveju, kai valdoma kartu keičiant signalo amplitudę ir fazę (1.13 b pav.) tarp pernešimo ir kontaktinių taškų laiko momentų sukuriamas fazinis skirtumas – $(q)T_0$, kai $q = 1/3$, kuris gaunamas antru signalo pusperiodžiu. Tuomet kitas signalo pusperiodis – $(1 - q)T_0$. Lyginant su pirmu atveju, judesys tampa tikslesnis.

Atskirų pjezoroboto kokių valdymo signalai pateikti 1.13 pav.



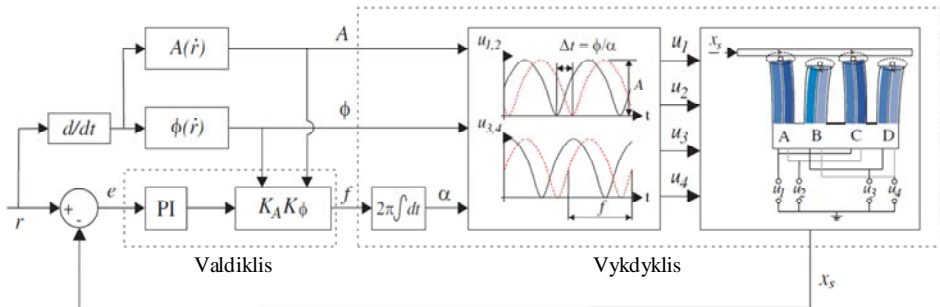
1.13 pav. Pjezokeitiklio kojų valdymo metodai:

a) – valdymas sinusiniu signalu b) – valdymas nesimetriiniu signalu

Fig. 1.13. Leg movement, stage motion, control effort, and waveforms for:

a) – original sinusoidal waveforms and b) – asymmetric waveforms

Bendra vaikščiojančio pjezoroboto valdymo schema pateikta 1.14 pav.



1.14 pav. Valdymo su grįžtamuju ryšiu schema (Changhai R., et al. 2007)

Fig. 1.14. Control scheme with feedforward (Changhai R., et al. 2007)

Schemoje signalo kitimas d/dt , išskaidomas į dvi sudedamąsias, amplitudei ir fazei:

$$A(t) = \frac{A_{\max}}{v_{\max}} |\dot{r}(t)| \quad (1.4)$$

$$\phi(t) = \frac{\Delta\phi_{\max}}{v_{\max}} |\dot{r}(t)| \quad (1.5)$$

čia $v_{\max} = \max_t (|\dot{r}(t)|)$ – maksimalus judėjimo greitis, A_{\max} – maksimali amplitudė, $\Delta\phi_{\max} = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$ – maksimali fazė. Valdymas vykdomas keturiais signalais

u_1 , u_2 , u_3 ir u_4 , kiekvienai pjezoroboto kojai. Valdymo signalai gaunami iš amplitudės A , fazės ϕ ir dažnio f funkcijų. Grįžtamasis ryšys formuojamas per padėties jutiklį ir išreiškiamas momentine koordinate x_s , kurio reikšmė per sumatorių pakoreguoja pradines valdymo sąlygas.

Toks valdymo metodas leidžia pasiekti didelį pozicionavimo tikslumą, kuris remiantis autorių atliktais tyrimais siekia iki 400 nm. Judesys gali būti suformuotas pagal iš anksto aprašytą algoritmą, bet tik vieno laisvės laipsnio ribose, kas ir yra esminis šio įrenginio trūkumas.

1.3.2. Plokštumoje judantis pjezorobotas MINIMAN ir jo valdymas

Įdomus pozicionavimo su trimis pjezomechaniniais kontaktiniais taškais sprendimas buvo panaudotas atliekant projektą MINIMAN (angl. Miniaturised Robot for Micro Manipulation), (ESPRIT–Projekt „Miniman“, Nr. 33915). Projektą vykdė Karlsruhe institute of Technology (Vokietija) kartu su kitų Europos universitetų mokslininkais 1999 – 2007 m. Buvo sukurta grupė įrenginių, galinčių judėti plokštumoje.

Vykdant projektą, vėlesnėse stadijose buvo sukurtas pozicionuojantys robotas MINIMAN–II, kuris pozicionavimui naudojo tris pjezomechanines kojas, kurios generuodavo slenkamąjį judėjimą trimis kryptimis. Pjezokeitikliai išdėstyti 120° kampu vienas kito atžvilgiu ir veikia pagal 1.1 skyriuje aprašytą schemą (Johannes R.; Merry E. 2009, Woern H. et al. 2000, 2001). Pjezoroboto bendras vaizdas su aktyviais kontaktiniais taškais pateiktas 1.15 paveiksle.

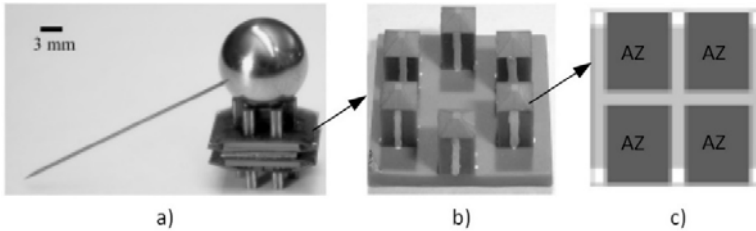


1.15 pav. Pjezoroboto MINIMAN judėjimo plokštumoje mechanizmai – PZT kontaktiniai taškai (Woern H. et al. 2000)

Fig. 1.15. The movement mechanisms of MINIMAN piezoro-bots – PZT contact points (Woern H. et al. 2000)

2001 metais to paties projekto mokslininkai U. Simu, S. Johansson ir kt. pristatė robotą MINIMAN V. Pjezoroboto prototipas buvo sudarytas iš dviejų judėjimui skirtų simetriškų pjezomechaninių sistemų, sumontuotų viena ant kitos. Viršutinė sistema buvo skirta sferos su kintamu laisvės laipsnių skaičiumi valdymui, apatinė – pjezoroboto pozicionavimui plokštumoje.

Mikroroboto MINIMAN – V prototipo bendras vaizdas ir judesį formuojančio mechanizmo schema pateikta 1.16 paveiksle.



1.16 pav. Mikroroboto MINIMAN – V prototipas (Woern H. et al. 2001):

- a) – bendras mikroroboto vaizdas su manipuliatoriumi,
 b) – pozicionavimo plokštumoje pjezomechaninė sistema, c) – judesį generuojančio keitiklio aktyvių zonų (AZ schema)

Fig. 1.16. Prototype of the microrobot MINIMAN – V (Woern H. et al. 2001):

- a) – microrobot with manipulator; b) – piezomechanical on plane poisoning system;
 c) – moving modifier generates active zones of movement generating system (AZ scheme)

Šešiakojo pjezoroboto MINIMAN judėjimo sistema sudaryta iš 6 atraminių, judėjimą formuojančių taškų, iš kurių vienu metu aktyvūs yra tik trys. Kiekviena atraminė koja sudaryta iš 4 atskirų aktyvinių zonų, kurias, atitinkamai sujungus gaunamos reikiamos sritis poromis, po dvi (1.17 pav. c.).

Judėjimas formuojamas atsispyrimo–traukos (angl. *stick–slip*) principu, kai koja atsispiria nuo paviršiaus esant generuojamai jėgai:

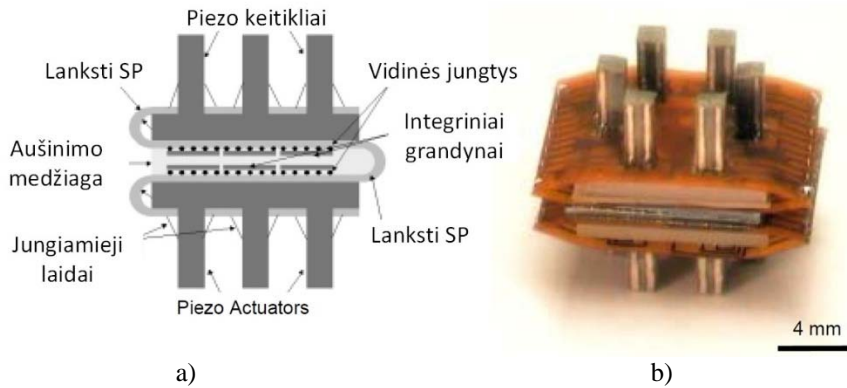
$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1.6)$$

čia, a – pagreitis μ – trinties koeficientas, m – masė, g – sunkio jėga.

Kai judėjimo pagreitis $a \leq \mu g$, vykdoma atsispyrimo (angl. *stick*) fazė, kai $a > \mu g$ – traukos (angl. *slip*).

Šiuo metodu pjezoroboto kojose generuojama jėga priverčia judėti pjezorobotą viena kryptimi, sudėtingam tokio įrenginio judėjimui reikalinga kojų grupė.

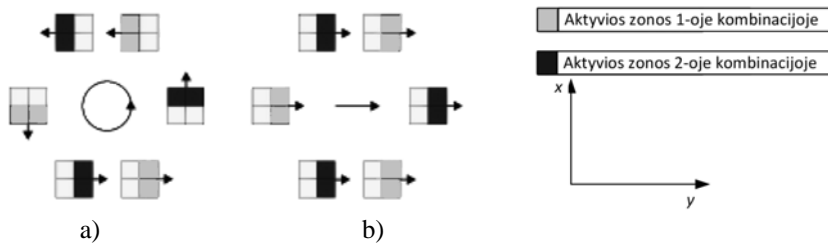
Ekspimentinio mikroroboto prototipo bendras vaidas pateiktas 1.17 paveiksle.



1.17 pav. Mikrorobotas su integruoti mikrograndynu (Woern H. et al. 2001): a) – mikroroboto surinkimo schema, b) – surinktas prototipas, taikant lanksčias fotolitografines jungtis pjezokeitiklių prijungimui

Fig. 1.17. The assembly of the microrobot including integrated circuits (Woern H. et al. 2001): a) – scheme of the microrobot assembly, b) – assembling protopype using flexible connectons of the piezoelectric actuators

Kai šios sritis aktyvios, gaunamas sukamasis roboto judesys 1-oje kombinacijoje (žr. 1.18 a pav.), esant trims aktyvioms kojoms vienu metu, arba slenkamasis judėjimas, kai kojos, abiejose kombinacijose generuoja jėgą viena kryptimi (žr. 1.18 b pav.).



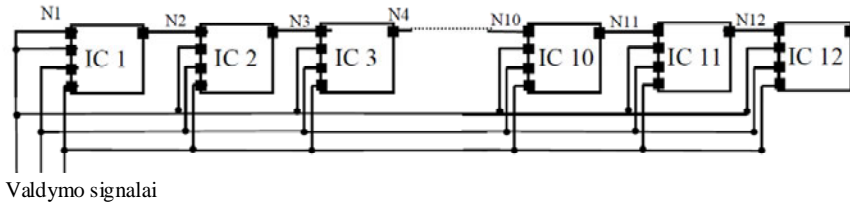
1.18 pav. Kvizistatinio vaikščiojimo mechanizmo taikymas, kai elementai suskirstyti į dvi grupes (grupė I ir grupė II) su 180° fazių poslinkiu tarp jų (Woern H. et al. 2001):

a) – sukamasis judėjimas, b) – slenkamasis judėjimas

Fig. 1.18. Using a quasistatic walking mechanism, when elements are divided into two sets (different shading for each set I and II) phase shifted 180° (Woern H. et al. 2001):

a) – round movement, b) – directional movement

Pozicionavimo mechanizmo konstrukcija sudaryta iš pjezomechaninių judesio keitiklių, sumontuotų kartu su integriniais valdymo grandynais (žr. 1.19 pav.) (Woern H. et al. 2001).

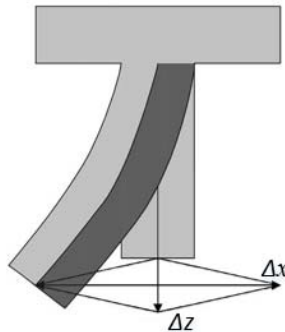


1.19 pav. Pjezoroboto MINIMAN V pozicionavimo sistemos elektrinė schema (Woern H. et al. 2001)

Fig. 1.19. Wire connections in micro-positioning/manipulation units of MINIMAN V microrobot (Woern H. et al. 2001)

Kiekviena pjezoroboto koja, kontaktiniame taške formuoja trajektoriją, kuri aprašoma rombu Δx , Δz .

Kojos pjūvis ir judėjimo koordinatinių zona pateikta 1.20 pav. (Woern H. et al. 2001).



1.20 pav. Judėsi formuojančios pjezoroboto kojos pjūvis. Kojos kontaktinis taškas pozicionuojamas pagal rombo zoną Δx ir Δz kryptimis. Tamsi zona parodo aktyvią pjezokeitiklio dalį (Woern H. et al. 2001)

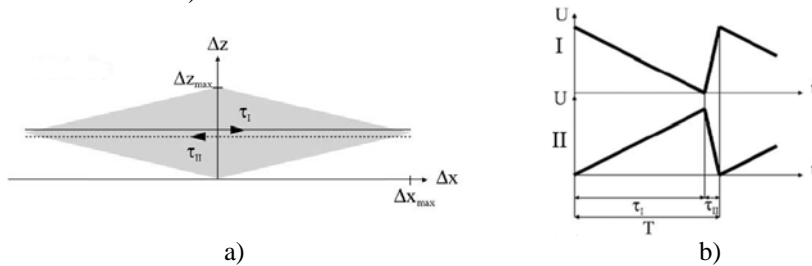
Fig. 1.20. Vertical cross-section of drive element. Possible locations for the contact point tip are within the rhombic area by directions Δx and Δz . Dark grey shading for activated part

„Stick-slip“ judėjimo mechanizmas realizuojama dviem būdais:

Pirmu atveju, kai formuojamas judesys ilgąja rombo įstrižaine, vienu metu naudojami keitiklių komplektai „I“ ir „II“ (žr. 1.18 pav.).

Judesio trajektorija menamo rombo įstrižaine pateikta 1.21 a paveiksle.

Valdymo signalų laiko diagramos, tokiam atvejui, pateiktos 1.21 b paveiksle (Woern H. et al. 2001).

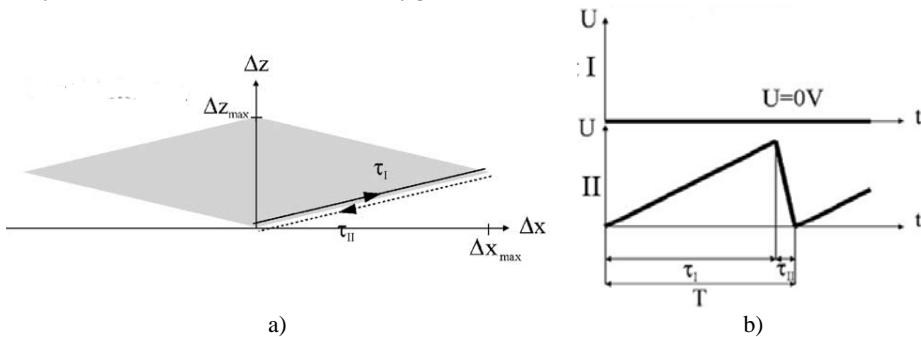


1.21 pav. Pjezoroboto MINIMAN–V kojos kontaktinio taško pozicionavimas rombo įstrižaine (Woern H. et al. 2001):

a) – pozicionavimo trajektorija, b) – valdymo signalas $U(t)$

Fig. 1.21. Poisoning leg of MINIMAN–V piezorobot Positioning by diamond diagonal (Woern H. et al. 2001): a) – position trajectory, b) – control signal $U(t)$

Kitas atvejis, kai judesys formuojamas menamo rombo kraštine pateiktas 1.22 a pav. Tuomet aktyvi būna tik viena kojų kombinacija „I“ (1.22 b. pav.), o valdymo kituose keitikliuose „II“ lygus 0.



1.22 pav. Pjezoroboto MINIMAN–V kojos kontaktinio taško pozicionavimas rombo kraštine (Woern H. et al. 2001): a) – pozicionavimo trajektorija, b) – valdymo signalas $U(t)$

Fig. 1.22. Poisoning leg of MINIMAN–V piezorobot positioning by diamond edge (Woern H. et al. 2001): a) – position trajectory, b) – control signal $U(t)$

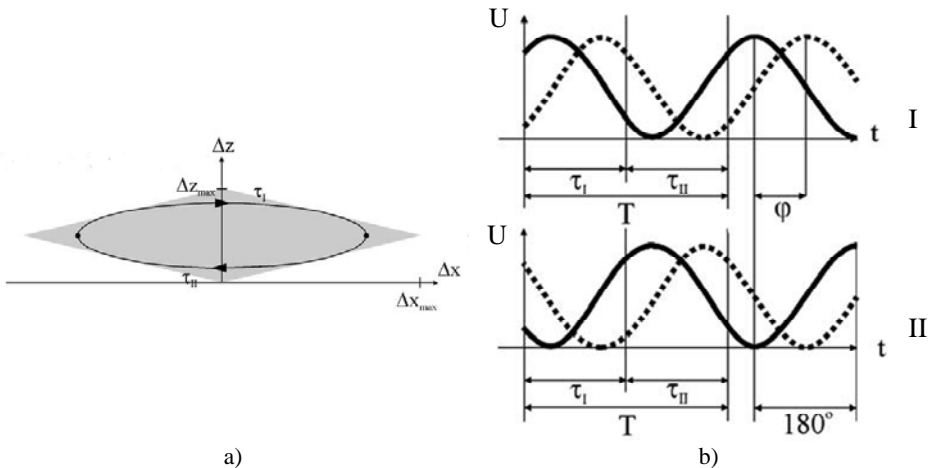
Valdymui naudojamas tik teigiamos įtampos signalas. Intervalai τ_I ir τ_{II} apibrėžiami taip:

$$\tau_I \geq \sqrt{\frac{2\Delta x_{\max}}{\mu g}} \quad ; \quad \tau_{II} \leq \sqrt{\frac{\Delta z_{\max}}{g}}, \quad (1.7)$$

čia: a – pagreitis μ – trinties koeficientas, m – masė, g – sunkio jėga, Δx_{max} – maksimalus poslinkis x ašimi, Δz_{max} – maksimalus poslinkis z ašimi.

Pjezoroboto judėjimas plokštumoje didesniais atstumais formuojamas kvazistatiniais kojų žingsniais, kurių kiekviena formuoja kontaktinio taško judėjimą dviejų tipų trajektorijomis. Trajektorijos formuojamos jau anksčiau aprašyto rombo zonoje ir yra dviejų tipų: elipsės ir rombo.

Elipsės trajektorija pateikta 1.24 a paveiksle., valdymo signalų laiko diagramos – 1.23 b paveiksle. Čia valdymas vykdomas sinusiniu signalu su skirtingomis fazėmis. τ_I ir τ_{II} randami pagal (2.7), (2.8), analogiškai.



1.23 pav. Pjezoroboto MINIMAN–V kojos kontaktinio taško trajektorija judant elipse (Woern H. et al. 2001): a) – pozicionavimo trajektorija, b) pirmo kojų rinkinio (I) ir antro (II) valdymo signalai $U(t)$.

Punktyrinė linija – signalas tiesiogine kryptimi, ištisinė – grįžtamąją

Fig. 1.23. Poisoning leg of MINIMAN–V piezobot positioning by ellipse around diamond edge (Woern H. et al. 2001):

a) – the positioning trajectory, b) – control signal $U(t)$.

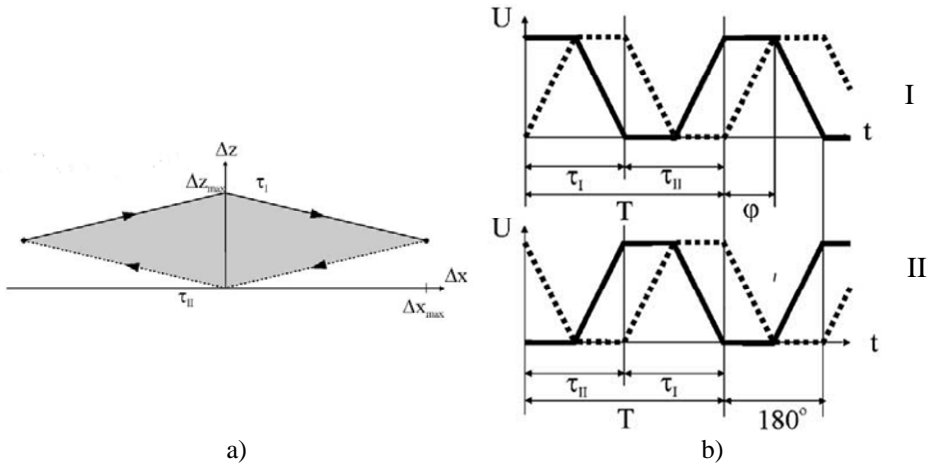
The dashed line – the signal in the direct direction and continuous – back direction

Iš 1.23 pav. matoma, kad pjezoroboto kontaktinis taškas, veikiamas harmoninio signalo juda elipse (žr. 1.23a pav.). Esant sinusiniam valdymo signalui ir valdymo fazei „I“, pjezoroboto koja iš pradinės padėties link plokštumos juda veikiamą pusperiodžio τ_I , prieš laikrodžio rodyklę (žr. 1.23a pav.). Kitas pusperiodis τ_{II} gražina pjezoroboto koją į pradinę padėtį.

Esant pilnam pjezoroboto kojos žingsniui paeiliui taikomos valdymo fazės „I“ ir „II“. Kompleksinio valdymo signalo sinusoidžių fazių skirtumo φ maksimali reikšmė yra 180° (žr. 1.23 b pav.).

Kitas atvejis, kai kontaktinis taškas juda menamo rombo perimetru. 1.23 a pav. pateikta kontaktinio taško trajektorija, 1.23 b pav. – valdymo signalai, kurie, skirtingai nuo 1.24 pav. pateikto atvejo, yra trapecijos formos.

Robotas turėjo 5LL ir galėjo pozicijuotis, be to, buvo atlikta keletas sėkmingų sferoje įtaisyto manipulatoriaus valdymo bandymų. Kaip teigia autoriai, sėkmingam roboto valdymui perspektyvoje galima būtų pritaikyti vaizdo atpažinimo sistemą.



1.24 pav. Pjezoroboto MINIMAN–V kojos kontaktinio taško trajektorija judant visomis rombo kraštinėmis (Woern H. et al. 2001): a) – pozicionavimo trajektorija, b) pirmo kojų rinkinio (Set I) ir antro (Set II) valdymo signalai $U(t)$.

Punktyrinė linija – signalas tiesiogine kryptimi, ištisinė – grįžtamąją
Fig. 1.24. Poisoning leg of MINIMAN–V piezorobot positioning by ellipse around all diamond sides (Woern H. et al. 2001):

a) – the positioning trajectory, b) – control signal $U(t)$.

The dashed line – the signal in the direct direction and continuous–back direction

Vykdamas MINIMAN projektą sukurti mikrorobotai buvo skirti atlikti tikslumo reikalaujančias užduotis mikroskopų sistemose. Vienas iš svariausių tokių mikrorobotų trūkumų tas, kad reikalingi 24 kanalai valdymui (4 kanalai vienai kojai), t. y. 12 kanalų judėjimo valdymui ir dar 12 kanalų manipulatoriaus valdymui. Todėl tiek valdymo programa, tiek elektrinė valdymo grandinė yra labai sudėtinga. Autorių sukurtas trijų centimetrų dydžio pjezorobotas buvo pirmasis veikiantis pusiau autonomiškai, t.y. kai kuriuos valdymo uždavinius jis galėjo atlikti pats.

1.3.3. Pjezrobotų judėjimo trajektorijų planavimas

Trajektorijomis judantis pjezrobotas turi judėti trajektorija ir maksimaliai tiksliai ją atkartoti. Todėl esminis reikalavimas yra toks algoritmas, kuris žmogaus teikiamas aukšto lygio užduotis konvertuotų į žemo lygio judėjimo aprašymus. Paprastai judesio trajektorijų formavimo uždaviniuose nagrinėjama problema, kaip turi judėti objektas priklausomai nuo jo mechaninių savybių.

Išskiriami pagrindiniai veiksniai, nuo kurių priklauso judesio trajektorijos planavimas (Lavelle 2004, Ata, A. A., et al. 2005, Crossley, V., et al. 2006, Costa, T. A. A., et al. 2008). Roboto trajektorijos planavimą galima aprašyti tokiu algoritmu:

1. Pradinė roboto padėtis.

Tai padėtis erdvėje, orientacijos kampas ir kita.

2. Laikas.

Atskiri veiksmai turi būti atlikti per tam tikrą nustatytą laiko tarpą.

3. Veiksmai.

Atliekami veiksmai tam tikru laiko momentu keičia roboto padėtį.

4. Galutinė padėtis. Atliekant veiksmus, robotas turi pasiekti galutinę nustatytą padėtį.

Apibrėžus pradinę ir galutinę roboto būsenas, reikia surasti, kaip elgsis ir kurioje trajektorijos dalyje bus robotas tam tikru laiko momentu.

Išanalizavus vaikščiojančių trajektorijų formavimą, pastebėta, kad naudojami tokie interpoliavimo metodai: polinominis interpoliavimas, interpoliavimas splainais ir Kornu spiralė. Visų šių metodų esmė – turint pradinius taškus (mazgus), rasti tolydžią funkciją, kuri aprašytų visus duotuosius taškus.

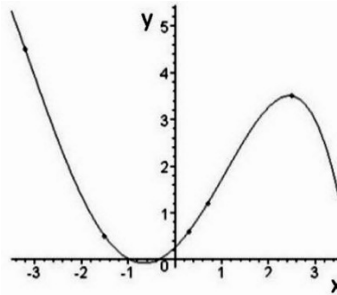
Remiantis ankstesniais Lietuvos ir užsienio mokslininkų tyrimais (Drukteinienė 2011), taip pat užsienio autorių patirtimi (Costa, T. A., et al. 2008; Guo, et al. 2007, Mitra, A., et al. 2007, Wang T. Y., et al. 2004), galima teigti, kad bendrinio atveju judėjimo trajektorijos formuojamos šiais metodais:

1. Trajektorijų formavimas polinomais – metodas, kai algebrinis reiškinytis yra sudarytas iš baigtinės vienanarių sumos. Bendru atveju daugianario funkciją galima užrašyti taip:

$$p(x) = \sum_{l=0}^n a_l x^l, \quad (1.8)$$

čia l – laipsnis, sveikasis skaičius, a – koeficientas, n – interpoliavimo laipsnis. Polinominės interpoliacijos prasmė, turint nelygius vienas kitam taškus (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , ..., (x_n, y_n) , $n > 1$, rasti n -tojo laipsnio funkciją, einančią per duotuosius taškus.

Polinominės funkcijos, einančios per tam tikrus taškus pavyzdys pateiktas 2.1 pav. (Drukteinienė 2011). Polinomai yra lengviausiai apskaičiuojamos funkcijos.



1.25 pav. Polinominės funkcijos einančios per duotuosius taškus pavyzdys (Drukteinienė 2011)

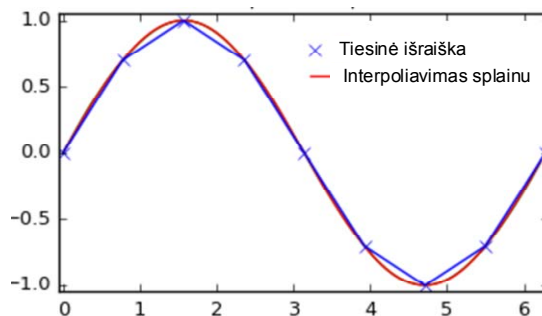
Fig. 1.25. Example of polynomial function passing through given points (Drukteinienė 2011)

2. Trajektorių formavimas splinais – metodas, kai interpoliuojant randamas ne vienas polinomas, bet keli. Jei duotų mazgų $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$, yra $N > 1$, vadinasi polinomų bus $N - 1$, t. y. tarp kiekvienos koordinatinių poros randama atskira polinominė m laipsnio ($m > 1$) funkcija (Mitra, Dhillon 2007):

$$S(x) = \begin{cases} S_1(x), & \text{jei } x \in [x_1, x_2]; \\ S_2(x), & \text{jei } x \in [x_2, x_3]; \\ S_i(x), & \text{jei } x \in [x_i, x_{i+1}]; \\ \dots & \\ S_{N-1}(x), & \text{jei } x \in [x_{N-1}, x_N]. \end{cases} \quad (1.9)$$

čia $S_i(x)$ yra (1.1) polinomo konkreti išraiška, kai $i = 1, 2, N - 1, 1 = 1, 2, \dots, m$. Splinas išreiškiamas kaip reali funkcija kai $a = x_1 < x_2 < \dots < x_N$ (Stoer, Bulirsch 2002).

Kaip iliustracija, 1.26 pav. pateikta trečio laipsnio splaino grafinė išraiška.



1.26 pav. Trečio laipsnio splaino iliustracija (Matlab 2016 help)

Fig. 1.26. Illustration of 3th spline (Matlab 2016 help)

3. Trajektorijų formavimas Kornu spirale – metodas, kai taikoma Kornu kreivė, kurios kreivis k tiesiškai priklauso nuo lanko ilgio (Drukteinienė 2011). Bendrinė tokios spiralės išraiška:

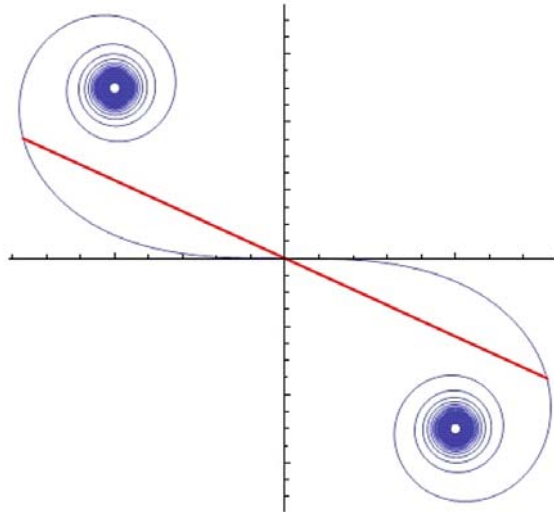
$$\kappa(s) = \delta \cdot s + \kappa_0, \quad (1.10)$$

čia δ – kreivės kreivio pokyčio greitis, κ_0 – pradinis kreivės kreivis, s – pozicijos kintamasis, $s \in [0, l]$ kur l – kreivės ilgis. Parametrinė Kornu spiralė aprašoma Fresnelio sinuso $S(s)$ ir kosinuso $C(s)$ integralais (Horn 1983);

Atskiras dvimatės Kornu spiralės atvejis: aprašomas 1.4.

$$\begin{aligned} x(s) &= C(s) = \int_0^s \cos\left(\frac{\kappa}{2s} t^2\right) dt; \\ y(s) &= S(s) = \int_0^s \sin\left(\frac{\kappa}{2s} t^2\right) dt, \end{aligned} \quad (1.11)$$

Dvimatės Kornu spiralės iliustracija pateikta 2.3 pav.



1.27 pav. Dvimatė Kornu spirale (Matlab 2016 help)

Fig. 1.27. 2 dimensional Cornu spirals (Matlab 2016 help)

Kornu spiralė taikoma tada, kai reikia pereiti nuo tiesios linijos prie apskritimo lanko ir atvirkščiai (Delingette, et al. 1991). Šio metodo trūkumas – negalima atlikti staigių posūkių. Tokiu būdu, toks metodas, netgi teoriškai negali būti taikomas atvejams kai trajektorija yra laužtė.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Pirmajame skyriuje atlikta informacijos šaltinių ir anksčiau atliktų mokslininkų darbų pjezorobotų judėjimo tema analizė.

1. Išanalizavus literatūrą, pastebėta, kad judančiuose robotuose naudojami pjezoelektriniai keitikliai valdomi aukšto dažnio virpesiais. Tačiau pats judesys generuojamas ne tiesiogiai pjezoelektriniais keitikliais, o naudojant papildomas konstrukcijas, tokias kaip kojos bei ratai. Išanalizuoti vaikščiojantys robotai daugiausiai skirti darbui įvairaus tipo mikroskopuose.

2. Analizuojamą cilindrinį, žiedinį ir kevalinį pjezorobotą taip pat galima priskirti prie vaikščiojančių robotų. Kadangi šie robotai gali nešti objektus, vadinasi, panaudojant pateiktų robotų manipuliatorių struktūrą, galima sukurti dviejų dimensijų plokštumoje judančius daugiamačius pjezorobatus su objektų manipuliatoriais ar stebėjimo įranga. Šie robotai skirtųsi nuo kitų panašių įrenginių, struktūros paprastumu, judesio tikslumu bei greičiu.

3. Atlikus judančių robotų su pjezoelektriniais judesio keitikliais analizę, nustatyta, kad literatūroje daugiau nusakoma roboto struktūra ar veikimo principai, tačiau nėra aprašomi šiems robotams skirti judesio trajektorijomis valdymo metodai bei algoritmai.

4. Išanalizavus įvairaus tipo robotų judesio trajektorijų formavimo metodus, nustatyta, kad naudojamas interpoliavimas polinomais, splineais ir Kornu spiralėmis, t. y. naudojamos didesnio nei pirmojo laipsnio kreivės. Taip pat nustatyta, kad šie metodai priklauso nuo roboto mechaninių savybių. Stengiamasi suformuoti trajektorijas, kuriomis robotas judėtų didžiausiu greičiu, arba būtų kuo didesnis trajektorijos atkartojimo tikslumas. Taip pat nustatyta, kad Lietuvoje tokio pobūdžio tyrimų nėra atlikta. Plokštumoje judančių pjezorobotų problematika pasauliniu mastu taip yra nenagrinėta.

5. Apibendrinant anksčiau pateikus rezultatus galima sukonkretinti disertacijos tyrimų uždavinius. Taigi disertacijos tyrimų metu reikalinga:

5.1. Sukurti plokštumoje judančių pjezorobotų valdymo metodus ir algoritmus.

5.2. Sukurti trajektorijomis judančių pjezorobotų valdymo sistemą. Sukurti programinę įrangą trajektorijomis judantiems pjezorobotams valdyti.

5.3. Atlikti sukurtais valdymo metodais trajektorijomis judančių pjezorobotų judėjimo praktinius eksperimentus ir nustatyti metodų tinkamumą skirtingiems taikomiesiems uždaviniams spręsti.

Trajektorijomis judančių pjezorobotų trajektorijų formavimas

Pjezoelektriniuose įrenginiuose sukimo ar slinkimo judesys formuojamas transformuojant aukšto dažnio rezonansinius pjezoelektrinių keitiklių virpesius. Tokios sistemos judesio parametrai labai priklauso nuo atraminio paviršiaus geometrijos ir judesio paviršiaus savybių, trinties koeficiento, kontakto geometrijos paviršiaus užterštumo ir kitų. Dėka mažų virpesių amplitudžių (pradedant nuo dešimtųjų mikrometro dalių), bet aukšto virpesių dažnio (kelių dešimčių kilohercų eilės), vidutinis judesio greitis yra kelių dešimčių mm per sekundę eilės (Ragulskis, et al. 1988). Sužadinant pjezokeitiklius paketiniame režime, minimalūs poslinkiai yra nanometrų eilės ir tai sudaro pagrindinius pjezovariklių privalumus: didelė skyra ir platus greičio valdymo diapazonas. Tačiau kalbant apie pjezoelektrinių sistemų tikslumą, be grįžtamo ryšio sistemos ir padėties jutiklių negalima realizuoti poslinkio ir virpesių periodų skaičiaus tikslios priklausomybės, t. y. objekto judesys yra asinchroninis (Bansevicius 2008, Skorc G., et al. 2011, Kulvietis G. 2012).

Panaši problema egzistuoja ir sistemose su keliais laisvės laipsniais, t. y. greičio vektoriaus tiek modulis, tiek kryptis turi atsitiktinę dedamąją, todėl šiame skyriuje nagrinėjamas pozicionuojamo objekto trajektorijų formavimo uždavinys tariant cilindrinis, pjezomechaninius judesio keitikius.

Judesio skyra formuojant trajektoriją apibrėžiama kaip mažiausias poslinkis žadinant judančio pjezomechaninio judesio keitiklio (pjezoroboto) elektrodų segmentą trumpiausiu impulsu. Tikslumas suprantamas, kaip maksimalus atsilenkimas nuo planuojamos trajektorijos (Drukteinienė 2011).

Plokštumoje trajektorijomis judančiam pjezomechaniniam keitikliui galima kelti tokius valdymo uždavinius:

1. Pjezoįrenginys per neribotą laiko tarpą turi tiksliai atkartoti pateiktą trajektoriją;

2. Judėjimas nuo pradinio taško iki galutinio turi būti atliktas per trumpiausią laiko tarpą, tačiau išlaikomas ir trajektorijos atkartojimo tikslumas. Šiuo atveju judančio pjezomechaninio įrenginio vidutinis judėjimo greitis turi būti didžiausias;

3. Pateiktos trajektorijos sekimas tam tikru tikslumu panaudojant paprastą pjezoįrenginio judesio valdymą.

Sprendžiant šiuos uždavinius būtina atsižvelgti į naudojamas pjezoįrenginio elektrodų žadinimo schemas.

Antrojo skyriaus tematika buvo publikuotas straipsnis recenzuojamuose mokslo žurnale (Drukteinienė A., Kulvietis G., Mačerauskas E., Janutėnaitė J., Mažeika 2016), straipsnis recenzuojamoje konferencijos medžiagoje (Bansevicius R., Kulvietis G., Mačerauskas E., Janutėnaitė J., Drukteinienė A., Mažeika D.), taip pat kituose leidiniuose (Mačerauskas E., Kulvietis G., Janutėnaitė J., Drukteinienė A. 2016).

2.1. Judančio pjezoroboto trajektorijų formavimo uždaviniai

Pjezorobotų valdymo metodai sudaromi remiantis pjezokeitiklio judesio formavimo plokštumoje principu. Pjezorobotas juda remdamasis atraminių taškų elipsiniais smūgiais į plokštumą su smailiu kampu. Todėl pjezorobotas turi veikti pagal judesį formuojančią ir elektrodų konfigūraciją atitinkančią schemą (Bansevicius, R. et al. 2010a, 2010b, 2011a, 2011b Drukteinienė 2011).

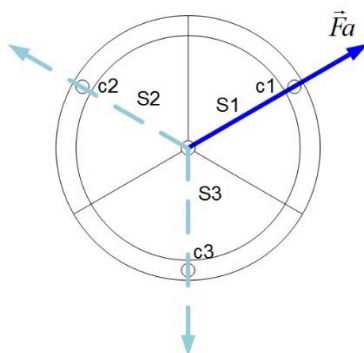
Sprendžiant plokštumoje trajektorijomis judančio cilindrinio pjezoroboto valdymo uždavinius būtina apibrėžti judėjimo valdymo metodus.

Cilindriniam pjezorobotui galioja analogiškos valdymo schemas kaip ir žiediniam ar kevaliniam (Bansevicius, R. et al. 2012, 2013). Konkrečiu atveju trimis simetriškais elektrodais padalintas įrenginys gali judėti dvejopai:

Pirmas modelis yra toks, kai pjezoroboto judėjimas nuo taško prie taško ir pats pjezorobotas nesisuka, o tik perjungia judesį formuojančią elektrodą (žr. 2.1 pav.). Valdant pjezorobotą šio metodu kiekvienu laiko momentu aktyvus tik vienas segmentas (S1, S2, S3), kuris generuoja judesį formuojančią jėgą su jėgos

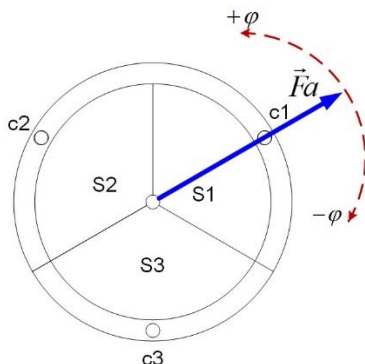
vektoriai \vec{F}_a einančiu iš centro link atitinkamo kontaktinio taško. Taigi šiuo metodu pjezorobotas gali judėti viena iš trijų krypčių, sudėtingas judėjimas, valdant šiuo metodu, gaunamas naudojant pakaitinę aktyvių segmentų kombinaciją.

Tiesiaieigio judesio formavimo schema, kai vienu metu aktyvus tik vienas pjezoroboto segmentas pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Tiesiaieigio judėjimo formavimas kai aktyvus tik vienas elektrodų segmentas
Fig. 2.1. Scheme of linear motion when one electrode segment is excited

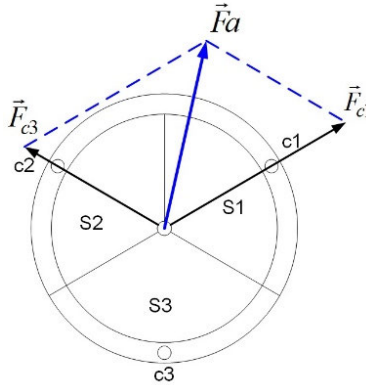
Antras metodas, kai pjezorobotas ne tik juda nuo taško prie taško, bet ir tarpiniuose mazguose gali keisti judėjimo kryptį pasisukdamas reikiamu kampu ($+\varphi$, $-\varphi$). Valdant šiuo metodu, jėgos vektorius \vec{F}_a generuoja judėjimą per kontaktinį tašką (c_1 , c_2 , c_3). Kadangi pjezorobotas gali sukis apie savo ašį, tai jėgos vektorius gali būti pasuktas bet koku kampu φ . Tokiu atveju pjezorobotas gali judėti nuo taško prie taško, analogiškai kaip ir pirmu atveju, bet papildomai gali atlikti posūkį taškuose. (žr. 2.2 pav.).



2.2 pav. Pjezorobotas sukasi apie savo ašį kampu $-\varphi\dots +\varphi$
Fig. 2.2. The piezorobot rotates about its axis at an angle $-\varphi\dots +\varphi$

Trečiasis metodas yra toks, kai pjezoroboto judėjimas vykdomas pastoviai generuojant jėgas dviejuose reikiamuose elektroduose, kur judėjimo kryptį ir greitį apsprendžia atstojamasis jėgos vektorius (žr. 2.3 pav.).

Kiekvienas iš sudedamųjų jėgų vektorių (\vec{F}_{c_1} , \vec{F}_{c_2}) priklauso nuo valdymo signalo stiprio, tokiu galima valdyti atstojamosios jėgos vektoriaus \vec{F}_a dydį ir kryptį (Bansevičius R. 2016).



2.3 pav. Pjezoroboto judėjimas formuojamas jėga \vec{F}_a gaunama kaip vienu metu veikiančių jėgų \vec{F}_{c_1} ir \vec{F}_{c_2} atstojamoji

Fig. 2.3. Piezorobot's movement formed by force \vec{F}_a comes at a result of the forces \vec{F}_{c_1} and \vec{F}_{c_2}

Šiuo metodu galima tiksliai reguliuoti judesį generuojančias jėgas, tačiau prognozuojamas gretimų segmentų tarpusavio sąveika nėra prognozuojama.

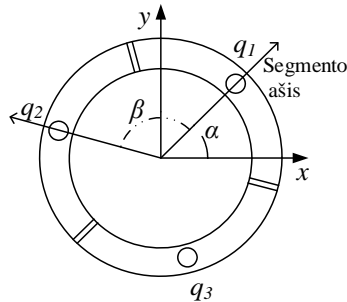
2.2. Judančių pjezorobotų trajektorijų formavimo algoritmų taksonomija

Analitinių tyrimų metu nustatyta, kad plokštumoje judantis pjezomechaninis keitklis, kuris valdomas harmoniniu signalu gali atlikti tiesiaeigį ir sukamąjį judėjimą bei kryptingą judėjimą, kai du segmentai generuoja jėgą vienu metu.

2.2.1. Trajektorijos formavimas neatliekant sukamojo judesio

Vienas iš galimų pjezomechaninio įrenginio judesio formavimo metodų yra judėjimas trajektoriją formuojant trumpų tiesiaeigių judesių masyvą. Panašius metodus teoriniuose skaičiavimuose galima sutikti ir kitų autorių darbuose (Drukteinienė A., 2011).

Judėjimas gaunamas žadinant po vieną žiedinio įrenginio elektrodų segmentą. Tokiu atveju pjezorobotas sukamojo judėjimo atlikti negali, vadinasi, yra apibrėžtos tik trys, viso judėjimo metu nekintančios judėjimo kryptys, priklausančios nuo pradinės įrenginio orientacijos kampo x ašies atžvilgiu. Pjezoroboto orientacijos kampu laikomas pirmojo elektrodų segmento simetrijos ašies kampas su x ašimi (žr. 2.4 pav.).



2.4 pav. Pjezoroboto elektrodų segmentų išdėstymas ir orientacija ašių plokštumos atžvilgiu

Fig. 2.4. Electrodes segments layout of the piezorobot and orientation by the axis in plane

Kampas laipsniais tarp elektrodų segmentų simetrijos ašių yra lygus (Drukteinienė A., 2011):

$$\beta = \frac{360^\circ}{c}, \quad (2.1)$$

čia c – elektrodų segmentų kiekis.

Kiekvieno segmento simetrijos ašis su x ašimi sudaro kampą:

$$\Gamma_j = \alpha + \beta(j - 1), \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (2.2)$$

čia α – pirmojo segmento simetrijos ašies kampas su x ašimi. j – segmento numeris.

Kai elektrodai žadinami vienoda jėga, nukreipta išilgai segmentų simetrijos ašių, įrenginio judėjimo kryptis sutampa su segmento simetrijos ašies kryptimi. Nustatomos įrenginio judesio kryptys kiekvienam segmentui J :

$$R_j = \begin{cases} R_{xj} = \begin{cases} 1, & \text{kai } 0^\circ < \gamma_j < 90^\circ \text{ ir } 270^\circ < \gamma_j < 360^\circ \\ -1, & \text{kai } 90^\circ < \gamma_j < 270^\circ \\ 0, & \text{kitu atveju} \end{cases} \\ R_{yj} = \begin{cases} 1, & \text{kai } 0^\circ < \gamma_j < 180^\circ \\ -1, & \text{kai } 180^\circ < \gamma_j < 360^\circ \\ 0, & \text{kitu atveju} \end{cases} \end{cases} \quad (2.3)$$

Kadangi pjezoroboto simetrijos ašis turi judėti tik tarp ribinių koordinačių, vadinasi jo judesio tiesė kirs ribines koordinates, o jų susikirtimo taškas bus pjezoroboto judesio koordinatė.

Pjezomechaninio įrenginio judėjimo trajektorija nesutampa su teorine netgi prie geriausių sąlygų. Nesutapimui įvertinti įvedama ribinių koordinačių sąvoka, kuri iš esmės reiškia judėjimo tikslumą. Ribinės koordinatės, įvertinus leistiną nuokrypį nuo judėjimo trajektorijos, randamos (Drukteinienė A. 2011):

$$g(x_g, y_g) = \begin{cases} x_g = -z \cdot k \cdot \left. \frac{\partial S}{\partial x} \right|_{x=x_s} + x_s; \\ y_g = z \cdot k + y_s \end{cases} \quad (2.4)$$

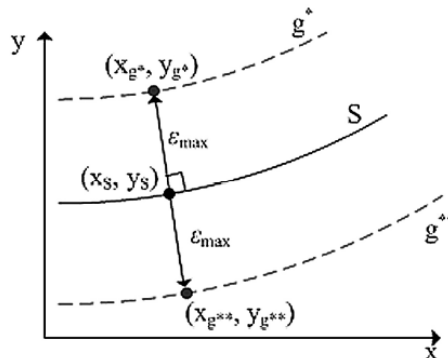
čia

$$k = \frac{\varepsilon_{\max}}{\sqrt{\left(\left. \frac{\partial S}{\partial x} \right|_{x=x_s} \right)^2 + 1}}; \quad z = -1.1. \quad (2.5)$$

Ribinės koordinatės planuojamos trajektorijos atžvilgiu:

$$g = \begin{cases} g^* & \text{kai } z = 1 \\ g^{**} & \text{kai } z = -1. \end{cases} \quad (2.6)$$

2.5 paveiksle., pateikiamas grafinis ribinių koordinačių pavyzdys.



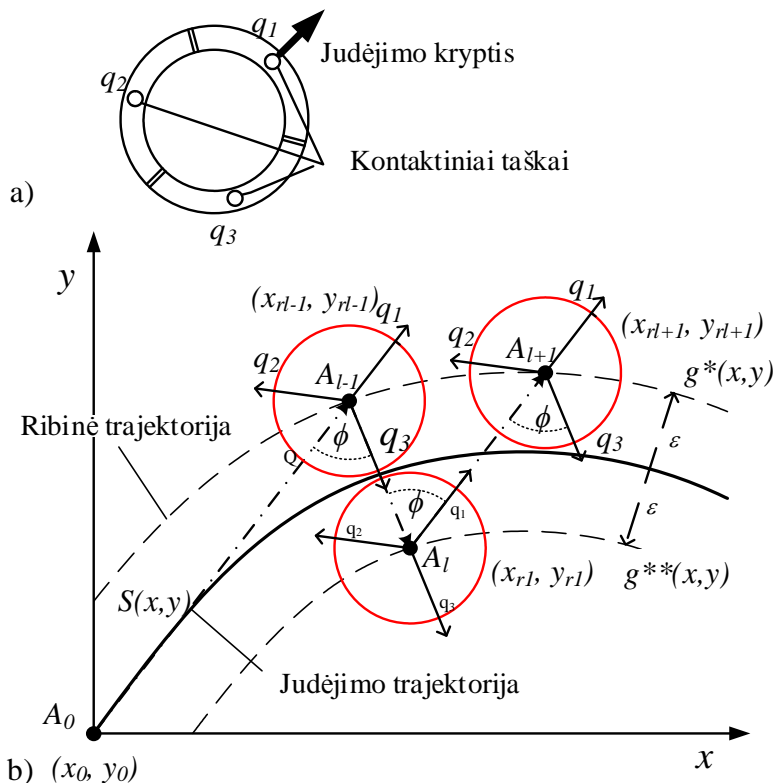
2.5 pav. Ribinės trajektorijos koordinatės (A. Drukteinienė 2011)

Fig. 2.5. Marginal coordinates of the trajectory (A. Drukteinienė 2011)

Pjezoroboto judėjimo schema pateikta 2.6 paveiksle. Tarp jo nuokrypį koordinačių juda pjezoroboto centras arba bet kuris kitas pasirinktas taškas, kai

pradinė jo koordinatė prilyginama (x_0, y_0) , o kelias vertinamas kaip to taško trajektorija.

Pjezoroboto, valdomo šio metodu, judėjimo schema pateikta 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Geometrinis judesio formavimas neatliekant posūkio

a) – pjezoroboto kontaktiniai taškai, b) – judėjimo trajektorija

Fig. 2.6. Geometric motion formation without rotation

a) – the contact point of the piezorobot, b) – motion trajectory

Pjezoroboto judėjimo plokštumoje trajektorija formuojama pagal tokį algoritmą:

1. Nustatoma tinkamiausia judesio kryptis.
2. Randami tarp duotų mazgų esančių tiesių kampai α , β , ir φ su x ašimi pagal (2.6) formulę.
3. Randami kampai tarp ϕ_i ir γ_i , kai posūkis atliekamas pagal laikrodžio rodyklę ($m = 1$), prieš laikrodžio rodyklę ($m = 2$):

$$[\theta] = \theta_{jm} = \begin{cases} 360^\circ + \gamma_j - \phi_i \equiv \theta_{J_1} \pmod{360^\circ}, & \text{kai } m = 1; \\ 360^\circ + \gamma_j - \phi_i \equiv \theta_{J_2} \pmod{360^\circ}, & \text{kai } m = 2; \end{cases} \quad (2.7)$$

4. Randamos matricos reikšmės surikiuojamos kampų didėjimo tvarka ir sudaromas dvimatis masyvas A_{ex2} . Masyvo eilučių skaičius e apskaičiuojamas pagal formulę:

$$e = \begin{cases} c, & \text{jei } l = 1; \\ c - 1 & \text{jei } l > 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

čia l – formuojamos trajektorijos koordinatinių judančio pjezoįrenginio pozicijos numeris).

Pagrindinis koordinatinių paieškos algoritmas pavaizduotas 2.7 paveiksle. Paieškos algoritmas prasideda nuo pradinių koeficientų i , k , ir l reikšmių, toliau šios reikšmės naudojamos tikrinant ar kiekvienas taškas atitinka pradines sąlygas. Jei taškas rastas, jis užfiksuojamas užrašant jo koordinatės (x_{rl}, y_{rl}) . Jei taškas nerastas toliau vykdoma tinkamų susikirtimo taškų paieška. Susikirtimo taškai ieškomi pagal algoritmą (A. Drukteinienė 2011). Radus tinkamus taškus priskiriamos jiems koordinatės (x_{rl+1}, y_{rl+1}) , jei taškų nėra tikrinama ar kertama funkcijos keitimo riba. Kiekvieną kartą tikrinimas ar kertama funkcijos keitimo riba, tam, kad trajektorija nekirstų ribinių koordinatinių. Kertant funkcijai ribines koordinates grįžtama žingsniu atgal ir paieška vykdoma nuo pradžių.

Pjezoroboto judėjimą apsprendžiantis kontaktų perjungimo bendrasis algoritmas, pavaizduotas 2.8 paveiksle. Pirminėje veiksmų padėtyje tikrinama ar kontaktas yra valdymo zonoje, t. y. ar atstumas nuo pjezoroboto centro nėra mažesnis už pjezoroboto spindulį $K > r$. antras žingsnis reikiamo segmento išrinkimas, kuris vykdomas pagal 2.2.1 skyriuje aprašytą metodą.

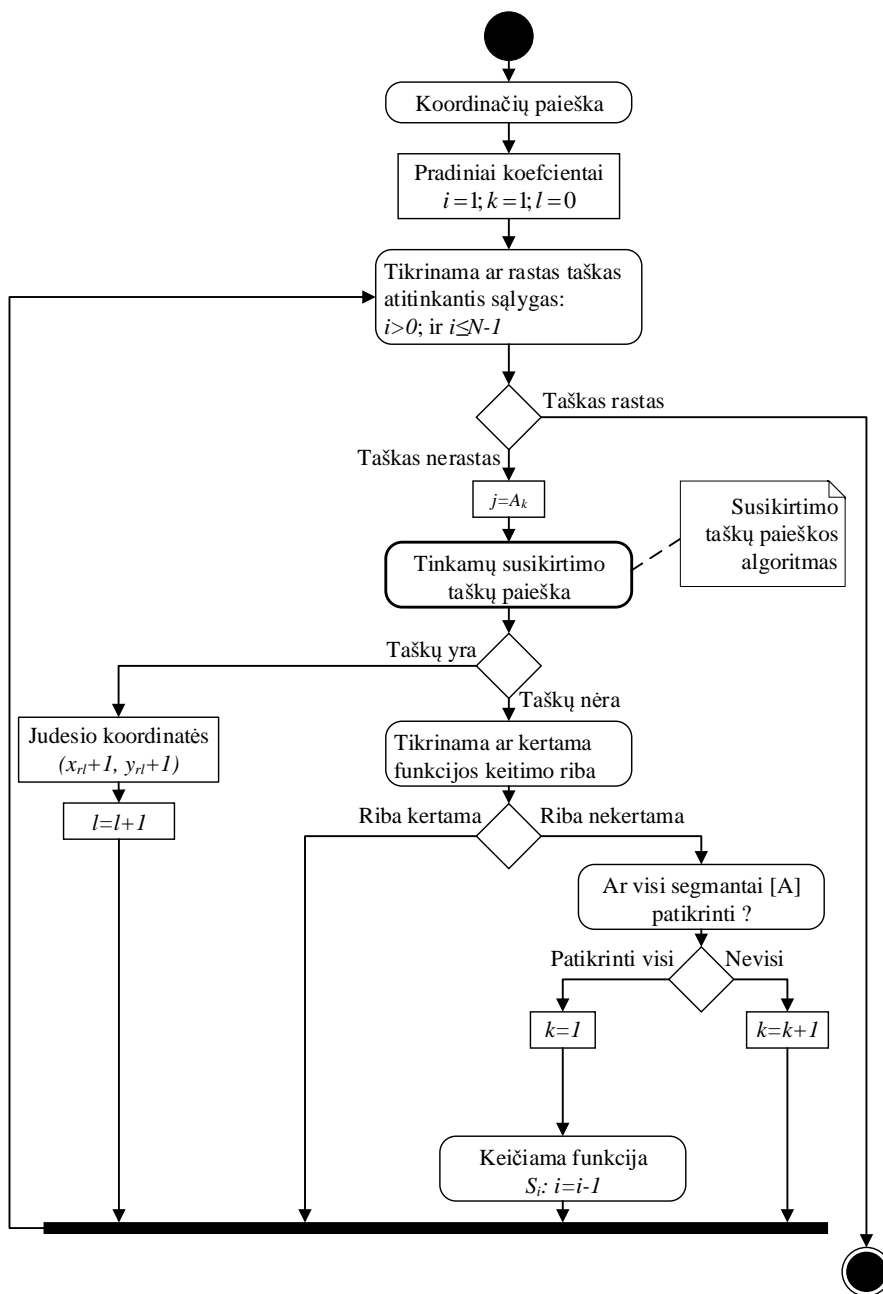
Segmentų parinkimas ir taško iki kurio turi nueiti pjezorobotas koordinatinių (x_{rl}, y_{rl}) radimas vykdomas pagal 2.7 paveiksle pateiktą algoritmą. Kol visi matricos $[A]$ taškai bus surasti skaičiuojamas kiekvienas atstumas nuo taško prie taško kartojant algoritmą, tikrinant papildomą sąlygą, kad pjezoroboto poslinkis kiekvienoje atkarpoje būtų minimalus, t.y. $\Delta P_i \geq \Delta P_{min}$.

Kiekvieno perskaiciavimo atveju prieinama prie kito taško $k = k + 1$, kol taškų skaičius i nepasiekia apskaičiuoto $-i = N$.

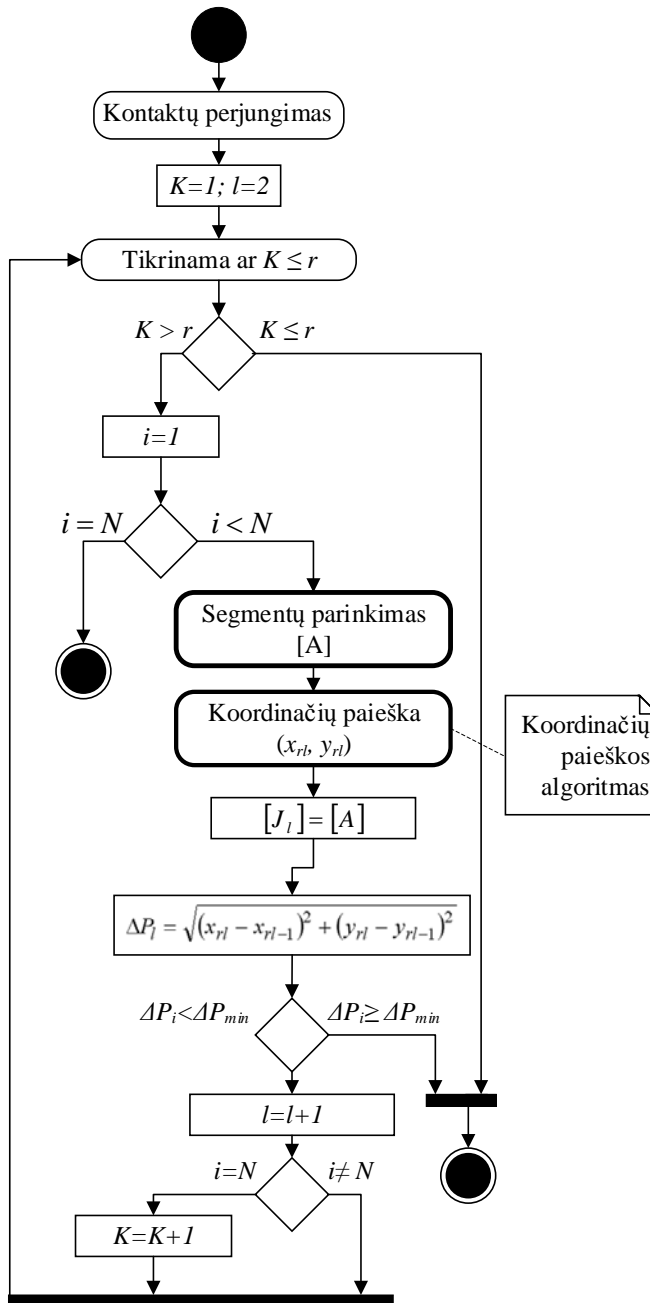
Pjezoroboto trajektorija, kai pjezorobotas juda tarp kontaktinių taškų, $(x_0; y_0)$, $(x_{rl-1}; y_{rl-1})$, $(x_{rl}; y_{rl})$, $(x_{rl+1}; y_{rl+1})$..., $(x_N; y_N)$, kur $N > 2$ aprašoma polinomu:

$$S_i = \begin{cases} S_{xi} = (x_{i+1} - x_i) \cdot t + x_i \\ S_{yi} = (y_{i+1} - y_i) \cdot t + y_i \end{cases} \quad (2.9)$$

čia t – yra parametrinės lygties parametras, ir $t \in [0, 1]$, $i = 1, 2, \dots, N-1$.



2.7 pav. Tarpinių koordinačių paieškos algoritmas
Fig. 2.7. The search algorithm of intermediate coordinates



2.8 pav. Kontaktų perjungimo algoritmas

Fig. 2.8. Contacts switching algorithm

Kadangi vykdant šį algoritmą yra nustatomas aktyvaus kontakto numeris J ir judesio koordinatės (x_r, y_r) , vadinasi galima apskaičiuoti poslinkio ilgį tarp rastų koordinačių.

Apskaičiuotas dydis turi tenkinti sąlygą $\Delta P_l \geq \Delta P_{min}$, čia ΔP_{min} – pjezo-mechaninio įrenginio judesio skyra.

$$[\Delta P_l] = \sqrt{(x_{rl} - x_{r,l-1})^2 + (y_{rl} - y_{r,l-1})^2}, l = 2, 3, \dots \quad (2.10)$$

Iš klasikinės fizikos žinoma, kad judančios objekto pagreitį galima išreikšti kaip greičio pokytį nuo laiko.

$$a_i = \frac{v_i - v_{0i}}{t_i}, \quad (2.11)$$

čia v_{0i} – pjezoroboto greitis pradinio laiko momentu, v_{0i} – greitis praėjus laikui, t_i , t_i – laiko pokytis nuo praėjusio taško, kai $i = 1, 2, \dots$

Laikas išreiškimas per greitį ir pagreitį

$$t_i = \frac{v_i}{a_i}. \quad (2.12)$$

Judančio kūno greitis, pagal II Niutono dėsnį:

$$a = \frac{|\vec{F}|}{M}, \quad (2.13)$$

čia M – pjezoroboto masė, $|\vec{F}|$ – vieno segmento generuojama jėga.

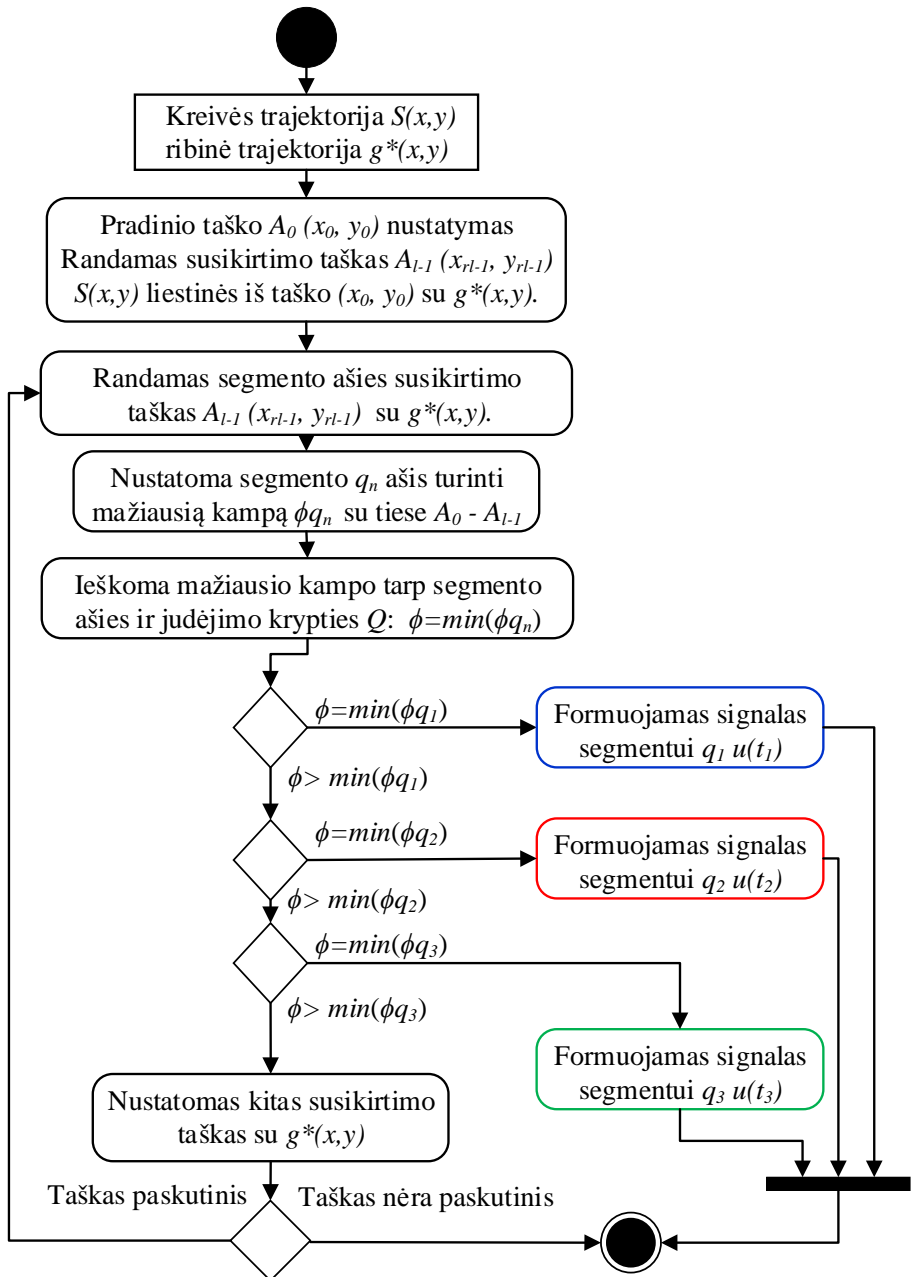
Atstumas tarp pjezoroboto koordinačių:

$$d_i = \frac{v_i^2}{2a}. \quad (2.14)$$

Tokiu atveju signalo veikimo laikas segmente:

$$t_i = \sqrt{\frac{2Md_i}{|\vec{F}|}}, |\vec{F}| \neq 0. \quad (2.15)$$

Remiantis šiomis matematinėmis išraiškėmis sudarytas pjezoroboto su trimis segmentais valdymo algoritmas pateiktas 2.9 paveiksle. Kaip įvesties duomenis algoritmas ima kreivę aprašytą funkcija $S(x, y)$ taip pat pjezoroboto segmentų skaičių – c , pradinį pirmojo segmento kampą su x ašimi – α , leistinas ribines koordinates – ε_{max} , pjezoroboto masę – m , ir vieno segmento generuojamą jėgą – $|\vec{F}|$. Toliau vykdomas pradinio taško nustatymas ir randami visi apskaičiuoti trajektorijos taškai. Judėjimo tiesė, kiekvienu momentui formuojama pagal mažiausią atsilenkimo kampą $\phi = \min(\phi_{q_n})$. Formuojant judesį sukuriama valdymo signalai kiekvienam pjezoroboto segmentui, apkaičiojant laiką – t , kurį segmentas bus aktyvus. Signalas skaičiuojamas kiekvienam segmentui atskirai, tol kol suformuojamos visos reikalingos judėjimo atkarpos iki susikirtimo su ribinėmis koordinatėmis $g^*(x, y)$. patikrinus sąlygą ir nustačius, kad trajektorijos taškas yra paskutinis algoritmas pjezorobotą stabdo.



2.9 pav. Valdymo signalų algoritmas, kai piezorobotas nesisuka
Fig. 2.9. The algorithm of control signals where piezorobot not rotating

2.2.2. Trajektorijos formavimo metodas su sukamuoju judesiu

Trajektorijomis judančio pjezomechaninio žiedo judėjimui galima formuoti judesio trajektoriją kombinuojant anksčiau aprašytą tiesiaeigį judėjimą su galimybe pasisukti apie savo simetrijos centrą. Tokiu atveju taikomi šie judesio formavimo etapai:

1. Posūkio kampo skaičiavimas;
2. Trajektorijos formavimas liestinių metodu.

Posūkio kampo nustatymas vykdomas apskaičiuavus judesio krypti pradiniu momentu. Pjezoroboto judėjimo atveju kai formuojama judesio trajektorija su sukamuoju judesiu, pateikiamas cilindrinio pjezoroboto posūkio apskaičiavimas pagal suformuotą trajektoriją.

Pirmiausia pagal (2.6) formulę apskaičiuojami galimi posūkio kampai, sukant pjezorobotą pagal laikrodžio rodyklę ir prieš laikrodžio rodyklę. Iš gautos matricos atrenkamas mažiausias posūkio kampas θ ir nustatoma posūkio kryptis. Kiekvieną kartą įrenginiui pasisukus, keičiasi pradinis orientacijos kampas α , kuris po kiekvieno pasisukimo perskaičiuojamas (Drukteinienė A. 2011):

$$\alpha_{i+1} = \begin{cases} \alpha_i - \theta & \text{kai } D = 1; \\ \alpha_i + \theta & \text{kai } D = 2; \end{cases} \quad (2.16)$$

Mažiausias posūkio kampas θ_{\min} priklauso nuo pjezoroboto geometrinių parametrų, mažiausias poslinkio λ_{\min} sukimosi metu ir kitų faktorių. Mažiausias posūkio kampas laipsniais apskaičiuojamas pagal formulę (Drukteinienė A. 2011):

$$\theta_{\min} = \frac{180^\circ \cdot \lambda_{\min}(M, \omega)}{\pi(r_{vid} + d/2)}, \quad (2.17)$$

čia M – pjezoįrenginio masė, ω – segmento žadinimo dažnis, r_{vid} – vidutinis pjezoroboto spindulys, d – kontaktinio taško diametras (2.14 pav.).

Minimalus posūkio kampas priklauso nuo pjezoroboto esamos orientacijos kampo α ir suplanuotos trajektorijos tikslumo $\varepsilon_{\min}(\Delta P_{\min}, \alpha)$. (Drukteinienė A. 2011).

Bendras mažiausias atsilenkimas nuo suplanuotos trajektorijos bus lygus:

$$\varepsilon_{\min} = \max([\varepsilon]). \quad (2.18)$$

Minėtu metodu gauti tarpiniai taškai yra išdėstomi abipus trajektorijos, kad tenkintų šią sąlygą.

Pjezoroboto sukamojo judesio schema pateikta 2.10 paveiksle.

Čia $S(x, y)$ – judėjimo trajektorija matematinė funkcija. Tarp $g^*(x, y)$ ir $g^{**}(x, y)$ apibrėžiamos galimos ribinės koordinatės. Pjezorobotas atlieka judesį, kai vienas aktyvus segmentas generuoja jėgą per kontaktinį tašką q_i ($i = 1, 2, 3$), išilgai savo simetrijos ašies (2.23 a pav.). Trajektorija padalinta atkarpomis, kurių galiniai taškai (x_0, y_0) , (x_{n-1}, y_{n-1}) , x_n, y_n neturi kirsti ribinių koordinatė, ir juose atliekamas pjezoroboto posūkis.

Tolesnis trajektorijos formavimo etapas – liestinių skaičiavimas, kuris taikytinas metodui, kai pjezorobotas judėdamas trajektorija atlieka sukamąjį judesį. Metodas, kai pjezorobotas geba atlikti posūkį kontroliniuose taškuose artimas liestinių metodui (Drukteinienė A. 2011). Šiam metodui taip pat reikalingas maksimalus atsilenkimas ε_{max} nuo suplanuotos trajektorijos. Pirmiausia patikrinama, ar galima judėti nuo esamo mazgo prie kito mazgo nekertant ribinių koordinatė g^* ir g^{**} (2.5 pav.).

Siekiant nustatyti, ar kertamos ribinės koordinatės, sprendžiamos dvi lygčių sistemos ir apskaičiuojami susikirtimo taškai:

$$\begin{cases} x_g^* = (x_{i+1} - x_i) \cdot t + x_i; \\ y_g^* = (y_{i+1} - y_i) \cdot t + y_i; \\ x_g^* = g_x^*(S_{xi}(t_S), \varepsilon_{max}); \\ y_g^* = g_y^*(S_{yi}(t_S), \varepsilon_{max}). \end{cases} \quad (2.19)$$

Kitoms ribinėms koordinatėms galiojanti sistema:

$$\begin{cases} x_g^{**} = (x_{i+1} - x_i) \cdot t + x_i; \\ y_g^{**} = (y_{i+1} - y_i) \cdot t + y_i; \\ x_g^{**} = g_x^{**}(S_{xi}(t_S), \varepsilon_{max}); \\ y_g^{**} = g_y^{**}(S_{yi}(t_S), \varepsilon_{max}). \end{cases} \quad (2.20)$$

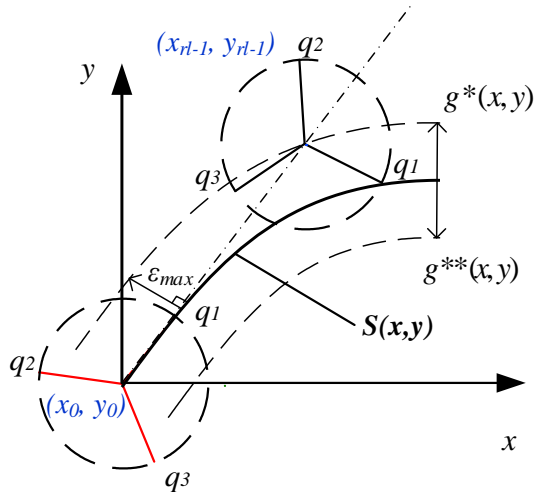
Sprendžiant (2.19) ir (2.20) kartu, galima rasti, kiek susikirtimo taškų turi tiesė esanti tarp mazgų su kiekviena ribine koordinate. Susikirtimo taškai turi tenkinti šias sąlygas:

$$1) \left[(x_g^*, y_g^*) \in R \right] \wedge \left[(x_g^{**}, y_g^{**}) \in R \right];$$

$$2) t_S \in [t_{i-1}, t_i] \text{ kitaip trajektorijos taškas yra už trajektorijos ribų};$$

3) susikirtimo taškų kiekis turi būti lygus l , kitaip judesio tiesė nekerta ribinės koordinatės ($n = 0$), arba esant $n > 1$, kerta ribinę koordinatę keliose vietose ir pjezoroboto trajektorija išeina už suplanuotos ribų (žr. 2.12 pav.).

Trajektorijos formavimo liestinių metodu variantas pateiktas 2.12 paveiksle.



2.12 pav. Trajektorijos formavimo liestinių metodu pavyzdys

Fig. 2.12. Example of trajectory formation using tangents method

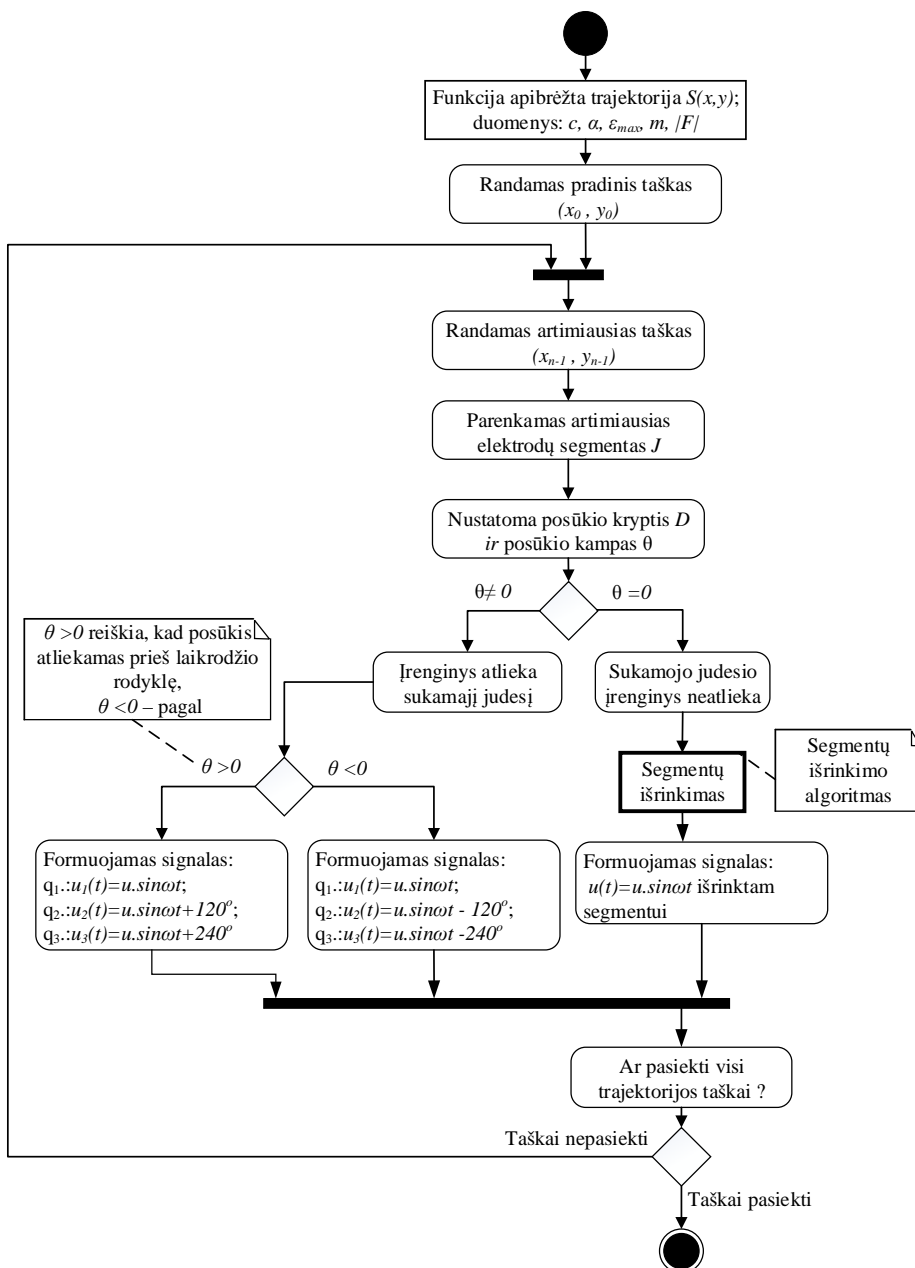
Pilnas valdymo su sukamuoju judesiu algoritmas, sudarytas pagal anksčiau aprašytą metodą pateikiamas 2.13 paveiksle.

Atskirų valdymo signalų, skirtų pjezoroboto segmentams žadinti algoritmas pateikiamas 2.14 paveiksle.

Šiuo metodu suformuotas judėjimas praktiškai sudaromas iš dviejų dalių: tiesiaiegio judėjimo, kai valdymo signalas yra tik viename pjezoroboto segmente ir posūkio, kai valdymo signalas paduodamas į visus segmentus.

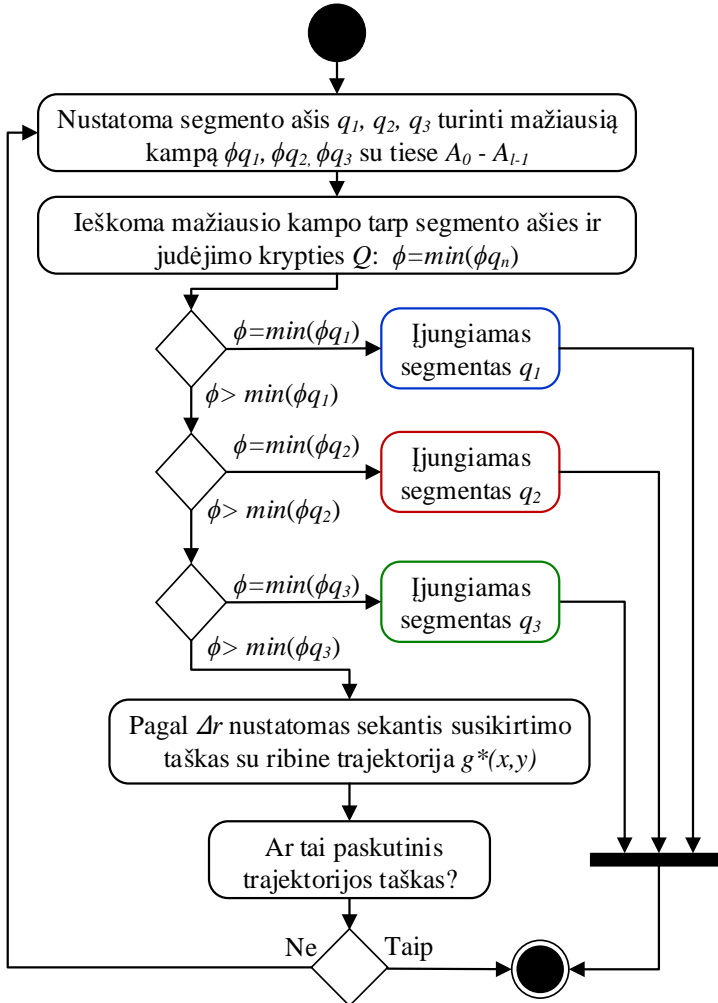
Trajektorija judančio pjezoroboto valdymo algoritmas panašus į pateiktą 2.9 paveiksle. Esminis skirtumas tas, kad tarp judėjimo atkarpomis pjezorobotas gali atlikti sukamąjį judesį apie savo ašį. Algoritmas skirtas valdyti pjezorobotą kai jis juda trajektorija tiesiai su sukamuoju judesiu pateiktas 2.13 paveiksle. Kaip įvesties duomenis algoritmas imama matematiškai aprašyta kreivė $S(x, y)$ su pradinį duomenų visuma aprašoma kintamaisiais c , α , ϵ_{max} , m , ir $|\vec{F}|$. Pirminiu atveju randamas pradinis taškas žymintis trajektorijos pradžią su koordinatėmis (x_0, y_0) . Kitas žingsnis yra artimiausio taško, kuris yra trajektorijoje ir turi koordinates (x_{n-1}, y_{n-1}) radimas bei tinkamo pjezoroboto segmento parinkimas. Nustačius posūkio kryptį D ir kampą θ algoritmas nusprendžia į kurią pusę bus atliekamas posūkis trajektorijos mazguose. Pagal šia sąlygas išrenkami aktyvus segmentai ir formuojamas kompleksinis valdymo signalas juose.

Kai visi trajektorijos taškai pasiekti algoritmas baigia darbą.



2.13 pav. Pjezoroboto valdymo su sukamuoju judesiu algoritmas
 Fig. 2.13. Control algorithm of piezorobot control with rotational motion

Segmentų išrinkimo algoritmas, skirtas priskirti akvyvų segmentą formuojamam valdymo signalui, pateiktas 2.14 paveiksle. Algoritmo pradžioje nustatoma kurio iš trijų segmentų q_1, q_2, q_3 , simetrijos ašis turi mažiausią kampą su judėjimo trajektorijos liestine (žr. 2.11 pav.). Išrinkus reikiamą segmentą jis įjungiamas ir priskiriamas valdymo signalas gautas pagal algoritmą pateiktą 2.13 paveiksle.



2.14 pav. Pjezoroboto segmentų išrinkimo algoritmas
Fig. 2.14. Segments selection of the piezorobot algorithm

2.3.3. Trajektorijos formavimo jėgų atstojamosios metodu

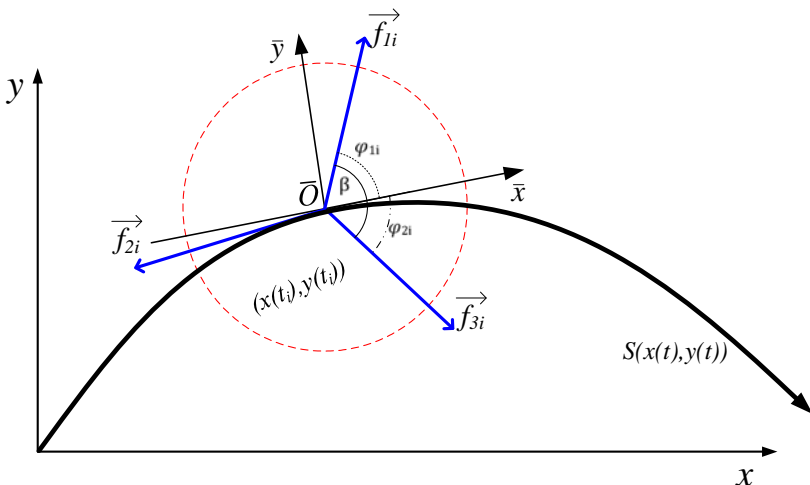
Anksčiau, 2.3.1 skyriuje aprašytas trajektorijų formavimo metodas, kai yra perjungiami aktyvūs kontaktiniai taškai ir pjezorobotas sukis negali ir 2.3.2 skyriuje aprašytas formavimo metodo, kai pjezorobotas pasisuka vingių taškuose, yra geri ir tinkami pjezorobotų valdymui. Be minėtų dviejų metodų, galimas metodas, kai pjezoroboto visi kontaktiniai taškai generuoja jėgas tuo pačiu laiko momentu. Pjezoroboto judesį reikiama kryptimi tokiu atveju formuoja trijų jėgų atstojamoji.

Sprendžiamas uždavinys, kai duota trajektorija aprašoma funkcija $f(x,y)=0$. Žinomos pradinės koordinatės (x_0, y_0) ir galutinės judesio koordinatės (x_g, y_g) (žr. 2.15 pav.). Anksčiau aprašytas, pjezorobotas turi tris elektrodus (žr. 2.4 pav.), iš kurių vienu metu aktyvūs yra du ir generuoja skirtingas jėgas \vec{f}_{ji} , tokiu atveju atstojamoji, judesį formuojanti jėga:

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1}^c \vec{f}_{ji}. \quad (2.21)$$

čia i – taško trajektorijoje eilės numeris, J – pjezoroboto segmento numeris, $J = 1, 2, 3$.

Kiekvieno segmento generuojama jėga proporcinga valdymo signalo įtampos amplitudei $\vec{f}_{ji} = k \cdot u_{ji}$, kur k – koeficientas priklausantys nuo pjezoroboto konstrukcijos parametrų, tokiu būdu keičiant įtampą galima keisti jėgą.



2.15 pav. Judesio generavimo duotąja trajektorija schema

Fig. 2.15. The scheme if motion generator by given trajectory

Toks variantas realizuojamas suplanuotai trajektorijai atkartoti, tačiau realiose situacijose pjezoroboto greitis nėra pastovus visame trajektorijos ilgyje.

Pjezorobotas juda trajektorija $S(x(t), y(t))$ plokštumoje, kur t – lygties parametras. Lygties sprendiniai yra atskirų segmentų generuojamos jėgos $|\vec{f}_{ji}|$ ir atstojamoji jėga $|\vec{F}_i|$ veikianti trajektorijos taške $(x(t_i), y(t_i))$. Jėgos gali tenkinti dvi sąlygas: $|\vec{f}_{ji}| \in [0, f_{max}]$ ir $|\vec{f}_{ji}| \in [f_{min}, f_{max}]$. Atstojamosios jėgos \vec{F}_i kryptis sutampa su liestinės kryptimi taške $(x(t_i), y(t_i))$.

Tam, kad pjezorobotas judėtų viena kryptimi:

$$|\vec{f}_{ji}| = f_{max}, \text{ kai } \varphi_{ji} = \min(\varphi_{1i}, \varphi_{2i}, \varphi_{3i}), \quad (2.22)$$

čia $\varphi_{ji} = \widehat{\vec{F}_i \vec{f}_{ji}}$.

Atskirų segmentų generuojamos jėgos:

$$|\vec{f}_{ji}| = \lambda_{ji} f_{max}, \quad (2.23)$$

čia λ_{ji} proporcingumo koeficientas randamas pagal:

$$\lambda_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{kai } \varphi_{ji} = \min([\varphi_{ji}]); \\ 0, & \text{kai } \varphi_{ji} \geq \beta; \\ \frac{\sin(\beta - \varphi_{ji})}{\sin \varphi_{ji}}, & \text{kitais atvejais,} \end{cases} \quad (2.24)$$

čia $\beta = \frac{360^\circ}{c}$ – kampas tarp elektrodų segmentų ašių.

Kai visų segmentų generuojamos jėgos žinomos, atstojamoji, judesį generuojanti jėga randama:

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1}^c \delta_{ji} \vec{f}_{ji}, \quad (2.25)$$

čia:

$$\delta_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq \varphi_{ji} < \beta \\ 0, & \text{if } \varphi_{ji} \geq \beta \end{cases}. \quad (2.26)$$

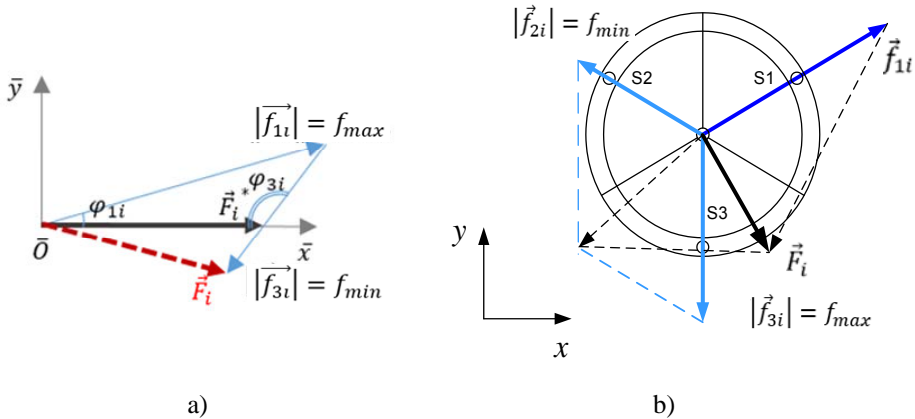
Pjezoroboto jėgų formavimo kolizijos gali atsirasti, jei reikiamas, pagal judėjimo kryptį segmentas yra išjungtas, kai generuojama jėga jame turi būti $|\vec{f}_{ji}| \in [f_{min}, f_{max}]$.

Atstojamosios jėgos vektoriaus skaitinė vertė $|\vec{F}_i|$ randama pagal segmentų generuojamų jėgų skaitinės vertės $|\vec{f}_{ji}^*|$ ir vektorių kryptis:

$$\begin{cases} |\vec{F}_i| \cos \theta_i = \sum_{j=1}^c |\vec{f}_{ji}^*| \cos \varphi_j, \\ |\vec{F}_i| \sin \theta_i = \sum_{j=1}^c |\vec{f}_{ji}^*| \sin \varphi_j. \end{cases} \quad (2.27)$$

čia θ_i – kampas tarp tangentes ir x ašies, ir segmento generuojama jėga.

Atstojamosios jėgos vektoriaus formavimas atskirais segmentais pateikimas 2.16 paveiksle.



- a) 2.16 pav. Jėgų atstojamoji:
 a) – gretimų segmentų generuojamos jėgos ir jėgų atstojamoji,
 b) – visų pjezoroboto segmentų generuojamų jėgų atstojamoji

Fig. 2.16. The total force:

- a) – adjacent segments generated forces and total force,
 b) – the resultant of all forces generated by all segments

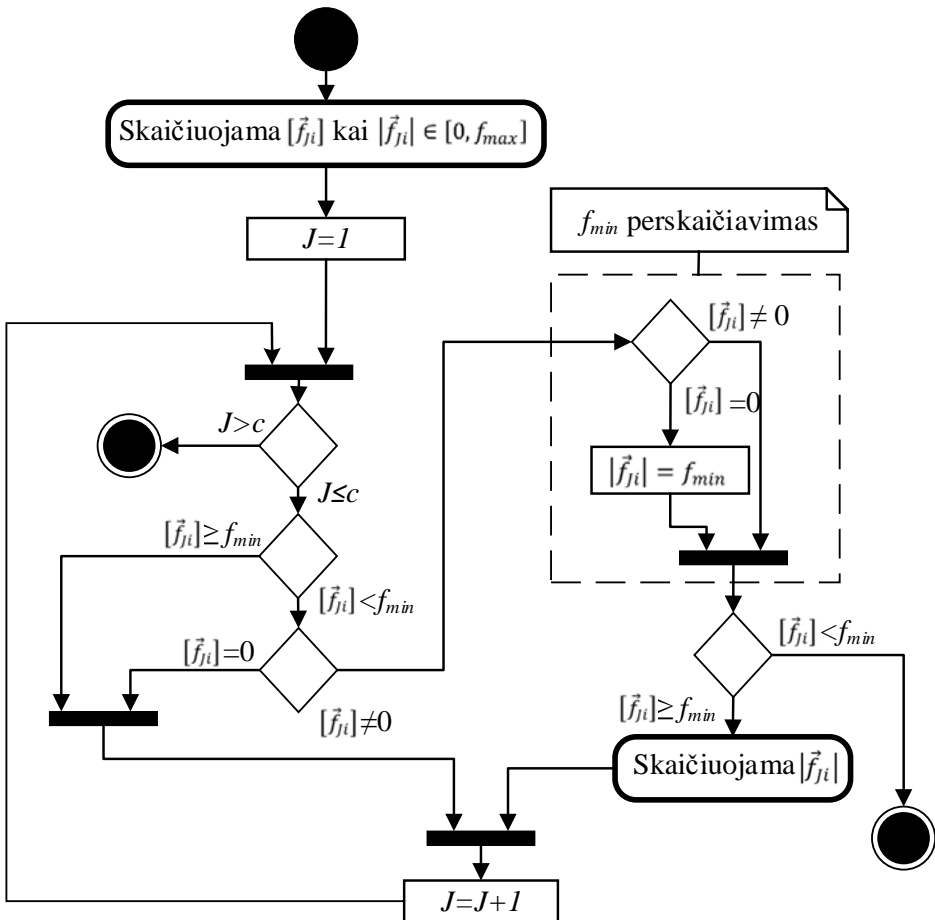
Pjezoroboto judesį generuojanti atstojamoji jėga:

$$|\vec{f}_{ji}| = \begin{cases} f_{min}, & \text{kai } |\vec{f}_{ji}| = 0, \\ f_{max}, & \text{kai } \varphi_{ji} = \min([\varphi_{ji}]), \\ |\vec{f}_{ji}^*|, & \text{kitais atvejais} \end{cases} \quad (2.28)$$

Remiantis anksčiau pateiktu valdymo metodo matematiniu aprašu buvo sudarytas bendrais trajektorijos formavimo jėgų atstojamosios principu algoritmas, kuris pateiktas 2.17 paveiksle.

Vykdamas algoritmą skaičiuojama kiekvieno segmento ($J = 1$) generuojama jėga reikiamu lako momentu. Veiksmai atliekami kai reikalinga segmento jėga yra didesnė už minimalią vertę arba lygi minimaliai – $|\vec{f}_{j1}| \geq f_{min}$, kai $|\vec{f}_{j1}| < f_{min}$ segmentas išjungiamas.

Minimali jėga konkrečiame segmente perkaičiojama kiekvienos iteracijos metu, esant papildomai sąlygai, kai ji nelygi 0 – $|\vec{f}_{j1}| \neq 0$.



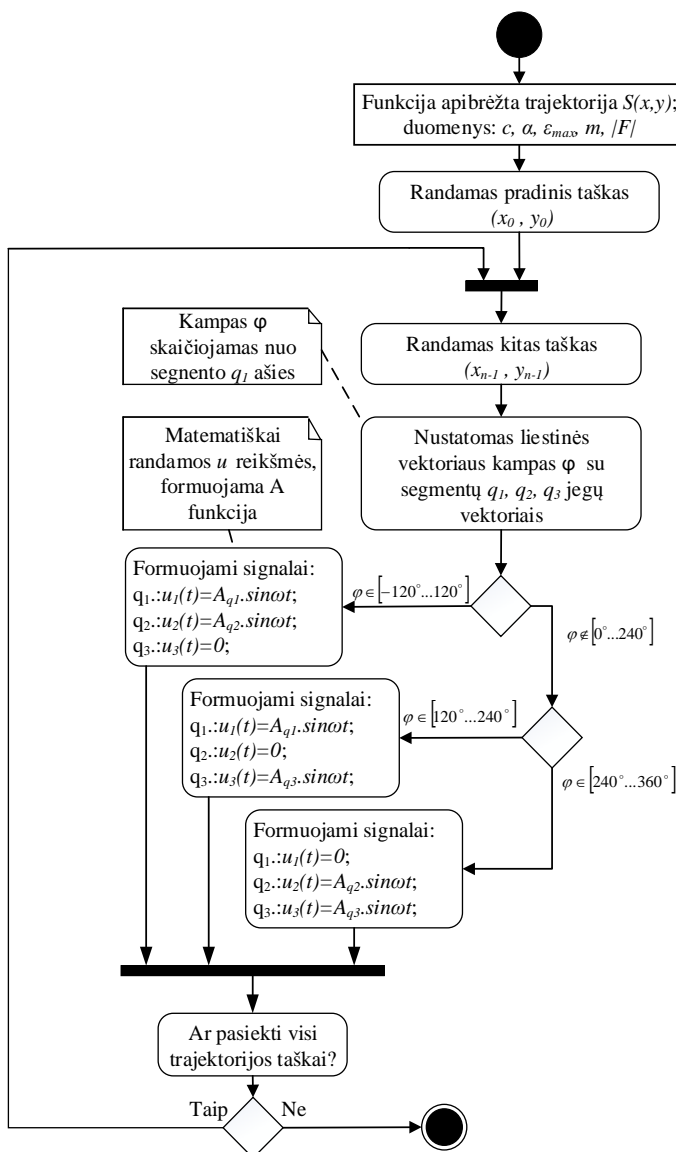
2.17 pav. Bendrais trajektorijos formavimo jėgų atstojamosios principu algoritmas

Fig. 2.17. The trajectory formatting algorithm formation by total force method

Valdymas vykdomas pagal kampą φ su trajektorijos liestine (žr. 2.15 pav.) keičiant signalo amplitudę $u_{ji}(t)$ kiekvienam pjezoroboto elektrodui.

Pagal anksčiau aprašytą matematinį modelį ir remiantis 2.17 pav. pateiktu bendriju algoritmu sudarytas konkretus valdymo elektriniais signalais algoritmas, kuris pateiktas 2.18 paveiksle.

Pradiniai duomenys algoritmo vykdymui analogiškai algoritmui pateiktam 2.13 paveiksle, – tai matematiškai aprašyta trajektorijos kreivė $S(x,y)$ pradinės kintamųjų c , α , ε_{max} , m , ir $|\vec{F}|$ reikšmės. Tolesnė algoritmo esmė yra judėjimo krypties kampo sustatymas pirmojo segmento atžvilgiu, pagal kurį vykdomas kompleksinio signalo $q_1 \in u_1(t)$, $q_2 \in u_2(t)$, $q_3 \in u_3(t)$ formavimas segmentams.



2.18 pav. Pjezoroboto valdymo atstojamosios jėgos principu algoritmas
Fig. 2.18. Total forces method algorithm of piezorobot control signals

Išskirtinė algoritmo savybė ta, kad galima dinaminis signalo keitimas valdant pjezoroboto judėjimo kryptį ir greitį, nes greitis proporcingas segmento gene-

ruojamai jėgai. Bet kurio metu, todėl gaunamas greičio parametras šiuo atveju turi tik maksimalią reikšmę.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

Apibendrinus antrame skyriuje pateiktus algoritmus galima daryti šias išvadas:

1. Pjezorobotui su trimis kontaktiniais taškais ir turinčiam tris nepriklausomus žadinimo elektrodais valdyti taikomos šias žadinimo schemas:

1.1. Vieno elektrodų segmento schema su aktyviu vienu kontaktiniu tašku tiesiaieigiam pjezoroboto judėjimui;

1.2. Visų (trijų) elektrodų segmentų žadinimo schema su visais aktyviais kontaktiniais taškais, skirta sukamojo judėjimo generavimui.

1.3. Dviejų gretimų segmentų generuojama jėga, kurios krypties vektorių ir jėgos stiprį galima valdyti valdymo signalu.

2. Pjezoroboto judėjimui duotąją trajektoriją formuoti galima taikyti šiuos judesio formavimo metodus:

2.1. Trajektorijos formavimas neatliekant sukamojo judesio, kai tiesiaieigį judėjimą formuoja tik vienas aktyvus pjezoroboto segmentas, o trajektorijos kelias sudarytas iš aibės tiesių atkarpų;

2.2. Trajektorijos formavimo metodas su sukamuoju judesiu, kai trajektorijos kelias formuojamas iš tiesių atkarpų, o jų susikirtimo taškuose pjezorobotas atlieka sukamąjį judesį bėgančios bangos principu;

2.3. Trajektorijos formavimo metodas pastoviai veikiančių jėgų atstojamosios principu, kai judėjimo kelias formuojamas pagal trajektorijos liestinę kiekviename taške, o pjezorobotas judėdamas šiuo metodu gali sukurti bet kurio laiko momentu arba judėti tiesiai.

3

Plokštumoje judančių pjezorobotų valdymo sistemos sukūrimas

Valdymo tikslas nusakomas kaip pageidaujama valdomos sistemos išėjimo reikšmė. Tokiu atveju sukuriama valdymo sistema, kuri siunčia pjezorobotui valdymo signalus. Dažnai į šią sistemą patenka ir trikdžiai, kurių poveikį valdymo sistema turi kompensuoti. Tokia sistema gali remtis pageidaujamo išėjimo reikšme (atviroji valdymo sistema) arba skirtumu tarp pageidaujamos ir tikrosios išėjimo reikšmės (uždaroji valdymo sistema). Programinis pjezoroboto valdymas, konkrečiu atveju, suprantamas ne tik kaip pjezoroboto judėjimo plokštumoje planavimas, bet ir kaip tam tikrų išorinių trikdžių arba pačio pjezoroboto parametrų išbarstymo kompensavimas.

Į pjezorobotų valdymo sistemos uždavinius įeina:

1. Išorinių jėgų poveikio kompensavimas palaikant išėjimo rezultatą artimą suplanuotam taikant reguliavimo pagal trikdį principą.

Šiose sistemose valdymo poveikis formuojamas išmatavus pjezoroboto trikdantį poveikį, t. y. nueito kelio ir greičio priklausomybę nuo veikiamo signalo parametrų. Tokia sistema neturi grįžtamojo ryšio, t. y. yra atvira, kurioje iš anksto žinomos išmatuoto trikdžio vertės kompensuojamos programinėmis priemonėmis. Taikant kokį metodą pjezoroboto valdymui galima būtų kompensuoti plokštumos, ant kurios jis juda, paviršiaus netolygumą.

2. Pjezoroboto savųjų parametrų išbarstymo kompensavimas programinėmis priemonėmis taikant reguliavimo pagal nuokrypą principą.

Tokioje automatinėje valdymo sistemoje valdymo signalas formuojamas pagal reguliuojamojo parametro nuokrypą nuo nuostato reikšmės, tai galima teigti, kad tokia sistema sudaryta reguliavimo pagal nuokrypą arba grįžtamojo ryšio principu. Tokių sistemų reguliavimo įtaise palyginamos reguliuojamojo parametro esamosios ir nuostato reikšmės ir pagal gautą skirtumą formuojamas valdymo signalas.

Kadangi konkretaus, plokštumoje judančio pjezoroboto trajektorija turi būti kiek galima artima suplanuotai nepriklausomai nuo valdomo įrenginio parametrų išbarstymo, ir judėjimo greitis turi būti artimas numatytam, tai valdymo sistema turėtų spręsti abu, anksčiau išvardintus uždavinius. Tokios kombinuotos valdymo sistemos kūrimui skiriamas trečias skyrius.

3.1. Plokštumoje judančių pjezorobotų valdymo sistema

3.1.1. Valdymo modelio sudarymas

Pjezoroboto valdymo modelis parenkamas remiantis pradinėmis sąlygomis ir numatomais realizuoti valdymo uždaviniais. Tam, kad pjezorobotas vykdytų iš anksto aprašytą algoritmą reikalinga automatinė valdymo sistema.

Valdymo sistemos esmė yra analizuoti kintamuosius, rasti sprendimus, kaip efektyviai keisti įėjimo signalus, kad būtų galima gauti pageidautiną rezultatą išėjime. Valdymo sistemos užduotis sąlygiškai turi tokias bendrines funkcijas (Ivanauskas A. 2005):

1. Išėjimo kintamųjų stebėjimas juos matuojant.

2. Racionalių valdymo sprendimų priėmimas ar algoritmų taikymas, atsižvelgiant į situaciją ir remiantis informacija apie esamą ir pageidaujamą sistemos būseną.

3. Efektyvus tokių sprendinių įgyvendinimas.

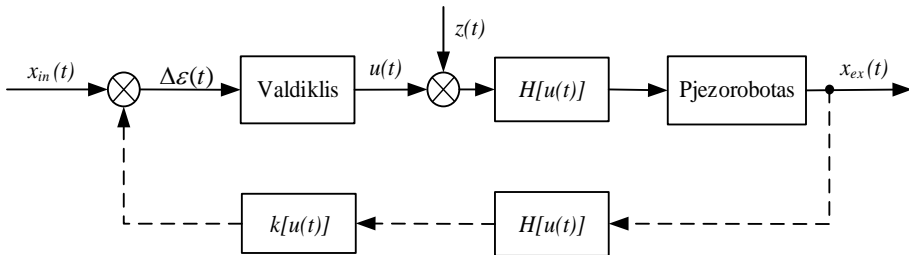
Nors plokštumoje judančio pjezoroboto valdymo uždavinys yra specifinis, automatinio valdymo sistema sudaroma remiantis bendrais principais. Iš galimų valdymo sistemų modelių konkrečiam pjezoroboto valdymui taikytinos tokios:

1. Stabilizavimo sistema – tai valdymo sistema, kuri duotu tikslumu palaiko pjezoroboto judėjimą trajektorija pastoviais reguliuojamais parametrais, su paklaida, ne didesne už leistiną.

2. Programinio valdymo sistema, kuri keičia reguliuojamuosius parametrus pagal iš anksto nustatytą programą (suplanuotą trajektoriją).

3. Automatinio reguliavimo sistema (ARS), kuri keičia reguliuojamuosius parametrus pagal iš anksto nežinomą laiko funkciją, apibūdinamą suplanuotos trajektorijos nuostatu. Tokioje sistemoje reguliuojami dydžiai turi sekti nuostato poveikius, kurie gali būti aprašomi lėtai kintančia iš anksto nežinoma laiko funkcija (Daniel, J., et al. 2009).

Kadangi eksperimentinių tyrimų tikslas yra tik patikrinti valdymo metodu tinkamumą plokštumoje judantiems pjezorobotams valdyti, buvo parinkta kombinuota valdymo sistema su programiškai koreguojamais grįžtamojo ryšio parametrais. Sistemos struktūrinė schema pateikta 3.1 paveiksle.



Grįžtamasis ryšys taikomas tik pradinėje (kalibravimo) fazėje

3.1 pav. Valdymo sistemos sandaros schema

Fig. 3.1. Control system block diagram

Valdymo sistemos įėjime formuojami įėjimo parametrai $x_{in}(t)$ gauti iš matematinio teorinės trajektorijos aprašo. Valdiklis valdo pjezorobotą elektriniu signalu $u(t)$, gautu iš įėjimo parametrų ir pjezoroboto charakteristikų netiesiškumo. Parametras $z(t)$ aprašo išorinio poveikio, tokio kaip pjezoroboto inercija, plokštumos netolygumas, plokštumos sukibimo su pjezoroboto mechaniniais kontaktais išsibarstymas ir kitus sunkiai prognozuojamus veiksnius, kurie turi įtakos valdymo signalo poveikiui. Valdymo poveikis šioje sistemoje formuojamas atsižvelgiant į skirtumą $\Delta \varepsilon(t)$ tarp nuostato ir reguliuojamojo parametro $x_{ex}(t)$ išėjime: $u = F(\Delta \varepsilon)$. Pagrindinius pjezoroboto judėjimui įtaką darančius parametrus, tokius kaip histerezės poveikį bei atskirų pjezoroboto segmentų generuojamų jėgų netolydumą galima išmatuoti ir vėliau koreguoti programiškai (Liu Y., et al. 2013, Hariri H. et al. 2010.). Histerezės parametrai $H[u(t)]$ turi įtakos valdymo signalui, ir tie patys parametrai įvertinami per grįžtamąjį ryšį (Mohammad J., et al. 2009, Juhasz L., et al. 2011). Kita parametru visuma $k[u(t)]$ aprašo jėgas judesį formuojančių jėgų netiesinę priklausomybę nuo valdymo signalo stiprio. Tokią valdymo sistemą galima laikyti sistema su daliniu grįžtamoju ryšiu, nes grįžtamojo ryšio parametrai koreguojami tik pradinio momentu.

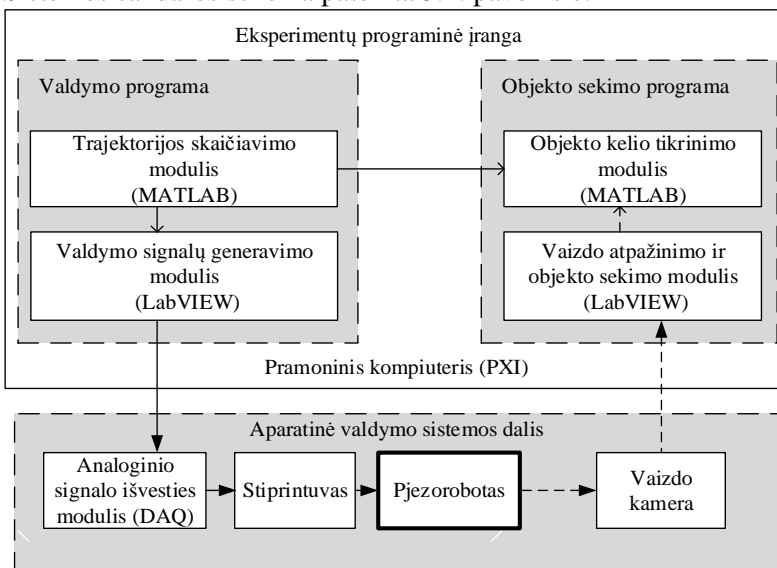
Prieš parenkant automatinio valdymo principą ir sudarant valdymo modelį reikalinga nustatyti išmatuojamus ir prognozuojamus paties pjezoroboto parametrus, valdymo signalų sistemos galimybes ir stabilumą bei prognozuojamus aplinkos poveikius.

Valdymo sistema buvo parinkta, atsižvelgiant į turimas priemones. Stiprinimo koeficientai parinkti pagal pjezokeramikos žadinimo įtampas.

Siekiant įsitikinti anksčiau aprašyto valdymo modelio pagrįstumu, VGTU Fundamentinių mokslų fakulteto laboratorijoje buvo sudaryta reali eksperimentinė sistema.

3.1.2. Valdymo sistemos struktūros sudarymas

Eksperimentinė sistema sukurta pjezoroboto valdymui ir trajektorijos judėjimo trajektorijos matavimui. Sistemą sudaro cilindrinis pjezorobotas, valdymo signalų formavimo dalis ir vaizdo apdorojimo sistema, skirta roboto trajektorijos matavimui. Sistemos sandaros schema pateikta 3.2. paveiksle.



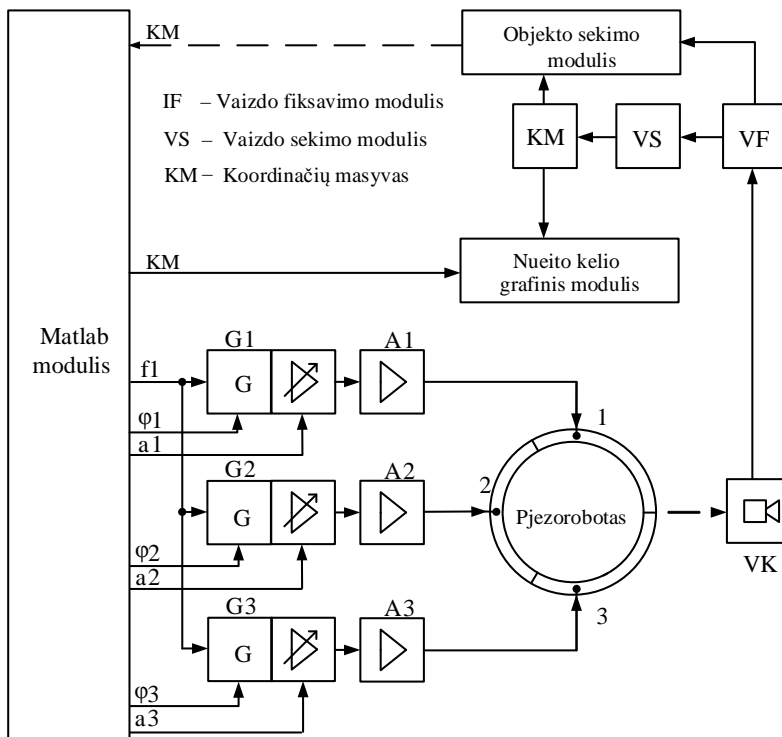
3.2 pav. Pjezoroboto valdymo ir trajektorijos matavimo sistemos sandaros schema
Fig. 3.2. The structure of the piezobot control and path verification system

Valdymo sistemą (žr. 3.2. pav.) sudaro pramoniniame PXI (angl. *Peripheral Component Interconnect Extensions for Instrumentation*) tipo kompiuteryje veikianti LabVIEW pagrindu sukurta valdymo programa, kurioje matematinės funkcijas atlieka įdiegtas MATLAB modulis, skirtas pjezoroboto pasukimui ir judėjimo trajektorijos apskaičiavimui (Bansevicius R. et al. 2016). Tokia

MATLAB ir LabVIEW kombinacija leido lanksčiai keisti eksperimento sistemą, adaptuojant ją bet kokiems trajektorijų skaičiavimo ir valdymo uždaviniams spręsti. Valdymo signalo formavimo ir paskirstymo pjezoroboto segmentams modulis sukurtas LabVIEW pagrindu.

Jis generuoja sinusinį signalą ir pagal gaunamas iš MATLAB valdymo kintamuosius paskirsto signalą skirtingiems cilindrinio pjezoroboto segmentams pagal 2.22 paveiksle pateiktą algoritmą. Plokštumoje judantis pjezorobotas yra valdomas analoginiu signalu, todėl jam formuoti naudojamas analoginio signalo išvedimo modulis suderinamas su pramoniniu PXI kompiuteriu. Kadangi sužadinti pakankamos amplitudės virpesius realiame pjezoelektriniame judesio keitiklyje reikia didelės įtampos signalo, sukurtas analoginio signalo stiprintuvas leidžiantis sustiprinti ir suderinti sistemą su talpine pjezoelektrinio cilindro apkrova. Pjezoroboto kelio sekimo sistema sudaryta iš aukštos raiškos vaizdo kameros, vaizdo atpažinimo ir objekto sekimo modulių realizuoto LabVIEW programa ir kelio tikrinimo modulių, kuri sulygina gautas koordinates su apskaičiuotomis (Singh P. et al. 2011, NI Inc. 2010, 2014, Borah, M., et al. 2014.).

Sistemos veikimą iliustruoja 3.3 paveiksle pateikta funkcinė schema.



3.3 pav. Pjezoroboto valdymo sistemos funkcinė schema

Fig. 3.3. Piezobot and trajectory tracking system function block diagram

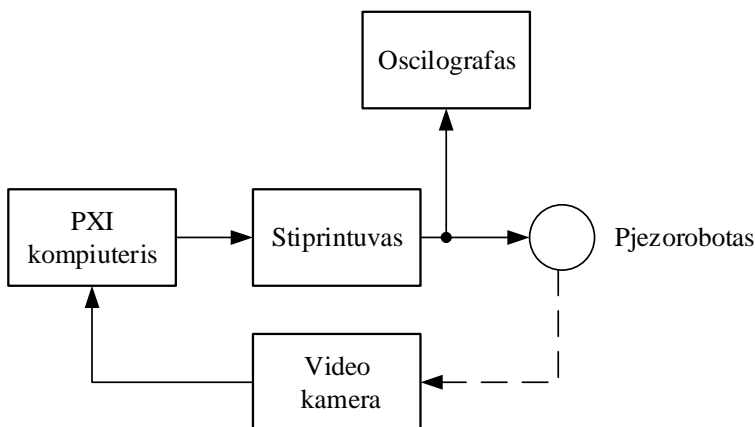
Pateiktoje funkcinėje schemoje (žr. 3.3 pav.), sistemos pagrindą sudaro matematinis modulis, realizuotas naudojant MATLAB matematinį paketą. Skaičiuojama pjezoroboto judėjimo trajektorija ir ji išreiškiama per atskirus valdymo signalų kintamuosius. Modulio išėjime gaunami kintamieji: f – valdymo signalo dažnis, kuris atitinka rezonansinį pjezoelektrinio cilindro dažnį; amplitudės a_1 , a_2 ir a_3 , skirtos jėgai kontaktiniuose taškuose formuoti; signalo pradinės fazės ϕ_1 , ϕ_2 ir ϕ_3 , reikalingos bėgančiai bangai generuoti, kada programiškai valdomas signalų fazių skirtumas. Dažnio formavimo kintamuoju f , sinchronizuojami loginiai generatoriai G_1 , G_2 ir G_3 , skirti kiekvieno segmento sinusiniam signalui formuoti. Kiekvienas generatorius valdomas keičiant generuojamo sinusinio signalo dažnį, amplitudę ir fazę per kintamųjų vertes f , a_1 , a_2 , a_3 , ϕ_1 , ϕ_2 ir ϕ_3 , gaunamas iš matematinio modulio. Generatoriai buvo realizuoti LabVIEW programos terpėje kartu su etaloninio laiko signalų šaltiniu. Iš generatorių gaunamas loginis signalas keičiamas elektriniu ir perduodamas į stiprintuvus A_1 , A_2 , ir A_3 .

Signalų stiprintuvai A_1 , A_2 ir A_3 buvo realizuoti aparatinėmis priemonėmis ir skirti elektriniam signalui, gautam iš pramoninio kompiuterio DAQmx išvesties modulio, sustiprinti. Pjezoelektrinis cilindras valdomas trimis signalais ir trijuose kontaktiniuose taškuose S_1 , S_2 ir S_3 sukuria tris skirtingas pjezoroboto judėjimą realizuojančias jėgas.

3.1.3. Aparatinė valdymo sistemos įranga

Remiantis anksčiau apibūztomis valdymo funkcijomis ir valdymo schema sudaryta pjezoroboto valdymo sistema.

Aparatinės valdymo sistemos dalies funkcinė schema pateikta 3.4 paveiksle.

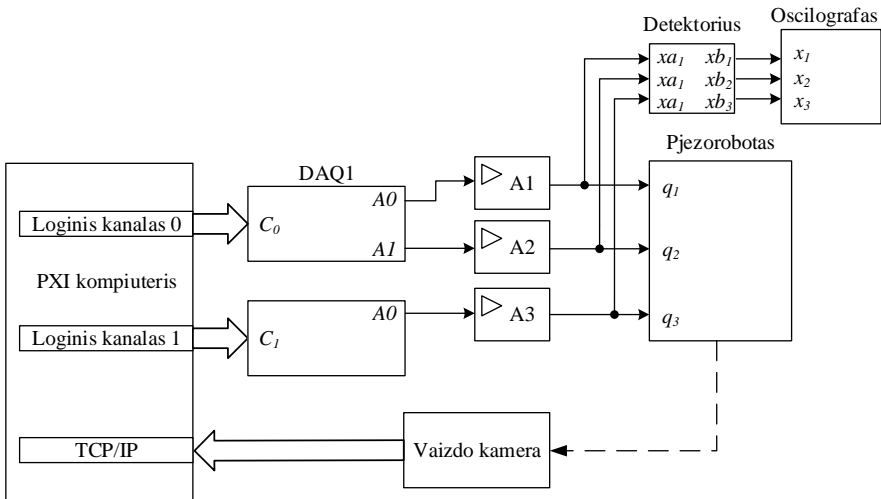


3.4 pav. Valdymo sistemos struktūrinė schema
Fig. 3.4. Experimental control system structure diagram

Pramoninis PXI kompiuteris su jame veikiančia valdymo programine įranga skirtas valdymo signalams generuoti. Stiprintuvus sustiprina iš kompiuterio gaunamą signalą iki tokio dydžio, kad pjezorobotas galėtų jį paversti judesį generuojančia mechanine energija. Signalo laikinės diagramos stebimos oscilografu. Pjezorobotas juda plokštumoje apibrėžta trajektorija, kuri registruojama vaizdo kamera ir duomenys perduodami atgal į kompiuterį, tam, kad galima būtų įvertinti trajektorijos tikslumą ir išorinių veiksnių įtaką judėjimui.

Sistemos pagrindas yra pramoninis PXI kompiuteris (PXIe-1062Q), kuriame veikia valdymo sistemos programinė dalis. Skaitmeniniai – analoginiai įvesties–išvesties įrenginiai DAQ1 ir DAQ2 (BNC-2090A), skirti formuoti analoginį valdymo signalą, skirtą atskirų pjezoroboto aktyviųjų sričių žadinimui. Skaitmeninio–analoginio įrenginio suformuotas signalas yra per silpnas, kad galėtų valdyti didelės įtampos ir vidutinės srovės signalo reikalaujanti pjezorobotą, tam reikalingi stiprintuvai A1 – A3. Stiprintuvų perdavimo funkcija valdomo signalo atžvilgiu yra tiesinė, stiprinimo kanalų skaičius atitinka pjezoroboto aktyviųjų segmentų skaičių. Trijų kanalų stiprintuvus buvo sukurtas specialiai šiai eksperimentinei sistemai. Pagrindinis stiprintuvo reikalavimas maksimaliai tiesinės dažnio ir fazės perdavimo funkcijos, be to, stiprintuvus turi dirbti su talpine apkrova ir atlaikyti dešimteriopą perkrovą piko metu. Signalo monitoringui realiu laiku naudojamas oscilografas, kuris prijungtas prie stiprintuvo išėjimo per detektorių. Detektorius skirtas eliminuoti neinformatyvų aukšto dažnio signalą, išskiriant tik esminę impulso dalį.

Detali sistemos sandaros schema pateikta 3.5 paveiksle.



3.5 pav. Eksperimentinės sistemos aparatinės įrangos principinė schema

Fig. 3.5. Control systems hardware schematic diagram

Tam, kad sistema galėtų valdyti sąlyginai didelę momentinę apkrovą pagal elektrinio signalo srovę turintį pjezokeraminį cilindrą reikalingas papildomas stiprintuvas. Pagrindinis stiprintuvo parametras yra jo perdavimo funkcija:

$$u_{ex}=Ku_{in}, \quad (3.1)$$

čia K – perdavimo (stiprinimo) koeficientas, u_{in} – įėjimo įtampa, u_{ex} – išėjimo įtampa,

Pagrindinės stiprintuvo techninės charakteristikos:

Signalų įtampa išėjime – 0 – 200 V;

Išėjimo apkrova varža – ≥ 1 k Ω

Išėjimo apkrova talpa – ≥ 100 nF

Signalų įtampa įėjime – 0 – 10 V;

Harmoninių iškrypimų koeficientas – ≤ 1 %

Faziniai iškrypimai – $\leq 0,5$ %

Ypatingas dėmesys turi būti skiriamas ne tik padidintai išėjimo įtampai ir srovei, bet minimaliems faziniams iškrypimams tarp kanalų. Šis parametras aktualus taikant valdymo metodus, kai pjezorobotas sukasi apie savo ašį valdant bėgančią bangą su 120o signalo fazių skirtumu tarp pjezoroboto segmentų.

Pjezorobotas, turintis tris aktyvius valdymo segmentus q1, q2, q3, yra valdomas signalais ir juda plokštumoje pagal suplanuotą trajektoriją. Judėjimo trajektorijos stebėjimui naudojama aukštos raiškos vaizdo kamera.

Kameros techninės charakteristikos:

Įrenginio pavadinimas – Basler pilot piA2400–17gm;

Skiriamoji geba – 2456×2058 pikseliai;

Optinis židinio nuotolis – 250 mm.;

Kadro raiška – 5 MP;

Filmavimo sparta – 17 k/s;

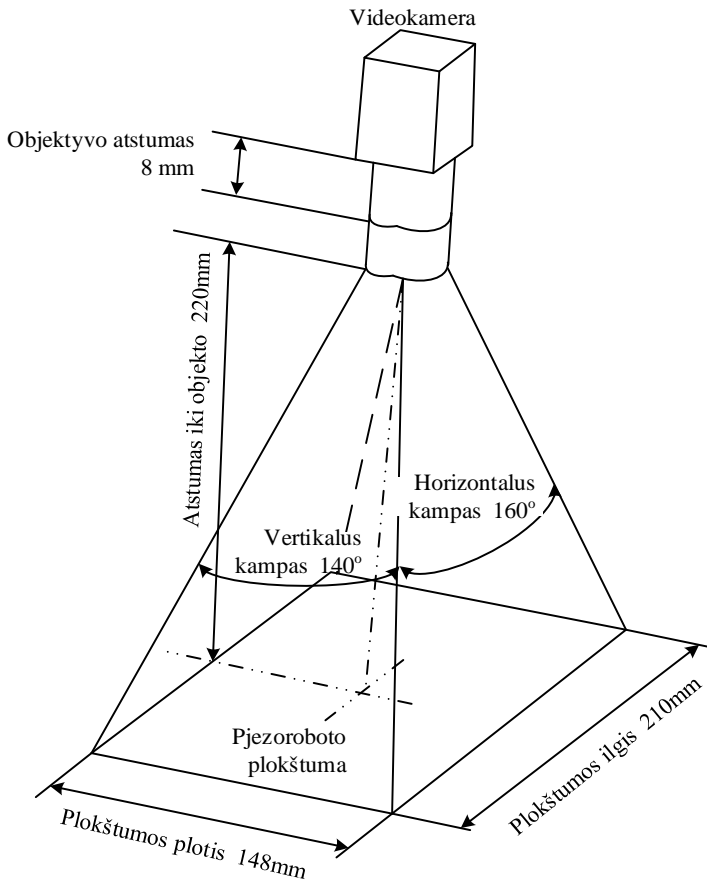
spalvų atkūrimo geba – 14 bit monochrominė;

Duomenų perdavimo sąsaja – Gigabit Ethernet 1000BASE-T.

Videokamera montuojama horizontaliai, plokštumos, kurioje juda pjezorobotas atžvilgiu. Atstumas parenkamas pagal kameros tipą, naudojamą objektyvą ir plokštumos parametrus. Kameros konfigūracijai taikoma automatinė gamintojo programinė aplinka „BLASTER LensSelector“ (Breguet M., et al. 2006).

Bendras vaizdo kameros tvirtinimo virš stacionarios plokštumos eskizas pateiktas 3.6 paveiksle. Vaizdo kamera tvirtinama tokia 220mm. aukštyje virš pjezoroboto judėjimo plokštumos. Kameros suderinimas su dinamine pjezorobotų valdymo sistema vykdomas programiškai nustatant optimalų filmuojamą lauką ir optinėmis priemonėmis parenkant židinio nuotolį.

Tokiu būdu suderinta vaizdo kamera yra integruojama į vieningą pjezorobotų valdymo sistemą.



3.6 pav. Vaizdo kameros konfigūravimas

Fig. 3.6. The configuration of the video camera

Parinkus vaizdo kameros poziciją ir atstumą nuo filmuojamo objekto bei įtvirtinus ją vertikaliai pagal aukštinę, išvestą iš plokštumos centro, atliekamas vaizdo kameros kalibravimas programinėmis priemonėmis.

Svarbiausias tyrimo sistemos komponentas yra tiriamas pjezorobotas. Parenkant pjezoelektrinį cilindrą ir siekiant nustatyti mechaninius, ir elektrinius pjezoroboto parametrus, buvo atliktas skaitinis modeliavimas taikant baigtinių elementų metodą – BEM (Stoer, J.; Bulirsch, R. 2002.).

Pjezorobotas yra cilindrinio tipo pjezomechaninis keitiklis – cilindras pagamintas iš PZT-4 pjezokeramikos, kurio išorinis diametras $D = 33$ mm, vidinis $d = 28$ mm, aukštis $h = 21$ mm, sienelių storis – 5 mm. Cilindro vidinis paviršius padengtas ištisiniu elektrodu, išorinis paviršius padalintas į tris lygias dalis.

Cilindro apačioje yra trys simetriškai, 120° kampu viena kitos atžvilgiu išdėstytos kojos, kurios yra kontaktiniai taškai su pasyvia plokštuma (žr. 3.7 pav. a).

Viršutinę pjezoroboto dalį dengia skritulys, geometriniais parametrais atitinkantis cilindro išorinį diametrą D (žr. 3.7 pav. b). Skritulio centre yra juodas, skritulys, kurio centras atitinka pjezoroboto geometrinį centrą, kitas tamsus taškas yra orientacijos žymė.



3.7 pav. Cilindrinis pjezorobotas su trimis kontaktiniais taškais:

a) – kontaktinių taškų topologija, b) – bendras pjezoroboto vaizdas,

čia: a – elektrodų segmentai, b – kontaktiniai taškai, c – pjezoroboto cilindras,

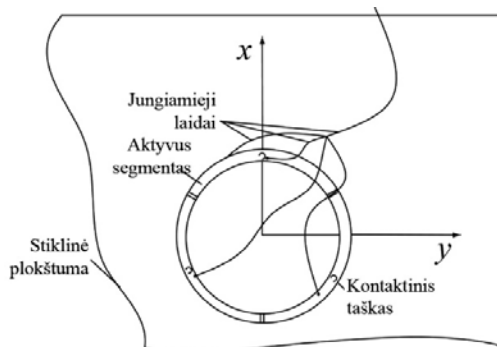
d – mažoji žymė, e – didžioji žymė

Fig. 3.7. The cylinder-type piezobot with three contact points:

a) – the topology of contact points, b) – piezobot's common view,

where c – small control tag, d – big control tag

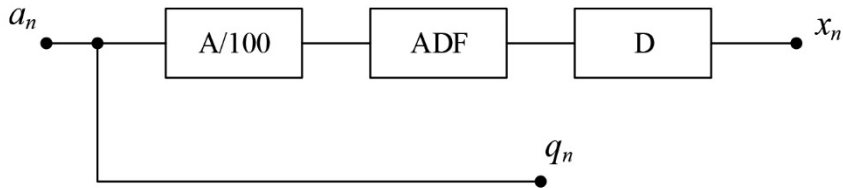
Kinematinė pora pjezorobotas – stacionari plokštuma sudaryta iš pjezoroboto ir stacionarios stiklinės plokštumos. Pjezorobotas juda ant horizontalios stiklinės plokštumos, kurios paviršius apdirbamas siekiant sumažinti šerpėtumą ir taip išlyginti susidarantią trinties jėgą visame plokštumos paviršiuje. Pjezorobotą su valdymo sistema jungiamas lanksčiais laidais, kurių poveikis judėjimui yra minimalus. Plokštumoje judančio pjezoroboto eskizas pateiktas 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Plokštumoje judantis pjezorobotas

Fig. 3.8. Piezobot moving on a plane

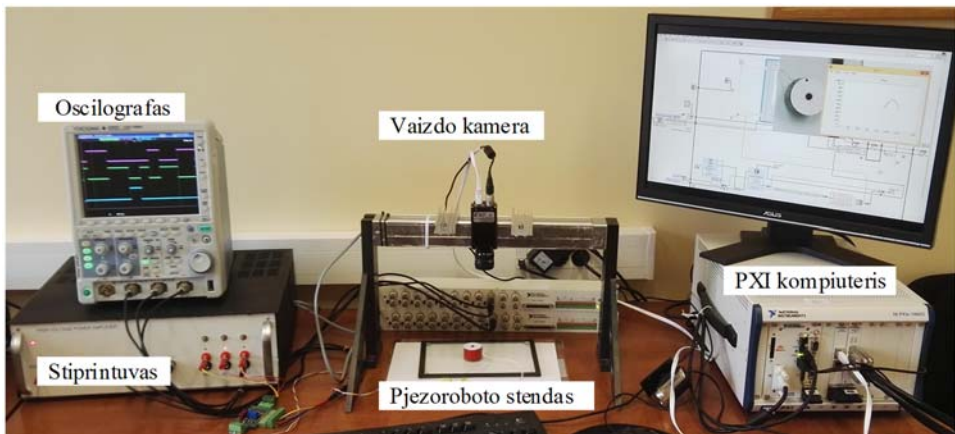
Oscilografas – sistemos įrenginys skirtas valdymo signalo monitoringui realiuoju laiku ir jungiamas prie stiprintuvo išėjimo per detektorių, su kuriuo pašalinama aukšto dažnio signalo dedamoji. Oscilografo jungimo schema pateikta 3.9 paveiksle.



3.9 pav. Oscilografo jungimo schema
Fig. 3.9. Oscilloscope's connection diagram

A/100 yra atenuatorius, kurio slopinimo koeficientas yra 100, po jo jungiamas aukšto dažnio filtras ADF ir detektorius D. a_n – signalas gaunama iš stiprintuvo, q_n – signalas perduodamas į pjezoroboto segmentą, x_n – signalas perduodamas į oscilografo vieną iš įėjimų. Toks jungimo metodas leidžia ne tik eliminuoti neinformatyvų aukšto dažnio signalą, bet ir beveik nedaro įtakos pjezoroboto valdymo elektriniam signalui.

Bendras VGTU laboratorijoje sumontuotos eksperimentinės sistemos vaizdas pateiktas 3.10 paveiksle.



3.10 pav. Eksperimentinė sistema
Fig. 3.10. The experimental system

Ši sistema buvo sukurta kaip universalus laboratorinis kompleksas skirtas įvairiems plokštumoje judančių pjezorobotų tyrimams.

3.2. Programinės valdymo sistemos įrangos sukūrimas

Programinė valdymo sistemos dalis sukurta remiantis anksčiau aprašytu valdymo modeliu ir parinkta realizavimo koncepcija. Programinės priemonės parinktos atsižvelgiant į eksperimentinės sistemos aparatinę įrangą ir jos galimybes. Kitos svarbios sąlygos parenkant programinės įrangos realizacijos variantą yra eksperimento kokybinių parametrų užtikrinimo galimybės ir realizacijos prieinamumas bei paprastumas. Programinių priemonių prieinamumas vartotojo atžvilgiu taip pat buvo įvertintas tuo požiūriu, kiek ir kokių papildomų sąnaudų reikės įsisavinant naujus programinius paketus ir programavimo metodus.

3.2.1. Programinės įrangos koncepcija ir architektūra

Parenkant programinę valdymo sistemos koncepciją svarbu įvertinti dvi esmines funkcijas: pjezoroboto valdymo elektriniais signalais funkcija ir jo nueito kelio plokštumoje registravimo funkcija.

Pirmai funkcijai realizuoti geriausiai tinka MATLAB programinės priemonės, nes yra patogu apdoroti matematinium modeliu išreikštą apskaičiuotą pjezoroboto judėjimo plokštumoje trajektoriją. Matematinio signalo išreiškimui fiziniu signalu geriausia taikyti LabVIEW programines priemones. Pjezoroboto nueito kelio registravimui taip pat patogu taikyti LabVIEW dėl gero aparatinės įrangos suderinamumo kartu su MATLAB dėl optimizuotų darbo su matematiniais modeliais galimybių (Abhishek K. G., et al. 2016, Goyal A., et al. 2017).

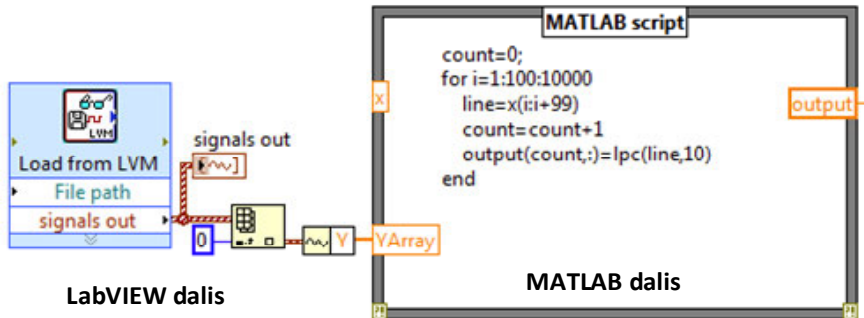
„National Instruments LabVIEW“ yra grafinė programavimo kalba. Ji turi daugiau lankstumo nei kiti standartiniai laboratoriniai instrumentai, nes jos bazė yra programinė įranga. „LabVIEW“ gali charakterizuoti aparatinės įrangos funkcionalumą. Ši programinė įranga taip pat turi savą virtualių įrenginių programinės įrangos aplikaciją. Su šia aplikacija galima valdyti užduotis pateiktas nuosekliu ir lygiagrečiu metodais.

„MATLAB“ yra programinė įranga, skirta įvairių mokslo šakų problemoms spręsti. Ši platforma taip pat turi virtualių įrenginių valdymo aplikacijas. „MATLAB“ programinė įranga yra labai populiari mokslinių tyrimų srityse. Įrangos bibliotekos yra plačios, daug funkcijų ir galimybių atliekančios. „MATLAB“ programinė įranga dėl jos sudėtingumo praranda greitį, todėl visos virtualių įrenginių valdymo aplikacijos dirba lėčiau nei pvz. „LabVIEW“. Kitas esminis MATLAB trūkumas yra tas, kad programinėmis priemonėmis sunku užtikrinti aparatinės įrangos valdymą.

Išanalizavus anksčiau aprašytas prielaidas nustatyta, kad pjezoroboto valdymo sistemos programinę įrangą tikslinga realizuoti MATLAB scenarijaus Lab-

VIEW terpėje pagrindu, kuris yra tiesioginis įrenginių programavimas „LabVIEW“ aplinkoje su „MATLAB“ scenarijumi. Šis metodas unikalus tuo, kad pasižymi greitu duomenų komunikavimu tarp „LabVIEW“ aplinkos ir „MATLAB“ scenarijaus (3.14 pav.). Scenarijaus branduolys, įterptas programoje naudoja „LabVIEW“ kintamuosius, o visus skaičiavimus atlieka „MATLAB“ branduolyje (Dictino, C., et al. 2013, Djermanova. N., et al. 2016, NI Inc 2014)

MATLAB scenarijaus pavyzdys pateiktas 3.11 paveiksle.



3.11 pav. MATLAB scenarijaus pavyzdys (NI Inc 2014)

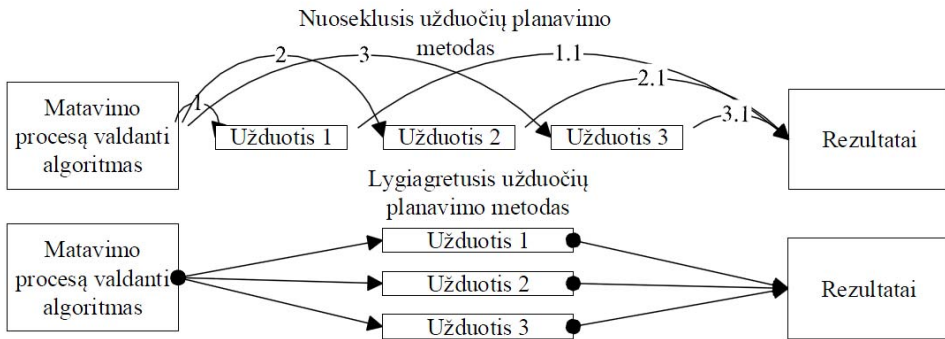
Fig. 3.11. The example of the MATLAB scenario (NI Inc 2014)

Šis komunikavimo būdas leidžia programoms dirbti tik iš anksto aprašius scenarijų. MATLAB scenarijaus pritaikymas LabVIEW terpėje yra ypač patogus, kai kuriama eksperimentinė programinė įranga, kadangi galima operatyviai keisti kintamųjų kieki ir programos struktūrą.

Automatizuojant tyrimo procesą svarbu užtikrinti greitą matavimo prietaisų aptarnavimą, todėl automatizuotiems matavimams yra priskiriama realaus laiko sąvoka. Norint aptarnauti matavimo prietaisus realiu laiku, reikalinga brangi ir tiksli techninė įranga, su greitais duomenų perdavimo kanalais. Aptarnaujant aparatinę įrangą programiškai yra naudojamas nuoseklusis ir lygiagretusis užduočių planavimo metodai. Taikant šiuos metodus atsiranda programinis lankstumas valdant matavimo prietaisus.

Nuoseklusis užduočių planavimo metodas taikomas tokiam automatizuotam valdymo procesui, kurio rezultatams didžiulę įtaką daro aparatinės įrangos techniniai parametrai. Naudojant nuoseklųjį metodą visos užduotys, iš programinės įrangos, aparatiniais prietaisams siunčiamos ir gaunamos nuosekliai. Naudojant lygiagretųjį užduočių planavimo metodą, užduotys siunčiamos vykdymo prietaisams taip, kad skirtingi vykdymo prietaisai galėtų dirbti lygiagrečiai. Naudojant šią užduočių planavimo metodiką yra funkcionaliau išnaudojamas matavimo algoritmą vykdomasis kompiuteris.

Nuoseklusis ir lygiagrečius užduočių planavimo metodus iliustruoja 3.12 paveiksle. pateikta diagrama.

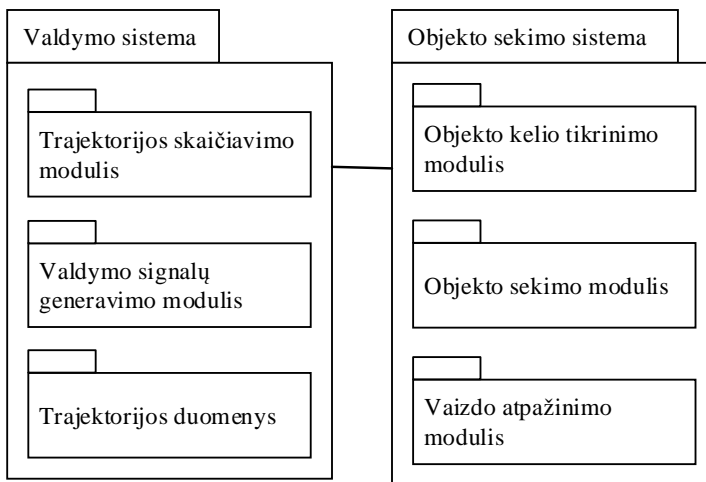


3.12 pav. Nuoseklusis ir lygiagretusis užduočių planavimo metodai
 Fig. 3.12. Sequential and parallel task planning methods

3.2.2. Pjezoroboto valdymo ir trajektorijos matavimo programinės įrangos sukūrimas

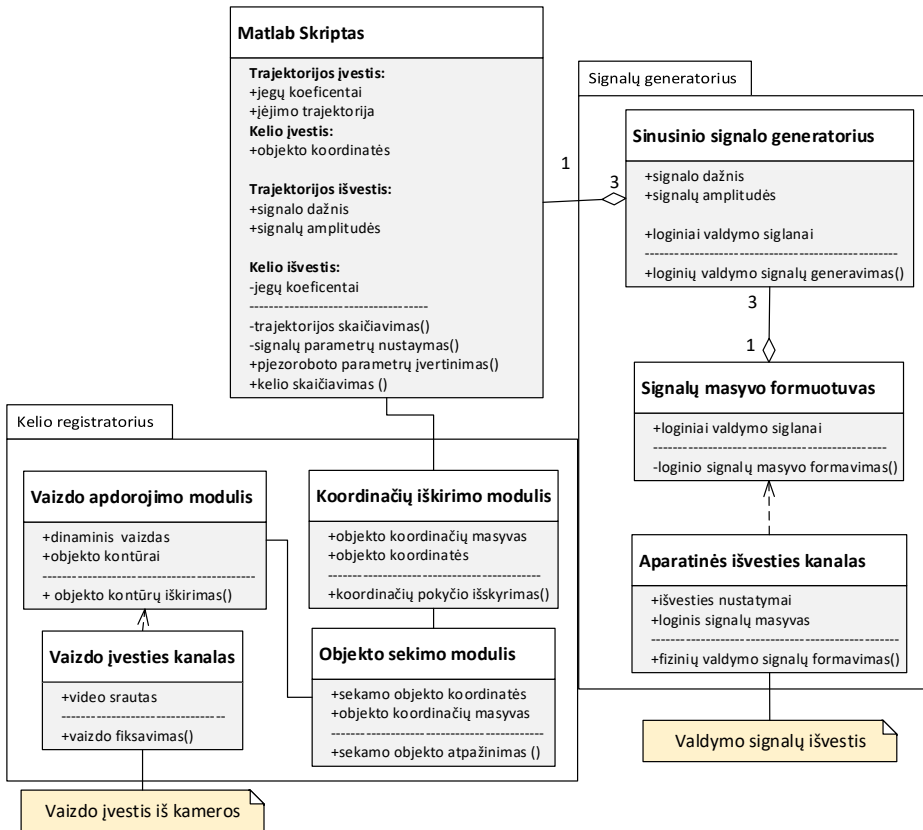
Valdymo sistemos programinę įrangą sudaro dvi loginės–funkcinės dalys: valdymo programa, skirta pjezoroboto valdymo signalams formuoti ir objekto sekimo programa, skirta pjezoroboto keliui registruoti (Wuni X. et al. 2010).

Bendrinė sukurtos pjezoroboto programinės įrangos struktūra pateikta 3.13 paveiksle.



3.13 pav. Valdymo programos paketų diagrama
 Fig. 3.13. Controls software package diagram

Valdymo programos architektūra pateikta 3.14 paveiksle.



3.14 pav. Valdymo programos klasių diagrama

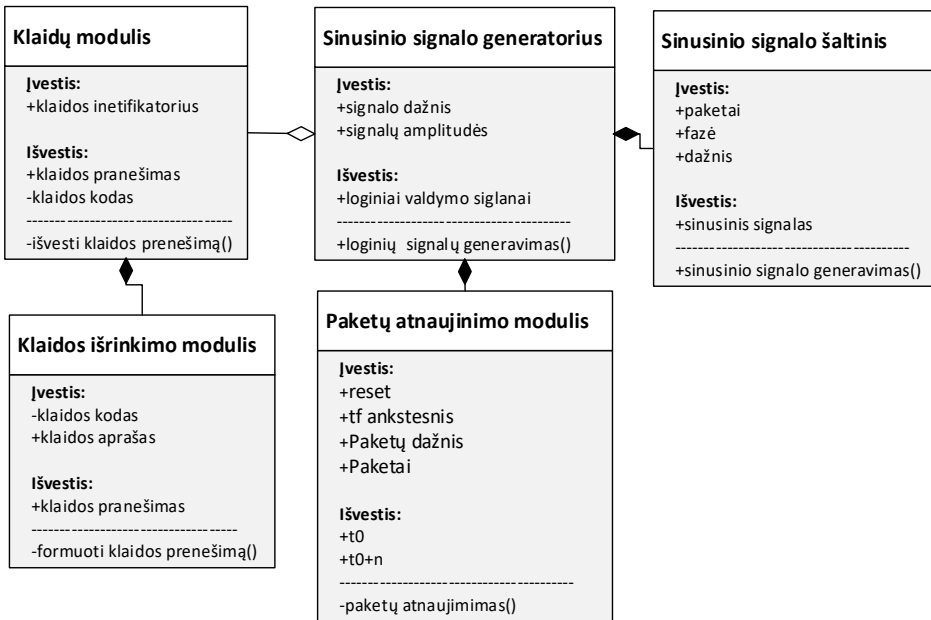
Fig. 3.14. Controls software class diagram

Programos pagrindą sudaro MATLAB skriptas, veikiantis kartu su LabVIEW programa. MATLAB skriptas skirtas trajektorijai formuoti ir valdymo signalams skaičiuoti. Signalų generatorius sudarytas iš trijų identiškų modulių ir skirtas loginiam valdymo signalui generuoti pagal matematinę išėjimo funkcijos aprašą.

Signalų masyvo formuotuvus kartu su aparatinės išvesties kanalu skirtas sukurti fizinį valdymo signalą sistemos išėjime.

Bendraudant su aparatine įranga programa turi valdymo signal išvestį realizuotą aparatinės išvesties kanale ir vaizdo įvestį iš kameros realizuotą vaizdo įvesties kanale.

Sinusinio signalo generatoriaus klasių diagrama pateikta 3.15 paveiksle.



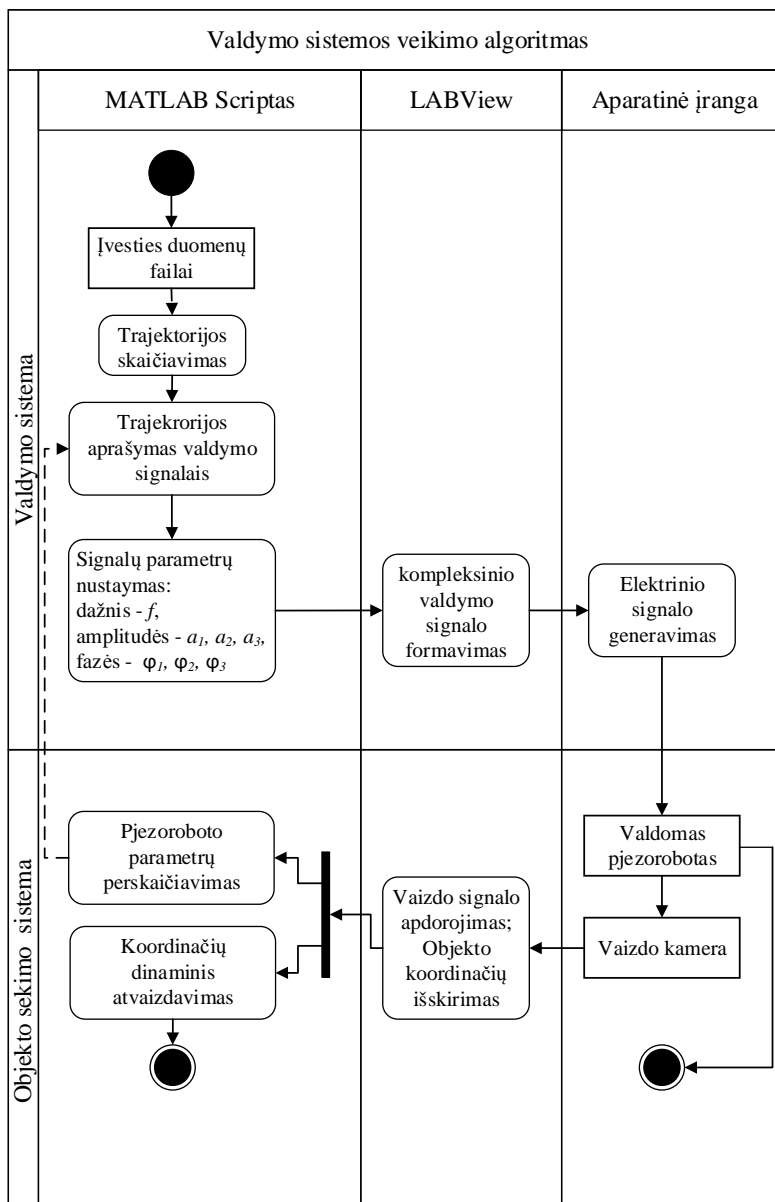
3.15 pav. Sinusinio signalo generatoriaus klasių diagrama
 Fig. 3.15. Sinusoidal signal generator class diagram

Generatorius sudarytas iš signalo šaltinio, skirto loginiam signalui formuoti; sinusinio signalo šaltinio, kuris naudojamas kaip atraminis signalo šaltinis skirtingiems signalams generuoti; paketų atnaujinimo modulių skirtų formuoti periodinius signalo paketus; klaidų išrinkimo modulių skirtų pranešimui apie kritinę klaidą išvesti (Aleksandrov, V. S., et al. 2015). Paketų atnaujinimo modulis reikalingas nenutrūkstamam sistemos darbui realaus laiko režime (Giannone E., et al. 2010).

Pjezoroboto koordinacių registravimui plokštumoje skirtas vaizdo apdorojimo ir objekto sekimo modulis, kuris veikia kartu su koordinacių išskyrimo moduliu. Pjezoroboto padėties koordinatėms nustatyti skirtas vaizdo įvesties kanalas (Klinger T., 2008; NI Inc. 2003).

Tokiu būdu valdymo programa susideda iš dviejų tarpusavyje susijusių modulių (programinių paketų): valdymo sistemos skirtos pjezorobotui valdyti ir objekto sekimo sistemos, skirtos pjezoroboto judėjimo keliui analizuoti.

Bendrinis valdymo sistemos veikimo algoritmas iliustruojamas 3.16 paveiksle.



3.16 pav. Eksperimentinės sistemos veiklos diagrama
Fig. 3.16. Experimental system activity diagram

Struktūriškai valdymo sistemos programa sudaryta iš dviejų pagrindinių dalių valdymo dalies ir pjezoroboto kelio registravimo dalies.

Valdymo sistemos veikimas paremtas valdymo signalų generavimu aktyviems pjezoroboto segmentams, taip, kad pjezorobotas judėtų reikiama trajektorija.

Kaip įvesties informacija naudojama, įvesties duomenų faile, matematiškai aprašyta trajektorija. MATLAB skripte vykdomas trajektorijos skaičiavimas, skripto darbo rezultatas yra kintamieji, kurių skaitinės vertės aptašomos kaip laiko funkcija. Vėliau vykdomas kintamųjų masyvo aprašymas valdymo signalais, išskiriant pagrindinius parametrus tokius kaip signalo dažnį f , kiekvieno iš valdymo signalų amplitudes, a_1 , a_2 , a_3 bei pradines fazes φ_1 , φ_2 , φ_3 .

Toliau LabVIEW programinė dalis suformuoja kompleksinį loginį valdymo signalą trimis pjezoroboto segmentams ir informaciją perduoda aparatinei daliai, kur vykdomas elektrinio valdymo signalo generavimas. Toliau sugeneruotu elektriniu valdymo signalu, išreikšti elektrinių per įtampos funkciją yra valdomas pjezorobotas.

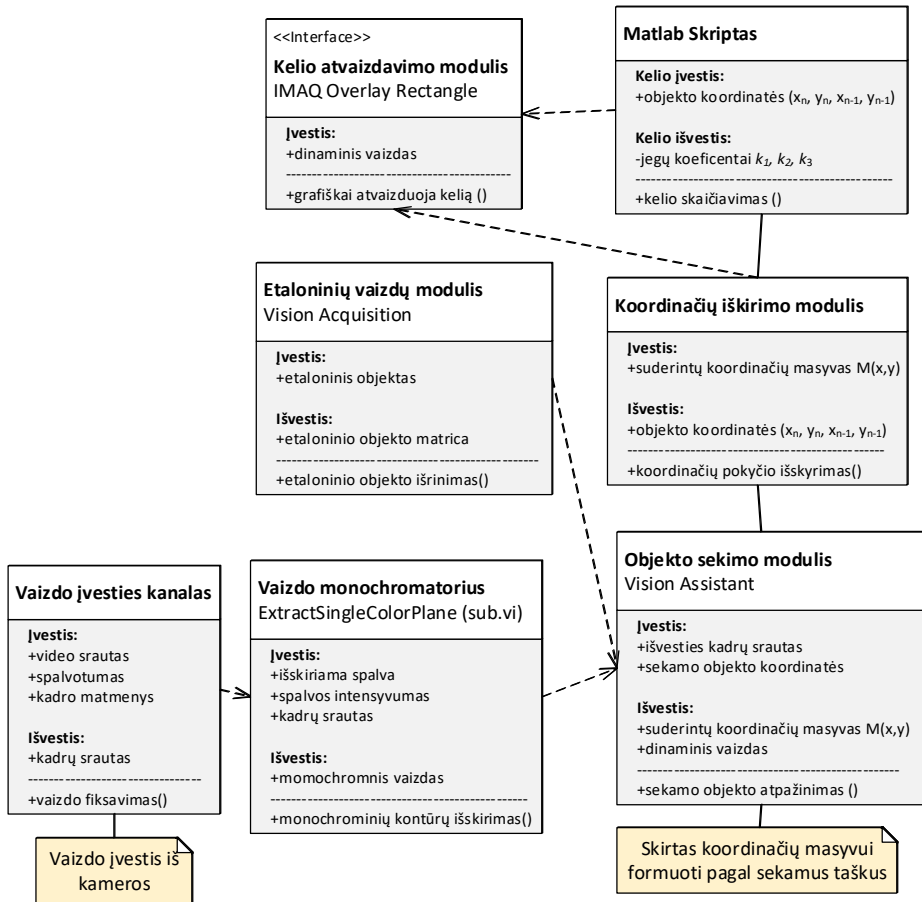
Objekto sekimo sistemos veikimas paremtas duomenų gavybos ir gaunamo dinaminio vaizdo principu. Sistemos veikimo tikslas registruoti pjezoroboto judėjimą plokštumoje realiu, surinkti duomenis apie realų pjezoroboto nueitą kelią ir koreguoti valdymo parametrus.

Pjezoroboto judėjimą registruoja vaizdo kamera, iš kurios gauto vaizdo LabVIEW priemonėmis išskiriamos judančio objekto koordinatės ir orientacijos kampas. Toliau MATLAB skriptas naudoja gautas koordinatas pjezoroboto parametrų perskaičiavimui ir kartu dinaminiam judesio atvaizdavimui. Duomenys su perskaičiuotais pjezoroboto parametrais per kompleksinius kintamuosius perduodami į trajektorijos aprašymo valdymo signalais dalį realizuotą MATLAB.

Objekto sekimo sistemos paskirtis – išskirti kintančias pjezoroboto koordinatas ir perduoti MATLAB skriptui (žr. 3.16 pav.), tam, kad trajektorijos formavimo algoritmas galėtų įvertinti dinamines pjezoroboto charakteristikas. Kitas tikslas registruoti pjezoroboto nueitą kelią plokštumoje, fiksuoti koordinatas diskretiniais laiko momentais ir informacija atvaizduoti grafinėje sąsajoje.

Esminis proceso etapas yra objekto sekimas. Pagal etaloninio objekto vaizdą vykdomas etaloninio objekto kontūrų išskyrimas ir šie abu kontūrai, nepriklausomai nuo jų mastelio, kaip požymiai, taikomi sekamo objekto atpažinimui. Vėliau vykdomas koordinačių pokyčio išskyrimas, pagal kurį nustatomas pjezoroboto padėties ir orientacijos kampo pokytis plokštumoje.

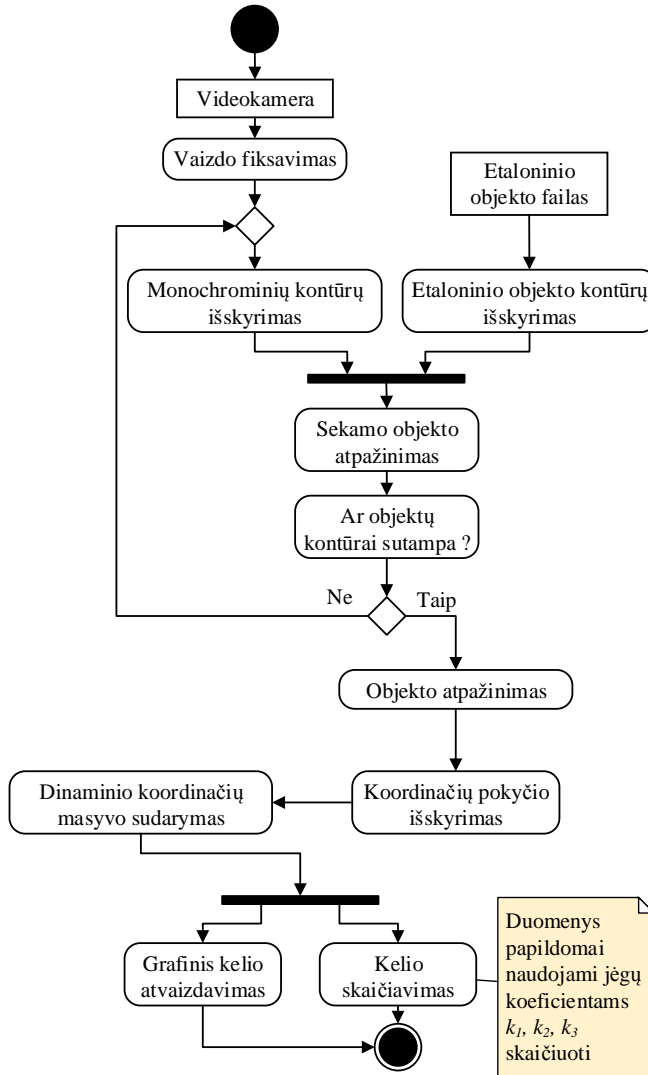
Objekto sekimo sistemos architektūra pateikta 3.17 paveiksle.



3.17 pav. Objekto sekimo programos architektūra
Fig. 3.17. The architecture of the object tracking software

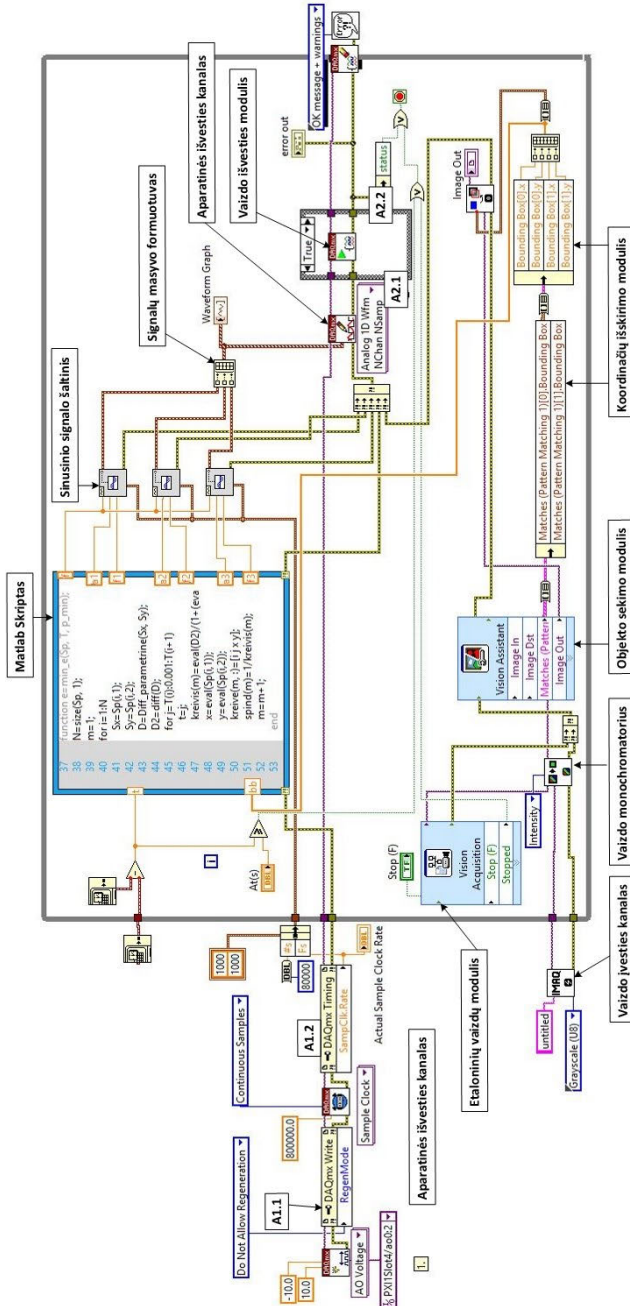
Objekto sekimo sistema skirta judėjimui plokštumoje registruoti. Vaizdo įvesties kanalas skirtas duomenims iš vaizdo kameros nuskaityti. Vaizdo įvesties metodus naudoja vaizdo monochromatorius, skirtas dominančio objekto išryškinimui vaizdo kadre ir jo kontūrų apibrėžimui. Objekto sekimo modulis skirtas sekamo objekto atpažinimui. Koordinačių išrinkimo modulis registruoja sekamo objekto koordinačių pokyčių ir formuoja dinaminį koordinačių masyvą. MATLAB skriptas skirtas koordinačių masyvo apdorojimui ir pjezoroboto kelio skaičiavimui. Iš gautos informacijos gaunami pjezoroboto segmentų generuojamų jėgų koeficientai k_1 , k_2 , k_3 , kurie įvertinami formuojant valdymo signalus. Kelio atvaizdavimo modulis skirtas pjezoroboto nueitam keliui atvaizduoti grafiškai. Jis ima realias pjezoroboto koordinates iš koordinačių

išskyrimo modulio ir apskaičiuotos trajektorijos koordinatės iš MATLAB skripto. Objekto sekimo programos algoritmas pateiktas 3.18 pav. UML veiklos diagrama.



3.18 pav. Objekto sekimo algoritmas
Fig. 3.18. Object tracking algorithm

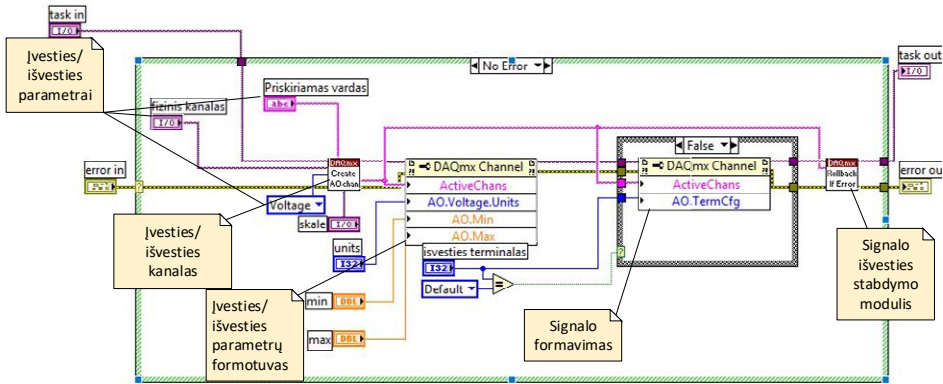
Bendroji valdymo programos LabVIEW diagrama pateikta 3.19 paveiksle.



3.19 pav. Valdymo ir pjektoroboto kelio registravimo programos LabVIEW programos diagram
 Fig. 3.19. Piezorobot control and path registration software LabVIEW diagram

Pagal 3.19 paveiksle. pateiktą valdymo sistemos LabVIEW diagramą, toliau pateikiamos išskaidytos atskirų valdymo dalių diagramos su komentarais ir atskirų dalių paskirties paaiškinimais.

Aparatinės išvesties kanalo diagrama pateikta 3.20 paveiksle.



3.20 pav. Aparatinės išvesties kanalas

Fig. 3.20. Hardware output

Atskirų dalių paskirtis:

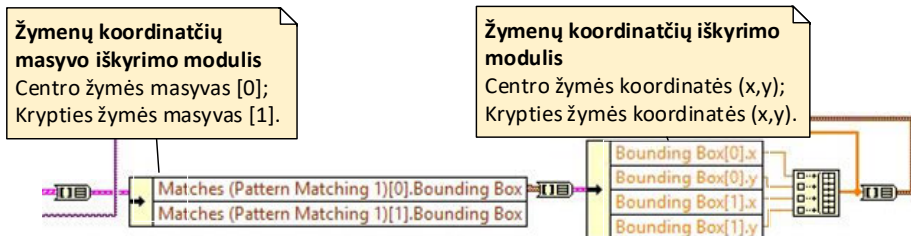
Įvesties/išvesties kanalas – sub.vi skirtas formuoti loginį įvesties/išvesties kanalą.

Įvesties/išvesties parametrų formuotuvas – funkcinė dalis skirta įvesties/išvesties parametrams loginiame kanale nustatyti.

Signalu formuotuvas – funkcinė dalis skirta signalo korektiškumui tikrinti, formuoja klaidos pranešimą, jei signalas nekorektiškas.

Signalu išvesties stabdymo modulis – sub.vi skirtas stabdyti signalo išvedimą, kai aptinkama klaida.

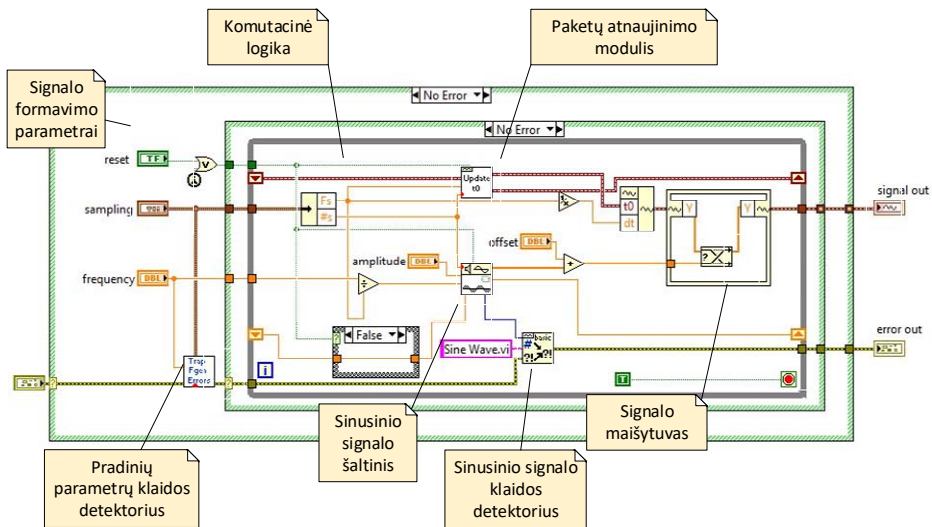
Koordinatinių išskyrimo modulis diagrama pateikta 3.21 pav.



3.21 pav. Koordinatinių išskyrimo modulis diagrama

Fig 3.21. Coordinate exclusion module diagram

Sinusinio signalo generatorius diagrama pateikta 3.22 paveiksle.

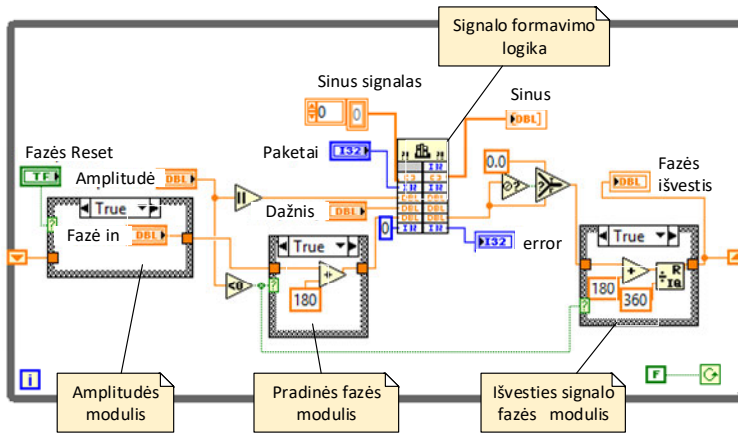


3.22 pav. Sinusinio signalo generatorius diagrama
Fig. 3.22. Sinusoidal oscillator diagram

Atskirų dalių paskirtis:

- | | | |
|--|---|--|
| Signal formavimo parametrai | – | kintamaisiais išreikštas įvesties parametrai. |
| Pradinių parametru klaidos detektorius | – | sub.vi skirtas nustatyti klaidingai pateiktus įvesties parametrus. |
| Komutacinė logika | – | funkcinė dalis skirta apjungti modulius į vieną loginę sistemą. |
| Sinusinio signalo šaltinis | – | sub.vi skirtas sinusinio signalo formavimui. |
| Paketų atnaujinimo modulis | – | sub.vi skirtas formuoti signalo paketu sekoms. |
| Sinusinio signalo klaidos detektorius | – | sub.vi skirtas aptikti klaidas sinusinio signalo sekoje. |
| Signalų maišytuvas | – | funkcinė dalis skirta formuoti vientisą loginį signalą. |
| Signalų išvestis | – | suformuoto loginio signalo išvestis. |

Sinusinio signalo šaltinio diagrama pateikta 3.23 paveiksle.



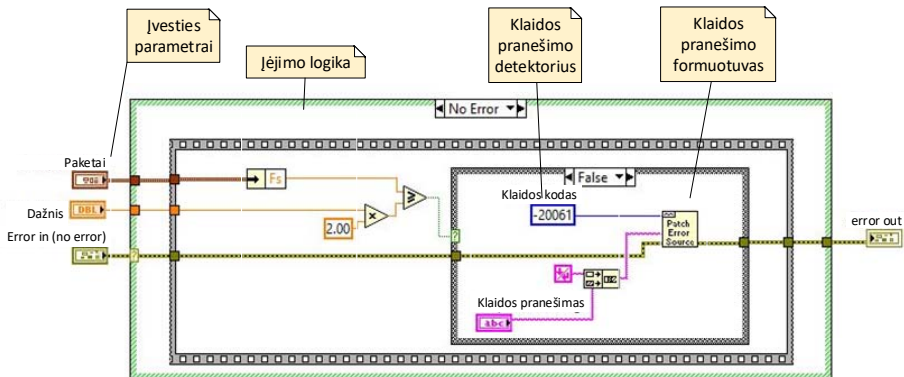
3.23 pav. Sinusinio signalo šaltinio diagrama

Fig. 3.23. Sine signal source diagram

Atskirų dalių paskirtis:

- Amplitudės modulis – funkcinė dalis skirta nustatyti generuojamo signalo amplitudę.
- Pradinės fazės modulis – funkcinė dalis skirta nustatyti generuojamo signalo pradinę fazę.
- Išvesties fazės modulis – funkcinė dalis skirta suderinti skirtingų pradinių fazių signalus išėjime.
- Signalų formavimo logika – funkcinė dalis skirta signalo formavimui pagal programiškai apibrėžtus parametrus.

Sinusinio generatoriaus klaidų modulis pateiktas 3.24 paveiksle.



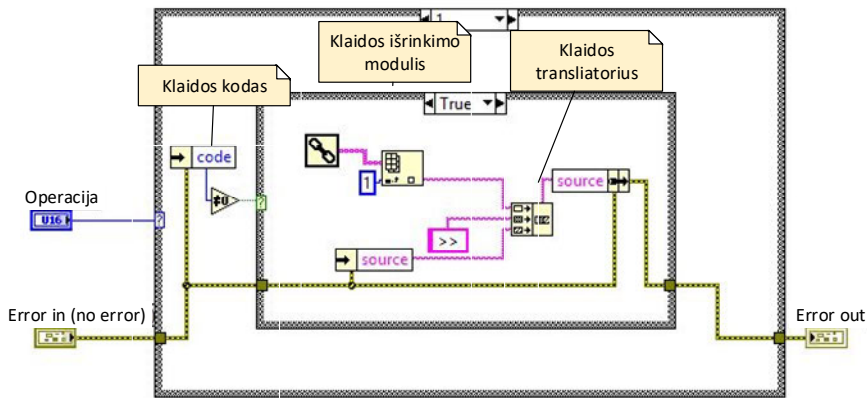
3.24 pav. Sinusinio generatoriaus klaidų modulis diagrama

Fig. 3.24. Sine oscillator error module diagram

Atskirų dalių paskirtis:

- Įvesties parametrai – skirta nustatyti generatoriaus laiko parametrus.
- Įėjimo logika – funkcinė dalis skirta sąlygų, atitinkančių klaidos situaciją fiksavimui.
- Klaidos pranešimo detektorius – funkcinė dalis skirta išrinkti klaidos tipą atitinkantį pranešimą.
- Klaidos pranešimo formuotuvus – sub.vi skirtas sukurti klaidos tipą atitinkantį pranešimą.

Klaidos pranešimo formuotuvo diagrama pateikta 3.25 pav.



3.25 pav. Klaidos pranešimo formuotuvo diagrama

Fig 3.25. Error message maker diagram

Atskirų dalių paskirtis:

- Klaidos kodas – aptiktos loginės klaidos kodas.
- Klaidos išrinkimas – funkcinė dalis skirta išrinkti klaidai pagal gautą loginės klaidos kodą.
- Klaidos transliatorius – funkcinė dalis skirta priskirti klaidos aprašą pagal klaidos kodą išrinktai klaidai.

Dalis standartinių LabVIEW programos modulių buvo pritaikyti ir perdalyti konkrečioms valdymo programos funkcijoms atlikti, tokioms kaip sinusinio signalo paketų generavimas, vaizdo fiksavimas ir kitoms. Standartiniai LabVIEW programos moduliai, naudoti valdymo programoje, nepateikiami.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

Apibendrinus valdymo sistemos kūrimo darbus galima daryti šias išvadas:

1. MATLAB–LabVIEW programinių priemonių derinys leidžia paskirstyti valdymo uždavinius. Sudėtingi matematiniai skaičiavimai atliekami MATLAB, aparatinės įrangos valdymo ir duomenų surinkimo uždaviniai realizuojami LabVIEW programine įranga.
2. Pjezoroboto valdymui taikomi du užduočių planavimo metodai: nuoseklusis užduočių planavimo metodas, kuris yra efektyvus registruojant nueitą pjezoroboto kelią bei lygiagretusis užduočių planavimo metodas, taikytinas pjezoroboto valdymui, kur reikalingas trijų tarpusavyje priklausomų valdymo signalų derinys.

Trajektorijomis judančių pjezorobotų judėjimo tyrimai

Antrame skyriuje buvo sukurti trajektorijos formavimo metodai skirti generuoti trajektoriją keliomis segmentų žadinimo schemomis. Naudojant skirtingas žadinimo schemas sudaryti pjezoroboto valdymo algoritmai tikrinami praktiškai su tam tikslui sukurta trajektorijomis judančių pjezoroboto bus tyrimo sistema. Tyrimų metu atliekami praktiškai patikrinamas pjezoroboto su trimis atramos taškais funkcionavimas.

Tyrimo tikslas – išanalizuoti sudarytų trajektorijų formavimo ir valdymo metodų tinkamumą pjezorobotams su trimis atramos taškais judėjimui duotąją trajektorija valdyti.

Tyrimo uždaviniai:

1. Praktiškai atlikti pjezoroboto judėjimo trajektorija neatliekant sukamojo judesio tyrimą, išmatuoti trajektorijos atkartojamumo tikslumą bei laiką, per kurį įveikiama trajektorija.
2. Praktiškai atlikti pjezoroboto judėjimo trajektorija su sukamuoju judesiu tyrimą, išmatuoti trajektorijos atkartojamumo tikslumą bei nustatyti laiką, per kurį įveikiama trajektorija.
3. Praktiškai atlikti pjezoroboto judėjimo trajektorija tyrimą, kai judesys formuojamas atstojamųjų jėgų principu, išmatuoti trajektorijos atkartojamumo tikslumą bei laiką per kurį įveikiama trajektorija.

4. Atlikti skirtingų judėjimo principų tinkamumo trajektorija judančiam pjezorobotui valdyti lyginamąją analizę.

Praktiniai eksperimentai atliekami realizuojant valdymo algoritmus MATLAB aplinkoje kartu su LabVIEW programine įranga. Trajektorijoms matuoti taikyta programa sukurta „LabVIEW Vision“ aplinkoje, iš kurios duomenys perkeliama ir padorojami MATLAB priemonėmis.

Šiame skyriuje pateikiami eksperimentų rezultatai, analizuojamos pagrindiniu parametru priklausomybės ir pateikiamos rekomendacijos atskirų valdymo metodų pritaikomumui plokštumoje judantiems pjezorobotams valdyti.

4.1. Eksperimentinės sistemos derinimas ir kalibravimas

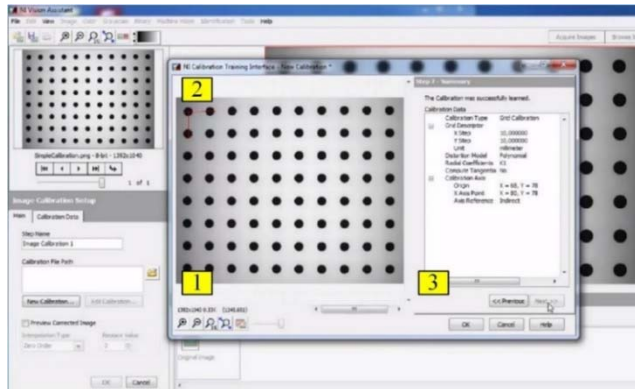
Siekiant užtikrinti ilgalaikį stabilų pjezoroboto valdymo sistemos darbą būtinas aparatinės ir programinės dalies derinimas. Atliekamų eksperimentų tikslumą užtikrina sistemos matavimo ir valdymo dalių kalibravimas. Skyriuje aprašomas sistemos kalibravimas, kuris susideda iš matavimo posistemės kalibravimo bei plokštumoje judančio pjezoroboto fizinių parametru netolygumo matavimo su tikslu juos kompensuoti programinėmis priemonėmis.

Sistemos kalibravimas neapima paties pjezoroboto parametru įvertinimo taip pat plokštumos, ant kurios jis juda paviršiaus šerpetumo. Pjezoroboto ir plokštumos tarpusavio sąveikai apibrėžti taikomas kalibravimas kiekvieno matavimo pradžioje. Taip įvertinamos ne tik kameros, bet ir pjezoroboto paklaidos. Tolesnių matavimų metu šios paklaidos eliminuojamos perskaičiavus valdymo parametrus, tačiau nepalaikant nuolatinio grįžtamojo ryšio valdymo procese.

4.1.1. Trajektorijos sekimo sistemos kalibravimas

Siekiant, kad atliekami matavimai turėtų pakankamą tikslumą, atliekamas programinis videokameros kalibravimas. Kameros kalibravimas vykdomas pagal vaizdo korekcijos metodus įvertinant vertikalų, horizontalų atstumą bei kampo matavimo paklaidas, kurias galima aprašyti bendriniais matavimų apdorojant vaizdą principais (Xiuqin.L., et. al. 2015). Konkretus kalibravimas vykdomas programiškai pagal NI Vision kameros kalibravimo metodus. NI Vision kalibravimo programos vartotojo sąsajos lango pavyzdys pateiktas 4.1 pav. kalibravimui naudojama standartinė kalibravimo gardelė „NI Vision Calibration Grid“ (NI Inc. 2010.).

Grafinė kalibravimo sąsaja pateikta 4.1 paveiksle.



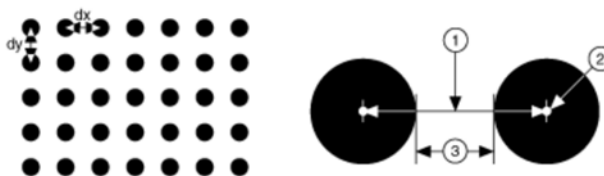
4.1 pav. Videokameros kalibravimo langas (NI Inc. 2010.):”
1 – kalibracinės gardelės vaizdas, 2 – dx ir dy atstumų matavimas,
3 – atstumų matavimo rezultatų langas

Fig. 4.1. Video camera’s calibration window (NI Inc. 2010.):
1 – calibration grids view, 2 – dx ir dy distance measuring,
3 – distances measuring results window

Taikant kalibravimo gardelę, kur atstumai tarp taškų žinomi kamera suderinama taip, kad vaizdo apdorojimo programa kompensuotų kameros tvirtinimo aukščio, kampo bei optikos paklaidas. Kameros kalibravimas vykdomas tokia tvarka:

1. Suderinami tiesiniai matmenys.
2. Suderinamas atskaitos taškas.
3. Suderinami pasvyrimo kampai.
4. Programa apmokoma dirbti su gautomis reikšmėmis.

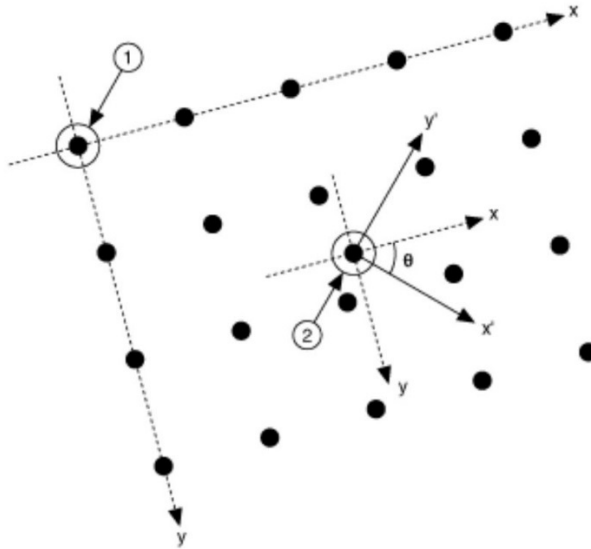
Tiesinių matmenų suderinamas vykdomas matuojant vaizde gaunamus atstumus tarp kalibravimo gardelės taškų. Atstumų dx ir dy matavimai iliustruoti 4.2 paveikslas (NI Inc. 2010).



4.2 pav. Tiesinių atstumų matavimas (NI Inc. 2010.):
1 – atstumas tarp centrų, 2 – gardelės taškų centrai,
3 – atstumas tarp skritulių kraštų

Fig. 4.2. Measuring liner distances (NI Inc. 2010.):
1 – center-to-center distance, 2 – center of grid dots,
3 – distance between the edges of the circles

Kitas žingsnis yra atskaitos taško nustatymas ir ašių sutapatinimas. Atskaitos taško ir orientacijos kampo sutapatinimas pateikiamas 4.3 pav. (NI Inc. 2010.).



4.3 pav. Pradinės atskaitos taško, kampo tarp gardelės x ašies ir matavimo sistemos x' ašies nustatymas ir nustatomos koordinatinių sistemos sutapatinimas (NI Inc. 2010.):

- 1 – kalibracinės gardelės atskaitos taškas, 2 – nustatomas atskaitos taškas,
- 3 – θ – kampas tarp kalibracinės gardelės ašių ir nustatomo vaizdo ašių

Fig. 4.3. Defence the origin and angle between the x -axis of the new coordinate system (x') and the top row of dots (x) (NI Inc. 2010.):

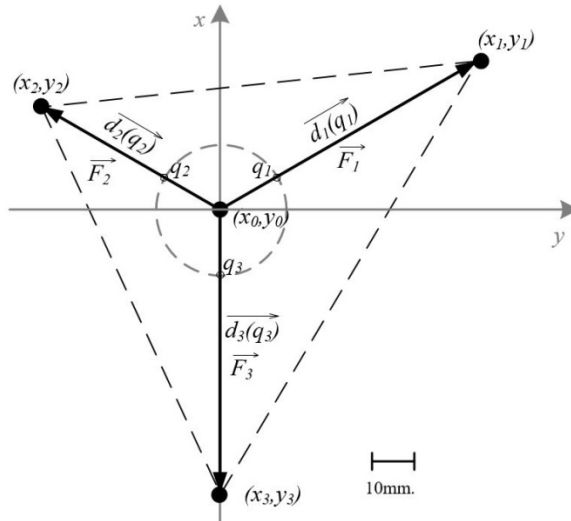
- 1 – origin in a calibration grid image, 2 – user-defined origin,
- 3 – θ – angle between grid axis and user-defined axis

Programos derinimas vykdomas įvedant kalibravimo duomenis NI Vision programos aplinkoje. Visas procesas vykdomas programinėmis priemonėmis pagal National Instruments metodiką (NI Inc. 2010.). Atlikus kalibravimą parenkama matavimo sistemos skiriamoji geba.

4.1.2. Eksperimentinis pjezoroboto kinematinųjų parametų nustatymas

Sistemos kalibravimas vykdomas prieš kiekvieną matavimą, siekiant programinėmis priemonėmis kompensuoti atskirų segmentų generuojamų jėgų netolydumą. Generuojamų jėgų netolydumas, be pačio pjezoroboto atskirų segmentų nevienodo, veikimo dar turi įtakos kontaktinių taškų mechaninių parametų išbarstymas, kurį aprašyti galima tik iš dalies ir tik tikimybiškai.

Atskirų segmentų formuojamų jėgų geometrinė išraiška iliustruota 4.4 paveikslas.



4.4 pav. Segmentų formuojamų jėgų \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , \vec{F}_3 grafinė išraiška
Fig. 4.7. Graphical view of segments forces \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , \vec{F}_3

Kalibravimo duomenys toliau naudojami valdymo programoje kaip atskiri kintamieji k_1, k_2, k_3 , kurie įvertinami formuojant valdymo signalą kiekvienam pjezoroboto segmentui.

4.2. Trajektorijomis judančio pjezoroboto judėjimo savybių tyrimai

Siekiant praktiškai įsitikinti teorinių tyrimų pagrįstumu, būtina atlikti atitinkamus eksperimentinius tyrimus.

Pagal 2–tame skyriuje sukurtą pjezorobotų valdymo metodiką VGTU Fundamentaliųjų mokslų fakulteto laboratorijoje buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai. Tyrimų metu buvo naudota 3.2 skyriuje aprašyta ir specialiai šiems eksperimentams sukurta valdymo sistema. Eksperimentiniams tyrimams buvo taikyta specialiai sukurta programinė įranga, kuri aprašyta 3.3 skyriuje.

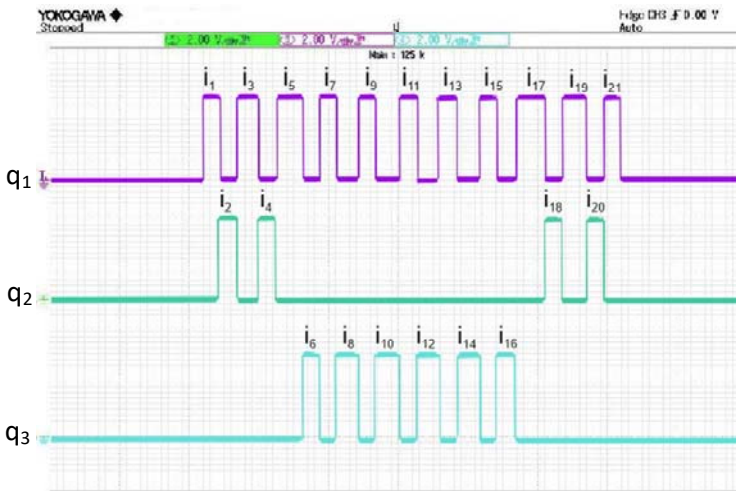
Toliau aprašomai eksperimentiniai tyrimai, kurie patvirtina sudarytų ir 2-ame skyriuje aprašytų valdymo algoritmų tinkamumą bei parodo jų taikymo ribas.

Tiriant skirtingais metodais pradinės sąlygos buvo vienodos. Nagrinėta vieno periodo sinusoidė intervale $[0, 62]$ mm, arba $[0, 2\pi]$. Sinusoidės amplitudė 60 mm

leistinas atsilenkimas nuo suplanuotos trajektorijos ε_{max} buvo paimtas $1/20$ nuo sinusoidinės trajektorijos skersinių matmenų: $\varepsilon_{max} = 3$ mm.

4.2.1. Pjezoroboto valdomo metodu be sukamojo judesio trajektorijos tyrimas

Pagal 2.18 pav. pateiktą algoritmą ir 3.18 formulę formuojamas valdymo signalas kiekvienam pjezoroboto segmentui. Pjezoroboto nueitas kelias yra išreiškiamas per signalo, veikiančio tam tikrą elektrodų segmentą, trukmę. Apskaičiuotas signalo paskirstymas pjezoroboto segmentams ir jo trukmė kiekviename iš jų pateikiama 1.1 lentelėje priede A. Suformuotas signalo duomenų masyvas LabVIEW priemonėmis keičiamas loginiu signalu, ir toliau, per išvesties įrenginį DAQmx, išvedama elektrinių impulsų seka. Elektrinis signalas paskirstomas atskiriems pjezoroboto segmentams formuojant signalo trukmę kiekviename segmente tam tikru laiko momentu. Realaus valdymo signalo oscilograma pateikiama 4.5 paveiksle.



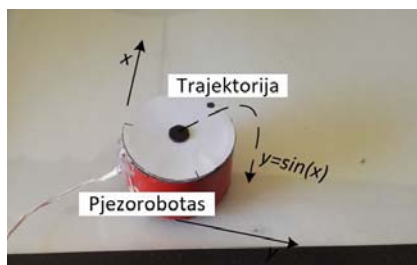
4.5 pav. Elektrinio signalo pjezoroboto segmentuose oscilograma: čia i_1, i_2, \dots, i_{21} – pjezoroboto žingsniai, q_1, q_2 ir q_3 – pjezoroboto segmentai

Fig. 4.5. Waveform of real electrical signal at piezorobots segments: where i_1, i_2, \dots, i_{21} – piezorobots steps, q_1, q_2 ir q_3 – piezorobots segments

Pjezorobotas juda ant stiklinio paviršiaus ir formuoja trajektoriją pagal apskaičiuotą modelį $y = \sin(x)$, kai $x \in (0;62)$ mm.

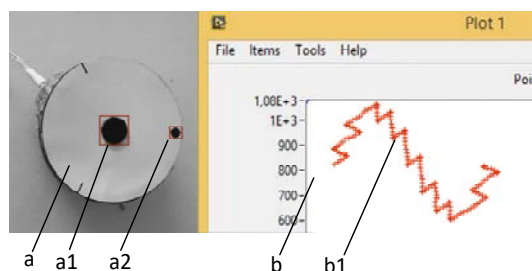
Oscilograma (žr. 4.5 pav.) sudaryta iš trijų signalų paketo skirto trims nepriklausomai veikiančioms pjezoroboto segmentams q_1, q_2 ir q_3 . Valdymo signalui generuojant jėgas šiose segmentuose valdomas pjezoroboto judėjimas.

Bendras eksperimentų plokštumos su judančiu pjezorobotu vaizdas pateiktas 4.6 paveiksle.



4.6 pav. Trajektorija judantis pjezorobotas
Fig. 4.6. Piezorobot moving in trajectories

Pjezoroboto nueitas kelias registruojamas vaizdo kamera ir grafiškai atvaizduojamas valdymo programos grafinėje sąsajoje (žr. 4.7 pav.).



4.7 pav. Pjezoroboto nueitas kelias grafinėje programos sąsajoje:

čia a – pjezorobotas, a1 – pjezoroboto centro žymė, a2 – pjezoroboto krypties žymė,
b – trajektorijos grafinis langas, b1 – praktinės trajektorijos vaizdas

Fig. 4.7. Piezorobot's path view in the software interface:

where a – image of the piezorobot, a1 – the central point of the piezorobot,
a2 – direction point, b – graphical window of trajectory, b1 – practical view of the practical trajectory

Pjezoroboto judėjimas yra registruojamas vaizdo kamera taikant vaizdo apdorojimo metodus. Vaizdo apdorojimo algoritmai yra realizuoti NI Vision metodais, kurie yra LabVIEW sudedamoji dalis. Objekto kelio registravimas vykdomas pagal objekto sekimo (angl. *image tracking*) algoritimą:

1. Pagal etaloninį grafinį vaizdą aptinkamas objektas pirminiame vaizdo kadre (angl. *image recognition*).

2. Pažymimas konkretus objektas ir randamas jo geometrinis centras.

3. Užfiksuojamos centro koordinatės pagal pirmą kadrą ir prilyginamos nulinėms ($x_0 = 0$, $y_0 = 0$), užfiksuojamos krypties taško išrenkant ($x_{a0} = 0$, $y_{a0} = 0$).

4. Koordinačių pokytis ir registruojamos vienodais laiko intervalais ir jų nustatomos jų reikšmės: centro koordinatės – (x_n, y_n) ir krypties taško koordinatės – $(x_d = 0, y_d = 0)$.

5. Formuojamas masyvas iš objekto centro koordinačių gautų kiekvieno registruojamo metu. Kritiniuose taškuose, kai vykdomas pjezoroboto posūkis, kiekvienai centro koordinatei (x_n, y_n) priskiriama krypties žymės koordinatė $(x_d = 0, y_d = 0)$ siekiant nustatyti pjezoroboto orientaciją x ašies atžvilgiu.

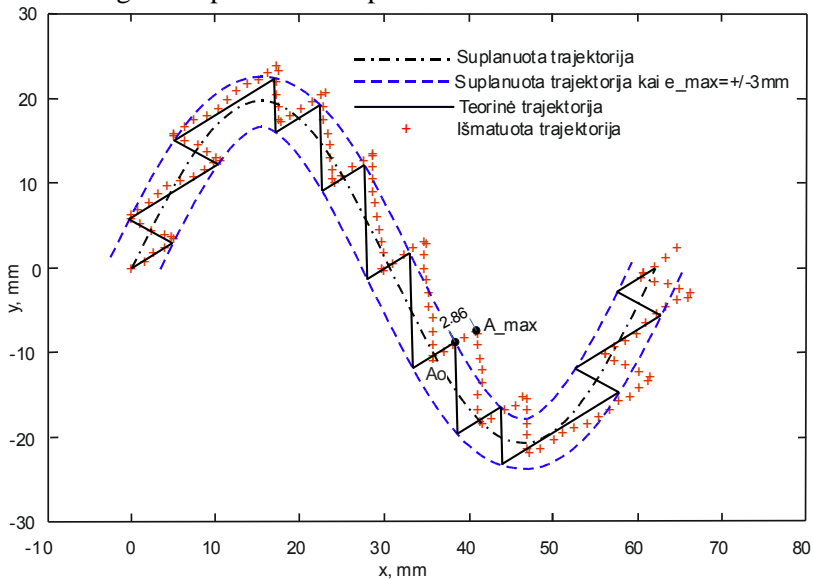
6. Masyvas atvaizduojamas grafiškai grafinėje valdymo programos sąsajoje.

7. Gautas eksperimentinis masyvas palyginamas su kitu masyvų gautu skaičiuojant trajektoriją.

8. Randamas didžiausias gauto kelio nuokrypis nuo suplanuotos trajektorijos.

Eksperimentas buvo atliekamas siekiant nustatyti trajektorijos atkartojamumo galimybes ir įvertinti tikslumą. Kadangi idealiai atkartoti suplanuotos trajektorijos neįmanoma, buvo apibrėžtos skirtingos pradinės paklaidų reikšmės.

Iš dešimties bandymų buvo atrinktas variantas, turintis mažiausių nuokrypių tarp suplanuotos ir realizuotos trajektorijų. Aprašytu metodu gautos pjezoroboto nueito kelio diagramos pateiktos 4.8 paveiksle.



4.8 pav. Pjezoroboto nueito kelio ir suplanuotos trajektorijos palyginimas, kai pjezorobotas juda neatliekant sukamojo judesio.

e_{max} žymimos ribinės koordinatės \mathcal{E}_{max} , $A_0 - A_{max}$ – maksimalus atstumas tarp leistino nuokrypio ribos ir gautos trajektorijos taško

Fig. 4.8. Comparison of piezobobot path and planned trajectory: when piezobobot moves without rotating motion:

where e_{max} – error coordinates means \mathcal{E}_{max} , $A_0 - A_{max}$ – the maximum distance between the error coordinates and the trajectory point

Suformuotą koordinačių reikšmių masyvą galima apdoroti matematiškai MATLAB priemonėmis ir taikyti automatiniam valdymui. Gautą grafinę informaciją patogu analizuoti tiek automatinėmis vaizdo apdorojimo priemonėmis, tiek vertinti vizualiai.

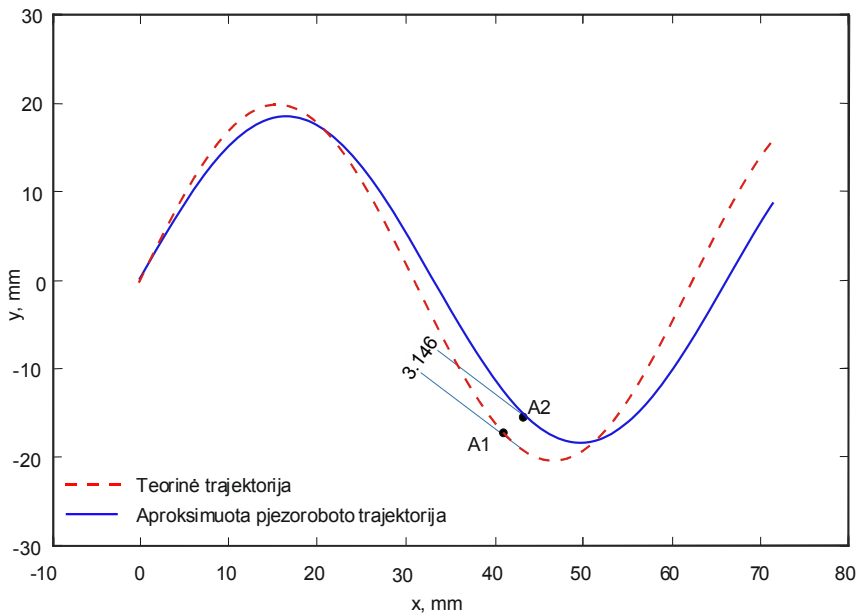
Išmatuotos trajektorijos atkartojamumas išreiškiamas santykinėmis paklaidomis imant didžiausią atstumą tarp suplanuotos ir gautos trajektorijų taškų. Didžiausias nuokrypis nuo leistinos trajektorijos kai $\varepsilon=3\text{mm}$. gaunamas tarp taškų A_0 ir A_{max} $d_{A_0-A_{max}}=2,86\text{mm}$.

Paklaidos buvo įvertinamas kaip santykinis dydis:

$$\delta = \frac{|(A_0 - A_{max}) - \varepsilon_{max}|}{\varepsilon_{max}} \cdot 100\% , \quad (4.4)$$

čia $(A_0 - A_{max})$ – didžiausias atstumas tarp suplanuotos ir gautos trajektorijų, ε_{max} – absoliutinė trajektorijos atkartojamumo paklaida.

Siekiant įvertinti trajektorijos nuokrypą nuo užsibrėžtos, taikytas apskaičiuotos trajektorijos ir išmatuoto pjezoroboto aproksimuoto kelio rezultatų palyginimas. Gautas grafinis vaizdas pateiktas 4.9 paveiksle.

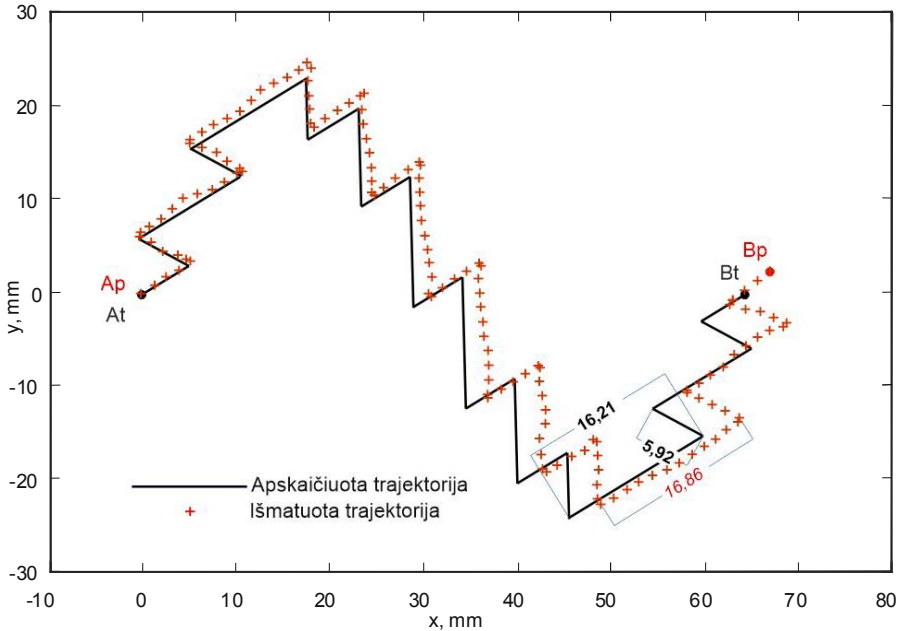


4.9 pav. Pjezoroboto aproksimuoto kelio ir suplanuotos trajektorijos palyginimas, kai pjezorobotas juda neatliekant sukamojo judesio

Fig. 4.9. The comparison of approximated piezorobots path with the planned approximated trajectory by control method when piezorobot is not rotating

Iš 4.9 paveikslo matoma, kad aproksimuotas pjezoroboto kelias maksimaliai nukrypsta nuo suplanuoto trajektorijos atstumu $d = |Ao - A| = 3,01$ mm intervale $[0, 2\pi]$ imant vieną sinusoidės periodą.

Atlikti pjezoroboto nueito kelio, kai atkartojama suplanuota trajektorija, matavimai. Matavimų rezultatų grafinė iliustracija pateikiama 4.10 paveiksle.



4.10 pav. Pjezoroboto nueitas kelias:

čia At – apskaičiuoto pjezoroboto kelio pradžios taškas, Bt – pabaigos taškas;

Ap – išmatuoto pjezoroboto kelio pradžios taškas, Bp – pabaigos taškas

Fig. 4.10. Path of piezobot:

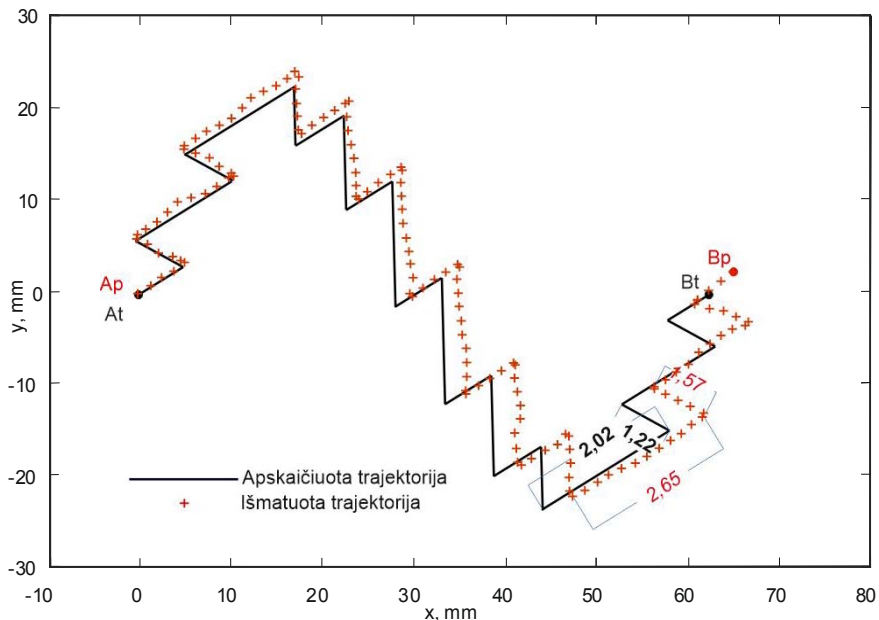
where At – start point of the calculated trajectory, – Bp end point;

Ap – start point of the measured trajectory, Bp – end point

Atlikti pjezoroboto laiko, per kurį įveikiama kiekviena kelio atkarpa, matavimai. Iš 4.10 paveikslo matoma, kad didžiausias suplanuotas atstumas yra $d_{ti} = 16,21$ mm, gauta šio atstumo vertė $d_{pi} = 16,86$ mm, tai rodo, kad trumpame intervale kelias beveik sutampa. Užfiksuotas trajektorijos pabaigos taškas – Bp skiriasi nuo teorinio – Bt.

Siekiant įvertinti pjezoroboto greitį buvo atliekami ir sugaišto laiko konkrečiose trajektorijos atkarpose rezultatai. Laiko matavimai atlikti siekiant įvertinti valdymo metodą, kai pjezorobotas juda duotąja trajektorija didžiausiu greičiu. Iš optinių duomenų buvo gautas judesio laikas kiekvienoje atkarpoje, suminis laikas gaunamas išmatavus laiką nuo pjezoroboto pradinės padėties iki galinio taško.

Matavimų rezultatų grafinė iliustracija pateikiama 4.11 paveiksle.



4.11 pav. Pjezoroboto laiko per kurį atkartojama trajektorija matavimai: (čia At – apskaičiuoto pjezoroboto kelio pradžios taškas, Bt – pabaigos taškas; Ap – išmatuoto pjezoroboto kelio pradžios taškas, Bp – pabaigos taškas)

Fig. 4.11. Time intervals measurements in piezobot's path (where At – start point of the calculated trajectory, – Bp end point; Ap – start point of the mesured trajectory, Bp – end point)

Suminis visos trajektorijos ilgis ir būtinas teorinis laikas trajektorijai formuoti pateiktas 4.1 lentelėje. Palyginimui lentelėje pateikiami teoriniai duomenys kartu su gautais eksperimentų rezultatais bei pateiktos apskaičiuoto ir išmatuoto laiko bei kelio paklaidos.

4.1 lentelė. Suminė pjezoroboto nueito kelio ir sugaišto laiko trukmė kai pjezorobotas juda neatliekant sukamojo judesio

Table 4.1. Total duration of the path and time spent by the piezobot by control method when piezobot is not rotating

Σd_{ti} (mm)	Σd_{pi} (mm)	Σt_{ti} (s)	Σt_{pi} (s)	$\delta \Sigma d_i$ %	$\delta \Sigma t_i$ %
179,71	185,19	30,13	39,46	3,05	30,95

Čia, 4.1 lentelėje, Σd_{ti} (mm) – suminis apskaičiuotas (teorinis) pjezoroboto trajektorijos ilgis; Σt_{ti} (s) – suminis apskaičiuotas pjezoroboto laikas reikalingas

užbaigti judėjimą; Σd_{pi} (mm) – suminis išmatuotas (praktinis) pjezoroboto kelias; Σt_i (s) – suminis išmatuotas pjezoroboto laikas; $\delta \Sigma d_i$ % – santykinė apskaičiuoto ir išmatuoto kelio paklaida, (%); $\delta \Sigma t_i$ % – santykinė apskaičiuoto ir išmatuoto laiko paklaida, (%).

Nors maksimali gauta santykinė paklaida yra sąlyginai didelė, bet gauta trajektorija yra labai artima suplanuotai.

4.2.2. Pjezoroboto trajektorijos su sukamuoju judesiu tyrimas

Skirtingai nuo 4.2.1 skyriuje aprašyto valdymo metodo, kai cilindrinis pjezorobotas neatlieka sukamojo judesio stacionarios plokštumos atžvilgiu, kitas valdymo metodas leidžia pjezorobotui sukstis. Pjezoroboto judėjimo trajektorijai formuoti pasirinktas liestinių metodas aprašytas 2.2.2 skyriuje kaip atskiras trajektorijos formavimo su sukamuoju judesiu atvejis. Šis metodas laikomas efektyviausiu judesiu atvira kreive formuoti, nes lyginant su metodu kai posūkis atliekamas ribinėse koordinatėse pasiekiamas mažesnis judėjimo žingsnių skaičius ir tuo pačiu didesnis greitis.

Pagal 2.18 paveiksle. pateiktą algoritmą ir formulę (3.18) formuojamas valdymo signalas kiekvienam pjezoroboto segmentui. Pjezoroboto nueitas kelias yra išreiškiamas per signalo, veikiančio tam tikrą elektrodų segmentą, trukmę. Apskaičiuotas signalo paskirstymas pjezoroboto segmentams ir jo trukmė kiekviename iš jų pateikiama priedo A 1.2 lentelėje.

Suformuotas signalo duomenų masyvas LabVIEW priemonėmis per DAQmx išvesties įrenginį paskirstomas pjezoroboto segmentams. Realus valdymo signalo oscilograma pateikiama 4.12 paveiksle.



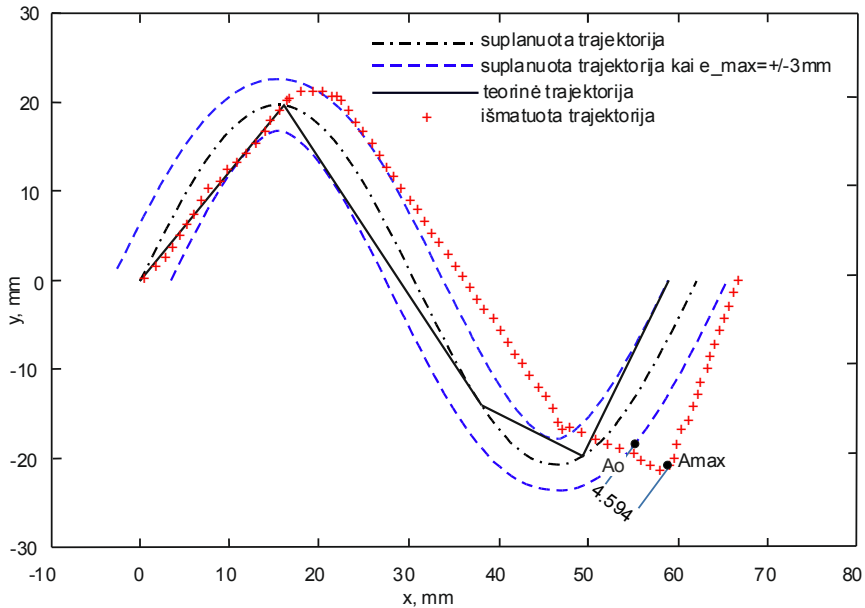
4.12 pav. Realus signalo pjezoroboto segmentuose oscilograma.

čia i_1, i_2, \dots, i_7 – pjezoroboto žingsniai; q_1, q_2 ir q_3 – pjezoroboto segmentai

Fig. 4.12. Waveform of real signals at piezorobots segments.

where i_1, i_2, \dots, i_7 – piezorobots time steps; q_1, q_2 ir q_3 – piezorobots segments

Pjezorobotas trajektorija juda ant stiklinio paviršiaus ir formuoja trajektoriją pagal apskaičiuotą modelį $y=20 \cdot \sin(x)$, kai $x \in (0; 2\pi)$. Parenkamos koordinatės atitinka pjezoroboto valdomo metodu be sukamojo tirtą trajektoriją. Bendras eksperimentų plokštumos su judančiu pjezorobotu vaizdas pateiktas 4.13 paveiksle.

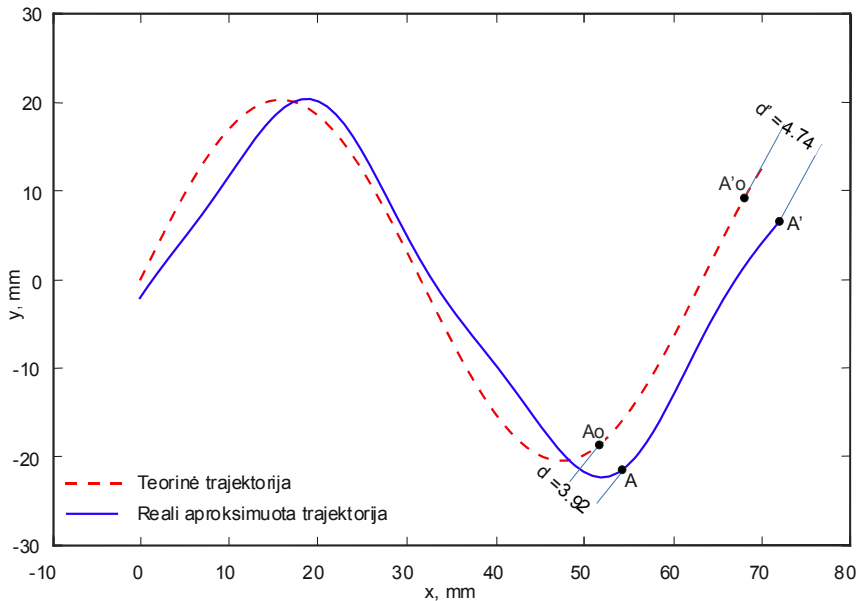


4.13 pav. Nueito kelio ir suplanuotos trajektorijos palyginimas
čia e_{\max} – žymimos ribinės koordinatės e_{\max}

Fig. 4.13. The comparison piezobots path and the planned trajectory
where e_{\max} – error coordinates means e_{\max} , $A_o - A_{\max}$ – the maximum
distance between the error coordinates and the trajectory point

Gautas maksimalus nuokrypis nuo suplanuotos trajektorijos intervale $x \in (0; 2\pi)$ su koordinatėmis, randamomis kaip vieno pusperiodžio sinusoidės susikirtimo taškai su x ašimi: $x \in (0; 62)$ mm ir $y \in (-20; 20)$ mm, kas atitinka vieną sinusoidės periodą, $d_{\max} = 4,59$ mm, arba 53 %. Įvertinant, kad trajektorija artima suplanuotai, metodas yra tinkamas pjezorobotui trajektorija valdyti.

Pjezoroboto valdymo metodu su sukamuoju judesiu gautos pjezoroboto nueito kelio diagramos pateiktos 4.14 paveiksle.



4.14 pav. Pjezoroboto aproksimuoto kelio ir suplanuotos trajektorijos palyginimas: čia $(A_o - A) = d_{max}$ – maksimalus nuokrypis nuo suplanuotos trajektorijos viename sinusoidės periodo intervale, $(A' o - A') = d'_{max}$ – maksimalus nuokrypis nuo suplanuotos trajektorijos vieno sinusoidės periodo intervale $x \in [0-70\text{mm}]$

Fig. 4.14. The comparison piezorobots path and the planned approximated trajectory:

where $(A_o - A) = d_{max}$ the maximum error between the planned trajectory and approximated path in a single sinusoidal period range when $x \in [0-70\text{mm}]$

Iš gautų aproksimuotų rezultatų matoma, kad trajektorijos atkartojamumas yra priimtinas, maksimalus nuokrypis $d_{max} = 3,92$ mm intervale $x \in [0-2\pi]$. Maksimali užfiksuota nuokrypa $d'_{max} = 4,74$ mm intervale $x \in [0-70\text{mm}]$.

Suminis, visos trajektorijos, ilgis ir būtinas teorinis laikas trajektorijai formuoti pateiktas 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Suminė pjezoroboto nueito kelio ir sugaišto laiko trukmė kai pjezorobotas valdomas metodu su sukamuoju judesiu

Table 4.2 Total duration of the path and time sent by the piezorobot when the piezorobot is controlled by a method with rotation movement

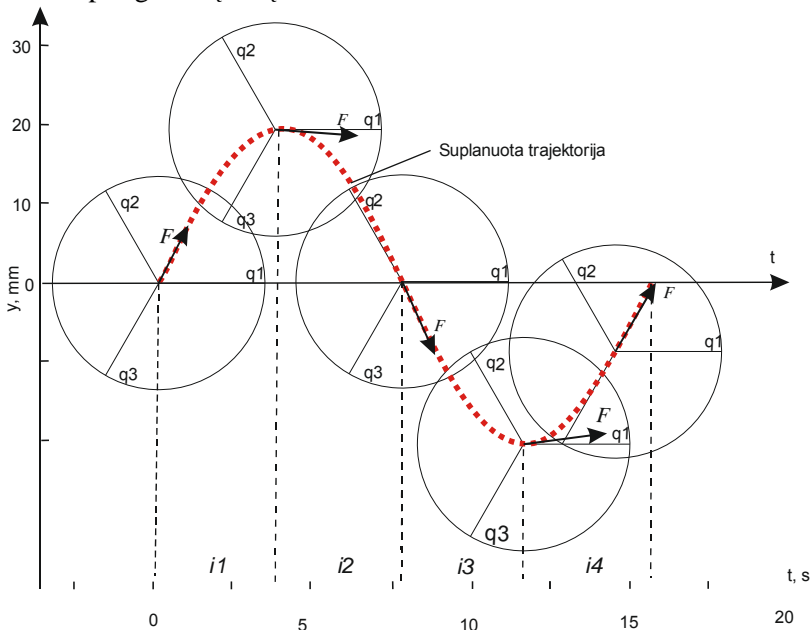
Σd_{i_i} (mm)	Σd_{p_i} (mm)	Σt_{i_i} (s)	Σt_{p_i} (s)	$\delta \Sigma d_i, \%$	$\delta \Sigma t_i, \%$
117,82	114,22	15,22	20,04	3,05	31,64

Žymėjimai pateikti 4.2 lentelėje: Σd_{i_i} (mm) – suminis apskaičiuotas pjezoroboto trajektorijos ilgis; Σt_{i_i} (s) – suminis apskaičiuotas pjezoroboto laikas reikalingas užbaigti judėjimą; Σd_{p_i} (mm) – suminis išmatuotas pjezoroboto kelias; Σt_{i_i} (s) – suminis išmatuotas pjezoroboto laikas; $\delta \Sigma d_i$ % – santykinė apskaičiuoto ir išmatuoto kelio paklaida, (%); $\delta \Sigma t_i$ % – santykinė apskaičiuoto ir išmatuoto laiko paklaida, (%).

4.2.3. Pjezoroboto valdomo jėgų atstojamosios metodu trajektorijos tyrimas

Pagal 2.2.3 skyriuje aprašytą modelį judėjimo trajektorija suskirstoma į 4 fazes: i_1 , i_2 , i_3 ir i_4 , per kurias atkartojamas sinusoidės pusperiodis.

Pjezoroboto judėjimo duotąja trajektorija teorinis kelias ir atskiro judėjimo fazės pateiktos 4.15 paveiksle. Kiekvienoje fazėje judėjimo jėgos \vec{F} vektorius, einantis per trajektorijos liestinę tame taške keičia kryptį, arba jo kryptis pasikeičia tarp segmentų ašių.



4.15 pav. Pjezoroboto judėjimo duotąja trajektorija teorinis kelias:

čia i_1 , i_2 , i_3 – trajektorijos fazės; q_1 , q_2 , q_3 – pjezoroboto segmentai;

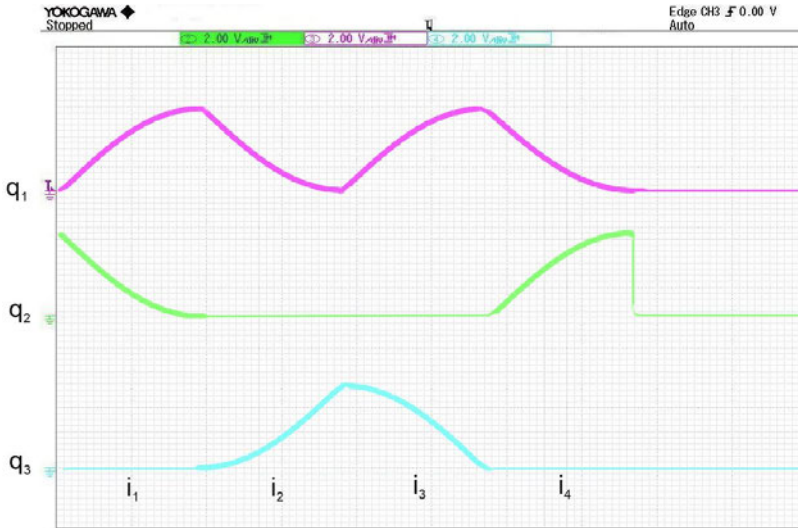
F – atstojamosios jėgos vektorius; y , (mm) – atstumas pagal y koordinatę (mm);

t , (s) – laiko atskaitos koordinatė (s)

Fig. 4.15. The theoretical path of piezobot moving by given trajectory: where: i_1 , i_2 , i_3 – phases of the trajectory; q_1 , q_2 , q_3 – segments of piezobot; F – total force vector; y , (mm) – distance by coordinate y ; t , (s) – time division

Pagal trajektorijos planavimo algoritmą (2.22 pav.) ir matematinę išraišką (2.54), MATLAB aplinkoje buvo realizuotas trajektorijos planavimo modelis, kuris įdiegtas į LabVIEW valdymo programą.

Pagal valdymo programą aparatinės įrangos su DAQmx suformuoti elektriniai valdymo signalai, realiame laike, pateikti 4.16 paveiksle.



4.16 pav. Realaus signalo pjezoroboto segmentuose oscilograma:

čia i_1, i_2, \dots, i_4 – pjezoroboto žingsniai; q_1, q_2 ir q_3 – pjezoroboto segmentai

Fig. 4.16. Waveform of real signals at piezorobots segments:

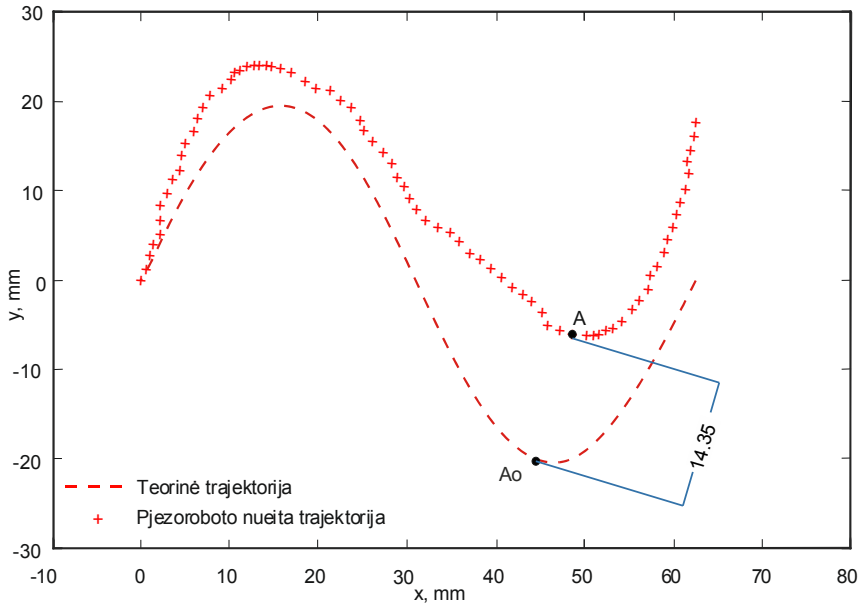
where i_1, i_2, \dots, i_4 – piezorobots time steps; q_1, q_2 ir q_3 – piezorobots segments

Valdymo signalų pasiskirstymas pjezoroboto segmentams, kiekvienoje iš trajektorijos fazių i_1, i_2, i_3, i_4 (žr. 4.16 pav.).

Skirtingai nuo valdymo metodo, kai pjezorobotas neatlieka sukamojo judesio ir valdymo metodo su sukamuoju judesiu, pjezorobotas juda ne diskretinėmis atkarpomis, o veikiamas kintančio stiprio nuolat veikiančios jėgos. Tokiu būdu generuojamas judesys gali būti glotniai keičiamas ir trajektorija nėra laužta. Pabrėžtina, kad skirtingai nuo dviejų ankstesnių metodų valdymas vykdomas ne skaitmeniniu skirtingos impulse trukmės signalu, bet aukštu dažniu moduluota analogine įtampa.

Pagal 3 – šiame skyriuje, aprašyta valdymo sistema ir remiantis 2.22 paveiksle pateiktu valdymo signalų paskirstymo pjezoroboto segmentams algoritmu gauta eksperimentinė pjezoroboto trajektorija.

Pjezoroboto nueitas kelias ir suplanuota trajektorija pateikti 4.17 paveiksle.



4.17 pav. Pjezoroboto nueito kelio ir suplanuotos trajektorijos palyginimas, kai judėjimas formuojamas atstojamųjų jėgų principu:

čia $(A_o - A) = d_{max}$ – maksimalus nuokrypis nuo suplanuotos trajektorijos, mm

Fig. 4.17. The comparison piezobot's path and the planned approximated trajectory when the piezobot movement formatted by tangent method:

where $(A_o - A) = d_{max}$ the maximum error between the planned trajectory and path in mm

Praktiškai gauta išmatuotos trajektorijos atskirų taškų koordinatės ir atstumai tarp jų pateikti A priede tekstinio failo formatu.

Gauta reali trajektorija vizualiai panaši į sinusoidę, tačiau maksimalus atsilenkimas nuo suplanuotos trajektorijos $d_{max} = 14,35$ mm. Toks rezultatas yra priimtinas tik iš dalies ir tik parodo algoritmo veikimą. Suminiai viso pjezoroboto nueito kelio ir laiko, per kurį suformuojama trajektorija rezultatai bei santykinės paklaidos pateikiamos 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. Suminė pjezoroboto nueito kelio ir sugaišto laiko trukmė, kai pjezorobotas valdomas jėgų atstojamosios metodu

Table 4.3 Total duration of the path and time spent by the piezobot when the piezobot is controlled by a total force method

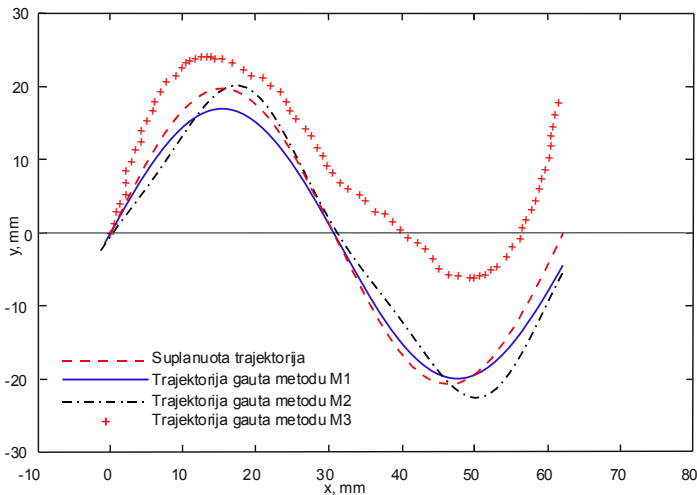
Σd_{ti} (mm)	Σt_{ti} (s)	Σd_{pi} (mm)	Σt_{pi} (s)	$\delta \Sigma d_i$, %	$\delta \Sigma t_i$, %
109,51	15,64	104,9	22,04	4,21	47,31

Žymėjimai pateikti 4.2 lentelėje: Σd_{ti} , (mm) – suminis apskaičiuotas (teorinis) pjezoroboto trajektorijos ilgis; Σt_{ti} , (s) – suminis apskaičiuotas pjezoroboto laikas reikalingas užbaigti judėjimą; Σd_{pi} , (mm) – suminis išmatuotas (praktinis) pjezoroboto kelias; Σt_{pi} , (s) – suminis išmatuotas pjezoroboto laikas; $\delta \Sigma d_i$, % – santykinė apskaičiuoto ir išmatuoto kelio paklaida, (%); $\delta \Sigma t_i$, % – santykinė apskaičiuoto ir išmatuoto laiko paklaida, (%).

Iš 4.8 lentelės rezultatų ir 4.20 paveiksle pateikto grafinio vaizdo galima nustatyti, kad nors ir trajektorija atkartojama su didele paklaida, kelias prailgėja nežymiai (4,21 %), laiko skirtumas yra didelis (47,31 %).

4.3. Skirtingais metodais judančio pjezoroboto trajektorijų lyginamoji analizė

Atliekant praktinį pjezoroboto trajektorijų atkartojamumo kokybinį tyrimą buvo gauti skirtingi vieno periodo sinusoidės atkartojamumo rezultatai. Trimis skirtingais metodais gautas praktinis nueitas pjezoroboto kelias pateiktas 4.18 paveiksle.



4.18 pav. Pjezoroboto suplanuotos trajektorijos ir nueito kelio gauto trim skirtingais metodais grafinis palyginimas:

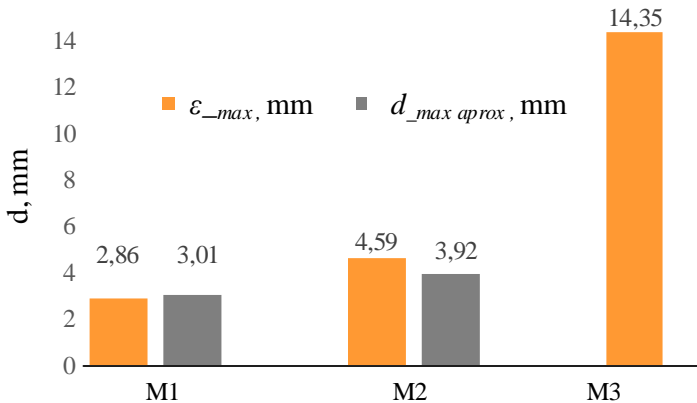
čia M1 – judėjimas neatliekant sukamojo judesio; M2 – judėjimas su sukumpuoju judesiu; M3 – judėjimas trajektorija atstojamosios jėgų principu

Fig. 4.18. Planned trajectory and practical path of the piezobot graphical comparison in three different methods:

where M1 – contact points method; M2 – tangents method;
M3 – movement in trajectories by total force method

Kaip matoma iš 4.18 paveikslo, pateiktos diagramos pjezoroboto kelias artimiausias suplanuotai trajektorijai gaunamas metodu, kai pjezorobotas neatlieka sukamojo judesio (metodas M1). Šiek tiek didesnis neatitikimas yra, kai pjezorobotas valdomas su sukamuoju judėjimu (metodas M2). Blogiausiai trajektorija atkartojama, kai pjezoroboto judesys valdomas jėgų atstojamosios metodu (metodas M3).

Atliekant anksčiau aprašytus eksperimentus be trajektorijos tikslumo buvo atlikti praktiniai pjezoroboto nueito kelio ir sugaišto laiko matavimai. Suvestiniai matavimų rezultatai palyginimui pateikti 4.19 paveiksle.



4.19 pav. Pjezoroboto maksimalaus nuokrypio gauto nuo suplanuotos trajektorijos palyginimas:

čia M1 – judėjimas neatliekant sukamojo judesio; M2 – judėjimas su sukamuoju judesiu; M3 – judėjimas trajektorija atstojamųjų jėgų principu

Fig. 4.19. Comparison of a maximum error of piezorobot between the path and planned trajectory:

where M1 – contact points method; M2 – tangents method;
M3 – movement in trajectories by total force method

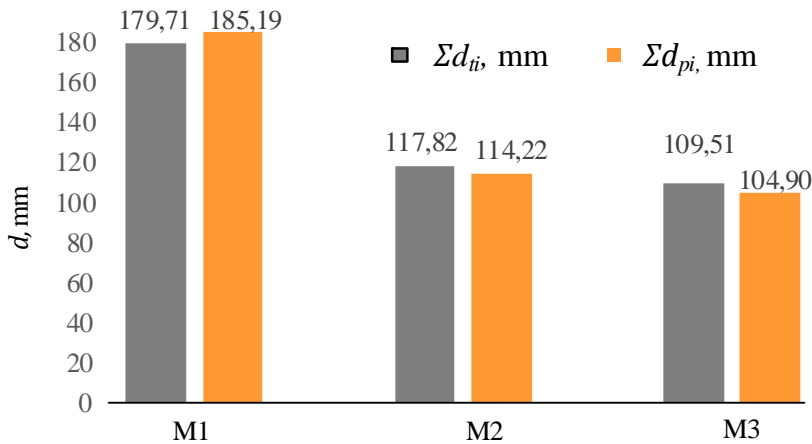
4.19 paveiksle pateikiami šie žymėjimai ε_{max} (mm) – maksimalus nuokrypis nuo suplanuotos trajektorijos; $d_{max\ approx}$ (mm) – maksimalus aproksimuotas kelio nuokrypis nuo suplanuotos trajektorijos; Σd_{ti} (mm) – suminis teorinis trajektorijos ilgis; Σd_{pi} (mm) – pjezoroboto suminis nueitas kelias; $\delta \Sigma d_{ti}$ (%) – trajektorijos ilgio ir nueito kelio neatitikimas; Σt_{ti} (s) – suminis teorinis laikas pjezoroboto trajektorijai įveikti; Σt_{pi} (s) – suminis pjezoroboto sugaištas laikas; $\delta \Sigma t_{ti}$ (%) – teorinio ir praktinio laiko neatitikimas.

Trajektorijų atkartojamumo tikslumas apibrėžiamas nuokrypa nuo duotos trajektorijos ε_{max} , kuri parodo kiek maksimaliai nukrypsta pjezoroboto centras nuo pasirinktos linijos ir maksimalus kelio nuokrypis nuo suplanuotos trajektorijos, $d_{max\ approx}$, kurio aproksimuota vertė parodo kiek duota trajektorija yra iškraipoma.

Iš 4.19 pav. pateiktos diagramos matoma, kad mažiausias maksimalus nuokrypis gaunamas metodu M1, kai judėjimas trajektorija formuojamas pjezorobotui neatliekant sukamojo judesio $\varepsilon_{max} = 2,83$ mm. Šiuo metodu suformuotas trajektorijos aproksimuotas kelias turi mažiausią nuokrypį $d_{max\ approx} = 3,01$ mm. Didžiausias aproksimuotas nuokrypis gaunamas metodu M3, kai judėjimas trajektorija formuojamas atstojamųjų jėgų principu.

Be trajektorijos atkartojamumo tikslumo yra svarbūs ir pjezoroboto greičio bei nueito kelio tyrimai.

Apskaičiuoto ir praktiškai pjezoroboto nueito kelio suminis ilgis pateikiamas diagrama 4.20 paveiksle.



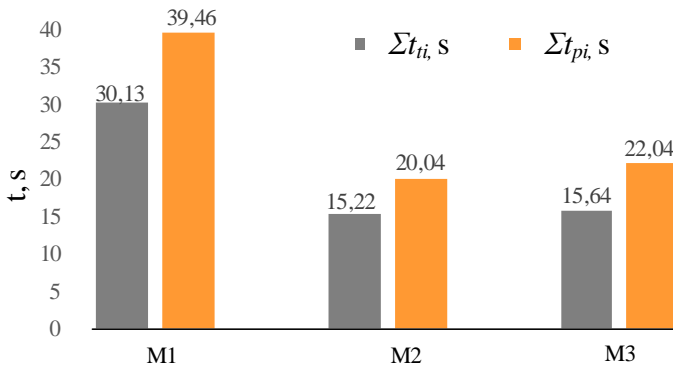
4.20 pav. Pjezoroboto suplanuotos trajektorijos ir nueito kelio ilgio palyginimas: čia M1 – judėjimas neatliekant sukamojo judesio; M2 – judėjimas su sukumpuoju judesiu; M3 – judėjimas trajektorija atstojamųjų jėgų principu

Fig. 4.20. Comparison of the planned trajectory of the piezorobot and the path length: where M1 – contact points method; M2 – tangents method; M3 – movement in trajectories by total force method

Iš gautų duomenų (žr. 4.20 pav.) matoma, kad ilgiausias kelias gaunamas metodu M1, kur trajektorija padalinama į daugiausia atkarpų. Šiuo metodu nueitas pjezoroboto praktinis kelias $\Sigma d_{pi} = 185,19$ mm, kas nedaug skiriasi nuo teoriškai suplanuoto $\Sigma d_{ii} = 179,71$ mm. Skirtumas yra nedidelis ir formuojant judesį M2 metodu.

Tyrinėjant pjezoroboto greitį buvo matuojamas laikas nuo starto iki trajektorijos pabaigos, t. y. kol pjezorobotas pasiekia koordinatę $x = 62$ mm, neįvertinant realaus kelio ir trajektorijos tikslumo.

Laiko matavimo rezultatai pateikti 4.24 pav.



4.24 pav. Pjezoroboto teorinės trajektorijos laiko ir laiko sugaišto atliekant judesį palyginimas. M1 – judėjimas neatliekant sukamojo judesio, M2 – judėjimas su sukumpuoju judesiu, M3 – judėjimas trajektorija atstojamųjų jėgų principu

Fig. 4.24. Comparison of the time wasted when piezorobot moves by different methods: where M1 – contact points method, M2 – tangents method, M3 – movement in trajectories by total force method

Iš gautų rezultatų matoma, kad ilgiausiai pjezorobotas užtrunka įveikdamas trajektoriją M1 metodu, nes dėl daugybės trumpų atkarpų tiek bendras atstumas, tiek laikas yra didesni. Teorinio ir praktinio laiko skirtumas čia taip pat didžiausias. Greičiausiai pjezorobotas juda valdomas M2 metodu su mažiausia teorinio ir praktinio laiko paklaida. Taikant metodą M3 teorinio ir praktinio laiko priklausomybė yra daugiau tikimybinė, nes praktiškai sunku įvertinti pjezoroboto segmentų tarpusavio sąveiką.

4.4. Ketvirtosios skyriaus išvados

Atliktus suformuotų trajektorijų kokybinių charakteristikų tyrimus galima teigti, kad:

1. Atlikus tyrimus kai pjezorobotas atkartoja suplanuotą trajektoriją neatliekant sukamojo judesio (metodas M1), gauta sąlyginai maža nuokrypa, trajektorijos įvykdymo laikas yra didžiausias grupėje, vadinasi judėjimas šia trajektorija yra tiksliausias ir lėčiausias. Skirtumas tarp teorinio ir praktinio trajektorijos laiko yra mažiausias. Tai paaiškinama tuo, kad suplanuotas pjezoroboto kelias šiuo metodu, susideda iš daug smulkių atkarpų, kas didina tikslumą bet mažina greitį.

2. Atlikus eksperimentinius tyrimus kai pjezorobotas valdomas trajektorija metodu su sukamuoju judesiu (metodas M2), gauta didesnė nuokrypa lyginant su metodu be sukamojo judėjimo (M1). Trajektorijos įvykdymo laikas yra didesnis

už pirmojo metodo, taigi pjezorobotas juda lėčiau. Skirtumas tarp teorinio ir praktinio trajektorijos laiko yra mažiausias Blogesni trajektorijos tikslumo rezultatai paaiškinami pjezoroboto inercija tais atvejais, kai jis atlieka sukamąjį judesį trajektorijos mazguose. Rezultatai gauti šiuo metodu yra priimtini ir metodas tinkamas realizuoti tiems atvejams kai aktualus didesnis pjezoroboto judėjimo greitis su priimtinu tikslumu.

3. Atlikus judėjimo tyrimus kai judesys formuojamas atstojamųjų jėgų principu (metodas M3) buvo tikrinama tik praktinė tokio judėjimo galimybė. Gauta atkartota trajektorija buvo artima suplanuotai, tačiau buvo pastebėtas didelis nuokrypis, todėl šis metodas praktiniam realizavimui priimtinas tik iš dalies. Trajektorijos tikslumą galima pagerinti tiksliai sukalibravus pjezorobotą ir sudarius sistemą, kuri realizuotų grįžtamąjį ryšį realiu laiku. Trajektorijos įvykdymo laikas yra didžiausias grupėje, esant mažiausiam praktiniam keliui toks sąlyginai lėtas pjezoroboto judėjimas sąlygotas pjezoroboto mechaninėmis savybėmis ir sunkiai prognozuojama gretutinių segmentų tarpusavio sąveika, kuri turi didelę įtaką jėgos vektoriui. Nepaisant didelio trajektorijos nuokrypio, šis metodas yra vertingas tuo, kad galima reguliuoti judesį generuojančios jėgos stiprį, vektorių kryptį, o kartu ir greitį visame trajektorijos kelyje arba pasirinktoje atkarpoje.

4. Atlikus išsamią skirtingų valdymo metodų lyginamąją analizę gali teigti, kad:

4.1. Pjezoroboto judėjimo trajektorija neatliekant sukamojo judesio yra tinkamas taikyti, kai reikalingas didesnis tikslumas;

4.2. Pjezoroboto judėjimas trajektorija su sukumpuoju judesiu tinkamas kai reikalingas didesnis greitis;

4.3. Pjezoroboto judėjimas trajektorija atstojamųjų jėgų principu tinkamas tik iš dalies ir turi perspektyvą kai yra aktualu keisti pjezoroboto judėjimo kryptį ir greitį bet kuriuo laiko momentu.

Bendrosios išvados

Apibendrinant disertacinio darbo rezultatus galima teigti:

1. Atlikus pjezorobotų darbų analizę nustatyta, kad pjezorobotams turintiems atraminius kontaktinius taškus, netinka klasikinių robotų, turinčių ratus bei kojas valdymo metodai.
2. Pjezorobotui valdyti taikytini signalo paskirstymo algoritmai, kurie paskirsto kompleksinį signalą segmentams taip, kad pjezorobotas judėtų apibrėžta trajektorija.
3. Valdymo sistemose sudėtingoms užduotims vykdyti yra tinkami MATLAB, labiau surištos su aparatine įranga – LabVIEW programinės priemonės. Aparatinė sistemos dalis turi keičia kompleksines kintamųjų reikšmes elektriniu signalu.
4. Pjezorobotų valdomo metodas neatliekant sukamojo judesio tinkamas pjezorobotams valdyti, kai aktualiausias trajektorijos atkartojamumo tikslumas.
5. Pjezorobotų valdomo metodas su sukamuoju judesiu tinkamas pjezorobotams valdyti kai aktualiausias judėjimo grietis.
6. Pjezorobotų valdymo metodas veikiantis jėgų atstojamosios principu tinkamas, kai reikia valdyti pjezoroboto judėjimo kryptį ir greitį realiu laiku.
7. Rekomenduojam kokybiškai judančių pjezorobotų valdymo sistemos užtikrinimui parinkti naujus sprendimus su grįžtamuoju ryšiu realiu laiku bei naujesnę aparatinę įrangą.

Literatūra ir šaltiniai

Abhishek K. G., et al. 2016. Real Time I–V and P–V Curve Tracer Using LabVIEW, Published in: *2016 International Conference on Innovation and Challenges in Cyber Security (ICICCS–INBUSH)*, IEEE Xplore: ISBN: 978–1–5090–2084–3.

Aleksandrov, V. S., et al. 2015. LabVIEW Virtual Instrument for Modeling and Control of Three-Phase BUCK Rectifier with Sinusoidal PWM. *Annual Journal of Electronics*. 2015, Vol. 9, ISSN:1313-1842, p224-227

Ata, A. A., et al. 2005. Trajectory Planning of a Constrained Flexible Manipulator. *Cutting Edge Robotics*, ISBN 3–86611–038–3, 784p.

Augustaitis A., et al. 2018. Control Features of 3D Deflector under Different Braking Conditions. *MECHANIKA*. 2018 Volume 24(5) ISSN 1392–1207 p746–750

Bansevicius, R. 2007. Mechatroninių nanometrų skyros daugiamačių poslinkiu generavimo/matavimo sistemų kūrimas ir tyrimas. *Aukštųjų technologijų programos Nr.B–07017 ataskaita*, Kauno technologijos universitetas.

Bansevicius, R. 2008. Mechatroninių nanometrų skyros daugiamačių poslinkių generavimo/matavimo sistemų kūrimas ir tyrimas. *Aukštųjų technologijų programos Nr. B–07017 ataskaita*, Kauno technologijos universitetas.

Bansevicius, R. 2009. Mechatroninių nanometrų skyros daugiamačių poslinkiu generavimo/matavimo sistemų kūrimas ir tyrimas. *Aukštųjų technologijų programos Nr. B–07017 ataskaita*, Kauno technologijos universitetas.

Bansevicius, R., et al. 2017. Piezoelectric kinematic pairs with several DOF in miniature high-resolution piezoelectric robots. *Journal Of Vibroengineering*. Nov 2017, Vol. 19, Issue 7. ISSN 1392-8716, p5182-5190.

- Bansevicius, R. et al. 2010a. Switching Leg Method For Trajectory Planning of Mobile Piezorobot. *Journal of Vibroengineering*. Vol 12, ISSUE 1. ISSN 1392–8716.
- Bansevicius, R., et al. 2010b. Development and Investigation of Novel Design Piezo-actuated Laser Beam Shutting System. *Journal of Vibroengineering* Volume 12. ISSUE 1. ISSN 1392–8716 p. 388–396.
- Bansevicius, R. et al. 2011a. *Research of Dynamic Characteristics of Piezoelectric Actuator Used in Flow Control Device*. *Journal of Vibroengineering* Volume 13, Issue 4. ISSN 1392–8716
- Bansevicius, R., et al. 2011b. Attitude Control of Micro and Nanosatellites Using Multi-degree-of-Freedom. *Piezoelectric Actuators, In Vibration Problems ICOVP 2011* 379–384. Springer Netherlands.
- Bansevicius R., et al. 2012. Cylindrical Piezoelectric Mobile Actuator Based on Travelling Wave. *Mechanika*. Volume 18(5): 554–560. ISSN 1392 – 1207
- Bansevicius, R., et al. 2013. Design of Mobile Microrobot Based on Standing and Travelling Waves. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. DOI: 10.5772/56111
- Bansevicius, R., et al. 2016. Trajectory planning for stabilization system of Nanosatellite. *21st International Scientific Conference MECHANIKA 2016*. Proceedings p22 – 28. ISSN 1822–2951
- BLADTER LensSelector [interaktyvus]. [žiūrėta 2017–05]. Prieiga per internetą: <https://www.baslerweb.com/en/support/tools/lens-selector/>
- Borah, M., et al. 2014. Design of a fractional order pd controller tuned by firefly algorithm for stability control of the nonlinear ball and plate system. In: *IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies*, Ramnathapuram, India (2014). ISBN No. 978-1-4799-3914 p.214-218.
- Breguet M., et al. 2006, A Review On Actuation Principles For Few Cubic Millimeter Sized Mobile Micro-Robots. *CiteScreen 2006* [žiūrėta 2018–05]. Prieiga per internetą: citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.167.3231
- Bubulis, A., Jūrėnas, V; 2008. *Pjezomechanika* VPU ISBN978–9955–20–296–7 p.142.
- Changhai R., et al. 2007. Tracking Control Method of Piezoelectric Actuator for Compensating Hysteresis and Creep. *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2007. NEMS '07. 2nd IEEE International Conference. ISBN: 1–4244–0609–9
- Costa, T. A., et al. 2008. Parametric Trajectory Generation for Mobile Robots, *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 3: 300–307.
- Crossley, V., et al. 2006. Midterm Progress on a Piezo-Actuated Deformable Spherical Robot [interaktyvus]. [žiūrėta 2013–05]. Prieiga per internetą: http://vcrossley.com/rolling_robot_midterm_4_5_2006.pdf.
- Cuevas, E., et al. 2004. Walking Trajectory Control of a Biped Robot: *Technical report* B–04–18

- Daniel, J., et al. 2009. Real-Time Trajectory Generation for Advanced Driver Assistance Systems Applications, *International Forum on Strategic Technologies*, 83–88.
- Delingette, H., et al. 1991. Trajectory Generation with Curvature Constraint Based on Energy Minimization, *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '91*, Proceedings IROS '91: 206–211.
- Dictino, C., et al. 2013. Virtual and Remote Robotic Laboratory Using EJS, MATLAB and LabVIEW, *Sensors* (14248220). Feb2013, Vol. 13 Issue 2, ISSN:1424-8220 p2595-2612.
- Djermanova, N., et al. 2016. *LabVIEW Based ECG Signal Acquisition and Analysis*, *XXV International Scientific Conference Electronics (ET)*, IEEE Xplore: ISBN: 978-1-5090-2883-1.
- Drukteinienė A. 2011. Nanometrų skyros judančių daugiamačių pjuzorobotų trajektorijų formavimas. *Daktaro disertacija*. Vilniaus Gedimino Technokos Universitetas. Vilnius.
- Drukteinienė A. 2011 Manometrų skyros judančių daugiamačių pjuzorobotų trajektorijų formavimas. *Daktaro disertacija*. Vilnius VGTU. ISBN 978-9955-28-970-8.
- Giannone E., et al. 2010. Data acquisition and real-time signal processing of plasma diagnostics on ASDEX Upgrade using LabVIEW RT, *Fusion Engineering and Design*, Volume 85, Issues 3–4, 2010, ISSN 0920-3796, p 303-307.
- Giannone L., et al. 2011. Data acquisition and real-time bolometer tomography using LabVIEW RT, *Fusion Engineering and Design*, Volume 86, Issues 6–8, 2011, ISSN 0920-3796 p.1129-1132.
- Goyal A., et al. 2017. Real-time Monitoring of Alternator Using LabVIEW. *Journal of Control & Instrumentation*. 2017; 8(1): p 30–34.
- Guo, Y., et al. 2007. Global Trajectory Generation for Nonholonomic Robots in Dynamic Environments, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1324–1329.
- Hariri H., et al. 2010. Locomotion principles for piezoelectric miniature robots *LGEP Laboratoire de Génie Electrique de Paris, Gif sur Yvette Cedex* Proceedings 91192,
- Ivanauskas A. 2005. Automatinio valdymo teoriniai pagrindai: tiesinės tolydžiosios sistemos. *Kaunas Technologija* ISBN: 995509964
- Juhasz L., et al. 2011. FPGA-Based Control of Piezoelectric Actuators. *Serbian Journal of Electrical Engineering*. Vol. 8, No. 2, p181–201. DOI:10.2298/SJEE1102181J
- Johannes R.; Merry E. 2009. Performance-driven control of nano-motion systems. *Dutch Institute of Systems and Control* ISBN 9789038620596.
- Klinger T., 2008. Image Processing with LabVIEW and IMAQ Vision. *Prentice Hall*, ISBN-13: 978-0130474155
- Koch, J. 1988. Piezoxide. Hamburg: Heidelberg.

Kulvietis G. 2012. Masteliojamų nanometrų skyros pjezrobotų modeliavimas ir trajektorijų valdymas. *Lietuvos mokslo taryba, projektas Nr. MIP-12256 metinė ataskaita*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

Lavalle, S. M. 2004. Planning Algorithms. *Cambridge University Press*, 842 p.

Liu Y., et al. 2013, Hysteresis and Creep Modeling and Compensation for A Piezoelectric Actuator Using A Fractional-Order Maxwell Resistive Capacitor Approach, *Smart Materials and Structures*, Volume 22, 2013 [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-01]. Prieigaper internetą: <http://wwwstacks.iop.org/SMS/22/115020>

Mažeika, D. 1999. Daugiamačių pjezokeitiklių geometrijos ir elektrodų konfigūracijos optimizavimas. *Daktaro disertacija*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

Mažeika D. 2011. Daugiamačių pjezomechaninių sistemų modeliavimas *Mokslo darbų apžvalga*. VGTU, ISBN 9786094570247.

Mohammad J., et al. 2009. Hysteresis compensation for smart actuators using inverse generalized Prandtl-Ishlinskii model. *American Control Conference*, 2009. ACC '09. Pages: 307 – 312. ISBN: 978-1-4244-4523-3

Mitra. A., et al. 2007. Evaluating Sinusoidal Functions by a Low Complexity Cubic Spline Interpolator with Error Optimization. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 2(2): 1 10-1 17.

NI Inc. 2003. IMAQ Vision for LabVIEW User Manual Austin, Texas 78759-3504

NI Inc. 2010. Perspective and Nonlinear Distortion Calibration. [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-09]. Prieiga per internetą: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370281M-01/nivisionlvbasics/perspective_and_nonlinear_distortion_calibration/

NI Inc. 2014. What is the LabVIEW Control Design and Simulation Module. [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-10]. <http://www.ni.com/white-paper/11281/en/>

Oxford, Definition of robot. [interaktyvus] Oxford English Dictionary, [žiūrėta 2018 06]. Prieiga per internetą: http://public.oed.com/?post_type=page&s=robot

Ragulskis, K., et al. 1988. Vibromotors for Precision Microrobots. USA: *Hemisphere Publishing Corp*. 310 p.

Roel J., et al. 2009. Using a Walking Piezo Actuator to Drive and Control a High-Precision Stage. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 14, No1. p21 – 31. DOI: 10.1109/TMECH.2008.2006756.

Roel J., et al. 2014. Gain Scheduling Control of a Walking Piezo Actuator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2014, Vol.19, Issue 3 p. 954 – 962, DOI: 10.1109/TMECH.2013.2264834

Skorc G., et al. 2011. Position Control with Parameter Adaptation for a Nano-Robotic Cell. *Jornal of Mechanical Engineering*. (57) 4. p313-322.

Stoer, J.; Bulirsch, R. 2002. Introduction to Numerical Analysis. 3. Springer. 744 p.

Siciliano, B., et al. 2009. Robotics: Modelling, Planning and Control. *Springer*. 632 p. ISBN 978-1-84628-642-1.

- Singh P. et al. 2011. LabVIEW–based cost effective Multi–Axis Motion Control System, *Annual IEEE India Conference Proceedings*, ISBN: 978–1–4577–1109–1
- Sofla, M. S., et al. 2011. Observer–Based Robust Motion Control Of A Piezo–Actuated Stage Under External Disturbances. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. Vol. 34 p. 365–375.
- Snitka, V. et al.1996. The Status of Ultrasonic Motors in the Former Soviet Union, *Ultrasonics KTU* 34(2–5): 247–250.
- Torii A., et al. 2011. Control of a Tripedal Robot Walking with a Shuffle. *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 177, No. 4. p. 467–474. DOI 10.1002/eej.21192
- Wang T.Y., et al. 2004. Adaptive Trajectory Tracking Control of a Wheeled Mobile Robot, Lyapunov Techniques, *IEEE 30th Annual Conference*, p. 389–394, ISBN: 0–7803–8730–9.
- Woern H., et al. 2000. Flexible Microrobots for Micro Assembly Tasks, *IEEE Xplore* ISBN: 0–7803–6498–8.
- Woern H., et al. 2001. From decimeter– to centimeter–sized mobile microrobots the development of the MINIMAN system. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 4568 DOI: 10.1117/12.444124.
- Wuni X. et al. 2010. Image processing based on seamless integration technology between LabVIEW and MATLAB. *Proceedings of 2010 International Conference on Information, Networking and Automation (ICINA)*. IEEE Xplore: 15 November 2010, ISSN: 2162-5484.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ paskelbti straipsniai:

Bansevicius R., Drukteinienė A., Kulvietis G., Mačerauskas E., Janutėnaitė J., Mažeika D. Fine Trajectory Planning Method For Mobile Piezrobots, *Journal of Vibroengineering*. Vol. 18, Issue 4, 2016, p. 2043–2052. ISSN 1392–8716. vol. 18, iss. 4 (2016), p. 2043–2052.

Janutėnaitė Bogdaniienė J., Mačerauskas E., Drukteinienė A., Kulvietis G., Bansevicius R. Cylindrical Piezrobot's Trajectory Planning and Control, *Journal of Vibroengineering*. ISSN 1392–8716. vol. 19, iss. 4 (2017), p. 2670–2679.

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science proceedings“ paskelbti straipsniai:

Bansevicius R., Kulvietis G., Mačerauskas E., Janutėnaitė J., Drukteinienė A., Mažeika D. Trajectory Planning for Stabilization System of Nanosatellite. *Proceedings of 21th International Conference “MECHANIKA 2016”*. ISSN 1822–2951

Straipsniai kituose leidiniuose

Mačerauskas E., Janutenaitė Bagdonienė J., Kulvietis G. Control Methods For Piezomechanical Robots Moving in Trajectories: Software and Hardware. 2017 *Open conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*: proceedings of the conference, April 27, 2017, Vilnius, Lithuania / Organized by: Vilnius Gediminas technical university. New York: IEEE, 2017. ISBN 9781538639986, p. 1–5.

Mačerauskas E., Kulvietis G. Žiedinis 2d plokštumoje judančio pjezoroboto prototipas ir jo valdymo metodai, *Mokslo taikomųjų tyrimų įtaka šiuolaikinių studijų kokybei mokslinių straipsnių rinkinys*, Vilnius, 2015, ISSN 2029–2279; 12 – 22 psl

Mačerauskas E., Kulvietis G., Janutenaitė J., Drukteinienė A.. Feromagnetinės sferos valdymas pjezokeitikliu, *Mokslo taikomųjų tyrimų įtaka šiuolaikinių studijų kokybei mokslinių straipsnių rinkinys*, Vilnius, 2016, ISSN 2029–2279; 11 – 20 psl.

Mačerauskas E., Janutenaitė Bagdonienė J., Kulvietis G., Drukteinienė A., Morkvėnaitė–Vilkončienė I., Lučun A. Suplanuotomis trajektorijomis judančio cilindrinio pjezoroboto valdymas. *Mokslo taikomųjų tyrimų įtaka šiuolaikinių studijų kokybei mokslinių straipsnių rinkinys*, Vilnius, 2017, ISSN 2029–2279; 39 – 50 psl.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Innovative development of science and technology has created the need to have small-scale industrial manipulators, robots, and research devices capable to move by the planned trajectory with high precision and speed. To achieve these requirements, piezomechanical motion converters are used, which allow small-scale devices to operate quickly and efficiently. The Lithuanian scientists' researches in the development of piezorobots have a great impact in the world and working at a global level. Development of new type of piezo devices involves the creation of new control methods, since general control methods, which are based on functions that describe the status of a moving object at a given time point is suitable only for regular robots' control. Piezorobots needs completely different control principle because they do not have additional motion-generating structures, only direct points of contact with a static plane. Independently on the trajectory of motion, piezorobots moving by the given trajectory with an acceptable accuracy can be controlled by complex electrical signals.

Despite the fact, that progress is very high, piezorobots control methods developed by Lithuanian scientists are not applied in practice, in most cases, only theoretical calculations and mathematical modeling were performed (Drukteinienė A. 2011). The purpose of such solutions is to force the piezorobot to move in the plane by following a certain mathematically described trajectory.

The piezorobots control experiments show high deviations from theoretical calculations due to the hardly predicted operation of the piezomechanical transducers, the hysteresis effect, deformation dependence on voltage functions, etc. The inaccuracy in the design of piezorobot also has high influence, since piezorobot mechanical contact with a stationary plane will be unideal. In this case, both the surface of the contact and the plane itself cannot be unambiguously described.

The dissertation focuses on the creation of a new piezorobot's control method, including the development of a new trajectory's control software, algorithms, and their application in experimental research.

Relevance of the thesis

The piezorobot motion control when it is moving in a plane by a certain trajectory is a very important problem. The precise control of piezorobot allows to control the positioning of it with a resolution of several tens of nanometers; and to carry over the objects without changing the parameters of robot's motion (Bansevicius, R. 2009). The precise positioning of piezorobots and using of manipulators of variable degrees of freedom creates new opportunities for creating the next generation of robots capable to perform precise and complex operations. Such applications of piezorobots are particularly relevant in scientific research systems, in medicine and elsewhere, where precise action is required and environmental conditions can change unpredictably.

From the works of Lithuanian and foreign scientists and the prospects of the development of robotic systems, it can be stated that the three degrees of freedom ring, cylindrical and hemispherical piezomechanical devices are suitable for positioning in the plane (Drukteinienė A. 2011). For these three types of piezorobots, similar control methods can be applied. Therefore, the further development of the most accurate and fast precision piezoelectric based robotic systems becomes possible. With the development of sufficiently effective software, this type of piezorobot can be controlled considering environmental conditions. Also, one can expect their commercial application in research, industry, medicine and other fields.

Research object

The object of research is the management of piezomechanical microrobots moving in the trajectories.

Objective of the thesis

To create a control system for piezorobots moving in trajectories

Tasks of the thesis

To achieve the goal, these tasks have to be solved:

1. To perform information analysis of the piezo actuators and piezoelectric microrobots moving on the plane, operating principles, motion generation methods.

2. To create algorithms for the formation and control of the piezorobots moving on the plane.
3. Create a control system for piezobots moving in trajectories and to develop control software.
4. Carry out practical experiments of piezorobots moving in trajectories created by control methods and determine the suitability of methods for solving different applied scientific tasks.

The research methods

The work was performed by theoretical and experimental methods.

The knowledge in piezorobots design, the principles of movement generation, and formation of trajectory was obtained from literature analysis. For algorithms creation and analysis, mathematical modeling methods were used. Comparing analysis methods were applied in qualitative characteristics of piezorobots movement trajectory.

Scientific novelty

The following new results in informatics engineering have been and are being implemented in the preparation of the dissertation:

1. Based on previous theoretical calculations by scientists, for the first time, the movement of a cylinder-type piezobot having a three contact point and moving in trajectories on the plane was implemented.
2. New control algorithms for piezobot's moments in trajectories at the plane in the plane, which evaluate the uniqueness of piezomechanical robots with three contact points. The algorithms, by the mathematical expression of the trajectory, distribute the control signals to the piezobot's segments to move it to a defined trajectory.
3. New methods of controlling piezobots have been developed and checked experimentally. The methods allow controlling the piezomechanical robot with three contact points moving in trajectories on the plane according to the previously known and mathematically described trajectory.
4. Newly developed methods and algorithms are versatile and suitable for all types of piezorobots moving in a plane, with three or three-point areas contact points. Adjusted methods, the universality of piezorobots movement principles can be applied to other robots with a number of contact points.

Practical value of the research findings

The research results were submitted to high-tech program „Piezobot Trajectory Modeling and Control of Scalable Nanometric resolution Piezorobots" foundation by Research Council of Lithuania (No. MIP-075/2012 and MIP-084/2015). Project supervisor was prof. (HP) dr. Genadijus Kulvietis.

Piezobot with three contact points can be used as a basis for manipulating robots with manipulators. With the methods developed, nanometric microrobots can be expected

to deliver good results in precision positioning systems. Plane positioning and load-carrying piezo-robots have the prospect of applying them in microscopic manipulators in biological studies, using in biological cell researching systems in conjunction with a microscope of nuclear forces.

Defended statement

The following statements are defended:

1. The control method of piezorobot moving in trajectories without rotating motion is suitable for piezorobot's control when piezorobot's speed is important.
2. The control method of piezorobot moving in trajectories with rotating motion is suitable for piezorobot's control when piezorobot's speed is important.
3. The control method of piezorobot moving in trajectories by total forces is suitable for piezorobot control when it is necessary to change the direction and velocity of the piezorobot at the same time.

Approval of the research results

Seven scientific articles have been published on the topic of the dissertation: two in scientific journals included in the Thomson ISI Web of Science international databases (Mačerauskas E 2016, 2017); two - in the reviewed international conference materials Thomson Reuters database ISI Proceedings (Mačerauskas E 2016, 2017), three in other databases.

The results of the research carried out in the dissertation were published at five scientific conferences:

- International Conference Mechanics 2016 Kaunas Lithuania.
- International conference "eStream", 2017 - Open conference of Electrical, Information and Information Sciences. 2017, Vilnius Lithuania.
- The National Conference "The Impact of Applied Research on the Quality of Current-Time Studies" - 2017 2016, 2015, Vilnius Lithuania.

The author's personal contribution

An experimental system for piezobots control has been developed.

Theoretical methods of forming trajectory trajectories of trajectory trajectories developed by colleagues in the realization of its management methods in the LabVIEW environment were realized. For the first time, these methods have been put into practice.

The method of the formation of trajectories of retrograde forces was developed and the method of management in the experimental system was realized.

The structure of the dissertation

The scientific work consists of an introduction of the dissertation, 4 chapters, general conclusions, references, list of author's publications and annexes. The total scope of the dissertation – 113 pages without a summary, 44 indexed equations, 94 pictures, 3 tables.

1. An overview of the piezo effects and piezomechanical actuators

In other authors researches, piezoelectric converters used for robots moving goals are controlled by high-frequency oscillations. The problem is that the motion itself is generated not directly by piezoelectric converters, but using additional structures such as legs and wheels. Walking robots are mainly intended for work in different types of microscopes.

The cylindrical, annular and buccal piezoelectric robots can also be attributed to walking robots because they can move in the plane (Fig. S1.1).



Fig. S1.1. a prototype of the cylinder-type piezoactuator (Bansevicius 2007).

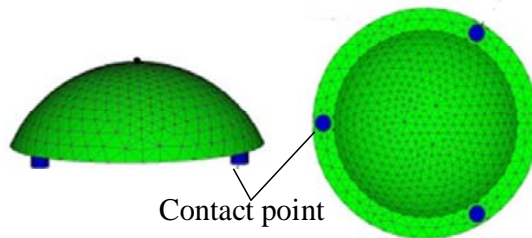


Fig S1.2. Hemispheric piezoelectric actuator model (Drukeitinienė A. 2011)

By analyzing moving robots with piezoelectric motion transducers, it was found that the literature describes the structure of the robot or the principles of its operation when the contact point moves along the ellipse trajectory (Fig. S1.2).

The legs of these piezorobots (for example MINIMAN-V), move on the “stick-slip” principle. The mathematical principles of motion are described. In literature, the necessary control signals for the electrodes are provided. Figure S1.3 shows the path of the piezorobot MINIMAN-V, and a foot contact moving in ellipse by the x, z plane and the time-delay signal diagrams are shown in Fig. S1.3b.

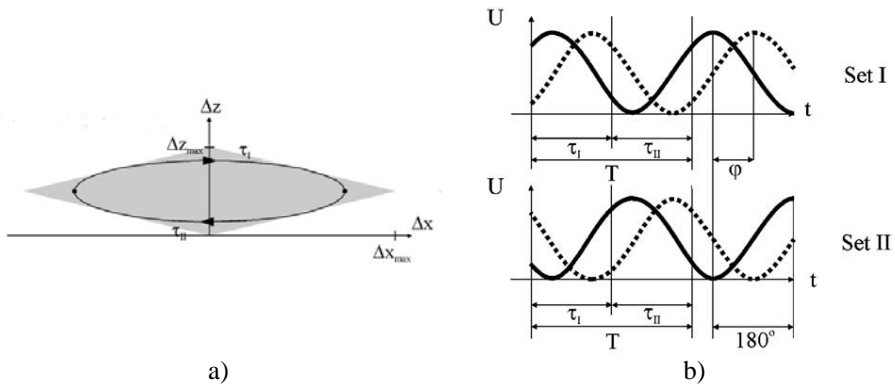


Fig. S1.3. Poisoning leg of MINIMAN–V piezorobot positioning by ellipse around diamond edge (Woern H. et al. 2001):

a) – the positioning trajectory, b) – control signal $U(t)$; the dashed line – the signal in the direct direction and continuous – back direction

However, the methods and algorithms for motion routines for these robots are not known.

The theoretical methods are used to form trajectories in which the robot can move at the highest speed, or to maximize trajectory accuracy. It has also been established that such studies have not been carried out.

2. Path planning algorithm for cylindrical piezoelectric mobile piezorobot

This cylindrical mobile piezorobot can be used as a moving device in two-dimensional plane. Two electrodes exciting methods are used for the excitation of piezorobot: 1. Single electrode sector is excited at a time, which generates rectilinear motion in the XY plane. 2. All three electrode sectors are excited at a time with a phase difference of 120°. In this case, piezorobot will rotate around its central axis.

Using these two excitations methods the path planning algorithm was developed.

2.1. Control method when piezorobot is not rotating

The piezorobot linear motion is formed by only one active segment, and the trajectory path consists of a series of straight sections. A piezorobot consisting of three segments ($c = 3$) is analyzed. Movement is created by exciting one of the segments, therefore, the robot moves from one trajectory point to another without any rotation (Fig. S2.1).

In this case, the only power actuator is active at a time and mobile piezorobot cannot rotate.

Move given by function: $\Psi=f(x,y)$. Function Ψ must be continuous at each point

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (a,b)} f(x,y) = f(a,b) \quad (\text{S2.1})$$

where $a \in [x_0; x_n]$, $b \in [y_0; y_n]$.

Maximum deflection ε from function $f(x, y)$, which cannot exceed the mobile between $g^* < \Psi < g^{**}$, where g^* and g^{**} marginal coordinates (Fig S2.1).

Problem is analysed when original trajectory is curve, which is formatted between given points $(x_0; y_0)$, $(x_{l-1}; y_{l-1})$, $(x_l; y_l)$, $(x_{l+1}; y_{l+1}) \dots$,

To find the coordinates of limit described by maximum deflection ε_{max} , it is necessary to solve simultaneous equations:

$$\begin{cases} y_{g_i} - y_{f_i} = -\frac{(x_{g_i} - x_{f_i})}{\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_{f_i}}} \\ \varepsilon_{max} = \sqrt{(x_{g_i} - x_{f_i})^2 + (y_{g_i} - y_{f_i})^2} \end{cases} \quad (S2.2)$$

Where $(x_{f_i}; y_{f_i})$ point at function $f(x, y)$, $(x_{g_i}; y_{g_i})$ marginal coordinates, ε maximum deflection, $i = 0, 1, 2 \dots, n$ function's point number.

$$g_i(x_i, y_i) = \begin{cases} g^*(x_i, y_i), & \text{if } K = 1; \\ g^{**}(x_i, y_i), & \text{if } K = -1 \end{cases} \quad (S2.3)$$

$(x_N; y_N)$, where number of movement points, $N > 2$. Curve functions are cubic splines in parametric form

$$S_i = \begin{cases} S_{x_i} = (x_{i+1} - x_i) \cdot t + x_i \\ S_{y_i} = (y_{i+1} - y_i) \cdot t + y_i \end{cases} \quad (S2.4)$$

Where t is parameter of parametric function.

Piezorobot movement in trajectory by this method illustrated by Fig. S2.1.

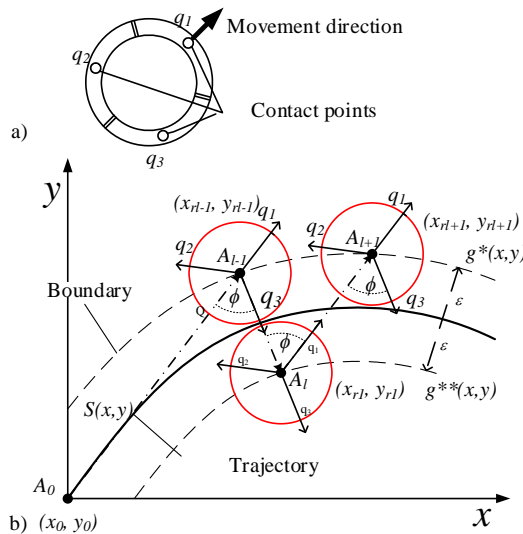


Fig. S2.1. Mobile piezorobot motion by given trajectory without rotation:

- a) – piezorobot’s movement direction and contact points,
- b) – the diagram of piezorobot movement by given trajectory

The duration of control signal when piezorobot moves between coordinates A_{l-1} , A_l :

$$t_i = \sqrt{\frac{2Md_i}{|\vec{F}|}}, \left| \sqrt{(x_{r_l} - x_{r_{l-1}})^2 + (y_{r_l} - y_{r_{l-1}})^2} \right| \neq 0. \quad (\text{S2.5})$$

Where M – the mass of piezorobot, $|\vec{F}|$ – the segment's excitation force, d_i – the distance between the coordinates.

According to (S2.4) and (S2.5), the control algorithm of piezorobot with three contact points was created.

2.2. Tangents method with rotational motion

Tangents method with rotational motion uses the principles of adaptive path control algorithm (Drukteinienė A. 2011). In this case, the orientation angle of piezorobot is changing. Using this method, the tangents of the trajectory can be calculated and piezorobots can rotate at the ends of the straight sections. The trajectory formation method is similar to (2.5), with the added rotation of the piezorobot.

The minimum rotation angle of the piezorobot (Drukteinienė A. 2011):

$$\theta_{\min} = \frac{180^\circ \cdot \lambda_{\min}(M, \omega)}{\pi(r_{\text{vid}} + d/2)}, \quad (\text{S2.6})$$

where M – mass of piezorobot, ω – frequency of the control signal, c – number of controlled segments, d – diameter of contact point, λ_{\min} – minimum displacement,

Piezorobot movement in trajectory by this method is shown in Fig. S2.2.

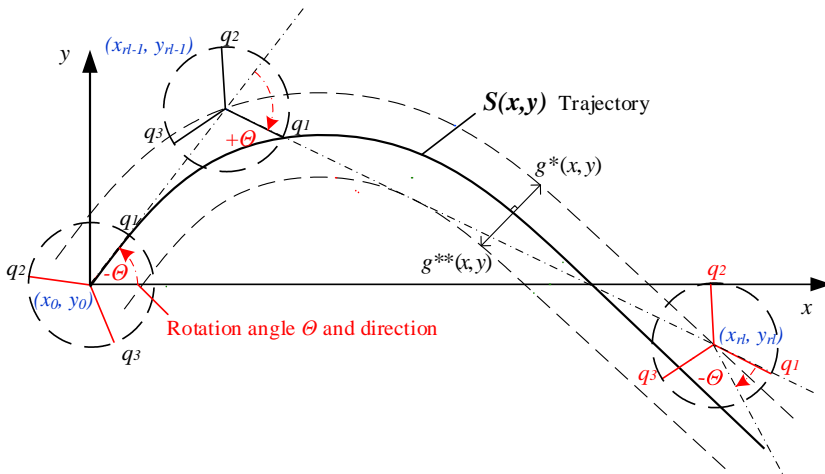


Fig S2.2. The trajectory formation scheme by tangents method with rotational motion:
 a) – piezorobot's movement direction and contact points, b) – the diagram of piezorobot movement by given trajectory

The control algorithm of piezorobot using tangents method rotational motion was created.

2.3. Piezorobot control method by total forces

In this case mobile piezorobot is moving by a given parametric trajectory $S(x(t), y(t))$ in two-dimensional space, where t – is parameter. Results are forces of separate electrode segment $|\vec{f}_{ji}|$ and their total force $|\vec{F}_i|$ at the trajectory point $(x(t_i), y(t_i))$. The problem was solved in two different situations: when $|\vec{f}_{ji}| \in [0, f_{max}]$ and $|\vec{f}_{ji}| \in [f_{min}, f_{max}]$. Orientation of the total force \vec{F}_i is the same as tangent line orientation at trajectory point $(x(t_i), y(t_i))$ as show in Fig.S2.3.

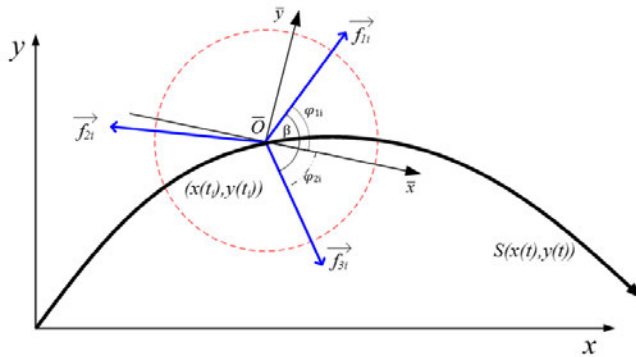


Fig. 2.3. The scheme if motion generator by given trajectory

Since the aim is to maximize traveling velocity of the piezorobot, so electrode segment that is closed to the total force vector must be selected for the excitation and its numeric value are equal to maximum:

$$|\vec{f}_{ji}| = f_{max}, \text{ if } \varphi_{ji} = \min(\varphi_{1i}, \varphi_{2i}, \varphi_{3i}), \quad (\text{S2.7})$$

where $\varphi_{ji} = \widehat{\vec{F}_i, \vec{f}_{ji}}$.

Forces of the individual electrode segments are equal to:

$$|\vec{f}_{ji}| = \lambda_{ji} f_{max}, \quad (\text{S2.8})$$

where λ_{ji} is proportionality coefficient

When all values of the segments are known, then the total force is calculated as follows:

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1}^c \delta_{ji} \vec{f}_{ji}, \quad (\text{S2.9})$$

where $\delta_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq \varphi_{ji} < \beta \\ 0, & \text{if } \varphi_{ji} \geq \beta \end{cases}$.

Numeric values of the third force $|\vec{f}_{ji}^*|$ and the total force are unknown (Fig. S2.4). These values were calculated after solving the system of equations:

$$\begin{cases} |\vec{F}_i| \cos \theta_i = \sum_{j=1}^c |\vec{f}_{ji}| \cos \varphi_j, \\ |\vec{F}_i| \sin \theta_i = \sum_{j=1}^c |\vec{f}_{ji}| \sin \varphi_j, \end{cases} \quad (\text{S2.10})$$

where θ_i is angle between tangent line and x -axis and

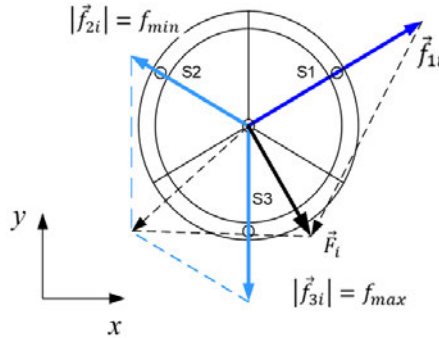


Fig. 2.4. The total force movement of the piezorobot

- a) – adjacent segments generated forces and total force,
- b) – the resultant of all forces generated by all segments

The fore generated by each electrode:

$$|\vec{f}_{ji}| = \begin{cases} f_{min}, & \text{if } |\vec{f}_{ji}| = 0, \\ f_{max}, & \text{if } \varphi_{ji} = \min([\varphi_{ji}]), \\ |\vec{f}_{ji}^*|, & \text{else} \end{cases} \quad (\text{S2.11})$$

The control algorithm of piezorobot using total forces method rotational motion was created.

3. Development of a control system of piezorobot moving in a plane

In order to check the validity of the previously described control model and to check it controls principles in practice, an experimental system was developed.

Piezorobot is working on a glass plate. Piezorobot's signal was amplified using high voltage amplifier and interface to hardware output was set according to the technical requirements of National Instruments NI-DAQmx hardware.

The structure of the piezorobot control and path verification system is presented in Fig. S3.1.

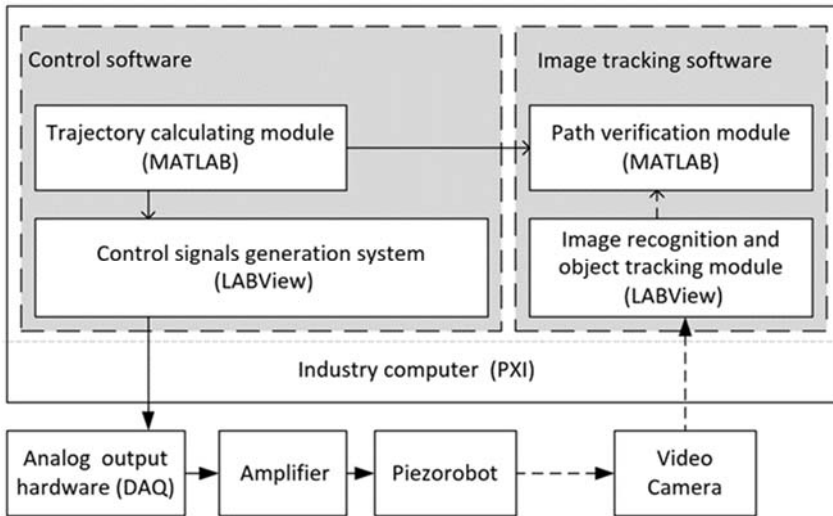


Fig. S3.1. The structure of the piezorobot control and path verification system

Control and trajectory monitoring system block diagram is shown in Fig. S3.2.

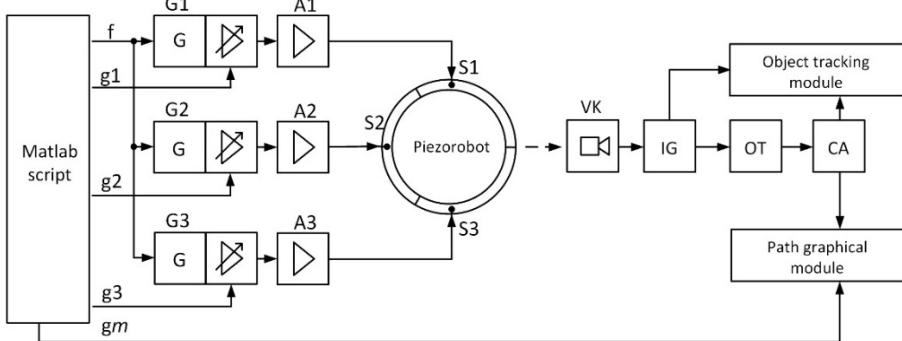


Fig. S3.2. The structure of the piezorobot control and path verification system

The trajectories planning module software is based on MATLAB and is used to calculate the trajectories of piezorobot. Analog signal control sequence for control of piezorobot was formed using signals formation and distribution system. Analog output hardware DAQ (Data Acquisition) is a piece of physical equipment that distributes the analog signals to the physical outputs. Piezorobot moves on a glass surface using high voltage sinusoidal signal therefore analog high voltage amplifier is needed. Trajectory planning software was integrated into the LabVIEW software with MATLAB module (Matlab script) forms a sinusoidal frequency control signal (f) for three sinusoidal signals generators G1, G2 and G3. They create a sinusoidal signal for the control of piezorobot. Amplitude control signals (g_1, g_2, g_3) change the amplitude of each signal at the right time and manage the amplifiers A1, A2, and A3. Each segment of piezorobot (S1, S2, and

S3) received an enhanced signal and individually manages the amplitudes according to the algorithm given by mathematical Matlab script that calculates variables' values according to given piezobot's algorithm.

Trajectory monitoring hardware consists of a high-resolution video camera - and LabVIEW – Matlab based image processing software. The software is designed for visual tracking with image grabber (IG). Object tracker (OT) is designed to track piezobot and create an array of path coordinates (CA). Movement of piezobot is observed in real time through Image and Object module and trajectory path graph is generated. Path trajectory monitoring module simultaneously receives theoretical coordinates from Matlab module.

4. Investigations of piezobots moving in trajectories

Empirical experiment with the previously described system has been completed. Mathematical model of planned movement trajectory was created with MATLAB and installed to LabVIEW based control program.

Piezobots moves on a glass surface and creates a trajectory that is defined $asy = \sin(x)$, when $x \in (0:2\pi)$.

Traveled path of piezobot is monitored using a video camera and is graphically presented on the computer screen (Fig. S4.1.)

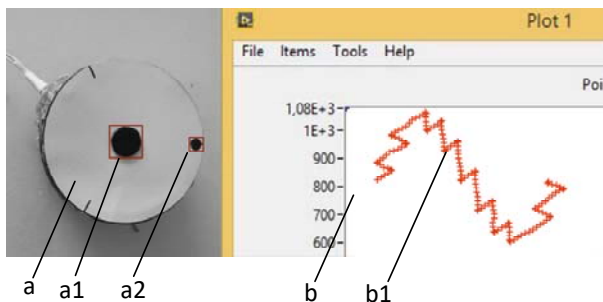


Fig. S4.1. Piezobot's path view in software interface, where a – image of the piezobot, a1 –piezobot's central point, a2 – direction point, b – graphical window of trajectory, b1 – practical view of practical trajectory

Acquired graphical information can be analyzed using automatic image processing tools and monitoring visually. The formed array of coordinates' values can be processed with MATLAB and in future applied for automatic control.

The results of the qualitative research of repeatability of piezoelectric trajectories in the practical research yielded different results of repeatability of full-the period of the sinusoidal function.

The practical piezoelectric path obtained in three different methods is presented in one diagram shown in Fig. S4.2.

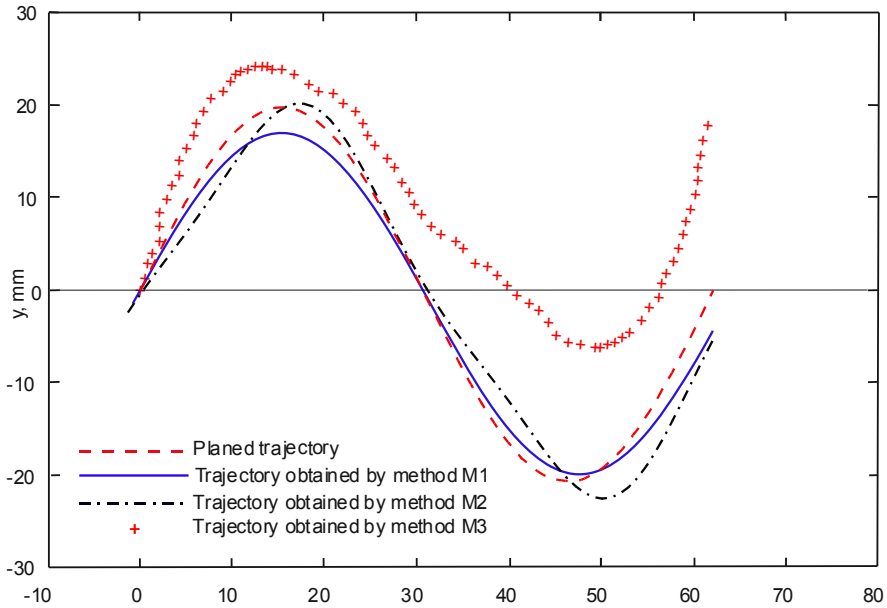


Fig. S4.2. Planned trajectory and practical path of the piezorobot graphical comparison in tree difenent method, where M1 – contact points method, M2 – tangents method, M3 – movment in trajectories by total force method

The trajectory accuracy is defined by the maximum deviation from the given trajectory ϵ_{max} , the approximated value of the deviation d_{max_aprox} indicates how much the given trajectory is distorted.

Graphically these values shown in Fig. S4.3.

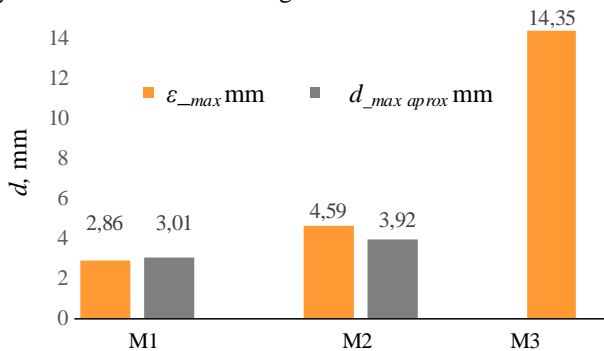


Fig. S4.3. Comparison of a maximum error of piezorobot between the path and planned trajectory, where M1 – contact points method; M2 – tangents method; M3 – movement in trajectories by total force method

From Fig. S4.3 the diagram below shows that the minimum deviation is obtained by method M1 when the trajectory movement is formed by the method where a piezorobot without rotational motion ($\varepsilon_{max} = 2,83\text{mm}$). The trajectory approximated by this method has the smallest deviation ($d_{max\ approx} = 3,01\text{mm}$). The maximum approximated deviation is obtained by the M3 method, when the path is formed by the total force method.

During the piezorobot velocity research, the time from the start to the end of the trajectory was measured, i.e. until the piezorobot reaches the coordinate $x = 62\text{ mm}$, without considering the actual path and trajectory accuracy. The time measurement results are presented in Fig. S4.5.

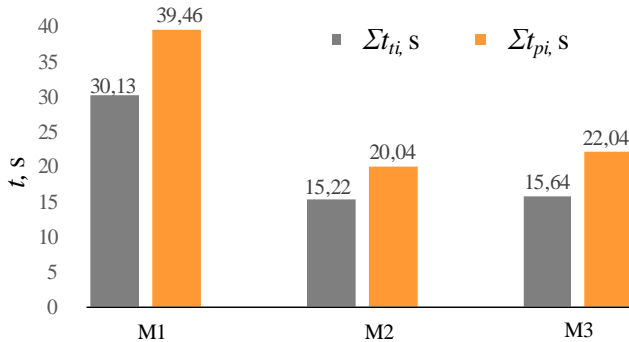


Fig. S4.5. Comparison of the time wasted when piezorobot moves by different methods, where M1 – contact points method, M2 – tangents method, M3 – movement in tra-jectories by total force method

From the results obtained, it can be seen that the longest piezorobots movement time in the trajectory is obtained using the method M1 since both the total distance and the time are greater for a large number of short sections. The difference between theoretical and practical path time is also the greatest. Probably piezorobot moves are controlled by the M2 method with minimal theoretical and practical time error. Using the method, the theoretical and practical time dependence of M3 is more probable since it is difficult to evaluate the interactions between piezoelectric segments.

General Conclusions

To summarize the results of the dissertation:

1. The analysis of piezorobotic works has shown that piezorobots with three contact points are not suitable for classical robots with roots with wheels and feet.
2. Signal distribution algorithms for piezobot control that distribute the complex signal to segments so that the piezorobot moves in trajectories.
3. MATLAB is more suited to performing complex tasks in control systems and is more firmly bound to hardware - LabVIEW software tools. The hardware part of the system has to change the complex values of the variables with an electrical signal and distribute to the segments of the piezorobot.
4. Piezorobot controlled method without rotational motion is suitable when the accuracy of trajectory repeatability is most relevant.

5. Piezorobot controlled method with rotary motion is suitable when the most important movement limb is.

6. Piezorobot controlled method by the force-retraction principle is suitable when it is necessary to control the direction of the piezorobot and the speed in real time.

7. We recommend that you choose new solutions with real-time feedback and a new version of the hardware to ensure a high-quality piezo-robotic control system.

Priedai³

A priedas. Matavimų rezultatų skaitiniai duomenys

B priedas. LabVIEW programos failai

C priedas. MATLAB metodų failai

D priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija

E priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą daktaro disertacijoje

F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Eugenijus MAČERAUSKAS

TRAJEKTORIJOMIS JUDANČIŲ
PJEZOMECHANINIŲ MIKROROBOTŲ VALDYMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
informatikos inžinerija (T 007)

CONTROL OF PIEZOMECHANICAL
MICROROBOTS MOVING IN TRAJECTORIES

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Informatics Engineering (T 007)

2019 04 30. 12,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“,
A. Mickevičiaus g. 5, LT-08119 Vilnius