

FEROMAGNETINĖS SFEROS VALDYMAS PJEZOKEITIKLIU

Eugenijus Mačerauskas^{1,2}, Genadijus Kulvietis¹, Jūratė Janutenaitė¹, Asta Druktinienė²,
Inga Morkvėnaitė-Vilkončienė^{1,2,3}, Andžej Lučun^{2,4}

¹ Vilniaus Gedimino technikos universitetas,

² Vilniaus kolegija,

³ Vilniaus universitetas,

⁴ Nacionalinis fizinių ir technologijos mokslų centras

Anotacija. Šiuolaikiniai taikomieji moksliniai tyrimai glaudžiai derinami su studijų procesu, atskirų dėstomųjų dalykų integracija ir tęstinumu per visą mokymosi kursą. Straipsnyje aprašomas tyrimas, kurio tikslas – sukurti sferinio pjezokeitiklio su programuojamu laisvės laipsnių skaičiumi valdymo metodus. Autorių sukurti valdymo metodai pjezokeitikliui, galinčiam pozicionuoti tašką sferos paviršiuje pasukant sferą bet koku kampu ir bet kokia kryptimi. Besisukanti sfera yra valdoma naudojant trijų kontaktinių taškų jėgas, kurių atstojamoji pasuka sferą norima kryptimi. Judėjimo metu sferos paviršiuje esantis taškas formuoja trajektoriją, kuri yra valdoma pozicionuojant sferą cilindrinio pjezokeitikliu. Straipsnyje pateikiamas cilindrinio pjezokeitiklio, suderinto su pasyvia plienine sfera, prototipas, aprašomi sferos pasukimo matematiniai metodai. Apžvelgiama valdymo eksperimentinė sistema, jos veikimo principas, aparatinė ir programinė dalys. Pateikiami matematinio modeliavimo ir realaus eksperimento su besisukančios sferos prototipu rezultatai. Išnagrinėtos panašaus tipo mokslinių eksperimentų taikymo galimybės gerinant studijų kokybę aukštojo mokslo įstaigose.

Raktiniai žodžiai: pjezoelektrinis keitiklis, 3D pozicionavimas trajektorijomis, judesio valdymo metodas, LabVIEW, MATLAB.

1. Įvadas

Šiuolaikiniame studijų procese ypač aktuali taikomoji mokslinė veikla, kuri išskiria kolegijas kaip taikomojo pobūdžio aukštojo mokslo institucijas. Kita aktuali problema yra dėstomų dalykų tarpusavio ryšiai, integracija bei studentų motyvacija, kuriai paskutiniu metu skiriamas vis didesnis dėmesys. Apjungus anksčiau išvardytas problemas ir pritaikius mokslinius taikomuosius tyrimus, kaip iliustracija pateikiamas mechatronikos srities tiriamasis darbas.

Mokslinis tyrimas buvo atliktas Vilniaus Gedimino technikos universiteto ir Šiaulių universiteto mokslininkų kartu su Vilniaus kolegijos dėstytojais ir studentais. Mokslo taikomojo tyrimo esmė yra naujų feromagnetinės sferos pozicionavimo valdymo metodų panaudojimas pritaikant pjezokeraminį keitiklį.

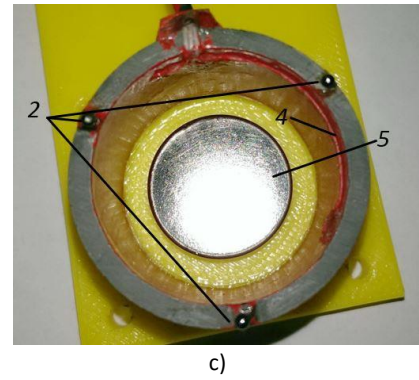
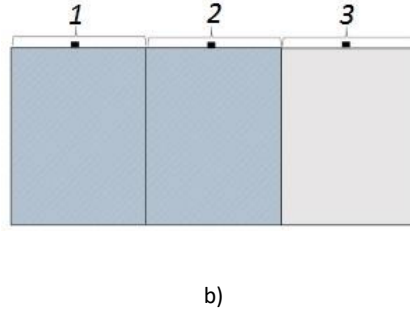
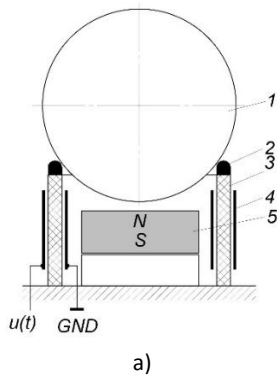
Jei mechanizmo pozicionavimą plokštumoje su duotu tikslumu galima laikyti klasikiniu mechatronikos uždaviniu, tai taško pozicionavimas erdvėje tampa daug sudėtingesnis. Šis mechatronikos uždavinys yra praktiškai išspręstas klasikinėmis priemonėmis naudojant tris mechanines x , y , z ašis su duoto tikslumo pavaromis. Tokios mechatroninės sistemos realizavimo pavydžiu galėtų būti 3D spausdintuvas, kur pozicionavimo tikslumas siekia 0,02 mm. Tuo tarpu taikant sumaniųjų pjezo medžiagų technologijas yra galimybė pagaminti ne tik slenkamąjį judesį generuojančią pavarą, bet ir pavaras, galinčias pozicionuoti tašką feromagnetinės sferos paviršiuje. Kitas tokios technologijos privalumas yra daug didesnis, siekiantis iki 10 nm?, tikslumas. Tai leidžia taikyti tokias pavaras ne tik įprastuose didelio tikslumo reikalaujančiuose mechaniniuose įrenginiuose, bet ir kosminėse technologijose, pvz., nanopalydovų stabilizavimo sistemose [2]. Naujų pjezokeitiklių, kurių veikimas paremtas pjezokeraminių medžiagų savybe keisti formą veikiant elektriniu lauku, įgalina generuoti judesius tiesiogiai ir atsisakyti įprastinių judančių detalių, o tai leidžia pasiekti didelį tikslumą ir greitą įrenginio reakciją į komandas [3, 6]. Tačiau šiam įrenginiui būtina atitinkama valdymo sistema, todėl šiai sistemai sukurti ir teorinių valdymo metodų įgyvendinimo galimybėms skiriamas šis darbas. Darbas savo moksliniu naujumu aktualus mokslininkams, taikymo galimybėmis tikslųjų mechaninių įrenginių ir robotų kūrėjams, o sukurtos valdymo sistemos adaptyvumas leidžia ją naudoti kosminėse technologijose, viena iš jų gali būti nanopalydovų stabilizavimas.

Straipsnyje pateikiami Lietuvos mokslų tarybos finansuojamo projekto SmartTrunk, Nr. MIP-084/2015 vykdytų tyrimų rezultatai, kurie bus pritaikomi praktikoje kuriant modernias nanopalydovų stabilizavimo sistemas.

2. Pasyvios feromagnetinės sferos valdymo problematika ir metodai

2.1. Pjezomechaninio keitiklio su pasyvia feromagnetine sfera prototipas

Pasyvios feromagnetinės sferos kartu su cilindrinio pjezoelektriniu keitikliu prototipas sukurtas pagal panašų įrenginį aprašytą [1, 7, 11]. Prototipo konstrukcija ir pagrindinės sudedamosios dalys pateiktos 2.1 pav.



2.1 pav. Pjezomechaninio keitiklio su pasyvia sfera konstrukcija: a) – bendra konstrukcija, b) – cilindro išorinių elektrodų topologija, c) – piezoelektrinis cilindras su pastoviuoju magnetu viduje. 1 – pasyvi feromagnetinė sfera, 2 – kontaktiniai taškai, 3 – aktyvus piezoelektrinis cilindras, 4 – cilindro elektrodai, 5 – pastovus magnetas

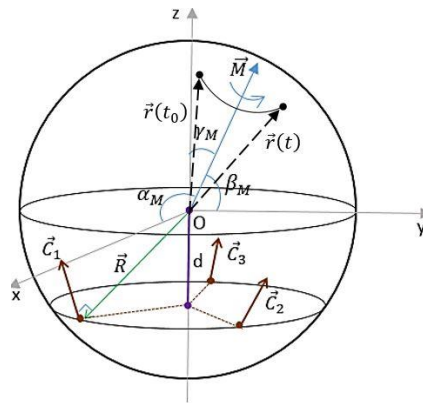
Pjezomechaninį keitiklį sudaro valdoma feromagnetinė sfera (1), kuri veikiamą magnetinės jėgos sukuriama pastovaus magneto (5) ir sferos sąveikos, remiasi į tris, ant pjezoelektrinio cilindro esančius kontaktinius taškus (2). Kontaktiniai taškai sukuria virpamuosius judesius ir remiasi į sferos paviršių, generuodami sferą sukančias jėgas. Kiekvienas kontaktinis taškas yra elektrodais (4) padalinto pjezoelektrinio cilindro (3) segmento centrinėje dalyje. Valdymo elektrodai (4) dalina pjezoelektrinį cilindrą į tris dalis (2.1 pav. b)). Prie kiekvieno iš išorinių elektrodų pridedamas kintamas sinusinis signalas $u(t)$, tuo tarpu ištisinis, vidinėje pusėje esantis elektrodas, sujungtas su nuliniu tašku GND.

2.2. Sferos judesio formavimo ir taško pozicionavimo principas

Sferos pasukimas formuojamas sukuriant skirtingas jėgas trijuose kontaktiniuose taškuose, kurie liečia sferą ir priklauso skirtingiems pjezoelektrinio cilindro segmentams (2.1 pav. (2)). Kiekvienas kontaktinis taškas liečiasi su sfera lietimosi apskritimo perimetre, kurio spindulys R (2.2 pav.), ir tokiu būdu kiekvienas kontaktinis taškas sukuria sferos paviršiuje jėgas $|\vec{C}_J(t)|$, kur J – yra kontaktinių taškų kiekis $J = 1, 2, 3$; t – funkcijos parametras. Jėgos sukuriama sferos paviršiaus liestinės kryptimi, o jų orientacija išlieka pastovi, kai kinta jėgos dydis.

$$\vec{C}_J^\circ = (\cos \alpha_J, \cos \beta_J, \cos \gamma_J) = \text{const}, \quad (2.1)$$

čia $\alpha_J, \beta_J, \gamma_J$ kampai tarp x, y, z ašių ir jėgos veikimo krypties \vec{C}_J .



2.2 pav. Sferos pasukimo schema

Jėgų \vec{C}_J orientacija randama iš formulės [3]:

$$[\vec{C}_J(\alpha_J, \beta_J, \gamma_J)] = \cos^{-1} \begin{bmatrix} \frac{d}{|\vec{R}|} & 0 & \sqrt{1 - \left(\frac{d}{|\vec{R}|}\right)^2} \\ -\frac{d}{2R} & \frac{\sqrt{3}d}{2R} & \sqrt{1 - \left(\frac{d}{|\vec{R}|}\right)^2} \\ -\frac{d}{2R} & \cos\left(180^\circ - \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}d}{2R}\right)\right) & \sqrt{1 - \left(\frac{d}{|\vec{R}|}\right)^2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

čia $|\vec{R}|$ – sferos spindulys, d – atstumas tarpo sukamos sferos centro ir kontaktinių taškų su valdymo cilindru plokštumos, kai $d < |\vec{R}|$.

Sferos sukimasis aprašomas vektorine funkcija $\vec{r}(|\vec{R}|, \theta(t), \phi(t))$, kai $\theta \in [0, \pi]$ yra kampas tarp teigiamos z ašies ir taško M , esančio sferos paviršiuje, jungiančio vektoriaus \vec{r} ; kampas $\phi(t) \in [0, 2\pi]$ yra kampas tarp teigiamos x ašies ir vektoriaus \vec{r} projekcijos x y plokštumoje.

Tokiu būdu sferos nustatoma sferos sukimosi kryptis, kuri sutampa su vektoriaus t tangentu kaip $\vec{r}(t)$ funkcija. Šis vektorius išreiškiamas, kaip atstojamoji suminė, pasukanti sferą reikiama kryptimi, jėga.

Posūkių vektorius $\vec{T}(t) = \langle T_x | T_y | T_z \rangle$ randamas pagal formulę:

$$\vec{T}(t) = \frac{\vec{r}'(t)}{|\vec{r}'(t)|} = \frac{1}{|\vec{r}'(t)|} \langle x'(t) | y'(t) | z'(t) \rangle \quad (2.3)$$

čia:

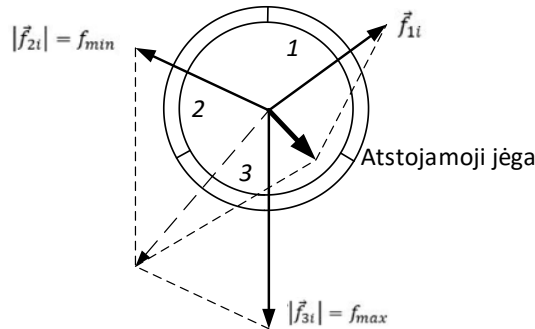
$$\vec{r}(t) = \begin{cases} x(t) = |\vec{R}| \sin \theta(t) \cos \phi(t) \\ y(t) = |\vec{R}| \sin \theta(t) \sin \phi(t) \\ z(t) = |\vec{R}| \cos \theta(t). \end{cases} \quad (2.4)$$

Taško judėjimo trajektorijos planavimas su dideliu tikslumu realizuojamas pagal metodiką aprašytą [2]. Planavimui reikalinga tangento vektoriaus projekcija \vec{F}_i ir veikiamos jėgos \vec{f}_j komponentės x y plokštumoje. Kiekvieno kontaktinio taško sukurtų jėgų vertės:

$$\frac{|\vec{f}_{ji}|}{\cos(90^\circ - \theta)} = \begin{cases} f_{min}, & \text{if } \varphi_{ji} \geq \beta, \\ f_{max}, & \text{if } \varphi_{ji} = \min([\varphi_{ji}]), \\ |\vec{f}_{ji}^*|, & \text{else} \end{cases} \quad (2.5)$$

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

Kontaktinių taškų generuojamų jėgų projekcijos lietimosi su cilindro plokštuma pateiktos 2.3 pav. Kiekvienas jėgos vektorius $|\vec{f}_{ji}^*|$ čia atitinka atskirų kontaktinių taškų sukurtai sferą sukančią jėgą $|\vec{f}_{1i}|$, $|\vec{f}_{2i}|$ ir $|\vec{f}_{3i}|$.



2.3 pav. Sferos posūkių jėgų projekcijos plokštumoje ir posūkių atliekanti jėgų atstojamoji

$|\vec{f}_{ji}^*|$ ir $|\vec{F}_i|$ reikšmės randamos iš lygčių:

$$\begin{cases} |\vec{F}_i| \cos \mu(t) = \sum_{j=1}^c |\vec{f}_{ji}| \cos \varphi_{ji}, \\ |\vec{F}_i| \sin \mu(t) = \sum_{j=1}^c |\vec{f}_{ji}| \sin \varphi_{ji}, \end{cases} \quad (2.6)$$

čia $\mu(t) = \tan^{-1} \frac{T_y(t)}{T_x(t)}$.

Kiekvieno segmento sukuriama jėga: $|\vec{C}_j(t)| = |\vec{f}_{ji}| \cos(90^\circ - \theta)$, bendra atstojamoji jėga atliekanti sferos sukimą: $\vec{C}(t) = \sum_{j=1}^c \vec{C}_j(t)$.

2.3. Sferos judėjimo matematinė analizė

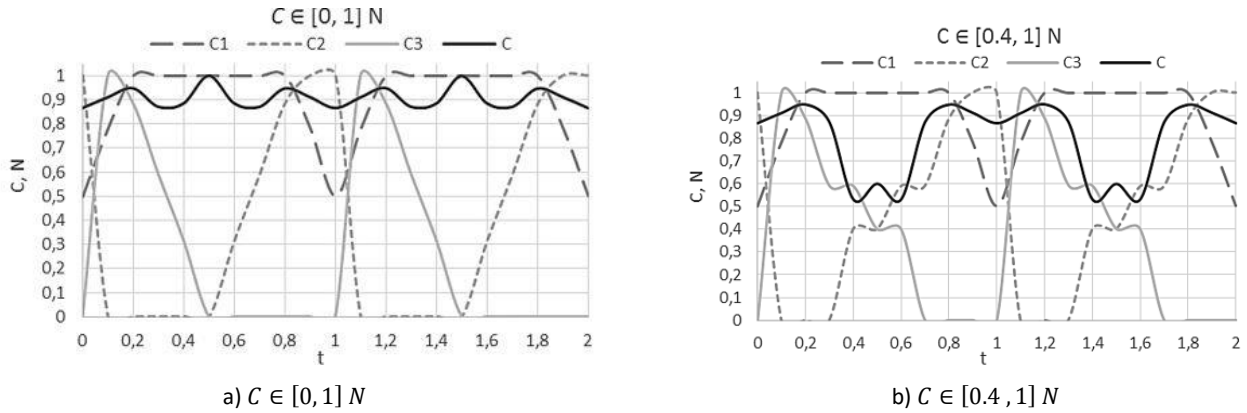
Siekiant patvirtinti matematinio skaičiavimo teisingumą, buvo atlikta matematinė analizė su besisukančios sferos matematiniais modeliais. Skaičiavimai buvo atlikti MATLAB programavimo kalba siekiant gauti tikslų matematinį algoritmą, kurį būtų galima taikyti kuriant sferos valdymo programą. Skaitiniai skaičiavimai buvo atliekami modeliuojant sferos sukimąsi apie z ir x ašis. Buvo taikomi konkrečios, vėliau eksperimentuose naudojamos, 34 mm diametro sferos duomenys.

Posūkių apie z ašį modeliavimas

Tangentinio vektoriaus $\vec{r}(t)$ vertė skaičiuota pagal formulę:

$$\vec{r}(t) = \begin{cases} \phi(t) = 90t \\ \theta(t) = [30^\circ, 90^\circ] \end{cases}, \text{ kai } t \in [0, 2] \quad (2.7)$$

Analitiškai gautos jėgos, atitinkančios kiekvieno kontaktinio taško sukurtas jėgas C_1 , C_2 , ir C_3 , bei atstojamosios jėgos $C(N)$ diagramos pateiktos 2.4 pav. Diagramose matoma, kad jėga C yra atskirų segmentų sukuriamų jėgų C_1 , C_2 , C_3 atstojamoji, esant dviem skirtingoms sąlygoms: $C \in [0, 1] N$ ir $C \in [0.4, 1] N$.



2.4 pav. Skirtingų segmentų generuojamos jėgos ir jų atstojamoji sukant sferą apie z ašį

Posūkio apie y ašį modeliavimas

Posūkis apie y ašį aprašomas kaip $\phi(t) = const$ funkcija:

$$\vec{r}(t) = \begin{cases} \phi(t) = [0^\circ, 20^\circ] \\ \theta(t) = 90t \end{cases}, \text{ kai } t \in [0, 2] \quad (2.8)$$

Posūkio skaitinis modeliavimas parodė, kad visos jėgos yra lygios per visą sferos posūkio formavimo momentą ir nepriklauso nuo posūkio kampo $\theta(t)$. Rezultatai pateikiami 1 lentelėje, skaitinėje formoje.

1 lentelė

Skaitinės segmentų jėgų vertės

$[f_{min}, f_{max}], N$	$\phi(t), ^\circ$	C_1, N	C_2, N	C_3, N	C, N
[0, 1]	0	1	0	0	1
[0.4, 1]	0	1	0	0	1
[0, 1]	20	1	0.347	0	0.879
[0.4, 1]	20	1	0.608	0.400	0.528

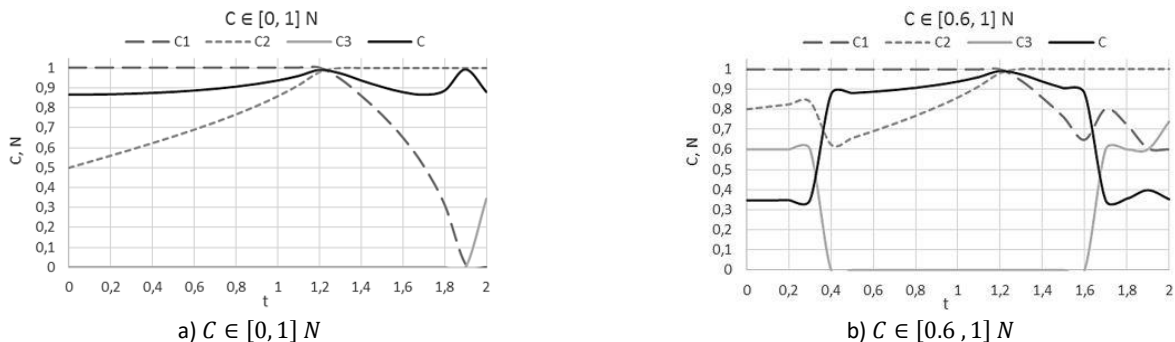
Iš lentelės matyti, kad kai posūkio kampas $\phi(t) = 0^\circ$, posūkio trajektorija valdoma pirmojo cilindro segmento C_1 . Kitais atvejais jėga C gaunama kaip atskirų C_1 , C_2 ir C_3 jėgų veikiamų atitinkamų pjezoelektrinio cilindro segmentų atstojamoji.

Posūkio apie skirtingas ašis modeliavimas

Kompleksinis posūkis apie skirtingas ašis vienu metu aprašomas pagal formulę:

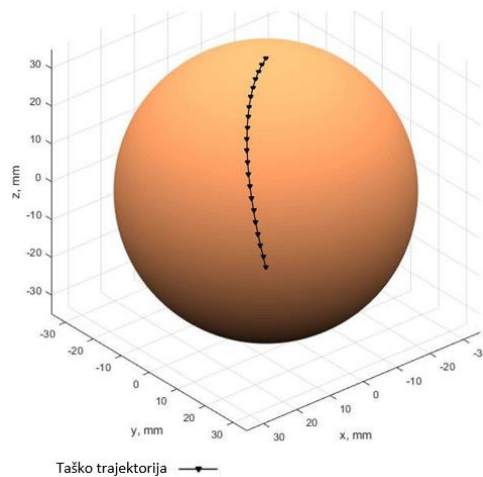
$$\vec{r}(t) = \begin{cases} \phi(t) = 45t \\ \theta(t) = 30 + 10t \end{cases} \quad (2.9)$$

Skaitinio eksperimento rezultatai pateikti 2.5 pav.



2.5 pav. Skirtingų segmentų generuojamos jėgos ir jų atstojamoji atliekant judesį apie kelias ašis

Atlikus kompleksinio posūkio apie skirtingas ašis modeliavimą ir pritaikius maksimalaus teorinio posūkio greičio sąlygas, buvo gauta taško sferos paviršiuje trajektorija, kuri pateikta 2.6 pav.

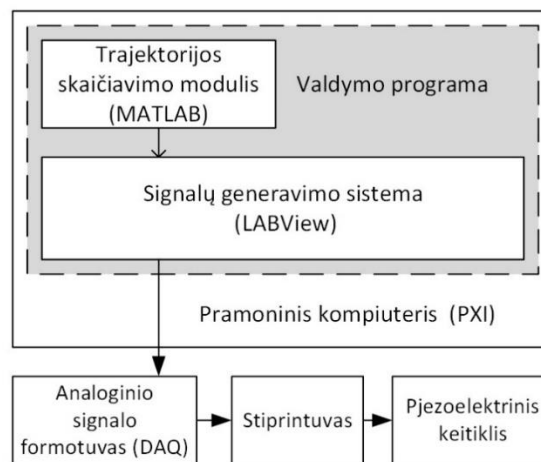


2.6 pav. Taško sferos paviršiuje trajektorija atliekant sukamąjį judesį apie skirtingas ašis

3. Praktinis eksperimentas

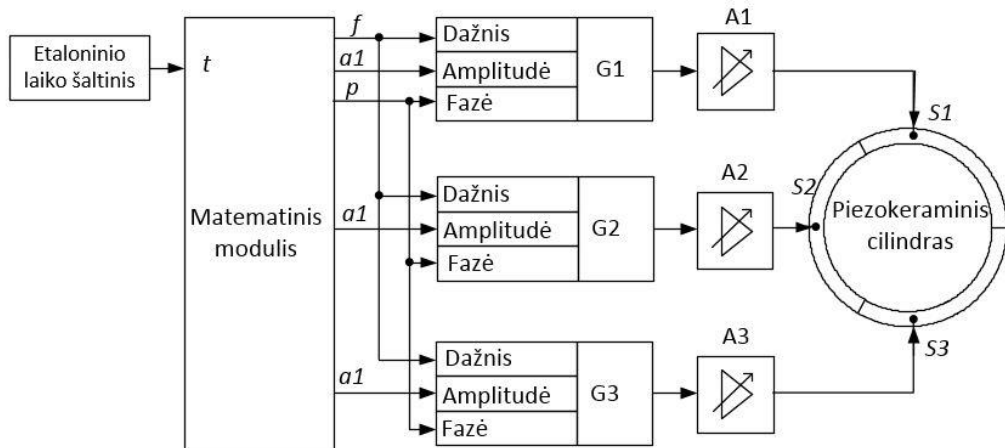
3.1. Eksperimento sistema

Siekiant įsitikinti matematinio modelio pagrįstumu ir patikrinti jo veikimo principus praktikoje, VGTU Fundamentaliųjų mokslų fakulteto laboratorijoje buvo sudaryta reali eksperimentinė sistema. Sistemą sudaro dvi pagrindinės dalys: tai tiriamasis cilindro tipo pjezoelektrinis keitiklis su pasyvia feromagnetine sfera (2.1 pav.) ir keitiklio valdymo sistema. Valdymo sistemą sudaro aparatinė valdymo signalą formuojanti dalis ir valdymo programa.



3.1 pav. Eksperimento valdymo sistemos sandaros schema

Feromagnetinės sferos valdymo sistemą (3.1 pav.) sudaro pramoniniame PXI tipo kompiuteryje veikianti *LabVIEW* pagrindu sukurta valdymo programa, kurioje matematinės funkcijas atlieka įdiegtas *MATLAB* modulis, skirtas duotam sferos pasukimui ir taško sferos paviršiuje judėjimo trajektorijos apskaičiavimui [9]. 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 komandas paskirsto signalą skirtingiems cilindro judesio keitiklio segmentams keisdamas signalo amplitudę [5, 10]. Sferos posūkį formuojantis cilindras yra valdomas analoginiu signalu, todėl jam formuoti naudojamas analoginio signalo išvedimo modulis suderinamas su pramoniniu PXI kompiuteriu [4]. Kadangi sužadinti pakankamos amplitudės virpesius realiame pjezoelektriniame judesio keitiklyje reikia didelės įtampos signalo, buvo naudojamas analoginio signalo stiprintuvas, leidžiantis sustiprinti ir suderinti sistemą su talpine pjezoelektrinio cilindro apkrova. Sferą valdantis pjezoelektrinis cilindras yra prijungtas prie stiprintuvo, ir tokiu būdu gauna aukštos įtampos elektrinį sinusinį signalą. Sistemos veikimą iliustruoja 3.2 pav. pateikta funkcinė schema.

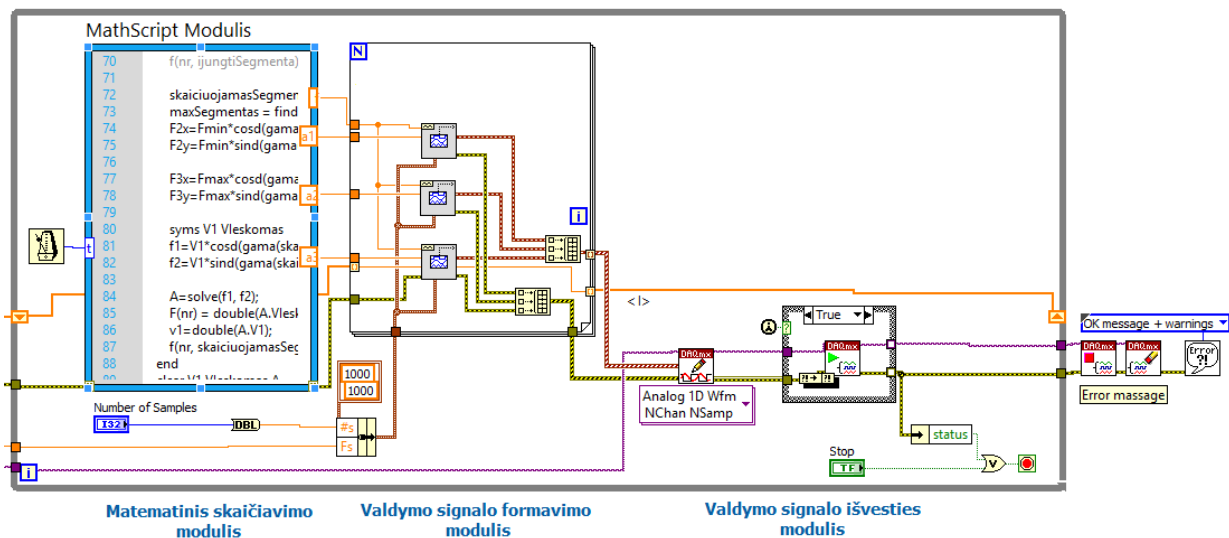


3.2 pav. Eksperimento valdymo sistemos funkcinė schema

3.2 pav. pateiktoje funkcinėje schemoje sistemos pagrindą sudaro matematinis modulis realizuotas naudojant MATLAB matematinį paketą. Skaičiuojama taško sferos paviršiuje judėjimo trajektorija bei išreiškiama per atskirus valdymo signalų kintamuosius. Modulio išėjime gaunami tokie kintamieji: f – valdymo signalo dažnis, kuris praktiškai atitinka rezonansinį pjezoelektrinio cilindro dažnį, amplitudės $a1$, $a2$ ir $a3$, skirtos jėgai kontaktiniuose taškuose formuoti ir sferai sukuti, pradinė fazė p , kuria sinchronizuojami loginiai generatoriai $G1$, $G2$ ir $G3$, skirti sinusiniam signalui formuoti. Kiekvienas generatorius valdomas keičiant generuojamo sinusinio signalo dažnį, amplitudę ir fazę per kintamųjų vertes f , $a1$, $a2$, $a3$ ir p gaunamas iš matematinio modulio. Generatoriai realizuoti LabVIEW programos terpėje kartu su etaloninio laiko signalų šaltiniu, kuris formuoja kintamąjį t , reikalingą matematiniam moduliiui ir praktiškai atitinkantį realų sistemos laiką. Iš generatorių gaunamas loginis signalas verčiamas elektriniu ir perduodamas į stiprintuvus $A1$, $A2$ ir $A3$.

Signalų stiprintuvai $A1$, $A2$ ir $A3$ yra realizuoti aparatinėmis priemonėmis ir skirti elektriniam signalui, gautam iš pramoninio kompiuterio DAQmx išvesties moduliiui sustiprinti. Pjezoelektrinis cilindras valdomas trimis signalais ir trijuose kontaktiniuose taškuose $S1$, $S2$ ir $S3$ sukuria tris skirtingas sferą pasukančias jėgas.

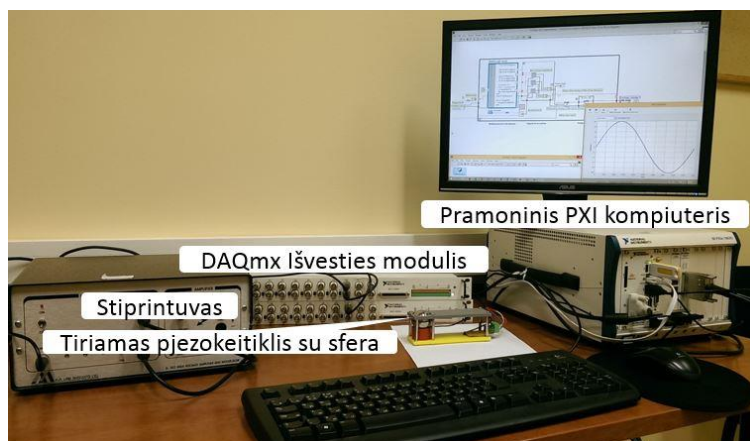
Valdymo sistemos programinės realizacijos fragmentas su pagrindiniais moduliais pateiktas 3.3 pav.



3.3 pav. Valdymo programos LabVIEW schema

Programą sudaro trys pagrindinės dalys: matematinio skaičiavimo modulis, valdymo signalo formavimo modulis ir valdymo signalo išvesties modulis, kurie atitinka anksčiau aprašytas funkcijas.

Kaip iliustracija, 3.4 pav. pateikiamas bendras eksperimentinės sistemos vaizdas su atskirais įrenginiais.



3.4 pav. Eksperimentinės sistemos bendras vaizdas ir atskiri įrenginiai

3.2. Realios feromagnetinės sferos sukimosi tyrimas

Sferos sukimasis realioje sistemoje buvo stebimas vizualiai ir filmuojamas vaizdo kamera. Atlikus gautų filmavimo kadrų analizę tam tikrais diskrečiaisiais laiko momentais, buvo nustatyta, kad sfera sukasi ir pažymėto taško judėjimas paviršiumi trumpu laiko intervalu, panašus į suplanuotą trajektoriją (3.5 pav.).



3.5 pav. Eksperimento metu taško suformuotos trajektorijos fotografinis vaizdas 1 – taško suformuota trajektorija, 2 – besisukanti sfera

Tikslesni tyrimai ir trajektorijos matavimai bus atliekami vėliau, pritaikius lazerinę poslinkio matavimo sistemą bei skaitmeninį vaizdų apdorojimą.

4. Taikomojo mokslinio tyrimo taikymas studentų mokyme

Aprašomas taikomasis tyrimas apima kelias mechatronikos sritis, kurios dėstomos aukštojo mokslo institucijose nuo pirmo iki paskutinio bakalaurų bei magistrų studijų kurso. Tai medžiagų inžinerija, nagrinėjanti pjezoelektrines medžiagas, mechanika, kurios pagrindu aprašomas sferos judesio formavimas taikant skirtingas jėgas, matematika ir programavimas MATLAB, skirtas trajektorijai skaičiuoti, programavimas LabVIEW, kaip šiuolaikinė taikomoji grafinio programavimo priemonė bei elektronika. Eksperimentinėje sistemoje signalų stiprintuvai buvo sukurti autorių kartu su studentais.

Remiantis autorių asmenine patirtimi galima teigti, kad taikomoji tyrimo pakraipa bei tyrimo metodika yra suprantami ne tik mokslo darbuotojams, bet ir moksliniais tyrimais besidomintiems studentams. Be to, tokio tipo taikomieji moksliniai tyrimai nereikalauja brangių laboratorijų, o tik keleto specifinių įrenginių, kurių kaina prieinama mokymo įstaigoms. Iš dalies adaptuojant tokio tipo mokslinius tyrimus, juos sėkmingai galima taikyti ne tik universitetų (konkrečiu atveju VGTU) bakalaurų bei magistrantūros studijų studentams, bet ir techninėms kolegijoms. Kaip pavyzdį galima imti Vilniaus kolegijos Elektronikos ir informatikos fakultetą. Minėtame fakultete jau kuris laikas yra diegiama mokslinio tyrimo įtraukimo į studijų programą praktika [8].

Fakulteto laboratorijose studentai jau dabar dirba su MATLAB matematiniu paketu, naudoja LabVIEW programinę įrangą, sėkmingai studijuoja automatinio valdymo ir mechatronikos pagrindus. Tai leidžia įgytas žinias taikyti praktikoje ir toliau jas gilinti. Apjungiant fakultete dirbančių mokslininkų žinias ir studentų iniciatyvą, galima pasiekti tikrai gerų rezultatų. Svarbiausia, tai kelia studentų motyvaciją ir suteikia dideles galimybes save realizuoti ypač gabiems studentams.

5. Išvados ir praktinė eksperimento vertė

Apibendrinant anksčiau pateiktus argumentus ir straipsnyje apžvelgtus praktinius rezultatus, galima teigti:

1. Praktiniu požiūriu optimalus sferos posūkio valdymas gaunamas sukant sferą per tris kontaktinius taškus trimis posūkių generuojančiomis jėgomis.

2. Posūkio valdymo trajektorijomis metodas leidžia pasiekti maksimalų tikslumą, greičiausią sferos reakciją į signalo pasikeitimą, arba optimalią šių dviejų veiksnių kombinaciją.
3. Taško sferos paviršiuje trajektorijai apskaičiuoti ir signalui valdyti puikiai tinka matematinio paketo MATLAB ir inžinerinės programavimo terpės LabVIEW derinys.
4. Mokslinių eksperimentų taikymas aukštojo mokslo institucijose kelia ne tik tyrimų technologinį lygį, bet ir skatina studentų susidomėjimą, kelia jų motyvaciją mokytis techninės krypties dalykų.

Eksperimentas turi didelę taikomąją praktinę vertę, nes pasyvios sferos sukimo valdymu paremtos pažangių šiuolaikinių nanopalydovų stabilizavimo sistemos aprašytos [1, 2]. Tačiau minėtuose leidiniuose aprašomi tik stabilizavimo principai, o efektyvios stabilizuojančių sferų valdymo sistemos dar tik kuriamos.

Literatūra

1. BANSEVICIUS, Ramutis; KULVIETIS, Genadijus; MAZEIKA, Dalius; DRUKTEINIENE, Asta, GRIGORAVICIUS, Arturas. *Cylindrical Piezoelectric Mobile Actuator Based On Travelling Wave*, Mechanics. 2012, p 554–560. ISSN 1392-1207.
2. BANSEVICIUS, Ramutis; KARGAUDAS, VYTAUTAS. *Attitude Control of Micro and Nanosatellites Using Multi-degree-of-Freedom Piezoelectric Actuators*, In Vibration Problems ICOVP. 2011, 379–384. Springer Netherlands 2011.
3. BANSEVICIUS, Ramutis; DRUKTEINIENE, Asta; JURENAS, Vytautas; KULVIETIS, Genadijus; MAZEIKA, Dalius. *Fine trajectory planning method for mobile piezobots*. The 12th international workshop on piezoelectric materials and applications in actuators (IWPMA 2015), 29 June – 1 July, 2015, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, ISBN 9786094578243:19-20. 2015.
4. BEGIN, Brayn. *Walkthrough: Creating a Measurement Studio NI-DAQmx Application*, p 1–11. National Instrument Inc. 2008.
5. Ding Yang.; Sun Buang ir kiti. *Hybrid MATLAB and LabVIEW to implement an intelligent Foundation Fieldbus control system*, Intelligent Control and Automation (WCICA), 8th World Congress. ISBN 978-1-4244-6712-9. p 4539–4543. IEEE print. 2010.
6. DRUKTEINIENĖ, Asta. *Nanometrų skyros judančiu daugiamačiu pjezrobotų trajektorijų formavimas*. Daktaro disertacija, VGTU, Technika, 2011. ISBN 978-9955-28-970-8.
7. GRIGORAVICIUS, Artūras. *Nanometrinės skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaitinis tyrimas*. Daktaro disertacija, VGTU Technika 2014. ISBN 978-609-457-718-5.
8. MAČERAUSKAS, Eugenijus; LUČUN, Andžej *Mokslinio eksperimento taikymas mokomojoje laboratorijoje*. IV respublikinė mokslinė praktinė konferencija „Mokslo taikomųjų tyrimų įtaka šiuolaikinių studijų kokybei“, 64–68 p. Vilnius, 2011-05-05. ISSN 2029-2279.
9. MATHWORKS Inc. *Analog Data Acquisition and Generation* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://se.mathworks.com/help/daq/examples.html>.
10. NATIONAL INSTRUMENTS Inc. *Developing Algorithms Using LabVIEW MathScript RT Module* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ni.com/white-paper/3256/en/>.
11. RAWASHDEH, Samir. *Passive Attitude Stabilization For Small Satellites*, University of Kentucky Master's Theses. Paper 624. 2010.

Ferromagnetic Sphere Control by Piezoactuator

Annotation. Modern applied research has high influence on studies and is integrated in different courses, and has continuity. The main aim of the research was to study control methods of the spherical piezoelectrical actuator with programmable number of degrees of freedom. Control methods for piezoelectric cylinder actuator were created, as a result, 3D positioning of the point on the sphere's surface becomes possible. This positioning method allows to rotate the sphere to any angle, and at any direction. The rotation of the sphere is controlled through three contact points, by resulting of three forces, which turns the sphere at any direction. A point on the surface forms the basis of the trace, which is controlled using cylindrical piezoelectric actuator. The prototype of cylindrical piezoelectric actuator, aligned with passive steel sphere, is provided. The mathematical method for sphere rotation, experimental control system, its working principle, hardware and software components are revealed. The results of mathematical modelling and real experiment with the prototype of rotating sphere are presented. A similar type of scientific experiments application for improving the quality of studies in higher education establishments was analysed.

Keywords: piezoactuator, 3D positioning on the sphere's surface, rotation control method, LabVIEW, MATLAB.

Padėka

Mokslinis tyrimas finansuojamas Lietuvos mokslų tarybos. Projekto SmartTrunk, Nr. MIP-084/2015.

Acknowledgement

The work was supported by the Research Council of Lithuania under the project SmartTrunk, No. MIP-084/2015.