

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
KVANTINĖS ELEKTRONIKOS KATEDRA

Mantvydas Mikulis

**OPTINĖS PAVIRŠIAUS SEKIMO SISTEMOS LAZERINIAM MIKROAPDIRBIMUI
KŪRIMAS BEI GALIMYBIŲ ĮVERTINIMAS**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Studijų programa – lazerinė technologija

Studentas

Mantvydas Mikulis

Darbo vadovas

dr. Domas Paipulas

Recenzentas

dr. Mangirdas Malinauskas

Katedros vedėjas

prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis

Vilnius 2016

Turinys

Įvadas	3
1. Literatūros apžvalga	5
1.1. Įžanga	5
1.2. Gauso pluoštai.....	5
1.3. Gauso pluoštų fokusavimas	6
1.4. Atstumo matavimo bei sekimo sistemos	9
1.4.1. Mechaninės atstumo sekimo sistemos	9
1.4.2. Optinis atstumo matavimas, pagrįstas intensyvumo registravimu	10
1.4.3. Trianguliacinės atstumo matavimo sistemos.....	11
1.4.4. Atstumo nustatymas matuojant bangos sklidimo laiką.....	12
1.4.5. Konfokalinė atstumo sekimo sistema	13
1.4.6. Konoskopinėmis hologramomis paremta atstumo matavimo sistema.....	14
1.4.7. Atstumo matavimo bei sekimo sistemų palyginimas.....	14
1.5. Autofokusavimas.....	15
1.6. PID reguliatorius	16
2. Eksperimente naudojama įranga	18
2.1. Atstumo matuoklis Optimet Probe ConoPoint-3	18
2.2. Pozicionavimo stalų valdymo įrenginys Aerotech a3200	18
2.3. PHAROS lazeris.....	19
3. Eksperimento metodika	20
3.1. Tyrimo sistemos bei jos veikimo aprašymas	20
3.2. Autofokusavimo optimizavimo metodika	23
3.3. Sekimo sistemos galimybių tyrimas mikroapdirbimo operacijose	24
4. Tyrimo rezultatai.....	27
4.1. Optimizavimo proceso rezultatai	27
4.2. Atstumo sekimo sistemos taikymo lazeriniame mikroapdirbime rezultatai.....	31
Rezultatų aptarimas ir išvados.....	35
Literatūros sąrašas.....	36

Ivadas

Jau pačioje lazerinių technologijų atsiradimo pradžioje (1960 m.) ši technologija buvo laikoma viena perspektyviausių mokslinėje ir pramoninėje srityse. Didžiulis susidomėjimas šia technologija lėmė lazerinių technologijų tobulinimą: ir 7-tojo dešimtmečio pabaigoje, ir 8-ojo dešimtmečio pradžioje didžiausiu stimulu plėtojant lazerines technologijas tapo tikslesnis šios technologijos orientavimas į tam tikras sritis – mikroapdirbimą, makroapdirbimą, komunikacijas, mediciną, chemiją, biologiją ir kt. [1]. Laikui bėgant vis svarbesnę vietą užėmė lazerinio mikroapdirbimo technologijos, kur konkurencingų alternatyvų lazeriams praktiškai nėra. Populiariausios medžiagos, kurias labai sudėtinga apdirbti kitais metodais, yra puslaidininkiai, keramika, kristalai [2]. Dar vienas svarbus lazerio privalumas – tas pats pluoštas gali būti panaudotas keletui uždavinių spręsti (pavyzdžiui, ir gręžimui, ir pjovimui, ir virinimui) taip suteikiant dar daugiau lankstumo lazerinėms technologijoms [3].

Pastaruosius keletą metų pastebimas ženklus lazerinio mikroapdirbimo technologijų augimas, kuris siejamas su augančiu mikro matmenų produktų poreikiu bei žymiu lazerių tobulinimu šioje srityje. Plačiausiai lazerinis mikroapdirbimas yra taikomas elektronikoje, telekomunikaciniuose įtaisuose, preciziškumo reikalaujančių medicinos įrankių, ekranų elementų, precizinių purkštukų gamyboje. Didžiausi lazerio panaudojimo šiose srityse privalumai yra tikslumas, galimybė gręžti ypač mažo skermens skylės (iki 1 μm), aukšta apdirbimo kokybė, pasiekiami dideli apdirbimo greičiai lyginant su kitomis technologijomis, galimybė visiškai automatizuoti sistemas, nėra tiesioginio sąlyčio su apdirbamu paviršiumi [4]. Sistemose, kuriose reikalinga ypatinga kokybė, plačiausiai yra naudojami femtosekundiniai lazeriai, pasižymintys aibe privalumų mikroapdirbimo srityje, tarp kurių vienas svarbiausių yra minimalus terminis poveikis apdirbamam paviršiui, kurį nulemia maža šiluminė difuzija dėl trumpos impulsų trukmės [5].

Šiuolaikinėje pramonėje norint pasiekti didesnes gamybos apimtis, tikslesnę bei greitesnę darbų atlikimą, siekiama kuo daugiau automatizuoti sistemas. Tai vienas iš didžiausių įtaką darančių veiksnių renkantis apdirbimo sistemą. Lazerinės mikroapdirbimo sistemos pasižymi galimybe visiškai jas automatizuoti. Tačiau sistemos automatizavimas kartu reiškia ir sistemos universalumo mažėjimą. Dažnai apdirbamas paviršius yra plokščias ir automatizuoti tokio paviršiaus apdirbimą yra gana nesudėtinga. Tačiau, kai apdirbamas paviršius yra kreivas, apdirbimo automatizavimas tampa gerokai sudėtingesnis. Tuomet lazerio pluoštas yra fokusuojamas į detalės paviršius, o pati detalė yra statoma į stakles, kurios gali judėti viena ar keliomis ašimis (priklauso nuo apdirbamo paviršiaus ir kaip norima apdirbti). Staklės yra užprogramuojamos, kad judėtų tam tikra trajektorija, kad lazerio pluoštas visada būtų tokiu pačiu atstumu nuo apdirbamo paviršiaus ir tokiu būdu

vykdoma norima operacija. Tokiais atvejais norint apdirbti kitokios formos detalę kiekvieną kart reikia iš naujo programuoti sistemą ir taip prarandamas sistemos universalumas.

Tačiau yra galimybė automatizuotą kreivų paviršių apdirbimo procesą padaryti universalesniu ir tai pritaikyti įvairiose lazerinio apdirbimo srityse. Vienas iš būdų yra panaudoti autofokusavimą ir taip sekti paviršių. Tokiu būdu visuomet bus palaikomas pastovus atstumas iki apdirbamo paviršiaus. Tai leidžia nekeičiant sistemos parametrų apdirbti įvairius paviršiaus nelygumus turinčias detales.

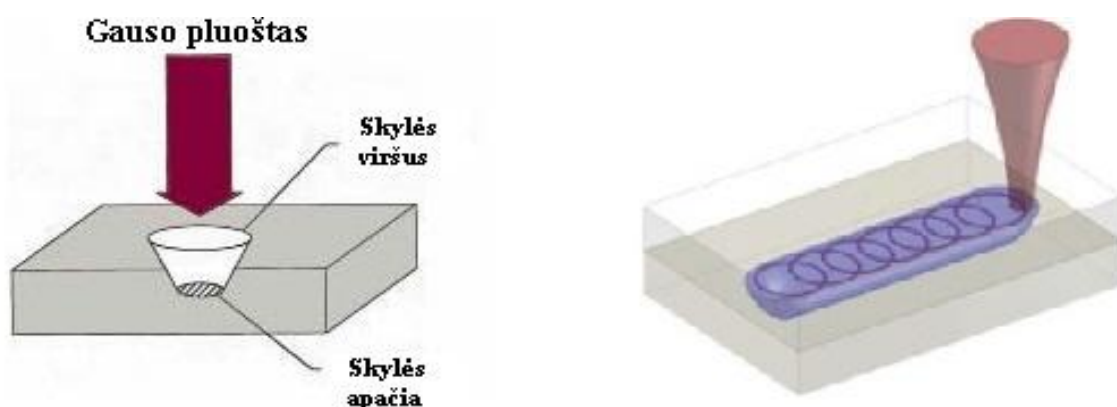
Šio darbo tikslas – sukurti ir optimizuoti optinę paviršiaus sekimo sistemą metaliniams, didelį atpindį regimajame diapazone turintiems, bandiniams, įvertinti jos galimybes bei ištirti, kaip sistema veikia realiomis sąlygomis. Užsibrėžto tikslo realizavimui buvo išskelti tokie uždaviniai:

1. Sukalibruoti mikroapdirbimui tinkamą objektyvą ir tokiu būdu tą patį objektyvą pritaikyti paviršiaus sekimui.
2. Optimizuoti autofokusavimo grįžtamojo ryšio koeficientus.
3. Įvertinti sukurtos sistemos galimybes bei apribojimus.
4. Išbandyti paviršiaus sekimo sistemą realiose mikroapdirbimo operacijose.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Įžanga

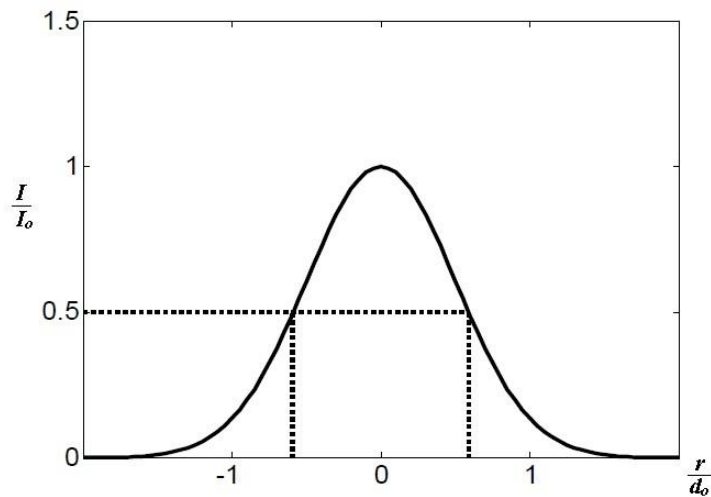
Norint kokybiškai pasinaudoti lazeriniais apdirbimo privalumais, atsižvelgiant į norimą rezultatą, reikia įvertinti įvairius sistemos parametrus: lazerio charakteristikas, pluošto sklaidimo kriterijus, aplinkos sąlygas ir kt. Vienas iš didžiausių lazerinio mikroapdirbimo privalumų yra mažas šiluminis poveikis (naudojant femtosekundinius impulsus), dėl kurio labai mažai pakinta apdirbamos medžiagos savybės. Taip yra todėl, kad naudojami trumpi impulsai bei energijos koncentravimas į mažą sritį. Tai reiškia, kad vienas didžiausių įtaką lazeriniam mikroapdirbimui darančių parametru yra lazerio pluoštas bei galimybė šį pluoštą sufokusuoti į mažo diametro dėmę. Gauso pluoštai yra populiariausi ir dažniausiai taikomi moksliniuose bei pramoniniuose lazeriuose, nes fokusuojant galima pasiekti didelius intensyvumus. [6]. Jie taip pat plačiai taikomi ir lazerinio mikroapdirbimo operacijose (1 pav.). Kairėje pavaizduotame paveiksle vykdomas lazerinis gręžimas abliuojant medžiagą, o dešinėje matomas lazerinio virinimo procesas, kurio metu išlydoma dalis medžiagos, esančios riboje tarp dviejų detalių, ir tokiu būdu įvykdomas sujungimas.



1 pav. Lazerinio mikroapdirbimo operacijos naudojant Gauso pluoštą generuojantį lazerį, kairėje – gręžimas, dešinėje – virinimas [2]

1.2. Gauso pluoštai

Gauso pluoštas – plačiausiai naudojamas ir dažniausiai rezonatoriuje generuojamas pluoštas. Jo pavadinimas yra kilęs iš to, kad Gauso pluošto intensyvumo skirstinys (2 pav.) yra aprašomas Gauso funkcija. Idealus Gauso pluoštas yra galimas tik tada, kai rezonatoriuje generuojama ir stiprinama pagrindinė moda TEM_{00} .



2 pav. Normuotas Gauso pluošto intensyvumo skirstinys

Gauso pluošto intensyvumas sklindant išilgai z ašies yra aprašomas:

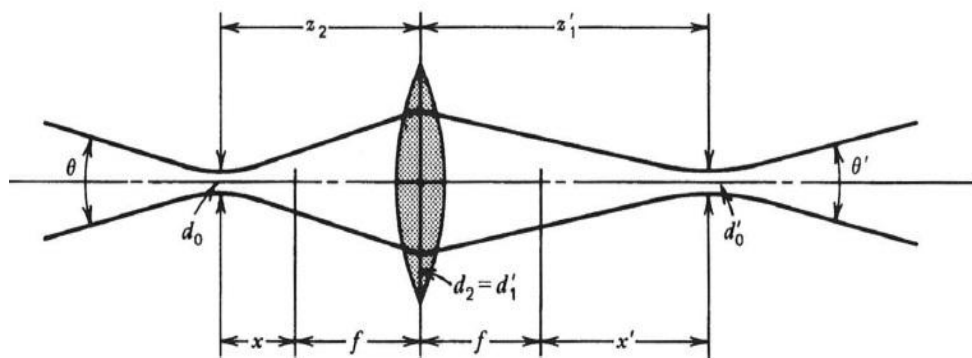
$$I(r, d_0) = I_0 \left(\frac{d_0}{d(z)} \right)^2 \exp\left(\frac{-2r^2}{d^2(z)} \right), \quad (1)$$

čia r yra atstumas nuo pluošto centro, z – sklidimo ašies koordinatė, d_0 – sąsmaukos diametras, $d(z)$ – diametras, kuriame intensyvumo amplitudė sumažėja $1/e^2$ karto. Pagrindiniai parametrai, parašantys Gauso pluoštą, yra pluošto diametras, Relėjaus ilgis (atstumas, kai pluošto diametras padidėja $\sqrt{2}$ karto), bangos frontas (nusakomas kreivumo spinduliu), pluošto skėtis.

1.3. Gauso pluoštų fokusavimas

Norint pasiekti efektyvų lazerinį mikroapdirbimą, Gauso pluoštą reikia modifikuoti. Dažniausiai yra atliekamos erdvinės pluošto modifikacijos: išplėtimas, kolimavimas bei fokusavimas. Fokusavimas visuomet reikalingas lazeriniame apdirbime. Pluošto fokusavimas – tai pluošto energijos erdvinis sukoncentravimas į mažą dėmę tam, kad būtų gaunama geriausia apdirbimo kokybė bei didelis intensyvumas. Pluošto fokusavimas atliekamas panaudojant lęšį ar objektyvą.

3 paveiksle pavaizduotas Gauso pluošto sklidimas per ploną lęšį. Tokiu atveju geriausiai apibūdinti pluoštą galima nustatant originalius sąsmaukos parametrus ir kaip jie pakito praėję pro lęšį [7].



3 pav. Gauso pluošto transformacija pereinant per ploną lęšį [7]

Gauso pluošto transformaciją pereinant ploną lęšį galima aprašyti [7]:

$$(z_2 - f)(z'_1 - f) = f^2 - f_0^2, \quad (2)$$

čia f_0^2 yra narys, kuris įskaito pluošto difrakciją, f – lęšio židinio nuotolis, z_2 – atstumas nuo pradinės sąsmaukos iki lęšio, o z'_1 – atstumas nuo lęšio iki naujos sąsmaukos. f_0^2 gali būti išreikštas per Relėjaus ilgį [7]:

$$f_0^2 = z_R z'_R, \quad (3)$$

čia z_R ir z'_R yra Relėjaus ilgis atitinkamai prieš lęšį ir po jo.

Sąsmaukos diametrą ir jos atstumą nuo lęšio galima išreikšti per tokį sąryšį [7]:

$$\frac{(z_2 - f)}{(z'_1 - f)} = \frac{d_0^2}{d'^2_0}. \quad (4)$$

Relėjaus ilgį galima išreikšti:

$$z'_R = \frac{d'_0}{\theta'} = \frac{\alpha d_0}{\theta/\alpha} = \alpha^2 z_R, \quad (5)$$

čia α yra išreikštas:

$$\alpha = \frac{|f|}{\sqrt{(z_2 - f)^2 + z_R^2}}. \quad (6)$$

Tuomet iš (5) ir (6) formulių galima išvesti Gauso pluošto fokusavimąsi aprašančią formulę plono lęšio artinio atveju [7]:

$$z'_1 = f + \frac{f^2(z_2 - f)}{(z_2 - f)^2 + z_R^2}. \quad (7)$$

Jeigu turimas ne plono lęšio atvejis, tai tuomet atsiranda papildomi nariai ir Gauso pluošto lygtys atrodytų taip:

$$z'_1 = \frac{z_R z'_R \left(\frac{n' - n}{r} \right) - z_2 n'}{n - z_2 \left(\frac{n' - n}{r} \right)}, \quad (8)$$

čia r yra lęšio kreivumo spindulys, n – aplinkos, kurioje yra lęšis, lūžio rodiklis, n' – medžiagos, iš kurios pagamintas lęšis, lūžio rodiklis.

Norint sufokusuoti bet kokią pluoštą (tarp jų ir Gauso) į kuo mažesnę dėmę, reikia mažinti bangos ilgį, mažinti lęšio židinio nuotolį arba didinti į lęšį ateinančio pluošto diametrą. Minėtoji priklausomybė aprašoma šia formule:

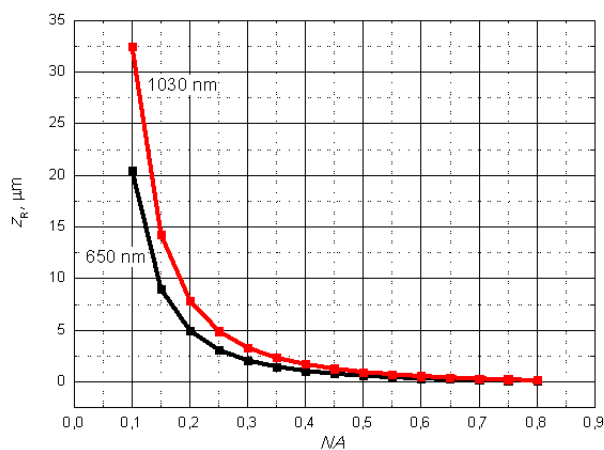
$$2w_0 = \frac{4\lambda f}{\pi D}, \quad (9)$$

čia $2w_0$ – sufokusuoto pluošto diametras, f – lęšio židinio nuotolis, D – pluošto diametras prieš lęšį. Dažniausiai keisti visus parametrus galimybės nėra, tačiau bent jau vienu ar dviem galima varijuoti.

Dar vienas svarbus atvejis nagrinėjant Gauso pluoštų kitimą yra Relėjaus ilgio priklausomybė nuo skaitinės apertūros. Ši priklausomybė paraksialiniu artiniu aprašoma [8]:

$$z_R = \frac{\lambda}{\pi} \frac{1 - NA^2}{NA^2}. \quad (10)$$

4 paveiksle pavaizduota Relėjaus ilgio priklausomybė nuo skaitinės apertūros, kai bangos ilgis yra 650 nm bei 1030 nm (šiuos bangos ilgius spinduliuojantys lazeriai buvo naudojami šiame darbe). Mažas Relėjaus ilgis reiškia, kad pluoštai greitai plečiasi, o kartu mažėja ir intensyvumas. 4 paveiksle matyti, kad didėjant skaitinei apertūrai Relėjaus ilgis mažėja. Taigi, fokusuojant pluoštą objektyvu bei siekiant efektyvaus lazerinio apdirbimo proceso, reikia tiksliai pozicionuoti bandinį dėmės, kurioje fokusuojasi pluoštas, atžvilgiu.



4 pav. Relėjaus ilgio priklausomybė nuo skaitinės apertūros apskaičiuota pagal 10 formulę

1.4. Atstumo matavimo bei sekimo sistemos

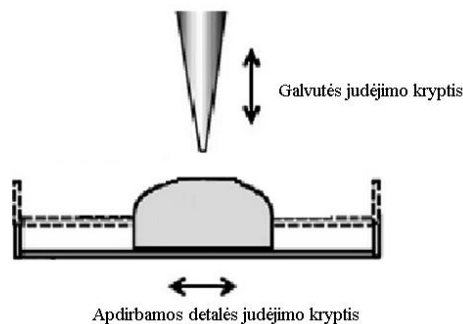
Norint realizuoti mikroabdirbimą ant kreivų paviršių, reikia naudoti aštriai fokusuojančius objektyvus. Tokių objektyvų skaitinės apertūros yra daugiau nei 0,2. Iš 4 paveikslo matyti, kad tokių objektyvų Relėjaus ilgis yra mažas, todėl apdirbamas detales reikia tiksliai pozicionuoti. Bandinio pozicionavimui gali būti naudojamos autofokusavimo sistemos, kurių vienas iš pagrindinių sudedamųjų dalių yra atstumo matavimo įrenginys.

Atstumui matuoti yra sukurta labai daug įvairių metodikų. Tobulinant technologijas bei vystantis mokslui atstumo matavimas buvo panaudotas kuriant įvairias atstumo sekimo sistemas, gebančias matuoti įvairius parametrus – atstumą iki objekto, atstumo pokytį, objekto paviršiaus profilį, greitį bei jo pokytį, vibracijas [9]. Tokių sistemų panaudojimas apima plačią sritį pradedant ridos matavimu automobiliuose, greičio radarais ir baigiant moderniomis didelio tikslumo sistemomis lazerinėse technologijose. Atstumo sekimas gali vykti mechaniškai, kai yra tiesioginis sąlytis su matuojamu objektu. Kitas būdas yra panaudojant radijo bangas (ilgiems atstumams bei greičiams matuoti). Dar vienas metodas, galintis pasiekti didžiausią tikslumą, yra optinis atstumo matavimas bei sekimas. Sistemos tipo pasirinkimas daugiausia priklauso nuo to, kokio ilgio atstumai bus matuojami ir koks tikslumas yra reikalingas.

1.4.1. Mechaninės atstumo sekimo sistemos

Patys paprasčiausi mechaniniai matavimo būdai yra atliekami naudojant ruletę ar slankmatį, tačiau tokio matavimo tikslumas nėra didelis bei kiekvieną kartą pasikeitus atstumui reikia iš naujo atlikti veiksmą, todėl toks matavimo būdas labiau paplitęs paprastuose inžineriniuose projektuose bei kasdieniniame namų ūkyje.

Paprasčiausia mechaninio paviršiaus sekimo sistema pavaizduota 5 pav. Šioje sistemoje galvutė juda tam tikru žingsniu iki bandinio tol, kol paliečia jį ir taip nustatomas atstumas. Kiekvieną kartą, kai pasikeičia bandinio padėtis, matavimas vykdomas iš naujo.

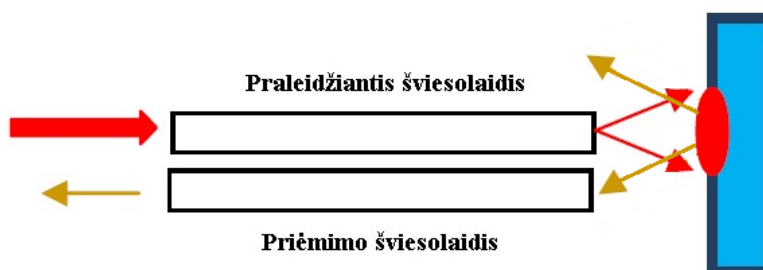


5 pav. Mechaninio atstumo sekimo principinė schema

Dažniausiai toks metodas taikomas, kai galvutė atstumo matavimo metu kartu pažymi vietą, kur vėliau vykdomas mechaninis apdirbimas. Trūkumai: bandinys yra gadinamas dėl daugkartinio tiesioginio sąlyčio kiekvieno matavimo metu, sistemos veikimas yra labai lėtas lyginant su nekontaktiniu atstumo matavimu, tikslumas labai prastas. Tačiau dėl savo paprastumo bei nedidelės kainos toks matavimo būdas visgi kai kur yra tinkamas (pavyzdžiui, gręžimo įrenginiuose, kai reikalingas vienodas skylių gylis ant kreivo paviršiaus).

1.4.2. Optinis atstumo matavimas, pagrįstas intensyvumo registravimu

Intensyvumo registravimu pagrįsti optiniai atstumo detektoriai susideda iš dviejų pagrindinių elementų – šviesos šaltinio bei detektoriaus. Veikimo principas yra nuo objekto atsispindėjusios šviesos intensyvumo, kuris yra tam tikra atstumo tarp šviesos šaltinio ar detektoriaus funkcija, registravimas. Dažniausiai realizuojant tokias sistemas yra naudojamas šviesolaidis (6 pav.) [10].



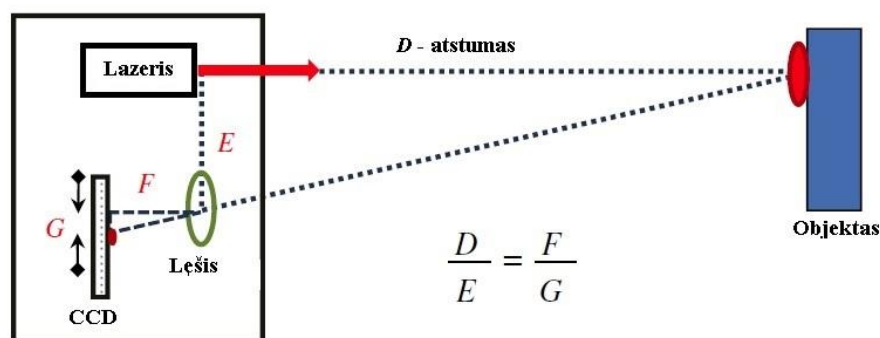
6 pav. Šviesolaidžių integravimas į optinius atstumo matuoklius, kai matuojamas intensyvumas

Dažnai yra naudojamas ne vienas šviesolaidis, o šviesolaidžių pynė tam, kad matavimo sistemos jautrumas būtų didesnis. Šviesos šaltinis gali būti diodinis lazeris, o registravimui galima panaudoti fotodiodą. Didžiausias intensyvumas yra registruojamas, kai objektas yra arti šviesolaidžio galo ir vis mažėja objektui tostant. Mažiausias atstumas, kurį galima registruoti tokia sistema, priklauso nuo šviesolaidžio skaitinės apertūros bei geometrinių elementų, sudarančių sistemą, išsidėstymo. Panaudojimo ribas taip pat nulemia ir naudojamo šviesos šaltinio parametrai.

Pagrindiniai tokios sistemos privalumai yra paprastumas, maža kaina bei galimybė atstumą matuoti dideliu pasikartojimo dažniu (iki šimtų kHz). Komercinės tokio tipo sistemos gali matuoti atstumus nuo kelių milimetrų iki maždaug 50 mm, tačiau šias ribas galima išplėsti kolimuojant pluoštą už praleidžiančiojo šviesolaidžio. Mažiausias atstumo pokytis, kurį galima išskirti, yra apie 1 μm, jei matuojamo objekto paviršius gerai atspindi naudojamą bangos ilgį. [11] Tačiau tokia atstumo technologija turi ir nemažai trūkumų. Visų pirma, kiekvieną kart, kai naudojamas kitas objektas, reikia kalibruoti sistemą ir nustatyti, ar ji tinkama. Taip pat svarbu tai, kad signalo intensyvumui įtaką gali daryti optinio sujungimo netikslumai, įvairūs atspindžiai, dulkės, nešvarūs paviršiai, kurie mažins intensyvumą ir bus gaunami klaidingi matavimo rezultatai. Dar vienas trūkumas – intensyvumo registravimu pagrįstos atstumo matavimo sistemos yra jautrios matuojamo objekto pokrypiams.

1.4.3. Trianguliacinės atstumo matavimo sistemos

Trianguliacinį metodą senovės graikų matematikai naudojo jau 600 metų prieš Kristų piramidžių aukščiui pamatuoti [12]. Atsiradus lazeriams tokio matavimo būdo galimybės labai išsiplėtė ir šiais laikais tapo plačiai taikomas atstumams bei paviršiaus nelygumams matuoti. Trianguliacinio matavimo principas – atstumas (arba koordinatė) yra apskaičiuojamas remiantis geometrinėmis panašių trikampių savybėmis. [12] Optinė trianguliacinė atstumo detektavimo schema pavaizduota 7 paveiksle.



7 pav. Trianguliacinio matavimo principinė schema

Kolimuotu lazerio pluoštu apšviečiamas objektas, nuo kurio pluoštas atsispindi ir praėjęs pro lęšį pataiko į tam tikrą CCD kameros sritį. Atstumai F ir E visada yra pastovūs, o G pamatuojamas, kai žinoma, į kurią kameros vietą surenkamas lazerio pluoštas. Tuomet atstumas iki objekto D yra apskaičiuojamas iš panašių trikampių savybės: $D/E = F/G$.

Atstumas, kurį galima matuoti tokia schema, yra nuo 10 mm iki 1 m. Šį atstumą nulemia geometrinės savybės, t.y. galima matuoti tol, kol lazerio pluoštas vis dar pataiko į CCD kamerą, bei optinis didinimas. Didžiausią skiriamąją gebą, kurią galima pasiekti, lemia lazerio pluošto

matmenys bei CCD kameros pikselio dydis. Maksimali skyra yra keli mikrometrai ir ji yra pasiekama tik tokiu atveju, kai mažinamos galimos atstumo matavimo ribos. Taigi, jei norima didinti matavimo diapazoną, neišvengiamai mažės skiriamoji geba.

Didžiausi trianguliacinio atstumo matavimo privalumai yra didelis matavimo greitis (iki šimtų kHz), galimybė nustatyti objekto formą bei nedidelė kaina. Tačiau toks atstumo matavimo metodas turi ir trūkumų. Sistema prastai veikia su skaidriomis medžiagomis, nes tokie paviršiai prastai atspindi daugumą lazerių spinduliuojamų bangų ilgių. Dar vienas trūkumas – dėl geometrinių apribojimų negalima matuoti mažų atstumų.

1.4.4. Atstumo nustatymas matuojant bangos sklidimo laiką

Dar vienas metodas, kuriuo galima nustatyti atstumą iki objekto, yra bangos sklidimo laiko matavimas. Paleidžiamas elektromagnetinės bangos impulsas (pvz. šviesos) ir matuojamas laikas, per kurį banga nusklinda iki objekto ir atsispindėjusi grįžta atgal. Atstumas bus lygus pusės sklidimo laiko ir šviesos greičio (300 000 km/s) santykiui. Tačiau kartais grįžęs signalas dėl sklaidos gali būti net eile silpnesnis nei paleista banga ir tokiu atveju reikia labai jautrių detektorių ar vidurkinti signalą, todėl tokios sistemos kaina gerokai išauga. Viena iš labiausiai paplitusių tokio tipo atstumo matavimo sistemų yra LiDAR (Light Detection And Ranging) [9].

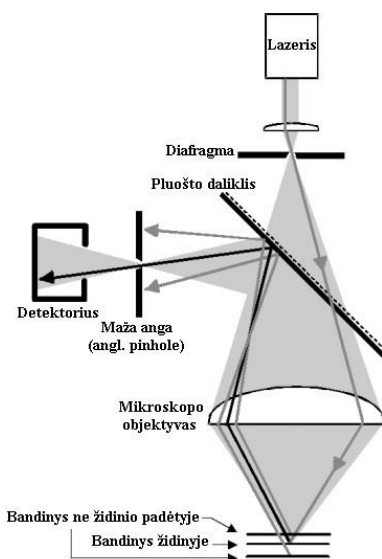
Atstumo nustatymo matuojant bangos sklidimo laiką metodas pirmiausia buvo panaudotas kuriant karinius radarus (per Antrąjį pasaulinį karą), tačiau tada buvo naudojami mikrobangų šaltiniai, o atradus lazerius įrenginiai tapo daug kompaktiškesni. Tokioms sistemoms naudojami lazeriai, spinduliuojantys regimajame diapazone arba artimojoje IR srityje. Naudojama impulso trukmė yra nanosekundžių trukmės. Šio impulso trukmė nulemia ir matavimo ribas. Kai matuojami atstumai yra didesni nei 50 m, impulso sklidimo trukmė yra gerokai ilgesnė už paties impulso trukmę ir gali būti išmatuota naudojant paprastus detektorius ir nesudėtingą elektroniką. Jei matuojami atstumai mažesni nei dešimtys metrų, tuomet reikia įskaičiuoti ir impulso laikinę formą tam, kad tiksliai būtų nustatytas užlaikymas tarp paleisto ir grįžusio impulso. Mažiausias atstumas, kurį galima išmatuoti, yra apie 1 m, tačiau norint matuoti kelių metrų ribose impulsinis lazerio veikos režimas nėra tinkamas ir reikia naudoti nuolatinės veikos moduluotos amplitudės bangas. Tokiu atveju išmatuojamas fazės pokytis tarp paleistos ir grįžusios į detektorių šviesos. Atstumas gaunamas fazės pokytį padalinus iš moduliacijos dažnio [9].

Atstumo nustatymo sistemos, matuojant bangos sklidimo laiką, dominuoja, kai reikia matuoti atstumus, didesnius nei 50 m (žemėlapių sudarymui, topografiniams matavimams ir pan.). Matavimo skiriamoji geba iš esmės priklauso nuo naudojamos elektronikos tikslumo. Didžiausias atstumas, kurį dar galima matuoti, priklauso nuo lazerio galios, detektoriaus jautrio bei paties

objekto matomumo. Didžiausias tokios sistemos trūkumas yra tai, kad ji nėra tinkama mažiems atstumams.

1.4.5. Konfokalinė atstumo sekimo sistema

Konfokalinė atstumo sekimo sistema – tai dar viena optinė sistema, kuri yra skirta matuoti objekto koordinatės pokyčiams bei paviršiaus nelygumams, kai šie yra milimetrų eilės. Konfokalinė sistema yra vienas iš geriausių pasirinkimų, kai norima palaikyti tikslų atstumą iki objekto (8 pav.) [13].



8 pav. Konfokalinės paviršiaus sekimo sistemos veikimo principas

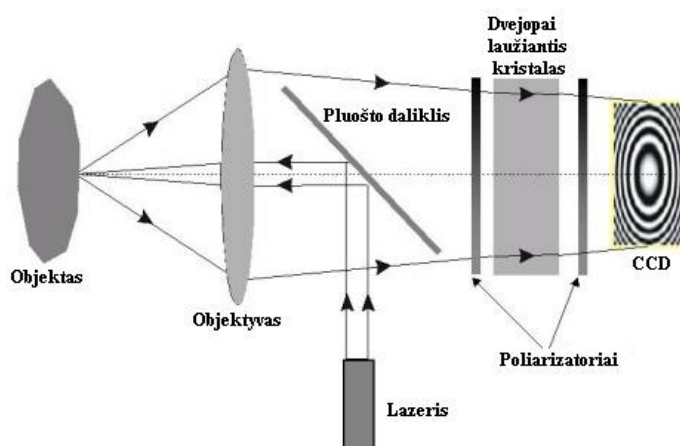
Konfokalinės atstumo sekimo sistema nustato, kada objektas pasislenka iš židinio padėties. Kaip tai realizuojama, pavaizduota 8 paveiksle. Lazero pluoštas sufokusuojamas ir židinio padėtyje pastatoma diafragma tam, kad būtų išvengiama papildomų atspindžių. Tuomet pluoštas fokusuojamas mikroskopo objektyvu ir atsispindi nuo objekto. Maža anga ir detektorius pastatyti taip, kad didžiausias šviesos kiekis į detektorius patektų tik tada, kai objektai yra mikroskopo objektyvo židinio plokštumoje. Kitu atveju didžioji dalis šviesos nepatenka į detektorius.

Naudojant monochromatinius šviesos šaltinius konfokalinėje sistemoje galima pasiekti $\sim 1 \mu\text{m}$ skiriamąją gebą. Pakeitus šviesos šaltinį į polichromatinį, skiriamąją gebą galima gauti iki dešimtųjų mikrometro dalių. Atstumas, kuriame veiks konfokalinės sistemos, įprastai yra milimetrų eilės ir priklausomai nuo sistemoje naudojamų lęšių židinio nuotolių gali būti nuo kelių milimetrų iki dešimčių milimetrų. Konfokalinės sistemos reikalauja tikslaus fokusavimo, todėl tokiose sistemose naudojama aukštos kokybės, mažą f -skaičių (židinio nuotolio ir įėjimo vyzdžio santykį) turinti optika. Vienas didžiausių tokios sistemos privalumų yra tai, kad ši sistema yra tinkama su įvairiais bandiniais. Net, jei bandinys yra labai mažai atspindintis, konfokalinę sistemą galima

naudoti, tik tuomet gali sumažėti matavimo greitis, jei reikės papildomo vidurkinimo. Tokių komercinių sistemų veikimo greitis yra dešimtys kHz [13].

1.4.6. Konoskopinėmis hologramomis paremta atstumo matavimo sistema

Dar vienas atstumo matavimo detektorių tipas konoskopine holografija paremtas matavimo metodas, pasižymintis dideliu tikslumu, dideliu matuojamo atstumo diapazonu bei galimybe matuoti sudėtingus paviršius. Spindulys keliauja iki objekto ir atgal tuo pačiu keliu, todėl įmanoma matuoti netgi skylių ar griovelių gylį [14]. Konoskopinės matavimo sistemos principinė schema pavaizduota 9 paveiksle.



9 pav. Konoskopinės sistemos veikimo principas

Lazerio pluoštas perėjęs objektyvą pataiko į objektą ir nuo jo atsispindėjęs grįžta atgal kolinearčiai. Grįžusio kūgio formos pluoštą surenka objektyvas. Tuomet pluoštas patenka į poliarizuojančios optikos elementus, kuriuose nepoliarizuoti spinduliai yra poliarizuojami. Tada spinduliai dvejopai laužiančiame kristale yra padalijami į du, sklindančius tuo pačiu keliu, bet turinčius statmenas poliarizacijas bei vėlinami vieno vienas kito atžvilgiu. Tai vyksta todėl, kad dvejopai laužiantis kristalas turi skirtingus lūžio rodiklius skirtingoms poliarizacijoms. Toliau spinduliai ant CCD kameros dėl vėlinimo tarp jų sukuria interferencinį vaizdą. Pagal sukurtus interferencinius žiedus yra apskaičiuojamas atstumas iki objekto.

Konoskopinės sistemos labiausiai tinka, kai reikalingas tikslumas yra apie 1 μm , paviršiai yra sudėtingų formų bei matavimo atstumas yra iki kelių metrų [14].

1.6.7. Atstumo matavimo bei sekimo sistemų palyginimas

Pasirinkimas kokia atstumo matavimo bei sistema yra tinkamiausia priklauso nuo konkrečios srities, kurioje ji bus naudojama, bei keliamų reikalavimų. Apibendrinant 1.6 skyriuje aptartas sistemas išskirti pagrindiniai jų privalumai ir trūkumai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Atstumo matavimo bei sekimo sistemų palyginimas

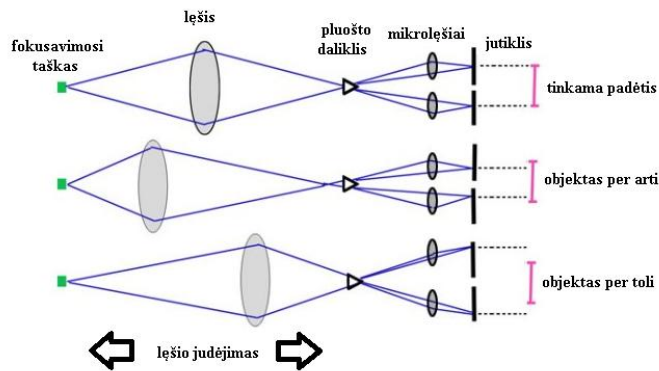
Parametras Sistemos pavadinimas	Tikslumas	Greitis	Veikimo nuotolis	Trūkumai	Kaina
Mechaninė	<100 mm	<10 Hz	<1 m	Kiekvieno sąlyčio metu gadinamas bandinys	Labai maža
Matuojant intensyvumą	>1 μm	<100 kHz	1 mm - 50 mm	Atspindžiai, dulkės, nešvarumai daro įtaką matavimo rezultatams	Maža
Trianguliacinė	>1 μm	>100 kHz	10 mm - 1 m	Netinkama mažiems atstumams	Maža
Matuojant bangos sklidimo laiką	>1 mm	<1 kHz	nuo 1 m kelių km	Netinkama mažiems atstumams	Didelė
Konfokalinė	> 1 μm	>10 kHz	<10 mm	Nėra matuojamas atstumas. Tinka tik mažiems atstumams	Vidutinė
Konoskopinė	<1 μm	<10 kHz	<1 m	Netinka skaidriems paviršiams	Vidutinė

Lazerinio mikroapdirbimo sistemos reikalauja didelio tikslumo (kelių mikrometrų) bei didelių greičių (kelių kHz). Iš pateiktos lentelės matoma, kad šiuos parametrus atitinkančios sistemos yra trianguliacinė, konfokalinė ir konoskopinė. Šiame darbe integravimui į lazerines mikroapdirbimo sistemas buvo pasirinkta konoskopinė atstumo matavimo sistema.

1.5. Autofokusavimas

Atstumo nustatymas bei sekimas yra pagrindinis autofokusavimo sistemų uždavinys. Tokios sistemos yra plačiausiai paplitusios fotoaparatuose. Autofokusavimo sistemos veikimas fotoaparatuose yra pagrįstas kontrasto įvertinimu (10 pav.). Iš jutiklio duomenų apskaičiuojamas kontrastas (skirtumas tarp jutiklių registruojamų duomenų), tuomet pajudinamas lęšis ir kontrastas skaičiuojamas iš naujo. Jei kontrastas mažėja, lęšis judinamas į kitą pusę. Tai kartojama tol, kol gaunamas didžiausias kontrastas [16].

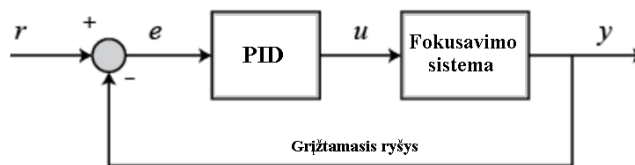
Autofokusavimo sistemos gali būti naudojamos ne tik fotoaparatuose bet ir kitose srityse (pavyzdžiui, atstumo palaikymui), tačiau pagrindinis tokios sistemos uždavinys išlieka toks pat – rasti tam tikrą atstumą.



10 pav. Fotoaparato autofokusavimo sistemos veikimo schema

1.6. PID reguliatorius

Norint pasiekti optimalų paviršiaus sekimo funkcionavimą, reikia sukurti pozicionavimo algoritmą su grįžtamoju ryšiu. Priklausomai nuo momentinės paviršiaus padėties algoritmas turėtų užduoti komandas valdymo stalams ir grąžinti į optimalią padėtį. Tokiam algoritmui aprašyti dažniausiai naudojama PID reguliavimo strategija. PID reguliatorius – įrenginys, gebantis kontroliuoti signalo kitimą pasinaudodamas grįžtamoju ryšiu. Šio įtaiso principinė schema pavaizduota 11 paveiksle [17].



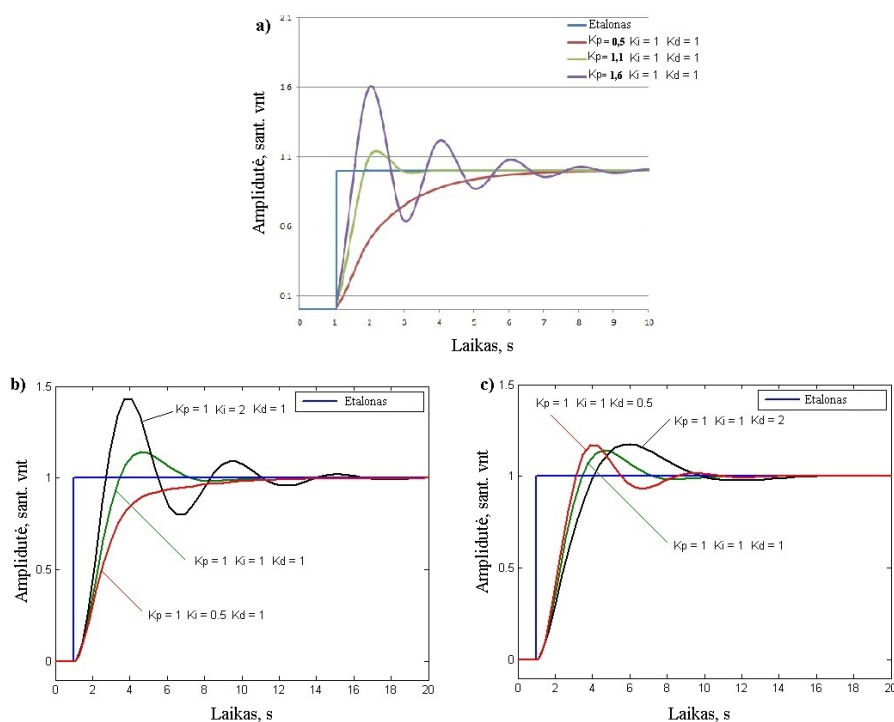
11 pav. PID reguliatoriaus principinė schema

Šio uždaro ciklo sistemos pagrindinis narys yra kintamasis e , kuris yra skirtumas tarp užduotos įėjimo vertės r (reikiamos paviršiaus padėties) ir realios išėjimo vertės y (tikrosios paviršiaus padėties). Kintamasis e atitinka paklaidą, kuri yra siunčiama PID reguliatoriui ir jis apskaičiuoja kaupiamą šios vertės išvestinę ir integralą. Signalas u yra lygus trijų dėmenų sumai – kintamojo e ir koeficiento K_p sandaugai, e integralo ir koeficiento K_i sandaugai bei e išvestinės ir koeficiento K_d sandaugai [17]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Tuomet yra siunčiamas signalas į pozicionavimo sistemą, kurio vertė yra lygi u , stalai pasislenka ir suformuojama nauja išėjimo vertė y . Ši operacija yra atliekama nuolat ir tik tuomet,

kai $r = y$, sistema neatlieka signalo keitimo (nes tuomet kintamasis e yra lygus 0). Taip realizuojama autofokusavimo sistema. Iš pateiktos formulės (11) matyti, kad PID reguliatoriaus veikimą nulemia parametrai K_p , K_i bei K_d , kurie yra atsakingi už sistemos paklaidą. Kiekvienas parametras įneša skirtingą indėlį bendrai paklaidai, tačiau visi jie yra teigiami [16]. 12 paveiksle iliustruojama šių koeficientų įtaka. Iš a) grafiko matoma, kad didėjant parametru K_p didėja signalo fronto statumas, grafike b) stebima, kaip didėjant K_i auga bendra signalo amplitudė, o c) dalyje matoma, kaip koeficientas K_d mažina signalo osciliacijas. Taigi, parametras K_p lemia realiu laiku esančios paklaidos vertę, t.y. lemia, kaip greitai bus reaguojama į pakitusį signalą, K_i lemia bendrą paklaidą, t.y. atsakingas už tai, kad bendra signalo forma artėtų prie siekiamos vertės, o koeficientas K_d lemia paklaidas, kurios atsiranda dėl signalo osciliacijų.



12 pav. Koeficientų K_p , K_i bei K_d įtaka signalui

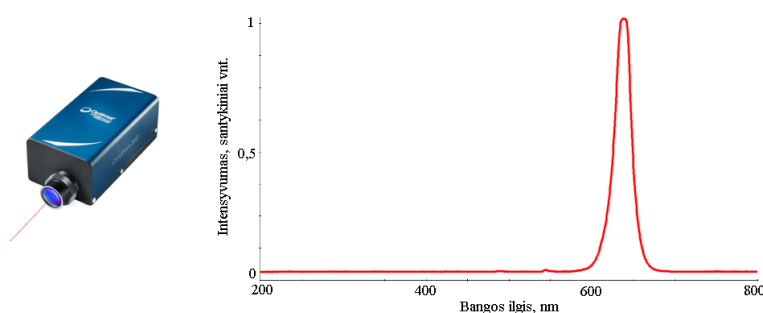
Egzistuoja daug įvairių metodų, kuriais remiantis galima optimizuoti koeficientų vertes. Plačiausiai paplitę yra Ziegler-Nichols, Tyreus Luyben, Cohen-Coon, Astrom-Hagglund matematiniai metodai [18]. Optimizavimas yra įmanomas ir pasinaudojus kompiuterinėmis programomis (pavyzdžiui, CAutoD). Pasirinkimas, kokį metodą naudoti, priklauso nuo konkrečios turimos sistemos bei norimo rezultato (ar siekiama kuo didesnio greičio, ar tikslumo, ar stabilumo). Tačiau pats universaliausias ir paprasčiausias yra rankinis optimizavimas (anlg. manual tuning). Šio metodo esmė yra vienu metu keisti tik vieną parametą ir suradus tinkamiausią vertę kitų ieškoti paliekant šį koeficientą kaip konstantą (pradinės parametų vertės yra lygios nuliui) [18].

2. Eksperimente naudojama įranga

Eksperimento metu buvo konstruojama kreivų paviršių mikroapdirbimo sistema. Tai buvo atliekama naudojant optinę paviršiaus sekimo sistemą, kurią sudaro integruotas konoskopinis Optimet atstumo matuoklis, pozicionavimo stalai bei šių stalų valdymo įrenginys Aerotech a3200. Mikroapdirbimo procesui buvo pasinaudota PHAROS lazeriu.

2.1. Atstumo matuoklis Optimet Probe ConoPoint-3

Optimet Probe ConoPoint-3 (toliau OPC) yra universalus atstumo matuoklis, kurio veikimas pagrįstas konoskopinės holografijos principu (žr. 1.4.6 skyrių). OPC yra tinkamas matuoti kreivus bei blizgius paviršius dideliu tikslumu. Gamintojų teigimu, didžiausias tikslumas, kurį galima pasiekti šiuo įrenginiu, siekia 0,1 μm naudojant 0,2 ir didesnes apertūras turinčius objektyvus. Maksimalus kritimo kampas į paviršių gali būti iki 85°. Įrenginyje yra naudojamas lazerinis diodas. Maksimalus pasikartojimo dažnis yra 3 kHz. Vienas didžiausių OPC privalumų – lengvai keičiamas objektyvas. Dėl šios priežasties galima naudoti įrenginį esant skirtingiems atstumams iki bandinio, tereikia keisti objektyvą. OPC gali būti valdomas kompiuteriu sujungus Ethernet sąsaja. Programinė įranga yra prieinama gamintojo internetiniame puslapyje ir yra tinkama naudoti su visomis Windows operacinės sistemos versijomis [19]. 13 paveiksle pavaizduotas OPC atstumo matuoklis (kairėje) bei jo spinduliuojamas spektras (dešinėje). Matoma, kad didžiausias intensyvumas yra ties 633 nm, taigi, didžiausias įtaiso trūkumas, kad jis nėra tinkamas paviršiams, kurie silpnai atspindi 633 nm (pavyzdžiui, stiklas).



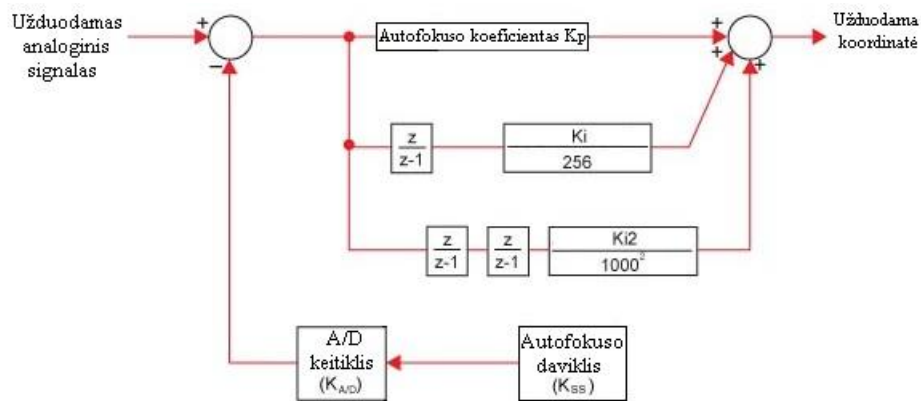
13 pav. Optimet atstumo matuoklis (kairėje) bei jo emisijos spektras (dešinėje)

2.2. Pozicionavimo stalų valdymo įrenginys Aerotech a3200

Aerotech a3200 – tai įrenginys, kurio paskirtis yra labai tiksliai valdyti pozicionavimo stalus (X bei Y stalų modelis – ANT180, Z – ANT130). Valdymas yra atliekamas įrenginį prijungus prie kompiuterio bei naudojant tam skirtą programinę įrangą. Pozicionavimo stalų pagrindiniai parametrai: didžiausias kelias, kurį gali judėti X bei Y stalai, – 400 mm, Z stalas – 200 mm,

tikslumas - <500 nm, atsikartojamumas - <100 nm, didžiausias greitis – 5 m/s, didžiausias pagreitis – 3 g.

Aerotech a3200 kontroleris turi autofokusavimo funkciją, kuri buvo svarbiausia įrenginio savybė atstumo sekimo įrangos kūrimo metu. Autofokusavimo ciklo principinė schema pavaizduota 14 paveiksle.



14 pav. Autofokusavimo ciklo blokinė diagrama

Šio ciklo metu pagal į valdiklį paduodamą analoginį signalą yra apskaičiuojama koordinatė tam tikra ašimi, kuri nekinta tol, kol nepasikeičia analoginio signalo vertė. Pakitus analoginiam signalui, kinta ir koordinatė. Tuomet vykdomas autofokusavimo ciklas tol, kol atstatoma reikiama vertė. Taip vykdoma autofokusavimo operacija, kurios paklaidas galima valdyti keičiant sistemos parametrų K_p , K_i bei K_{i2} vertes, kurios atitinka PID reguliatoriaus vertes (žr. 1.6 skyrių).

2.3. PHAROS lazeris

Tyrimo metu pagrindinę lazerinio mikroapdirbimo sistemą sudarė ultratrumpųjų impulsų PHAROS lazeris (15 pav), kuriuo buvo atliekami pjūviai bandinio paviršiuje kartu naudojant ir sukurtą paviršiaus sekimo sistemą, siekiant įvertinti, kaip veikia sistema kartu naudojant ir apdirbančio lazerio pluoštą.

Pagrindiniai naudoto lazerio parametrai: maksimali išėjimo galia – 6 W, didžiausia impulso energija – 0,3 mJ, mažiausia generuojamų impulsų trukmė – 280 fs, didžiausias pasikartojimo dažnis – 200 MHz, spinduliuojamas bangos ilgis – 1030 nm [20].

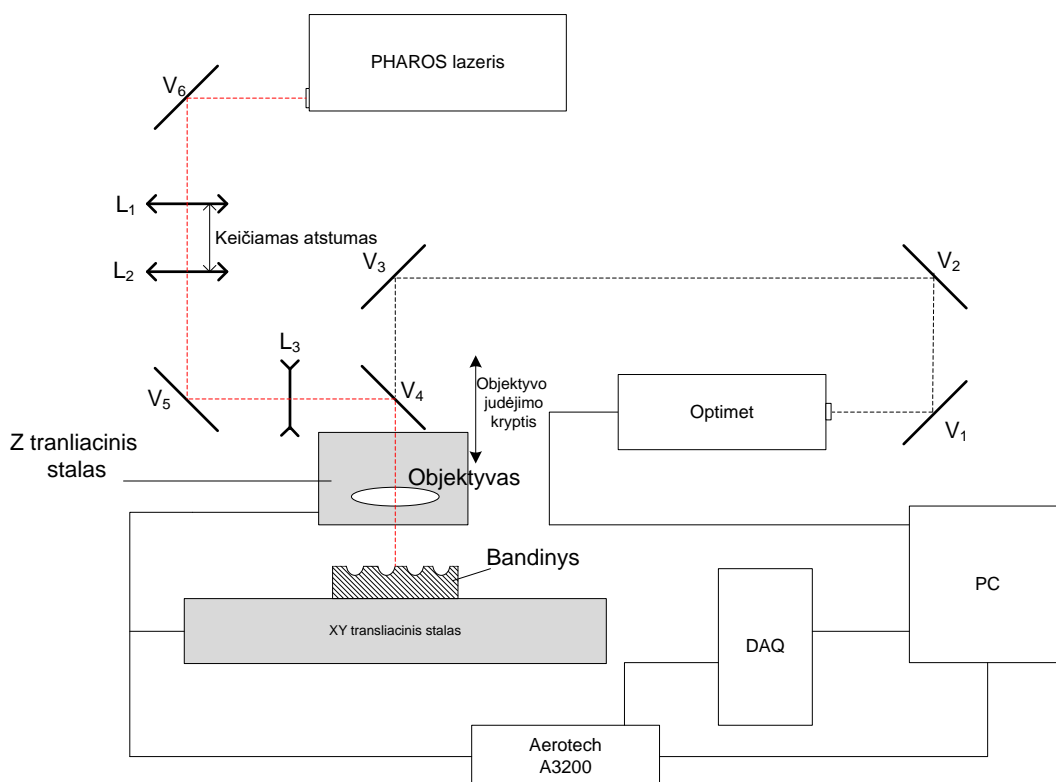


15 pav. Tyrimo metu naudotas PHAROS lazeris

2. Eksperimento metodika

3.1. Tyrimo sistemos bei jos veikimo aprašymas

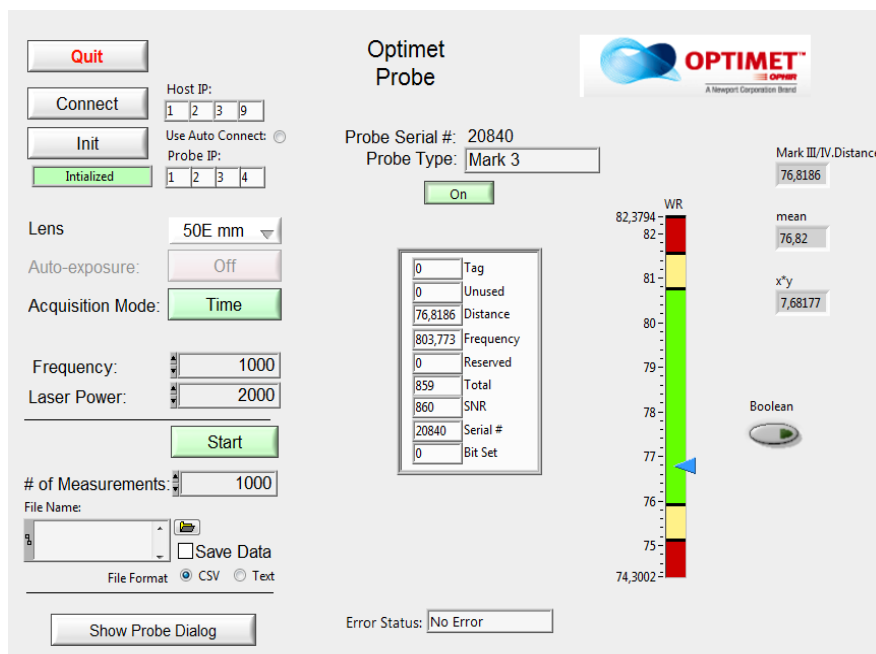
Tyrimo tikslas yra sukurti paviršiaus sekimo sistemą bei įvertinti jos galimybes, šiam tikslui pasiekti buvo pasinaudota sistema, kurios principinė schema pateikta 16 paveiksle. Sistemą sudaro OPC atstumo matuoklis, turintis ethernet išėjimą, kuriuo yra sujungtas su kompiuteriu (PC), PHAROS lazeris, transliaciniai stalai Z (gali judėti vertikaloje koordinatėje) bei XY (gali judėti horizontaliose koordinatėse X, Y kryptimis), kurie prijungti prie Aerotech valdymo bloko, sujungto su kompiuteriu, veidrodžiai $V_1 - V_6$, kurie skirti OPC ir PHAROS pluoštui valdyti bei National Instruments (NI USB-6221) skaitmeninio – analoginio signalo keitiklis.



16 pav. Tyrimo įrangos principinė schema

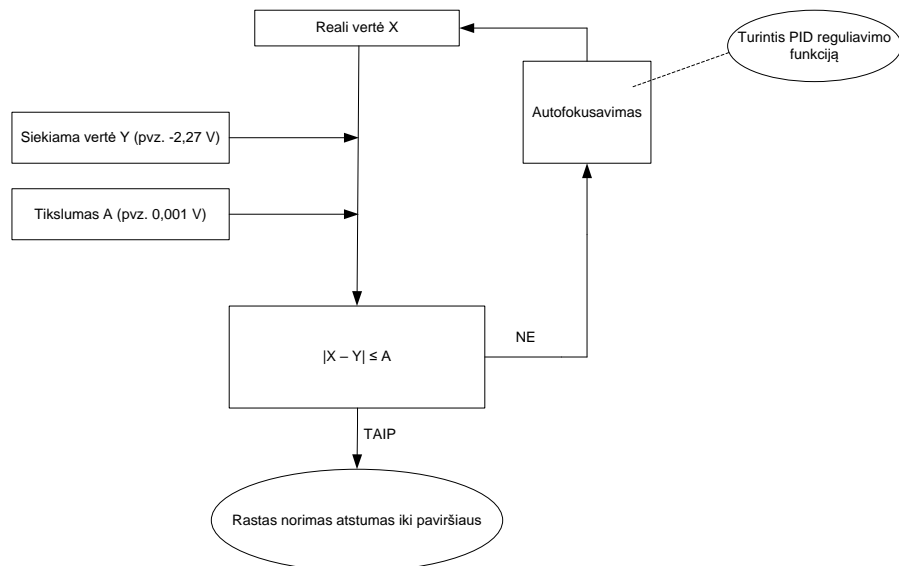
16 paveiksle pavaizduotos tyrimo schemas principas yra kolinearčiai suvesti PHAROS ir OPC lazerių pluoštus abu juos fokusuojant tuo pačiu objektyvu ir apdirbimo metu realiu laiku keisti objektyvo padėtį priklausomai nuo apdirbamos detalės paviršiaus kreivumo ir tokiu būdu užtikrinti, kad fokusavimo padėtis visada būtų ant bandinio paviršiaus. PHAROS lazerio pluoštas veidrodžiais $V_4 - V_6$ nuvedamas iki objektyvo, kuriuo yra fokusuojamas. Tuo pačiu objektyvu yra fokusuojamas ir OPC lazerio pluoštas, atvestas $V_1 - V_3$ veidrodžiais. OPC kartu su Aerotech a3200 sudaro paviršiaus sekimo sistemą. Ši sistema keičia Z transliacinio stalo padėtį, ant kurio yra objektyvas. Judant XY stalams, skenuojamas bandinio paviršius.

Pasinaudojus OPC gamintojo pateikiama programine įranga, galima valdyti matuoklio lazerio spinduliuotės galią bei pasikartojimo dažnį. Programos valdymo langas pavaizduotas 17 paveiksle. Kaip matoma, programa pateikia tokius kintančius parametrus kaip atstumas (distance), dažnis (frequency), surinktos šviesos kiekis (total) bei signalo ir triukšmo santykis (SNR).



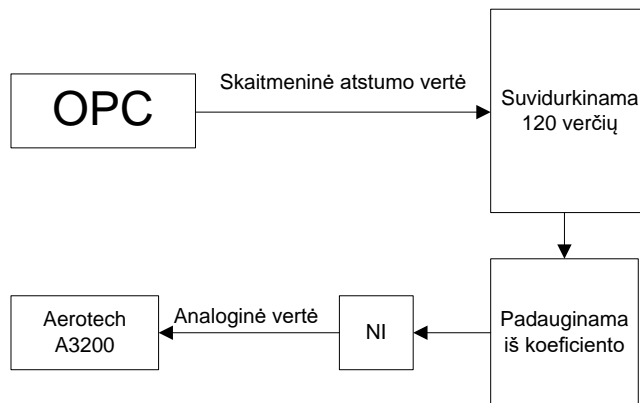
17 pav. OPC atstumo detektoriaus valdymo programos langas

Tyrimo metu buvo naudojama OPC pateikiama atstumo vertė. Pasinaudojus Labview programavimo kalba bei NI-DAQ sąsaja buvo sujungti OPC bei NI prietaisai bei skaitmeninis signalas keičiamas į analoginį, kuris toliau yra perduodamas į Aerotech valdymo kontrolierį. Į autofokusavimo kontrolierį galima įrašyti tam tikrą įtampos vertę bei užduoti komandą, kad šią vertę būtų stengiamasi palaikyti Z ašies atžvilgiu. Kitoje skiltyje įrašoma vertė, kuri nurodo, koku tikslumu palaikyti įtampos vertę. Pakitus X, Y koordinatėms bei atstumui nuo objektyvo iki bandinio kinta ir analoginis signalas. Tuomet Aerotech įrenginys keičia objektyvo padėtį Z ašyje, kol vėl gaunama užduota analoginio signalo vertė ir bandinys vėl atsiduria pradiniu atstumu iki objektyvo. Tokiu būdu yra realizuojama autofokusavimo funkcija, turinti grįžtamąjį ryšį. Šios funkcijos schematinė realizacija pateikta 18 pav.



18 pav. Autofokusavimo veikimo principinė schema

19 paveiksle pateikta principinė funkcijų ciklo, kuris atliekamas signalo perdavimo metu, schema. Šio ciklo metu yra paaimama OPC atstumo vertė, suskaičiuojamas 120 verčių vidurkis (toku būdu sumažinamas triukšmų lygis ir išvengiama staigių įtampos šuolių, kurie neigiamai veikia OPC stabilumą) ir padauginama iš koeficiento (koeficientas reikalingas tam, kad analoginio išėjimo vertė būtų ribose tarp -10 ir 10 V – toks verčių intervalas gali būti perduodamas į Aerotech valdymo įrenginio analoginį įėjimą). Tuomet gauta vertė yra perduodama į DAQ, kuriame paverčiama iš skaitmeninio į analoginį. Toliau analoginė vertė iš NI įrenginio patenka į Aerotech.



19 pav. Labview programos atliekamų funkcijų principinė schema

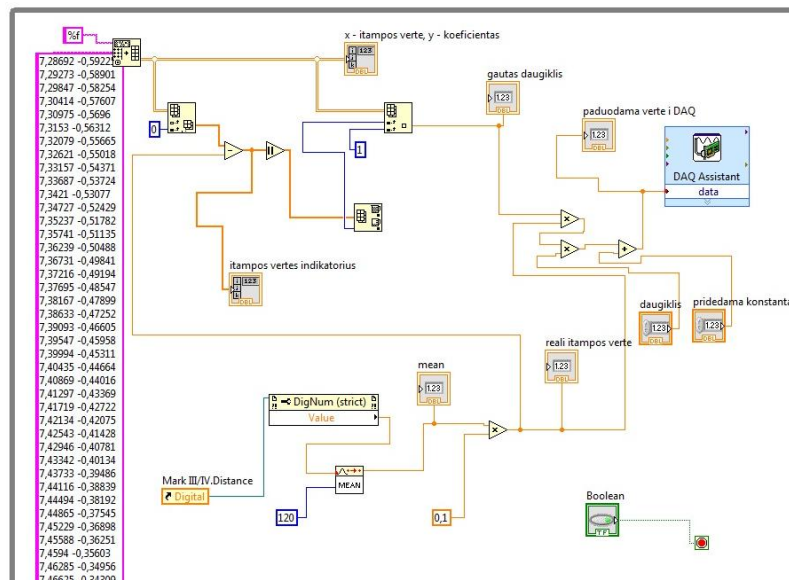
Lazerio mikroapdirbimui valdyti bei duomenims įrašyti buvo naudojama komercinė SCA (Workshop of Photonic) programa. Šia programa galima valdyti pozicionavimo stalus, užduoti formavimo algoritmus bei kontroliuoti PHAROS lazerį.

Matavimų metu buvo naudojami trys objektyvai: Thorlabs 10x objektyvas, kurio židinio nuotolis $f = 15$ mm, o skaitinė apertūra $NA = 0,25$, Olympus 40x ($f = 0,6$ mm, $NA = 0,65$) objektyvas bei Mitutoyo objektyvas M Plan Apo NIR 50x ($f = 200$ mm, $NA = 0,42$).

3.2. Autofokusavimo optimizavimo metodika

Tyrimo metu yra naudojami ne originalūs OPC objektyvai, nes originalus objektyvas nėra tinkamas lazeriniam mikroapdirbimui. Atstumo matavimo įrenginys yra sukalibruotas su originaliu objektyvu, sujungtu su pačiu įtaisu. Dėl šios priežasties naudojant ne originalius objektyvus gaunamas netiesinis įtampos atsakas, todėl sistemą reikia optimizuoti.

Norint sekimo sistemą realizuoti lazerinio mikroapdirbimo operacijose naudojant šiam taikymui skirtus objektyvus, esančius toliau nuo OPC matuoklio, buvo iškelti du pagrindiniai optimizavimo tikslai. Pirmasis – netiesinę įtampos priklausomybę nuo atstumo iki bandinio pakeisti tiesine. Ši priklausomybė daro didelę įtaką sekimo sistemos veikimui – dėl netiesinio įtampos kitimo kreivo bandinio dalis, turinti neigiamą amplitudės kitimą, yra sekama skirtingai nei ta dalis, kuri turi teigiamą amplitudės pokytį. Kiekvienai įtampos vertei buvo rastas skirtingas koeficientas, iš kurio padauginus visa įtampos priklausomybės nuo atstumo iki bandinio kreivė tampa tiesinio pobūdžio. Taigi tokiu būdu įvedamos korekcinės pataisos, kurias realizuoja Labview programoje aprašytas ciklas matomas 20 pav. Šio ciklo metu iš OPC gauta įtampa yra priskiriama artimiausiai įtampos vertei iš rausva spalva apibraukto skaičių masyvo pirmojo stulpelio. Tuomet paimamas koeficientas, priskirtas tai įtampos vertei, esantis to paties masyvo antrajame stulpelyje, ir padauginamas iš realios įtampos vertės (tos, kurią išduoda OPC). Tuomet gautasis skaičius yra perduodamas į DAQ.

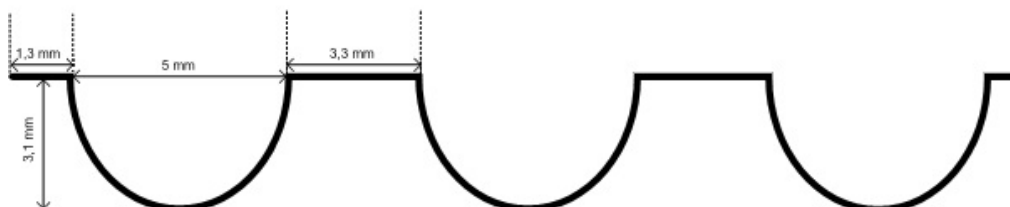
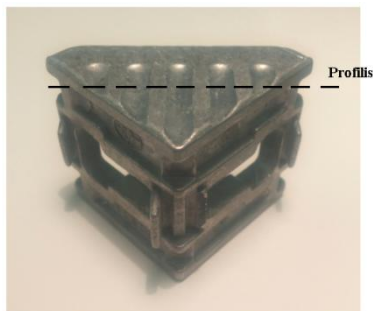


20 pav. Labview programos lango dalis, kuria gaunama tiesinė įtampos priklausomybė nuo atstumo iki bandinio

Antrasis optimizavimo tikslas – optimizuoti autofokusavimo parametrus K_i , K_{i2} bei K_p . Šiuos koeficientus, kurie atitinka PID kontrolerio parametrus, galima keisti Aerotech a3200 valdymo programoje, tačiau instrukcijų apie šiuos parametrus ir jų optimizavimą nėra pateikiama nei

pagalbiniuose dokumentuose, nei oficialioje interneto svetainėje. Dėl šios priežasties buvo pasinaudota universalia PID optimizavimo metodika (žiūrėti 1.5 skyrių).

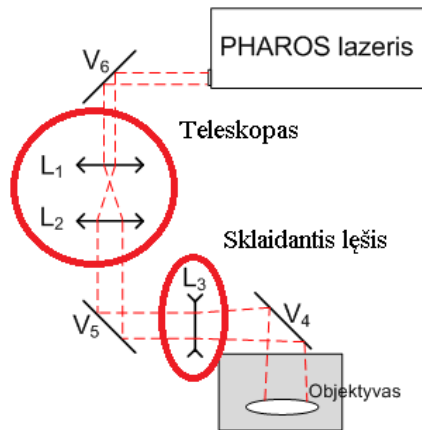
Atlikus optimizavimą buvo įvertinamas sistemos veikimas. Tam buvo skenuojamas kreivos detalės paviršius (21 pav.) įjungus autofokusavimo funkciją bei SCA programa įrašant translacinio stalo Z (ant kurio yra objektyvas) koordinatės kitimą. Tokiu buvo gautas paviršiaus profilis skenuojant skirtingais greičiais.



21 pav. Bandinio nuotrauka (viršuje) bei bandinio schematinis profilis (apačioje)

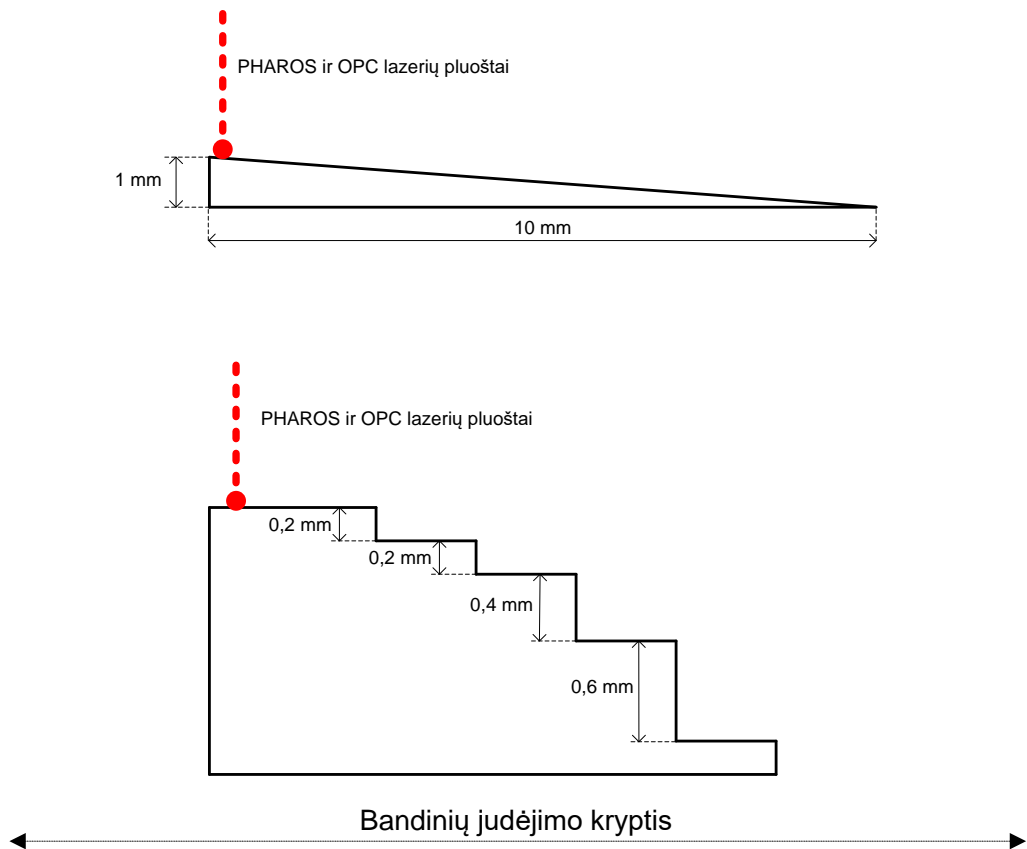
3.3. Sekimo sistemos galimybių tyrimas mikroapdirbimo operacijose

Paskutinis tyrimo etapas – sekimo sistemos išbandymas realiose mikroapdirbimo operacijose. Šiam tikslui pasiekti autofokusavimo sistema buvo naudojama kartu su PHAROS lazerio pluoštu. Ankstesnio tyrimo metu buvo pastebėta, kad sekimo sistema veikia tik tuomet, jei parinktas atstumas nuo objektyvo iki bandinio yra didesnis ar mažesnis nei objektyvo židinio nuotolis. OPC negali išmatuoti atstumo iki bandinio, kai šis yra tiksliai židinyje, nes tokiu atveju atsispindėjęs pluoštas už objektyvo sklįs kolimuotas, o ne kūgio formos. Tai reiškia, kad norint apdirbti bandinį PHAROS lazerio pluoštą fokusuojant tuo pačiu objektyvu reikia dirbtinai pastumti fokusavimosi taško padėtį. Šiam tikslui pasiekti buvo išderinamas PHAROS lazerio pluoštas naudojant teleskopą bei sklaidantį lęšį (22 pav.). Teleskopas pastatomas taip, kad pluoštas už jo sklįstų ne kolimuotas, o diverguojantis. Toks pluoštas fokusuojasi arčiau nei objektyvo židinio taškas. Sklaidantis lęšis buvo naudojamas todėl, kad vien pasirinkto teleskopo sklaidymo neužteko reikiamam fokusavimosi taško poslinkiui pasiekti.



22 pav. PHAROS lazerio pluošto išderinimo schema

Kolineariai suvedus OPC ir PHAROS lazerių pluoštus buvo vykdomi pjūviai ant 23 paveiksle pateiktų bandinių: metalinės plokštelės su pastoviu pokrypiu bei laiptuotos metalinės plokštelės.

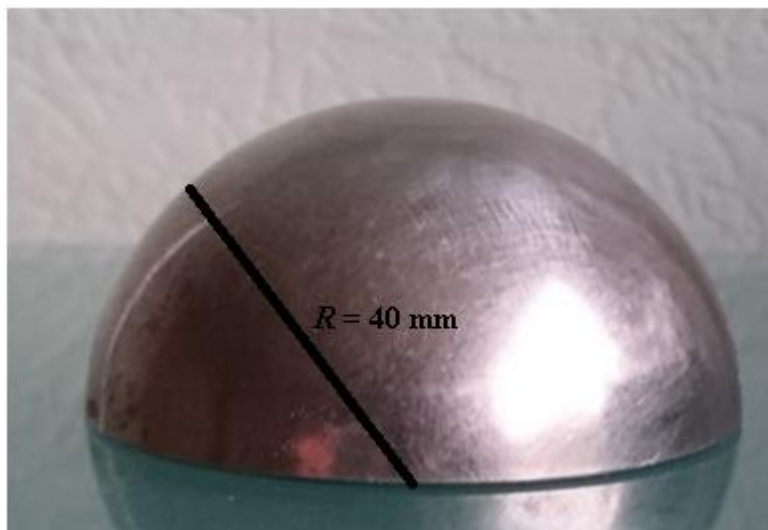


23 pav. Mikroapdirbimo metu naudotų bandinių profiliai

Pjūviai buvo atliekami naudojant autofokusavimo sistemą ir be jos siekiant akivaizdžiai pamatyti, kaip skiriasi pjūvis be sekimo sistemos ir su ja. Buvo pjaunama esant tokioms pačioms sąlygoms ir iš kairės pusės į dešinę bei atvirkščiai tam, kad būtų galima įvertinti, kaip veikia paviršiaus sekimo sistema esant tiek neigiamiems, tiek teigiamiems amplitudės pokyčiams. Pjūviai buvo atlikti bandiniui judant skirtingais greičiais tam, kad būtų galima rasti optimalų bei maksimalų

(kai sistema dar veikia) apdirbimo greičius. Atlikus pjūvius, gautųjų įpjovų gyliai bei pločiai buvo išmatuoti pasinaudojus optiniu profilometru (Sensofar PLU 2300). Gautieji rezultatai buvo palyginti su pjūviais ant lygaus bandinio nenaudojant paviršiaus sekimo sistemos.

Siekiant demonstratyviai parodyti, kad sekimo sistema integruota į lazerinį mikroapdirbimą veikia, buvo atliktas spiralės formos pjūvis ant 24 paveiksle pavaizduotos metalinės pusrutulio formos detalės, kurios kreivumo spindulys yra 40 mm.



24 pav. Metalinis pusrutulio formos bandinys

3. Tyrimo rezultatai

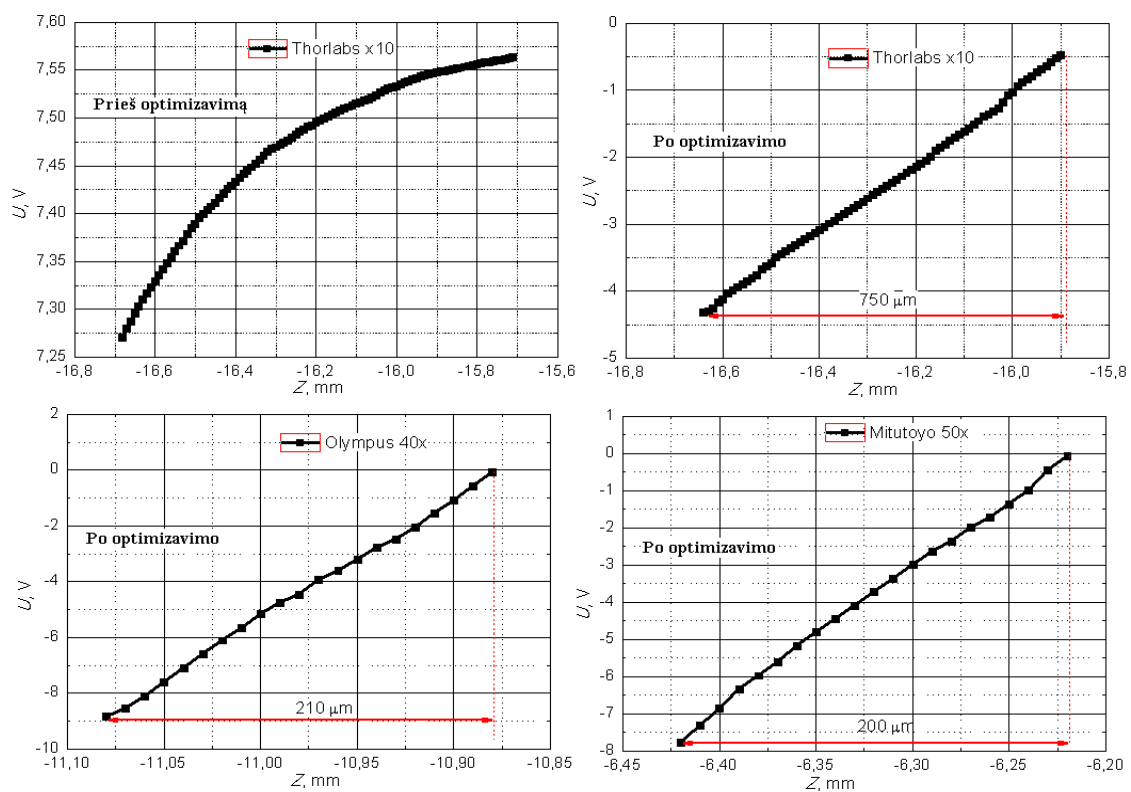
3.1. Optimizavimo proceso rezultatai

Pirmoje tyrimo dalyje pateikiami rezultatai, kurie buvo gauti po optimizavimo proceso. Pirmiausia buvo matuojama, kaip kinta įtampa objektyvui artėjant link bandinio paviršiaus.

25 paveiksle pateiktos įtampos priklausomybės nuo atstumo iki bandinio prieš optimizavimo procesą ir po jo naudojant skirtingus objektyvus. Viršuje kairėje pusėje esančiame grafike matoma, kad visame diapazone įtampos kitimas yra logaritminio pobūdžio. Dėl šio netolygaus įtampos kitimo testuojant atstumo sekimo sistemą buvo matomas skirtingas sistemos veikimas esant neigiamam ir teigiamam bandinio amplitudės pokyčiui. Esant neigiamam koordinatės kitimui įtampa kinta greičiau nei priešingu atveju, todėl atstumo sekimas vyksta netolygiai.

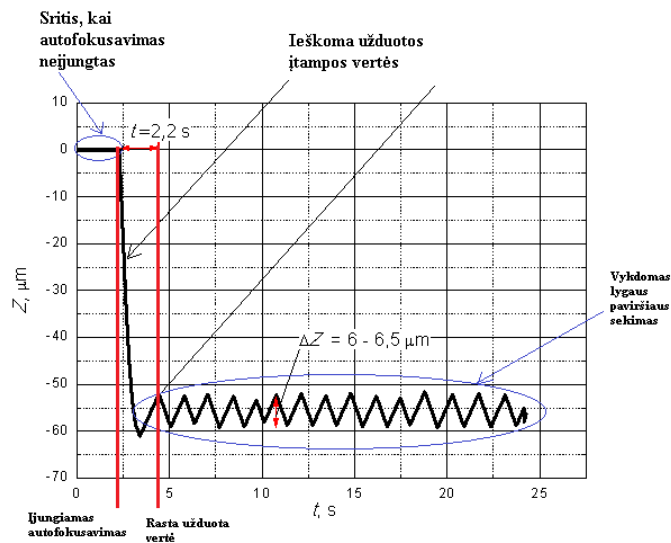
Viršuje dešinėje bei apačioje esančiuose paveiksluose pavaizduoti rezultatai po optimizavimo, kurio metu buvo rasti koeficientai, iš kurių padauginama kiekviena įtampos vertė. Šiuo atveju stebima tiesinė įtampos priklausomybė nuo atstumo iki bandinio ir tai lemia vienodą sistemos veikimą esant tiek neigiamam, tiek teigiamam bandinio reljefo amplitudės pokyčiui.

Iš grafikų taip pat matoma, kad intervalas, kurioje veikia sistema (įtampos atsakas į atstumo pokytį yra tiesinis), po optimizavimo su Thorlabs (NA = 0,25) objektyvu yra 750 μm , su Olympus (NA = 0,6) – 210 μm , o su Mitutoyo (NA = 0,42) – 200 μm . Toliau matavimai buvo atliekami naudojant plačiausią darbinį diapazoną turintį objektyvą (t.y. Thorlabs).



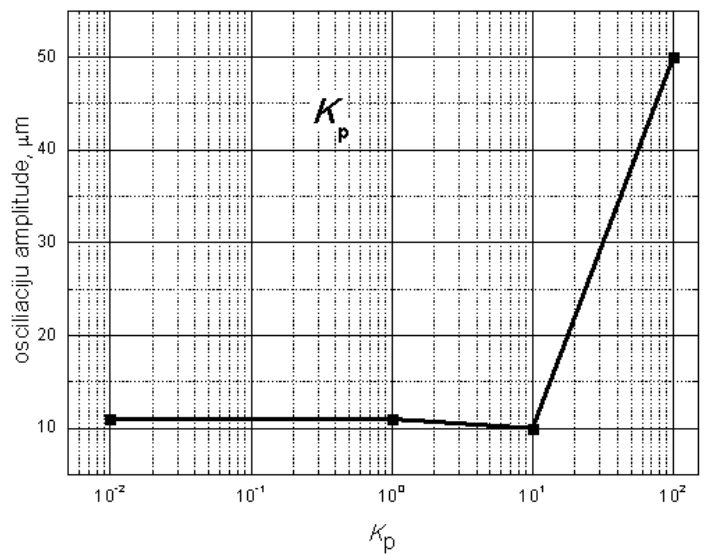
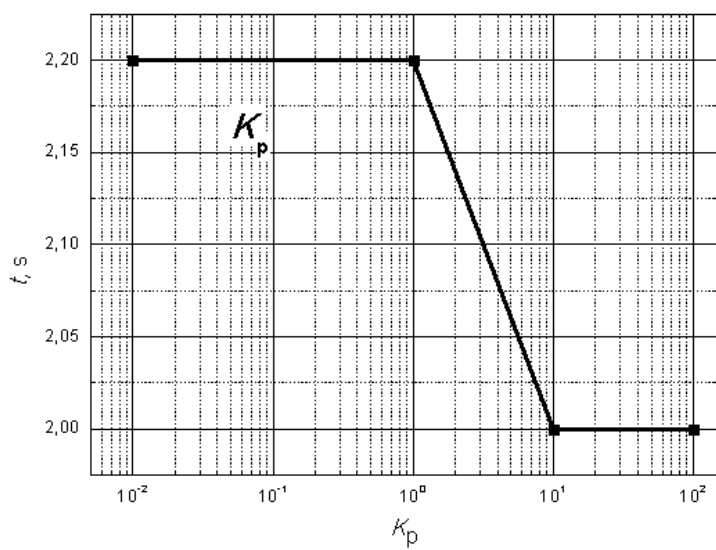
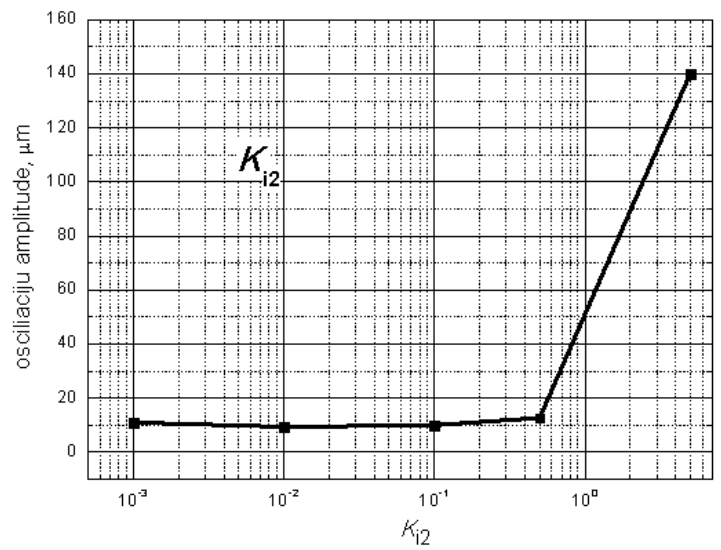
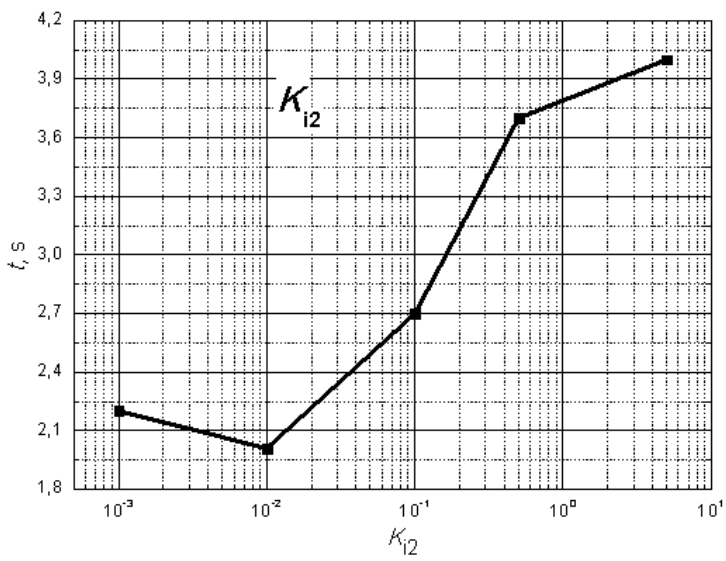
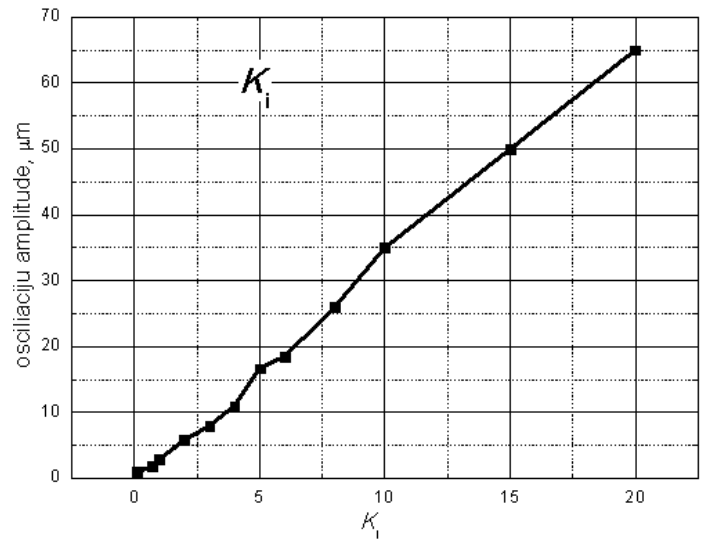
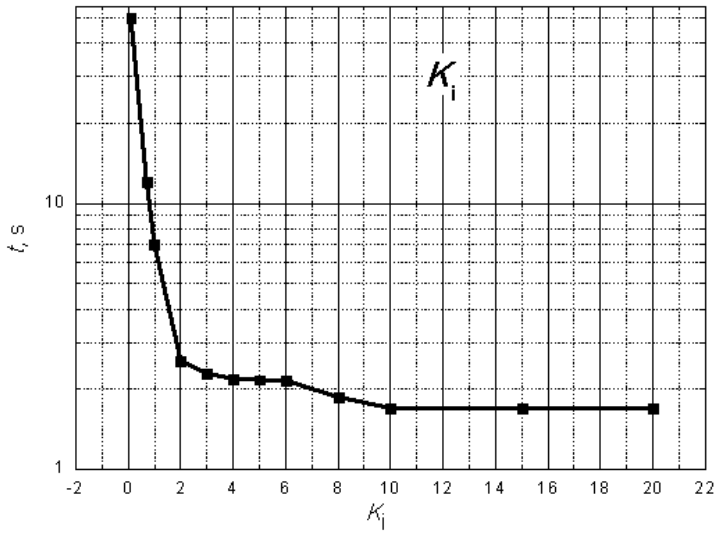
25 pav. Įtampos priklausomybė nuo atstumo iki bandinio prieš optimizavimą ir po optimizavimo naudojant skirtingus objektyvus

26 paveiksle yra pavaizduota viena iš kreivių, pagal kurią buvo optimizuojami K_i , K_{i2} bei K_p parametrai. Šioje kreivėje matomas koordinatės Z , kuri atitinka objektyvo padėtį, kitimas laike. Iš pradžių Z koordinatė nekinta, nes autofokusavimas neįjungtas, tuomet įjungiamas autofokusavimas ir vyksta greitas Z koordinatės mažėjimas, kol randama užduota įtampos vertė ir galiausiai stebimos osciliacijos ties palaikomu atstumu. Bendras kreivės kitimo pobūdis atitinka teoriją, aprašytą 1.5 skyriuje. Iš pateikto grafiko taip pat matoma, kad laikas, per kurį sistema randa užduotą įtampos vertę, yra lygus $\sim 2,2$ s (pradedant matavimą bandinys yra nutolęs nuo siekiamos vertės $\sim 55 \mu\text{m}$), o osciliacijų amplitudė ties palaikomu atstumu yra $6 - 6,5 \mu\text{m}$. Šiuos nuokrypius galima laikyti sukurtos sistemos paklaida.



26 pav. Koordinatės Z priklausomybė nuo laiko

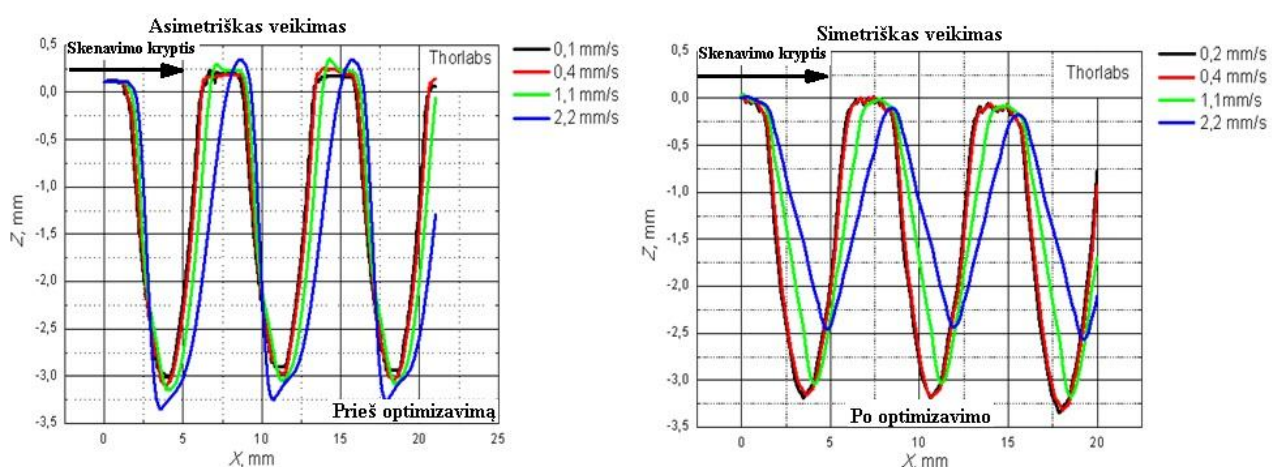
Keičiant optimizuojamų koeficientų K_i , K_{i2} bei K_p vertes, kiekvieną kartą buvo stebimas grafikas, pavaizduotas 26 paveiksle, bei matuojamas laikas, per kurį randama užduota įtampos vertė ir osciliacijos ties ta padėtimi. Šie rezultatai pavaizduoti toliau esančiame 27 paveiksle Pateiktuose grafikuose vaizduojama atskirai kiekvieno koeficiento įtaka. Kairėje matoma laiko, per kurį optinė atstumo sekimo sistema randa užduotą autofokusavimo įtampą, priklausomybė nuo koeficientų dydžio, o dešinėje pusėje kiekvieno koeficiento įnešamos osciliacijos amplitudės radus norimą įtampos vertę. Matoma, kad didžiausią įtaką sistemos greičiui daro koeficientas K_i . Taip pat pastebima tai, kad didinant kiekvieną koeficientą neišvengiamai auga ir osciliacijos. Remiantis šiais rezultatais buvo pasirinktos optimalios K_i , K_{i2} bei K_p vertės – atitinkamai 3, 0,01 bei 0, kurie buvo naudoti tolesniam tyrimui. K_p pasirinktas lygus nuliui, nes jis praktiškai nesumažina sistemos vėlavimo (radimo laiką sumažina tik $\sim 1,1$ karto), bet įneša papildomas apie $5 \mu\text{m}$ siekiančias Z amplitudės osciliacijas.



27 pav. Laiko, per kurį randama užduota įtampos vertė (kairėje), bei osciliacijų aplink koordinatę Z (dešinėje) priklausomybės nuo koeficientų K_i , K_{i2} bei K_p

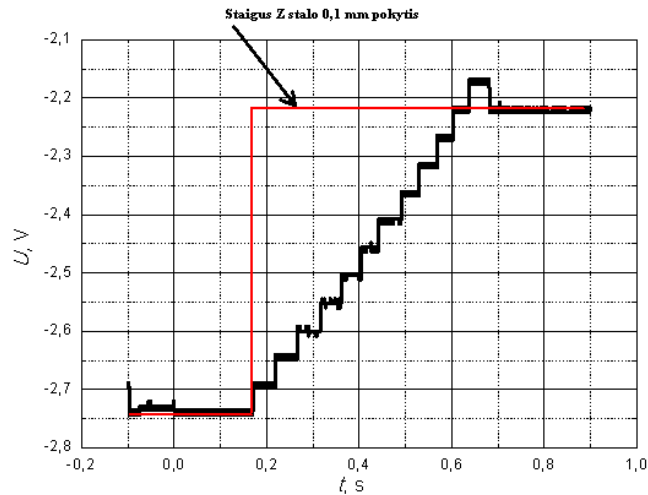
Siekiant įvertinti optimizavimo rezultatus buvo skenuojama detalė, pavaizduota 21 paveiksle. Gauti rezultatai kartu su gautais prieš optimizavimą pavaizduoti 28 paveiksle. Šiame paveiksle po optimizavimo matomas padidėjęs sistemos stabilumas bei atsikartojamumas. Kairėje (prieš optimizavimą) matomas asimetriškas veikimas, o dešinėje (po optimizavimo) – simetriškas. Tai reiškia, kad sistema veikia vienodai, nepaisant to ar bandinio koordinatė kinta teigiama ar neigiama kryptimi. Taip pat pastebėta, kad sistemai veikiant asimetriškai sekimo sistema išsina iš rikiuotės (išsijungia, kai amplitudė pakinta), kai skenavimo greičiai yra didesni nei 2,2 mm/s.

Iš dešinėje esančio grafiko pastebimas sistemos vėlavimas, kai greičiai yra didesni nei 0,4 mm/s, todėl efektyvus sistemos panaudojimas galimas bandiniui judant mažesniu nei 0,4 mm/s greičiu.



28 pav. Koordinatės Z priklausomybė nuo koordinatės X, esant skirtingiems skenavimo greičiams prieš optimizavimą (kairėje) bei po optimizavimo (dešinėje)

Pastebėjus, kad sistema vėluoja esant didesniems greičiams, nuspręsta išsiaiškinti priežastį kodėl taip yra. Tai buvo daroma matuojant užlaikymą, kurį sukuria skaitmeninio signalo keitimo į analoginę operacijos. Buvo užduodamas staigus Z stalo poslinkis, ir matuojama kaip greitai įtampa pasikeičia nuo -2,7 V vertės (atitinkančios pradinę vertikalaus stalo padėtį) iki -2,2 V vertės (atitinkančios pakitusią vertikalaus stalo padėtį). Tai buvo daroma pasinaudojus oscilografu. Ši įtampos priklausomybė nuo laiko pavaizduota 29 pav. Iš pateikto grafiko matoma, kad vėlavimas yra apie 0,6 s. Tačiau matuojama be autofokusavimo sistemos, todėl bendras užlaikymas yra didesnis, nes įtampos kitimas bei reikiamos vertės ieškojimas, veikiant autofokusavimo funkcijai, vyksta nuolat ir vėlavimas, pavaizduotas 29 paveiksle, kaupiasi.

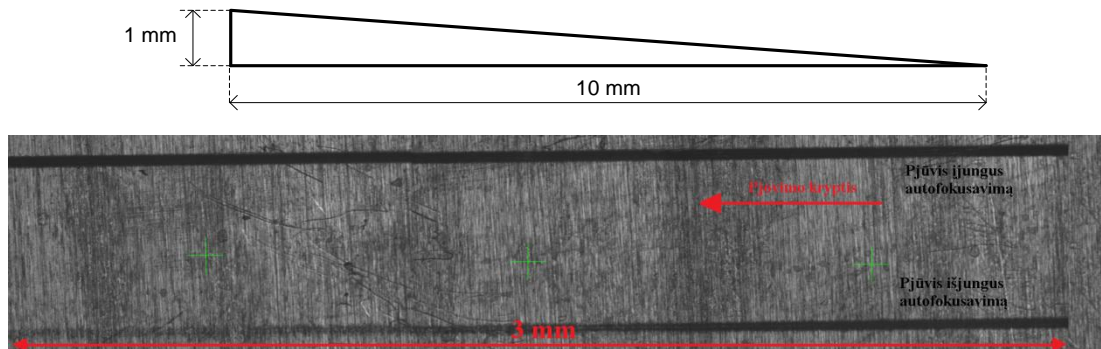


29 pav. Autofokusavimo sistemos signalo vėlavimas

4.2 Atstumo sekimo sistemos taikymo lazeriniame apdirbimi rezultatai

Sukurta optinė paviršiaus sekimo sistema buvo išbandyta lazerinio mikroapdirbimo operacijose. Pjūviai buvo vykdomi PHAROS lazeriu, kurio bangos ilgis yra 1030 nm, pasikartojimo dažnis – 100 kHz bei galia, naudota pjovimo metu – 90 mW. Gauti rezultatai pateikti šiame skyriuje.

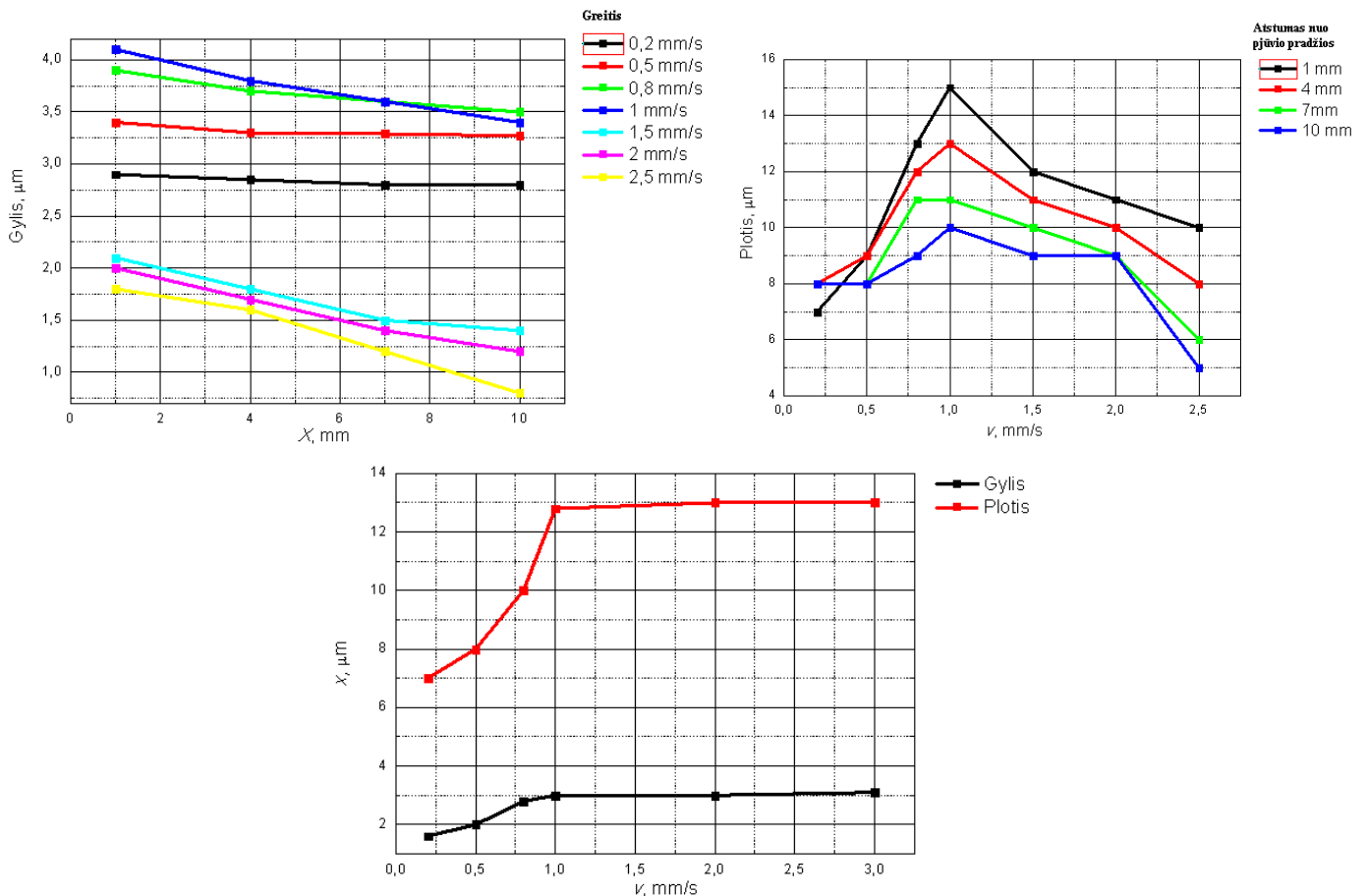
Pirmiausia sistema buvo išbandyta naudojant detalę, pateiktą 30 paveikslo viršuje. Naudotos detalės paviršiaus koordinatės pokytis yra lygus 1 mm. 30 paveikslo apačioje pavaizduota dalis pjūvių, gautų naudojant paviršiaus sekimo sistemą ir be jos (bandinio judėjimo greitis – 0,5 mm/s). Matoma, kad pjūvis nenaudojant autofokusavimo sistemos už 3 mm nuo pjūvio pradžios yra vos matomas, o pasinaudojus profilometru su x50 objektyvu jau negalima išmatuoti jokių pjūvio matmenų. Naudojant autofokusavimo sistemą aiškiai matomi pjūviai buvo atlikti visame intervale. Išmatuotas pjūvio gylis yra $3,3 \mu\text{m}$ ($\pm 0,1$ skirtingose vietose), o plotis – $8,5 \mu\text{m}$ ($\pm 0,5$). Matuoti pjūvio matmenis, kai nėra naudojama paviršiaus sekimo sistema, galima tik trumpame atstume, todėl toliau esantys rezultatai pateikti tik tie, kai pjovimo metu yra naudojama autofokusavimo sistema.



30 pav. Bandinys, ant kurio buvo vykdomi pjūviai (viršuje) bei 0,5 mm/s greičiu atliktų pjūvių nuotrauka

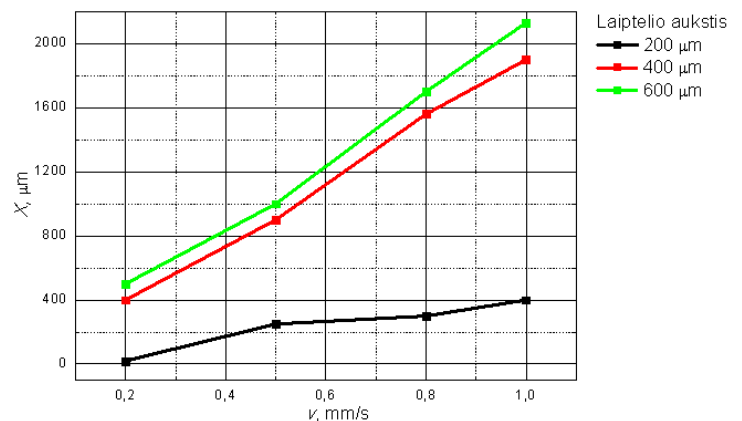
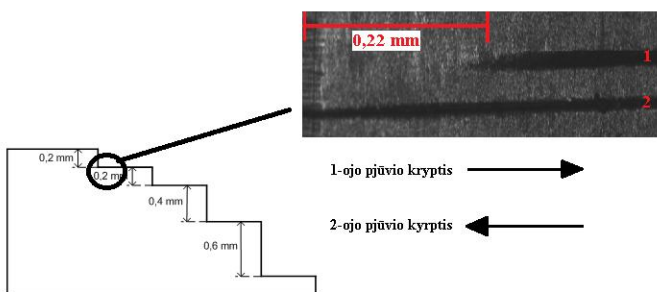
Pjūvių gylis ir plotis įvairiose pjūvio vietose esant skirtingiems bandinio judėjimo greičiams pateikti 31 paveiksle. Iš 31 paveiksle pateiktų rezultatų matoma, kad pjūvio plotis ir gylis praktiškai nekinta tuomet, kai bandinio judėjimo greitis yra ne didesnis nei 0,5 mm/s. Esant didesniems greičiams jau stebimas atstumo sistemos vėlavimo efektas ir pjūvio plotis bei gylis mažėja lyginant pradinę ir galinę pjūvio koordinates – bandiniui judant 2,5 mm/s greičiu gylis sumažėja 4 kartus, plotis - 2 kartus.

Didėjant bandinio judėjimo greičiui iki 1 mm/s pjūvio matmenys pjūvio pradžioje auga, o vėliau pradeda mažėti. Pradinis augimas gali būti paašškintas apačioje esančiu grafiku. Jame pavaizduotas pjūvio matmenų kitimas pjaunant lygaus profilio bandinį be autofokusavimo sistemos. Matoma, kad kitimas (iki 0,5 mm/s) yra panašaus pobūdžio kaip ir naudojant atstumo sekimo sistemą. Tai reiškia, kad tai yra paties lazerio pjovimo rezultatas, o ne sekimo sistemos sukelta pasekmė. Toks kitimo pobūdis gali būti dėl to, nebuvo naudojama įranga pjūvio atliekoms pašalinti, todėl dalis pluošto yra sklaidoma ir sumažėja intensyvumas.



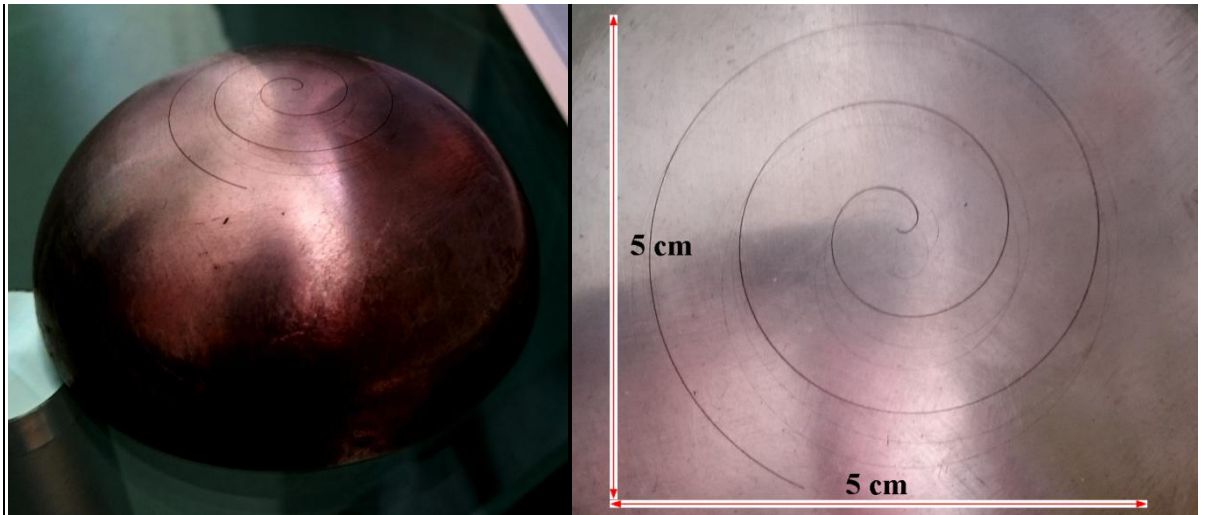
31 pav. Pjūvių gylio priklausomybė nuo skirtingų pjūvių vietų (viršuje kairėje), pločio priklausomybė nuo greičio (viršuje dešinėje) naudojant paviršiaus sekimo sistemą bei pjūvio gylio ir pločio priklausomybės nuo greičio nenaudojant sukurtos sistemos (apačioje)

Sistema taip pat buvo išbandyta, kai amplitudės pokytis yra ne tolygus, o staigus. Šio tyrimo metu buvo naudotas 32 paveikslo kairėje pavaizduotas bandinys, turintis tris skirtingo aukščio laiptelius: 0,2 mm, 0,4 mm ir 0,6 mm. Pjūviai buvo atliekami pirmyn ir atgal (tarp šių pjūvių paliekant 80 μm tarpą) 4-iais skirtingais greičiais: 0,2 mm/s, 0,5 mm/s, 0,8 mm/s ir 1 mm/s. Pasinaudojus prieš tai minėtu profilometru buvo išmatuota, kaip greitai sekimo sistema reaguoja į staigų amplitudės pokytį. Šiam tikslui pasiekti buvo matuojamas atstumas nuo laiptelio pradžios iki vietos, kurioje pjūvio parametrai tokie patys kaip ir prieš laiptelį (grafike pažymėta x). Rezultatai pateikiami 30 paveiksle. Kairėje esančiame paveiksle pateiktas iš kart po pirmojo laiptelio esantis pjūvis atliktas 0,5 mm/s greičiu. Matoma, kad dėl sekimo sistemos vėlavimo pjūvis po laiptelio vykdomas tik po 220 μm nuo laiptelio briaunos, tuo tarpu pjaunant kita kryptimi, stebimas tolygus pjūvis, nes nėra šuoliško amplitudės pokyčio. Dešinėje pateikti rezultatai matuojant pjūvį tik į vieną pusę. Matoma, kad didėjant greičiui bei laiptelio aukščiui kartu didėja ir atstumas, per kurį paviršiaus sekimo sistema randa užduotą įtampos vertę. Tai galima paaiškinti prieš tai aptartu sistemos užlaikymu. Iš 32 paveikslo matyti, kad sistema veikia tiksliai, kai staigus amplitudės pokytis neviršija 200 μm bei bandinio judėjimo greitis yra ne didesnis nei 0,2 mm/s.



32 pav. Atstumo, per kurį randama užduota įtampos vertė, priklausomybė nuo bandinio judėjimo greičio esant skirtingiems amplitudžių pokyčiams

Toliau esančiame 33 paveiksle matomas spiralės formos pjūvis ant pusrutulio formos bandinio. Pjūvis buvo atliekamas 0,5 mm/s greičiu, amplitudės pokytis tarp aukščiausio ir žemiausio pjūvio taško yra 3,5 mm. Naudojant PHAROS lazerį kartu su Thorlabs 10x objektyvu, Relėjaus ilgis yra $\sim 12 \mu\text{m}$, todėl akivaizdu, kad sukurta optinė paviršiaus sekimo sistema leidžia realizuoti sudėtingus pjūvius ant kreivų paviršių.



33 pav. Spirālės formos pjūvis ant pusrutulio formos bandinio

Iš gautųjų rezultatą galima teigti, kad sukurta paviršiaus sekimo sistema yra tinkama lazerinio mikroapdirbimo operacijoms, tačiau negali konkuruoti su komerciniais (Workshop of Photonics, MotionX, Prior kompanijų) autofokusavimo įrenginiais, nes veikimo sparta nusileidžia 10-15 kartų. Šį skirtumą lemia darbe aptartas signalo keitimo iš skaitmeninio į analoginį sukeliamas vėlavimas. Norint tai eliminuoti, reikia išvengti signalo keitimo skaitmeninių manipuliacijų. Sėkmingai įvykdžius šią užduotį, galima bent eile (10 kartų) padidinti veikimo greitį ir tokiu būdu sukurta sistema taptų konkurencinga komerciniams tokio tipo įrenginiams.

Rezultatų aptarimas ir išvados

Į lazerinę mikroapdirbimo sistemą buvo integruotas atstumo matavimo modulis Optimet, kuri pasitelkus buvo realizuota automatinė paviršiaus sekimo sistema.

- Darbo metu buvo atliktas autofokusavimo kalibravimas, kurio metu perkalibruotas atstumo matuoklio atsakas į kitos paskirties objektyvą. Tokiu būdu gautas tiesinis atsakas į atstumo pokytį, kuris yra būtina sąlyga norint išlaikyti stabilų autofokusavimo sistemos veikimą bei optimizuoti PID koeficientus taip, kad sistema veiktų visame objektyvo darbiniam lauke. Su tiesiniu atsaku bei 0,25 NA objektyvu pasiektas darbinio atstumo (židinio išderinimo) intervalas siekė 750 μm .
- Optimizuoti PID kontrolerio parametrai, kurie leido pasiekti mažas oscilacijas apie optimalią židinio vertę. Oscilacijos siekia $<6,5 \mu\text{m}$, o tai yra mažiau nei naudoto lęšio Relėjaus ilgis (12 μm).
- Autofokusavimo spartą labiausiai riboja Optimet skaitmeninio signalo keitimas į analoginį, kuris šiame darbe buvo atliekamas kompiuteriu ir papildomu kodas – analogas keitikliu. Dėl konvertavimo vėlavimo autofokusavimo sistemos veikimo greitis buvo mažesnis nei 0,4 mm/s.
- Paviršiaus sekimo sistema su integruotu konoskopiniu atstumo matuokliu negali konkuruoti su komerciniais tokio tipo įrenginiais, nes greitis yra eile (10 kartų) mažesnis, tačiau šį skirtumą galima panaikinti išvengiant skaitmeninių manipuliacijų.
- Mikroapdirbimo sistema sėkmingai veikia kartu su autofokusavimo sistema, kai apdirbimo greičiai yra mažesni nei 0,5 mm/s ir jei nėra šuoliškų paviršiaus pokyčių, didesnių nei 0,2 mm, naudojant 0,25 NA objektyvą. Eksperimentiškai pademonstruotas mikrograviravimas ant kreivo, atspindinčio paviršiaus.

Literatūros sąrašas

- [1] V. Sirutkaitis, *Lazerių taikymas* (Vilniaus universiteto leidykla, Vilnius, 1993)
- [2] A. Gillner, Laser Micro Processing, *J. Laser Tech.* **5**(1), 27-30 (2008)
- [3] O. Balachnaitė, A. Bargelis, A. Dementjev, R. Jonušas, G. Račiukaitis, V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija* (Vilniaus Universiteto leidykla, Vilnius, 2008)
- [4] M. C. Gower, Industrial applications of laser micromachining, *Opt. Express*, **7**(2), 56-57 (2000)
- [5] A. Zoubir, I. Shah, K. Richardson, M Richardson, „Practical uses of femtosecond laser micro-materials processing“, *Appl. Phys. A*, **77**(2), 311-315 (2003)
- [6] A. Laskin, Achromative refractive beam shaping optics for broad spectrum laser applications, *Proc. SPIE*, **7430**, 3-11 (2009)
- [7] D. C. O'shea, *Elements of Modern Optical Design* (John Wiley & Sons Publishing, Georgia, 1985)
- [8] A.E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Sausalito, 1991)
- [9] G. Berkovic, E. Shafir, Optical methods for distance and displacement measurements, *Adv. Opt. Photonics*, **4**(4), 441-471 (2012).
- [10] Internetinė prieiga http://www.efunda.com/DesignStandards/sensors/fotonic/fotonic_intro.cfm tikrinta 2015.06.24.
- [11] W. Shen, X. Wu, H. Meng, G. Zhang, X. Huang, Long distance fiber-optic displacement sensor based on fiber collimator, *Rev. Sci. Instrum.*, **81**(12), 104-123 (2010).
- [12] P.H. Keskar, Multiplication: From Thales to lie, *Res.*, **17**(5) 476-486 (2012)
- [13] H. J. Jordan, M. Wegner, H. Tiziaki, Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy, *Meas.Sci. Technol.*, **9**(7) 11-42 (1998)
- [14] Internetinė prieiga <http://www.optimet.com/blog/non-contact-distance-measurement-technologies/> tikrinta 2015.06.24.

[15] R. Fontana, M. C. Gambino, M. Greco, L. Marras, M. Materazzi, E. Pampaloni, L. Pezzati, A High-precision surface analysis of roughness of Michelangelo's David, Proc. SPIE, **5146** 236-243 (2003).

[16] G. Zorpette, Focusing in flash, Sci. Am., **283**(2), 82-83 (2000)

[17] Internetinė prieiga <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID> tikrinta 2016.04.24.

[18] K. J. Astrom, T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning* (Library of Cataloging Publishing, USA,1995)

[19] Internetinė prieiga <http://www.optimet.com/conopoint-3hd.php> tikrinta 2015.06.24.

[20] Internetinė prieiga http://www.lightcon.com/products/product.php?ID=28&sphrase_id=6900 tikrinta 2016.05.04.

Santrauka

Optinės paviršiaus sekimo sistemos lazeriniam mikroapdirbimui kūrimas bei galimybių įvertinimas

Lazerinis mikroapdirbimas – jau dabar plačiai paplitusi medžiagų apdirbimo rūšis, siekianti įsitvirtinti dar įvairesnėse srityse. Dėl šios priežasties vyksta nuolatinis šio apdirbimo tipo tobulinimas. Vienas iš trūkumų naudojant lazerinį mikroapdirbimą yra tai, kad nenaudojant papildomų sistemų, jis gali apdirbti tik lygų paviršiaus profilį turinčias medžiagas. Jei turimas paviršius yra kreivas, reikia programuoti apdirbimo įrenginį arba apdirbimas bus netolygus. Tačiau egzistuoja ir kiti būdai, kuriais remiantis galima apdirbti kreivus paviršius. Vienas iš jų – optinė paviršiaus sekimo sistema, kurią pasitelkus išlaikomas pastovus atstumas iki bandinio.

Šio darbo tikslas yra sukurti paviršiaus sekimo sistemą, kuri būtų tinkama lazeriniam mikroapdirbimui, integruojant komercinį konoskopinį atstumo matuoklį, bei išbandyti tokios sistemos galimybes taip pademonstruojant, kad naudojant šį metodą galima išvengti programavimo operacijų ir tokiu būdu supaprastinti sistemos pritaikymą įvairesniam panaudojimui.

Darbe pademonstruota, kad optinę paviršiaus sekimo sistemą galima panaudoti lazerinio mikroapdirbimo operacijose ir tokiu būdu apdirbti kreivus paviršius. Tyrimai parodė, kad sukurta sistema veikia tinkamai, kai didžiausias apdirbimo greitis yra 0,5 mm/s, o didžiausias staigus apdirbamos detalės paviršiaus profilio amplitudės pokytis – ne daugiau nei 0,2 mm. Nustatyta, kad sistema negali konkuruoti su komerciniais tokio tipo įrenginiais, nes veikimo greitis yra eile (10 kartų) mažesnis. Šį skirtumą lemia skaitmeninio signalo keitimas į analoginį, kurį eliminavus, galima tikėtis, kad sukurta sistema būtų konkurencinga komercinėms.

Summary

Optical surface tracking system for laser microprocessing development and properties assessment

Laser micromachining is getting more and more widespread in materials processing applications. For this reason, it is required for continuing improvements of this type of processing. One of the main drawbacks of laser microprocessing is that it can process only a smooth surface profile containing material when no additional system is used. To process a curved surface profile containing element the process requires a programming for each different shape of an element. However, there are other ways to implement that kind of operation. One of them is an optical surface tracking system that maintains a constant distance to the object.

The purpose of this investigation is to create the optical surface tracking system with integrated conoscopic distance sensor that would be suitable for laser microprocessing and to assess the properties of that system.

The possibility of an optical surface tracking system application for laser microprocessing was demonstrated. It has been measured that maximum speed of processing must be less than 0,5 mm/s. Furthermore, it was observed that the object should not have sharp edges higher than 0,2 mm to ensure that system works properly. This system cannot compete against commercial this type of device due to poor speed (10 times lower). This difference can be eliminated by changing the way of conversion digital signal to analog.