

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Cheminės fizikos institutas

Donatas Liupševičius

LAZERIO PLUOŠTO PLĖSTUVO PARAMETRŲ VALDYMAS
DIRBTINIŲ NEURONINIŲ TINKLŲ

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Teorinės fizikos ir astrofizikos studijų programa

Studentas

Donatas Liupševičius

Leista ginti

2020-06-01

Darbo vadovas

dr. Stepas Toliautas

Instituto direktorius

prof. Valdas Šablinskas

Vilnius 2020

Turinys

Įvadas	3
1 Optinės teorijos apžvalga	4
1.1 Gauso pluoštas	4
1.2 Trijų lęšių Galilėjaus tipo pluošto plėstuvai	5
1.3 ABCD matricių analizė	6
1.4 Kompleksinis Gauso pluošto parametras	7
2 Giliųjų dirbtinių neuroninių tinklų principas	9
3 Optinis modelis ir duomenų generavimas	11
3.1 Optinė sistema ir modeliuojamų šviesos šaltinių parametrai	11
3.2 Optinės sistemos modeliavimas	12
3.3 Analizinio lęšių pozicijų sprendinio problema	13
3.4 Duomenų generavimas	15
4 Neuroninio tinklo struktūros parinkimas ir mokymas	18
4.1 Struktūra	18
4.2 Mokymas	19
5 Eksperimentinis dirbtinio neuroninio tinklo patikrinimas	20
5.1 Validavimas realioje optinėje sistemoje	20
5.2 Tinkamumo patikrinimas mikrovaldiklyje	23
6 Rezultatai	26
6.1 Sumodeliuotų duomenų apžvalga	26
6.2 Dirbtinio neuroninio tinklo tikslumas	27
6.3 He-Ne lazerio matavimų rezultatai	29
6.4 Dirbtinio neuroninio tinklo veikimas mikrovaldiklyje	34
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	37
Literatūra	38

Įvadas

Lazerio pluošto plėstuvai yra esminiai elementai moderniose lazerinėse sistemose. Jų pagalba galima pakeisti lazerio spindulio erdvinius parametrus. Jie yra naudojami moksliniuose tyrimuose ir įvairiose pramonės šakose nuo gydymo iki medžiagų mikroapdirbimo, ir yra šių sistemų sudedamoji dalis. Dažniausiai yra naudojamas Galilėjaus tipo pluošto plėstuvas. Tokio tipo pluošto plėstuvo optinėje sistemoje lazerio spindulys nėra sufokusuojamas, todėl yra išvengiama efektų, susijusių su dideliu lazerio galios tankiu. Taip pat šis plėstuvas, lyginant su kitais, yra kompaktiškas.

Šiuolaikiniai industriniai įrenginiai, priklausomai nuo veikimo režimo, naudoja skirtingą lazerio pluoštą ir yra automatizuoti. Todėl patogiu turėti lazerio pluošto plėstuvą, kuris leidžia keisti lazerio pluošto didinimą ir skėstį, bei integruoti jį į automatizuotą lazerinę sistemą, arba tiesiog valdyti kompiuteriu. Dauguma pluošto plėstuvų yra mechaniniai. Jei pluošto plėstuvas būna motorizuotas, jo didinimas ir skėstis dažnai valdomi fiksuotu žingsniu, o uždavus norimą didinimo ar skėsties parametą, lęšių pozicijos nėra automatiškai apskaičiuojamos.

Automatizuojant lazerio pluošto plėstuvą susiduriama su problema, kaip tiksliai nustatyti, kokios turi būti jo lęšių pozicijos, norint gauti norimus lazerio parametrus. Yra įvairių metodų nustatyti parametrus tam tikrose lęšių pozicijose, pavyzdžiui, spindulių sekimas (angl. ray tracing), bet ne atvirksčiai. Taip pat motorizuoti lazerio pluošto plėstuvai dažniausiai valdomi mikrovaldikliais, kurių pajėgumai yra riboti. Todėl svarbu rasti būdą, kaip efektyviai gauti reikiamas lęšių pozicijas optinėje sistemoje. Galima būtų kurti papildomą sistemą su grįžtamuju ryšiu, bet lyginant su pluošto plėstuvu ji būtų didelė. Taip pat pluošto matavimai reikalautų daug laiko ir papildomų skaičiavimų. Kitas sprendimo būdas yra neuroninių tinklų taikymas. Jų pagalba galima rasti sąryšius tarp įvairių parametrų. Sąryšių paieškai reikia turėti duomenų apie gaunamus lazerio parametrus, kai pluošto plėstuvo lęšiai yra skirtingose pozicijose. Tiriamajame darbe [1], panaudojant Keras [2] programavimo sąsają, buvo nustatyta, kokios struktūros neuroninis tinklas yra tinkamiausias.

Šiame darbe naudojamas motorizuotas lazerio pluošto plėstuvas su magnetiniu absoliučios pozicijos jutikliu [3]. Nagrinėta, kaip rasti jo lęšių pozicijų priklausomybes nuo norimo didinimo ir skėsties parametro panaudojant neuroninį tinklą. Lęšių pozicionavimas atliekamas He-Ne 632,8 nm lazeriui, kadangi jis puikiai tinka tyrimams dėl savo savybių, pavyzdžiui, labai didelio panašumo į Gauso pluoštą.

Šio darbo pagrindinis **tikslas** yra parodyti, kad motorizuotas pluošto plėstuvas, su mikrovaldiklyje integruotu dirbtiniu neuroniniu tinklu, gali efektyviai ir tiksliai valdyti He-Ne lazerio pluošto skėsties ir dydžio parametrus. Tikslui pasiekti reikia atlikti tokius uždavinius:

- Sugeneruoti sintetinius duomenis, kurie nusako tiriamo He-Ne lazerio pluošto sklidimą per motorizuoto pluošto plėstuvo optinę sistemą.
- Sukurti ir optimizuoti dirbtinį neuroninį tinklą, kuris leistų tiksliai nustatyti lęšių pozicijas pagal sintetinius duomenis.
- Eksperimentiniu būdu įvertinti He-Ne lazerio parametrus, kai lazerio pluošto plėstuvo lęšiai yra dirbtinio neuroninio tinklo parinktose pozicijose, ir skaičiavimo efektyvumą mikrovaldiklyje.

1 Optinės teorijos apžvalga

1.1 Gauso pluoštas

Iš lazerio išeinantis Gauso pluoštas, vadinamas TEM_{00} skersinės modos pluoštu¹, yra gryniausias galimas lazerio pluoštas ir turi mažiausią skėstį iš visų modų, kuri ribojama dėl difrakcijos. Pluošto intensyvumas x ir y ašyse, statmenose z ašiai (sklidimo kryptčiai), charakterizuojamas taip [4]:

$$I(y) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2y^2}{w^2}\right), \quad (1)$$

čia I_0 yra maksimalus pluošto intensyvumas, y – atstumas nuo pluošto centro ir w – pluošto pusplotis (spindulys). Svarbu atkreipti dėmesį, kad pluošto spindulys w judant tolyn nuo lazerio plečiasi, todėl ši intensyvumo skaičiavimo formulė tinka tik sutartam atstumui nuo lazerio.

Gauso pluošto, sklindančio laisvoje erdvėje, spindulys w , įgyja mažiausią vertę w_0 vieninteliame erdvės taške, kuris vadinamas pluošto sąsmauka. Pluošto spindulys atstumu z nuo sąsmaukos yra nustatomas iš tokio sąryšio:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}, \quad (2)$$

čia

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (3)$$

vadinamas Relėjaus ilgiu, čia λ yra bangos ilgis. Atstumas $b = 2z_0$ vadinamas sąsmaukos ilgiu.

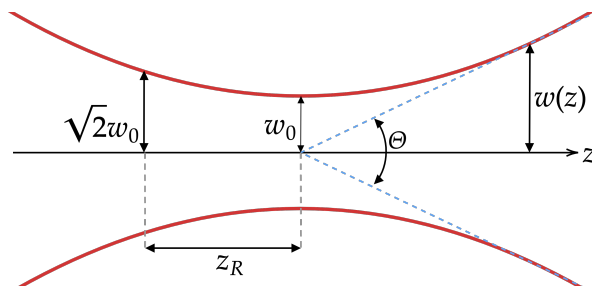
$w(z)$, kai $z \gg z_R$, pradeda kisti tiesiškai:

$$w(z) \rightarrow w_0 \frac{z}{z_0}. \quad (4)$$

Kampas, kurį sudaro $w(z)$ liestinė su pluošto ašimi z , yra vadinamas pluošto skėsties kampu ir išreiškiamas

$$\theta \simeq \frac{\lambda}{\pi w_0}. \quad (5)$$

Bendras skėsties kampas $\Theta = 2\theta$. Tokio pluošto geometrija atvaizduojama 1 pav. Sąryšiai galioja x ir y ašyse atskirai.



1 pav. Gauso pluošto geometrija: b – sąsmaukos ilgis, w_0 – sąsmaukos spindulys (pusplotis), $w(z)$ – pluošto spindulio priklausomybė nuo z , Θ – skėstis.

¹ TEM_{00} – „T” – Transverse, „EM” – Electromagnetic.

Svarbus dydis yra M^2 , kuris yra priimtas kaip standartas charakterizuojant lazerio pluošto kokybę. Šis dydis apjungia tris tarpusavyje susijusius lazerio pluošto parametrus – sąsmaukos plotį, skėstį ir Relėjaus ilgį. Naudojant M^2 lazerio pluoštas yra palyginamas su idealiu Gauso pluoštu. Idealaus Gauso pluošto M^2 vertė yra lygi 1. Visi kiti lazerio pluoštai turi $M^2 > 1$.

1.2 Trijų lęšių Galilėjaus tipo pluošto plėstuvai

Pluošto plėstuvai yra optiniai įrenginiai, kuriuose yra padidinamas praėjęs kolimuotos šviesos spindulys. Dažnai jie būna fiksuoto didinimo, sudaryti iš dviejų lęšių ir sureguliuoti taip, kad optinė sistema būtų afokali, t.y., kad optinės sistemos židinio nuotolis būtų begalybėje. Nėra sudėtinga gauti optinę sistemą, kuri leidžia turėti pluošto plėstuvą su kintamu didinimu ir skėsties parametru. Tokia optinė sistema pavaizduota 2 pav. Su tokia optine sistema stumdant lęšius galima sukonstruoti daug afokalių optinių sistemų, turinčių skirtingą didinimo efektą.

Optinės sistemos iš trijų ar daugiau lęšių pasižymi svarbia savybe – galima išskirti dviejų lęšių (ar daugiau) židinio nuotolį. Tai leidžia žiūrėti į optinę sistemą, tarsi sudarytą iš dviejų lęšių. Taip pat visą optinę sistemą galima sutraukti iki vieno efektinio židinio nuotolio, bet šiuo atveju, norint suprasti veikimą, paprasčiau įsivaizduoti 2 pav. $L1$ ir $L2$ lęšius kaip vieną. Dviejų lęšių efektinis židinio nuotolis išreiškiamas tokiu sąryšiu:

$$f_{12} = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - l}, \quad (6)$$

čia f_1 ir f_2 – dviejų gretimų (atstumu l) lęšių židinio nuotoliai. Pagal 2 pav. tai būtų atitinkamai $L1$ ir $L2$ lęšiai. Naudojant tokį parametą galima žiūrėti į pateiktą optinę sistemą kaip į įprastą Galilėjaus tipo pluošto plėstuvą.

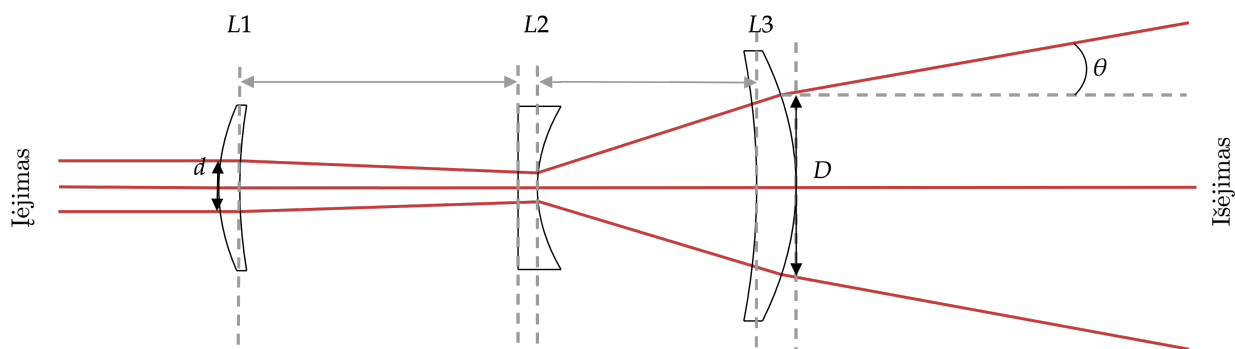
Pluošto didinimas m sistemoje išreiškiamas išeinančio ir įeinančio spindulio diametru santykiu D/d . Praėjusio optinę sistemą lazerio pluošto skėstis pagal 2 pav. yra θ . Tai kampas, kurį sudaro iš optinės sistemos išėjęs lazerio pluoštas su sistemos optine ašimi. Norint gauti trijų lęšių Galilėjaus tipo pluošto plėstuvo afokalią optinę sistemą, atstumas tarp lęšių turėtų būti

$$t = f_{12} + f_3, \quad (7)$$

čia f_3 yra $L3$ lęšio židinio nuotolis. Jeigu optinė sistema m kartų didina lazerio pluošto dydį ir yra afokali, tuomet skėstis sumažėja m . Ši savybė leidžia sufokusuoti lazerio pluoštą į mažesnę dėmę nei įprastai.

Šios optinės sistemos veikimą galima būtų apibendrinti taip:

- Keičiant atstumą tarp lęšių $L1$ ir $L2$ yra keičiamas jų efektyvus židinio nuotolis, todėl galima rasti $L1$ ir $L2$ lęšių pozicijas, kur $L1$, $L2$ ir $L3$ sudarytų afokalią optinę sistemą su tam tikru didinimu m .
- Išlaikant atstumą tarp lęšių $L1$ ir $L2$ ir stumiant juos nuo taško optinėje ašyje, kur sistema yra afokali, yra keičiama Gauso pluošto skėstis, išlaikant mažai pakitusį didinimą.



2 pav. Galilėjaus tipo pluošto plėstuvo optinė sistema. $L1$, $L3$ – glaudžiamieji lęšiai, $L2$ – sklaidomasis lęšis, d – įeinančio spindulio diametras, D – išeinančio spindulio diametras, θ – skėsties kampas.

1.3 ABCD matricų analizė

$ABCD$ matricų analizė, dar vadinama spindulio pernašos matricų analize, yra matematinis metodas, pasakantis, kaip transformuojasi spinduliai, sklindantys kokia nors optine sistema arba terpe. Tokia analizė tinka spinduliams, kurie gerai aprašomi paraksialiniame artinyje (tariant, kad spindulys yra lygiagretus optinei ašiai z).

$ABCD$ matrica aprašo šviesos lūžį per kreivą paviršių, perėjimą į skirtingą terpę, atspindį, arba tiesiog šviesos spindulio sklidimą erdve. Įeinantis į optinę sistemą ir iš jos išėjęs spindulys yra susiję tokiu sąryšiu (3 pav.):

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

čia x_1 žymi į optinę sistemą įeinančio šviesos spindulio atstumą statmenai optinei ašiai, θ_1 žymi, kokį kampą spindulys sudaro su optine ašimi. x_2 , θ_2 žymi išeinančio spindulio parametrus. Šios matricos elementų vertės nusako, kaip yra veikiamas spindulys. Taip pat $ABCD$ matrica pasižymi tokia savybe:

$$\det(ABCD) = AD - BC = \frac{n_1}{n_2}, \quad (9)$$

čia n_1 ir n_2 atitinkamai yra įeinančio ir išeinančio spindulio terpės lūžio rodiklis. Jeigu abi terpės vienodos, $\det(ABCD) = 1$.

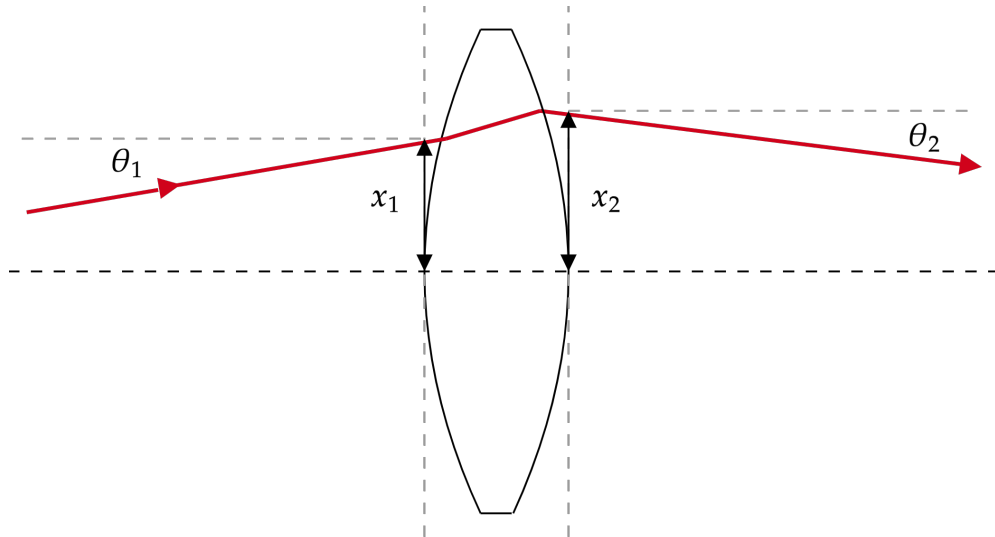
Verta paminėti tris $ABCD$ matricas, kurios yra naudojamos šiame darbe. Pirmoji – tai laisvojo sklidimo matrica:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

čia d yra atstumas, kuriuo sklinda spindulys. Kita matrica yra šviesos lūžio per kreivą paviršių matrica

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{Rn_2} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

čia n_1 ir n_2 atitinkamai žymi pradinės ir galutinės terpių lūžio rodiklius, o R žymi paviršiaus kreiv-



3 pav. Optinio elemento (čia lęšio) aprašymas $ABCD$ matricių analizės metodu duoda transformaciją tarp įeinančio ir išeinančio spindulio.

vumo spindulį, kuris, pagal Dekarto ženklų susitarimą optikoje, išgaubtam paviršiui yra $R > 0$.
Trečioji matrica

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix} \quad (12)$$

aprašo šviesos lūžio efektą per plokščią paviršių. Šiuo atveju tariama, kad kreivumo spindulys R yra be galo didelis, kas ir duoda matricos elementą $C = 0$.

Šios matricos pasižymi svarbia savybe – jas dauginant galima gauti visos optinės sistemos spindulio pernašos matricią, kurią galima naudoti kaip ir kurią nors vieną iš spindulio pernašos matricių.

1.4 Kompleksinis Gauso pluošto parametras

Dažniausiai sutinkamas lazerio pluoštas yra toks, kur intensyvumas plokštumose, statmenose sklidimo kryptčiai, yra Gauso pasiskirstymo. Panaudojant Maksvelo lygtis, galima gauti elektrinio lauko Gauso pluoštui homogeninėje terpėje sprendinį, kurio eksponentės rodiklyje yra kompleksinis Gauso pluošto parametras [5]. Jis nusako lazerio pluošto parametrus tam tikru atstumu z nuo lazerio pluošto sąsmaukos. Jis žymimas q raide ir aprašomas taip:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{z + iz_R} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)}, \quad (13)$$

čia $w(z)$ yra pluošto dydis atstumu z nuo sąsmaukos w_0 , z_R – Relėjaus ilgis, λ – bangos ilgis, $R(z)$ – Gauso pluošto bangos frontų kreivumo spindulys atstumu z .

Kompleksinis Gauso pluošto parametras yra naudojamas $ABCD$ matricių analizėje. Žinant pradinį q_0 parametą ir optinės sistemos $ABCD$ matricią, galima surasti, koks bus Gauso pluošto kompleksinis parametras q_1 praėjus optinę sistemą. Šis sąryšis, vadinamas $ABCD$ taisykle arba Kogel-

niko transformacija [6], aprašomas taip:

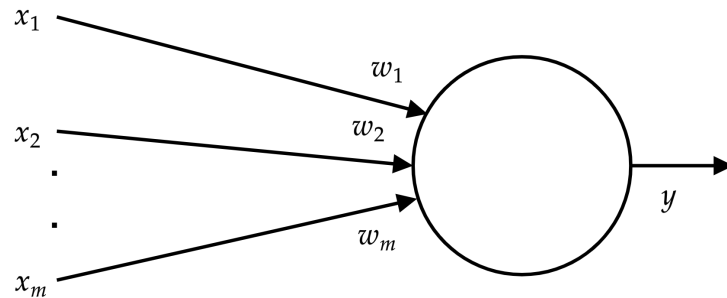
$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (14)$$

čia A , B , C ir D koeficientai yra optinės sistemos matricos elementų vertės.

Panaudojant naująjį q_2 , galima nesunkiai iš Gauso pluošto sąryšių išskaičiuoti, kokie bus Gauso pluošto parametrai praėjus optinę sistemą, aprašomą bet kokia $ABCD$ matrica.

2 Giliųjų dirbtinių neuroninių tinklų principas

Neuroninis tinklas yra supaprastintas nervų sistemos kompiuterinis modelis. Jis yra sudarytas iš dirbtinių neuronų ir jungčių tarp jų [7]. Panaudojant neuroninius tinklus, kompiuterį galima išmokyti atpažinti tam tikras struktūras. Vis dėlto dirbtinis neuroninis tinklas turi būti paruoštas žmonių pagalba.



4 pav. Dirbtinis neuronas. x_m – m-oji įvesties vertė, w_m – m-asis svoris, y – išvesties vertė.

Pagrindinis neuroninio tinklo elementas yra neuronas. Kaip pavaizduota 4 pav. neuronas gali turėti m įvesties verčių ir kiekvienai įvesties vertei po svorį w_m . Įvesties vertės ir jų svoriai neurono „viduje“ yra sudauginami ir sudedami:

$$net = x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_m w_m. \quad (15)$$

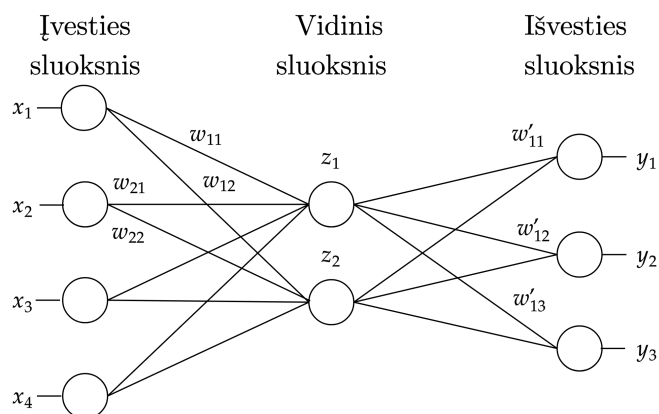
Neurono išvesties vertė y suskaičiuojama panaudojant aktyvacijos funkciją:

$$y = f(net). \quad (16)$$

Aktyvacijos funkcijos gali būti įvairios, pavyzdžiui, sigmoidinė funkcija, hiperbolinis tangentas arba mažiau žinomos funkcijos, šiandien dažnai naudojamos neuronų aktyvacijai, pavyzdžiui, *ELU* [8] tipo funkcijos.

Bet kokia tvarka sujungti neuronai yra vadinami neuroniniu tinklu. 5 pav. yra pavaizduotas sluoksninio tipo neuroninis tinklas. Jis sudarytas iš trijų rūšių sluoksnių – įvesties, vidinių ir išvesties. Kiekvienas sluoksnis turi fiksuotą skaičių neuronų, kurie jungiasi su gretimo (iš dešinės) sluoksnio visais neuronais. Kaip ir paprasto neurono atveju, visų neuronų jungtys turi svorines vertes. Priklausomai nuo svorinių ir įvesties verčių, kiekvienas vidinio ir išvesties sluoksnių neuronas turi tam tikrą tarpinę vertę, gaunamą pagal 16 sąryšį. Todėl yra svarbu rasti neuroniniam tinklui tinkamus svorius, t.y. tokius, kad priklausomai nuo įvesties parametrų būtų aktyvuojami išvesties neuronai su teisinga verte. Neuroninis tinklas, optimizuodamas svorinius koeficientus, mokosi struktūras.

Efektyvus stochastinio optimizavimo metodas yra *Adam* [9]. Jei tiriama funkcija yra $f(\theta)$ – stochastinė funkcija, kuri diferencijuojama parametrų θ atžvilgiu, tuomet šiuo metodu yra minimuojama tikėtiniausia vertė. Jis dažnai naudojamas neuroninių tinklų svorinių koeficientų opti-



5 pav. Dirbtinis neuroninis tinklas. $x_{1,2,3,4}$ – įvesties vertės, w_{mn}, w'_{mn} – svorinė vertė iš m -tojo neurono į gretimo sluoksnio n -tąjį neuroną, $z_{1,2}$ - vidinio sluoksnio neuronai, $y_{1,2,3}$ – išvesties vertės.

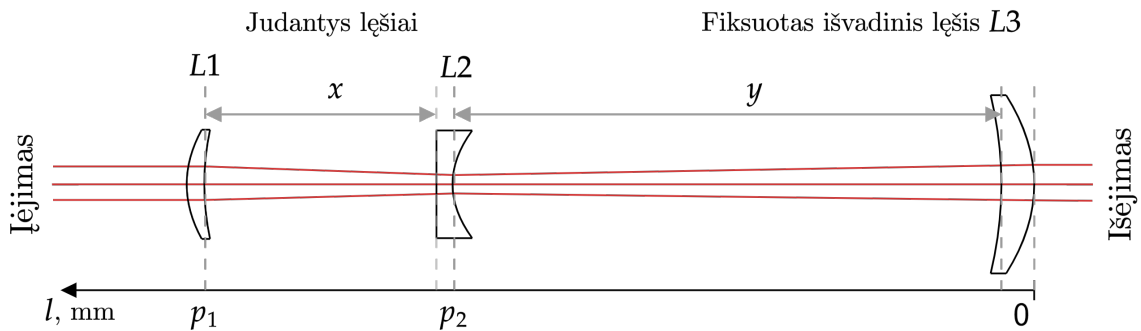
mizavimui. Šis metodas skirtingiems parametrms individualiai skaičiuoja adaptyvius mokymosi greičius, įvertindamas gradiento pirmąjį ir antrąjį momentus. Pirmasis momentas yra laiko momentu t funkcijos gradientas – $g_t = \nabla_{\theta} f_t(\theta)$. Antrasis momentas yra dviejų gradientų sandauga $g_t^2 = g_t \odot g_t$. Pavadinimas *Adam* kilęs iš junginio – adaptyvus momentų įvertinimas. Šis optimizavimo metodas sujungia du kitus populiarius metodus – *AdaGrad* [10] ir *RMSProp* [11]. Svarbūs sąryšiai tarp šių metodų ir *Adam* aptariami [9] straipsnyje.

Pačiam tinklo koeficientų optimizavimui reikia turėti duomenis, kur žinomas sąryšis tarp tinklo, įvesties ir išvesties verčių, kad optimizuojant svorius būtų galima patikrinti neuroninio tinklo patikimumą. Kadangi didelius kiekius tokių duomenų eksperimentais gauti sudėtinga, tenka naudoti matematinį optinės sistemos modelį, kuris aprašytas kitam skyriuje.

3 Optinis modelis ir duomenų generavimas

Panaudojant atviro kodo *SymPy* [12] programavimo sąsają, galima sumodeliuoti bet kokio realaus lazerio pluošto sklidimą per lazerio pluošto plėstuvo optinę sistemą paraksialiniame artinyje. Tam reikia $ABCD$ matricų pagalba sukurti tiriamą optinę sistemą ir aprašyti pradinį kompleksinį Gauso pluošto parametą, t.y. nurodyti tiriamą šviesos šaltinį. Pasirinkus modeliuojamos šviesos parametrus, lęšius ir jų pozicijas, galima išsaugoti praėjusio šviesos šaltinio skėsties, pluošto dydžio ir sąsmaukos pozicijos parametų vertes (toliau tiesiog duomenys). Tokiu būdu duomenys gaunami vienoje iš lęšių pozicijų kombinacijų. Galiausiai, šie duomenys turi būti paruošiami kaip neuroninio tinklo mokymo ir testavimo duomenys. Toliau yra išsamiau aptariami šie žingsniai.

3.1 Optinė sistema ir modeliuojamų šviesos šaltinių parametrai



6 pav. Motorizuoto lazerio pluošto plėstuvo optinė sistema ir atskaitos sistema l . $L1$ ir $L2$ yra judinami motorų pagalba atskaitos sistemoje l , kuri yra lygiagreti optinei ašiai z ir prasideda nuo lęšio $L3$ dešiniojo paviršiaus.

Šio darbo lazerio pluošto plėstuvo optinė sistema pateikta 6 pav. Tokia sistema yra vadinama „teigiama, neigiama, teigiama“ ir jos veikimas aprašytas 1.2 skyriuje. Šiuo atveju, nuo atstumų x , y , kurie pavaizduoti 6 pav., priklauso, koks bus lazerio pluošto didinimas ir skėstis lazerio pluoštui praėjus optinę sistemą. Aktualios yra lęšių kombinacijos, kurios yra galimos tyrimui naudojamame motorizuotame pluošto plėstuve.

Šiame darbe tiriama optinė sistema yra taikoma He-Ne lazeriui. Lazerio modeliavimui, panaudojant *SymPy* modulį, yra sukuriamas kompleksinis Gauso pluošto parametras q_0 . Tam reikia nurodyti, kokie yra lazerio parametrai ir koks bus pluoštas ant lęšio $L1$ kairiojo paviršiaus. Atlikus naudojamo He-Ne lazerio parametų matavimą, nustatyta, kad jo sąsmauka yra $w_0 = 405,5 \mu\text{m}$, kas atitinka He-Ne lazerį su skėstimi $\theta = 0,496 \text{ mrad}$. Sąsmaukos padėtis lazerio apertūros (angos pro kurią išeina lazerio pluoštas) atžvilgiu yra $-34,155 \text{ mm}$, neigiamas skaičius reiškia, kad sąsmauka yra prieš lazerio apertūrą. Šviesos bangos ilgis $\lambda = 632,8 \text{ nm}$. Atstumas nuo sąsmaukos iki lęšio $L1$ yra kintamas ir šio parametro aprašymas aptariamas 3.2 skyriuje.

3.2 Optinės sistemos modeliavimas

Optinės sistemos modeliavimui pasirinktas $ABCD$ matricų metodas. Norint sumodeliuoti 6 pav. atvaizduotą optinę sistemą, reikia trijų tipų $ABCD$ matricių: laisvojo sklidimo, lūžio per kreivą paviršių ir lūžio per plokščią paviršių ((10) – (12) lygtys).

Verta išskirti kelis elementus optinėje sistemoje – lęšius $L1$, $L2$ ir $L3$, atstumus tarp lęšių x ir y . Juos galime aprašyti atskirai. Toliau parodoma, kaip šie elementai aprašomi $ABCD$ matricėmis. Elementai pateikiami eilės tvarka iš kairės į dešinę pagal 6 pav. Verta paminėti, kad visi šios optinės sistemos lęšiai turi vienodą lūžio rodiklį.

Pirmasis lęšis, $L1$, aprašomas taip:

$$\mathbf{L}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2-n_1}{R_2 n_1} & \frac{n_2}{n_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1-n_2}{R_1 n_2} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

čia pirmoji matrica aprašo Gauso pluošto perėjimą per kreivą paviršių, kurio kreivumo spindulys pažymėtas R_2 , ir lūžimą iš lęšio terpės į orą. Antroji matrica aprašo sklidimą lęšio viduje, s_1 žymi sklidimo ilgį arba tiesiog $L1$ lęšio storį. n_1 - oro lūžio rodiklis, n_2 - lęšio lūžio rodiklis. Trečioji matrica aprašo Gauso pluošto perėjimą per kreivą paviršių su kreivumo spinduliu R_1 ir lūžio efektą iš oro į lęšio terpę. Toliau yra laisvas sklidimas oru:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

x žymi atstumą tarp lęšių $L1$ ir $L2$. Trečiasis elementas yra lęšis $L2$.

$$\mathbf{L}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2-n_1}{R_4 n_1} & \frac{n_2}{n_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

paskutinioji matrica yra lūžio per plokščią paviršių, būtent toks ir yra pirmasis lęšio $L2$ paviršius. R_4 žymi lęšio antrojo paviršiaus kreivumo spindulį, o s_2 – lęšio storį. Toliau vėl yra sklidimas oru.

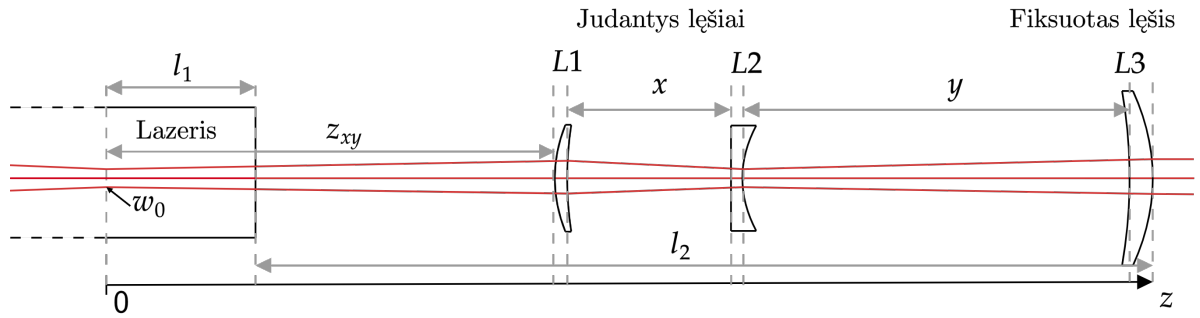
$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} 1 & y \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (20)$$

čia y yra atstumas tarp lęšių $L2$ ir $L3$. Paskutinis elementas yra $L3$ lęšis, analogiškas $L1$:

$$\mathbf{L}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2-n_1}{R_6 n_1} & \frac{n_2}{n_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1-n_2}{R_5 n_2} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

čia R_5 ir R_6 žymi $L3$ lęšio pirmo ir antro paviršių kreivumo spindulius, s_3 - lęšio $L3$ storį. Galiausiai, optinės sistemos $ABCD$ matrica yra visų šių elementų sandauga:

$$\mathbf{O} = \mathbf{L}_3 \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{L}_2 \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{L}_1. \quad (22)$$



7 pav. Lazero sąsmaukos atstumo iki pirmo lęšio priklausomybė nuo lęšių L_1 , L_2 pozicijų. l_1 žymi atstumą nuo sąsmaukos iki lazerio apertūros, o l_2 nuo lazerio apertūros iki optinės sistemos fiksuoto lęšio L_3 dešiniojo paviršiaus. w_0 – sąsmaukos pozicija. z_{xy} – atstumas nuo lazerio sąsmaukos iki lęšio L_1 kairiojo paviršiaus. Schemoje naudojama optinė sistema tokia pati, kaip 6 pav.

Lazero pluošto, praėjusio optinę sistemą \mathbf{O} , parametrus galima gauti panaudojant Kogelniko transformaciją (14 lygtis). Aprašant pradinį kompleksinį Gauso pluošto parametą reikia nurodyti, koks yra atstumas nuo pluošto sąsmaukos iki L_1 lęšio kairiojo paviršiaus centro. Reikia atkreipti dėmesį, kad šio lęšio pozicija yra kintama. Pagal 7 pav. pateiktą schemą, lęšio L_3 ir lazerio pozicijos sistemoje yra fiksuotos, todėl ir atstumas tarp jų nuo sąsmaukos yra fiksuotas. Atstumas l_1 nuo sąsmaukos iki lazerio apertūros, gali būti rastas matuojant lazerio parametrus, o atstumas l_2 nuo lazerio iki L_3 dešiniojo paviršiaus yra lengvai išmatuojamas. Pasinaudojant tuo, galima apskaičiuoti sąsmaukos atstumą z_{xy} iki lęšio L_1 visoms atstumų tarp lęšių x ir y kombinacijoms pagal tokią formulę:

$$z_{xy} = l_1 + l_2 - s_1 - x - s_2 - y - s_3, \quad (23)$$

čia s_1 , s_2 , s_3 yra atitinkamai lęšių $L_1 - L_3$ storiai. Suradus pradinį kompleksinį Gauso pluošto parametą q_{0xy} tiriamose lęšių pozicijose, praėjusio spindulio parametras q_{xy} gaunamas taip:

$$q_{xy} = \frac{A_o q_{0xy} + B_o}{C_o q_{0xy} + D_o}. \quad (24)$$

Indeksai o žymi, kad tai optinės sistemos \mathbf{O} $ABCD$ matricos elementai. Gautas naujasis q_{xy} (indeksai žymi atstumus x ir y) nusako, koks yra Gauso pluoštas ant lęšio L_3 dešiniojo paviršiaus, arba, kaip pavaizduota 6 pav., l ašies pradžioje. Ši vieta tinka, nes optinėje sistemoje ji yra stacionari. Tai yra svarbu, kad galėtume suderinti lęšių pozicijas su motorizuoto pluošto plėstuvo magnetiniu pozicijų jutikliu, kuris nuskaito L_1 ir L_2 lęšių pozicijas l ašyje. Jeigu norėtume pasižiūrėti, koks bus Gauso pluoštas ne už optinės sistemos, o toliau, tai prie optinės sistemos reikėtų papildomai pridėti sklidinimą oru arba suskaičiuoti panaudojant 2 sąryšį.

3.3 Analizinio lęšių pozicijų sprendinio problema

Žinome, kad tiriamos optinės sistemos $ABCD$ matrica gaunama pagal 22 sąryšį. Jeigu atliekant ją sudarančių $ABCD$ matricų daugybą prie kiekvieno matricinio elemento, kaip nežinomą dydį,

paliktume tik atstumus tarp lęšių x ir y , gautume tokius optinės sistemos \mathbf{O} matricinius elementus:

$$A = C_1xy + C_2x + C_3y + C_4, \quad (25)$$

$$B = C_5xy + C_6x + C_7y + C_8, \quad (26)$$

$$C = C_9xy + C_{10}x + C_{11}y + C_{12}, \quad (27)$$

$$D = C_{13}xy + C_{14}x + C_{15}y + C_{16}. \quad (28)$$

Čia koeficientai C_1 – C_{16} yra žinomi ir priklauso nuo $C(n_1, n_2, s_1, s_2, s_3, R_1, R_2, R_4, R_5, R_6)$ parametrų. Visi šie parametrai aptarti 3.2 sk. ir yra žinomi. Tokie sąryšiai buvo gauti panaudojant *SymPy* programavimo sąsają, atliekant $ABCD$ matricių daugybą įstačius, visas žinomas vertes ir suprastinus gautas išraiškas. Kadangi šioje optinėje sistemoje įeinančio ir išeinančio spindulio terpės vienodos, t.y. $\det(ABCD) = 1$, pareikalaujant šios sąlygos ir pasinaudojant Kogelniko transformacija (14), galima sudaryti lygčių sistemą

$$\begin{cases} \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} = q_2 \\ AD - BC = 1 \end{cases}. \quad (29)$$

Čia q_1 ir q_2 atitinkamai yra įeinančio ir išeinančio spindulio kompleksiniai Gauso pluošto parametrai. Jų vertės yra žinomos, nes jos priklauso nuo tiriamo lazerio ir nuo norimų gauti parametrų. Tereikia apsisrašyti kompleksinius Gauso pluošto parametrus. Pavyzdžiui, jeigu naudojama tokia q forma:

$$q = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)}, \quad (30)$$

w yra lazerio spindulio pusplotis, kuris atitinkamai būtų įeinančio spindulio ir norimo gauti už optinės sistemos. Jų santykis šiame darbe yra valdomas didinimo parametras. Kreivumo spindulys priklauso nuo Relėjaus ilgio ir atstumo nuo sąsmaukos z :

$$\frac{1}{R(z)} = \frac{z}{z^2 + z_R^2}. \quad (31)$$

Relėjaus ilgį galima rasti pasirinkus norimą skėstį θ ir z_R , kuris taip pat šiame darbe yra valdomas parametras:

$$z_R = \frac{\lambda}{\pi\theta^2}. \quad (32)$$

Atstumas z nustatomas pagal trigonometrinių sąryšį

$$z = \frac{w(z)}{\tan \theta}, \quad (33)$$

tai yra vieta, kur pluošto liestinė kerta optinę ašį, kaip 1 pav. atvaizduotos mėlynos punktyrinės linijos.

Jeigu 25–28 sąryšius įstatome į 29 lygčių sistemą, gauname tokią išraišką:

$$\begin{cases} \frac{(C_1xy + C_2x + C_3y + C_4)q_1 + (C_5xy + C_6x + C_7y + C_8)}{(C_9xy + C_{10}x + C_{11}y + C_{12})q_1 + (C_{13}xy + C_{14}x + C_{15}y + C_{16})} = q_2 \\ (C_1xy + C_2x + C_3y + C_4)(C_{13}xy + C_{14}x + C_{15}y + C_{16}) - \\ -(C_5xy + C_6x + C_7y + C_8)(C_9xy + C_{10}x + C_{11}y + C_{12}) = 1 \end{cases}, \quad (34)$$

ši lygčių sistema turi du nežinomuosius ir dvi lygtis bei gali būti susieta su valdomais parametrais. Tai reiškia, kad galima gauti tikslus atstumus tarp lęšių pasirinktiems skėsties θ ir didinimo m parametrams, apsirašius q_2 parametą ir išsprendus šią lygčių sistemą. Tačiau tokią lygčių sistemą išspręsti yra labai sudėtinga. Pirmiausia, ji yra labai netiesinė, vadinasi gali turėti kelis sprendinius. Antra, ji dėl q parametro yra kompleksinė, o sprendinys turi išeiti realus, nes x ir y yra realūs skaičiai.

Tokią lygčių sistemą būtų galima spręsti skaitiniais metodais. Jei naudojamas metodas būtų su fiksuotu iteracijų skaičiumi, jis negarantuotų, kad visais atvejais bus rastas tikslus sprendinys, arba sprendinys išvis gali būti nerastas. Jei iteracijų skaičius būtų neribojamas, tai gali sukelti trikdžius mikrovaldiklyje dėl ilgo skaičiavimo laiko. Taip pat, jei egzistuoja keli sprendiniai, skaitiniu būdu sprendžiant lygčių sistemą galimai bus gautas sprendinys, kur atstumai tarp lęšių optinėje sistemoje praktiškai nepasiekiami.

3.4 Duomenų generavimas

Naudojamas motorizuotas lazerio pluošto plėstuvus yra skirtas iki $3\times$ lazerio pluošto didinimo. Todėl pasirinkti atstumai x ir y tarp lęšių iš intervalų $X = 5 - 30$ mm ir $Y = 50 - 75$ mm. Pasirinkta, kad bus generuojami 2 rinkiniai duomenų – po 100 ir po 300 vienodai nutolusių verčių X ir Y intervaluose (išviso $100 \times 100 = 10^4$ kombinacijų ir $300 \times 300 = 9 \cdot 10^4$ kombinacijų). Didesnis duomenų rinkinys leidžia turėti mažesnio duomenų rinkinio tarpines vertes, kurios yra naudingos tikrinant neuroninį tinklą.

Konkreči sumodeliuota optinė sistema tenkina tik vieną x ir y kombinaciją. Kitų kombinacijų paieškos principas paprastas – kiek yra kombinacijų, tiek reikia sumodeliuoti optinių sistemų, kurioms skiriasi vertės x ir y . Iš gautų q_{xy} parametrų išskaičiuojami trijų tipų duomenys ir sudaromos 3 matricos, aprašančios skirtingas priklausomybes:

1. Pluošto sąsmaukos pozicijos priklausomybės nuo x , y lęšių padėčių matrica w_{xy} . Jos pagalba galima nustatyti, ar lazerio pluoštas, praėjęs optinę sistemą, yra konverguojantis, ar diverguojantis.
2. Pluošto diametro priklausomybės nuo x , y lęšių padėčių matrica d_{xy} . Jos pagalba randamas lazerio pluošto didinimas.
3. Pluošto skėsties priklausomybės nuo x , y lęšių padėčių matrica φ_{xy} . Matricoje neatsižvelgiama, ar praėjęs optinę sistemą pluoštas yra diverguojantis, ar konverguojantis.

Matricos φ_{xy} elementų vertės gaunamos radianais, o matricių w_{xy} ir d_{xy} – milimetrais.

Kiekvienos matricos w_{xy} , d_{xy} ir φ_{xy} stulpeliai žymi x atstumą tarp lęšių, o eilutės – y atstumą tarp lęšių. Taip gaunami duomenys, kur esant atstumams tarp lęšių intervaluose $x \in X$ ir $y \in Y$ yra sumodeliuota sąsmaukos pozicija, pluošto diametras ir skėstis. Tai pavaizduota 8 pav.

	5	5,083612	5,167224	5,250836	5,334448	5,41806	5,501672	5,585284	5,668896	5,752508
75	3.1355548	3.1288233	3.1220917	3.1153603	3.1086289	3.1018976	3.0951663	3.0884351	3.0817040	3.0749729
74,91639	3.1331064	3.1263806	3.1196550	3.1129294	3.1062038	3.0994783	3.0927529	3.0860275	3.0793022	3.0725770
74,83278	3.1306579	3.1239380	3.1172182	3.1104984	3.1037787	3.0970591	3.0903395	3.0836199	3.0769005	3.0701811
74,74916	3.1282095	3.1214954	3.1147814	3.1080675	3.1013536	3.0946398	3.0879260	3.0812123	3.0744987	3.0677851
74,66555	3.1257610	3.1190528	3.1123446	3.1056365	3.0989285	3.0922205	3.0855126	3.0788047	3.0720969	3.0653892
74,58194	3.1233126	3.1166102	3.1099079	3.1032056	3.0965034	3.0898013	3.0830992	3.0763971	3.0696952	3.0629933
74,49833	3.1208641	3.1141676	3.1074711	3.1007747	3.0940783	3.0873820	3.0806857	3.0739896	3.0672934	3.0605974
74,41472	3.1184157	3.1117250	3.1050343	3.0983437	3.0916532	3.0849627	3.0782723	3.0715820	3.0648917	3.0582014

8 pav. Duomenų matricos pavyzdys. Geltonai pažymėti stulpeliai atitinka x atstumą tarp lęšių $L1$ ir $L2$ (pagal 6 pav.), o geltonos eilutės – y atstumą tarp lęšių $L2$ ir $L3$. Balti elementai šiame pavyzdyje žymi didinimus, m_{xy} .

Sugeneruoti *SymPy* duomenys yra panaudojami dar dviejų matricių apskaičiavimui. Pirmoji matrica yra pluošto didinimo priklausomybės nuo x , y pozicijų, o kita – skėsties priklausomybės (įskaitant konvergavimą ir divergavimą). Jose stulpeliai ir eilutės atitinka tas pačias reikšmes – atstumus tarp lęšių.

Lazerio pluošto didinimas, kai atstumai tarp lęšių yra x ir y , yra apskaičiuojamas taip:

$$m_{xy} = \frac{d_{xy}}{d}, \quad (35)$$

čia d_{xy} yra lazerio pluošto diametras esant x , y atstumams tarp lęšių, o d – tiriamo lazerio pluošto diametras. Skėščių matrica, įskaitant, ar lazerio pluoštas konverguoja ar diverguoja, yra gaunama panaudojant sąsmaukų atstumų ir skėščių matricas. Atstumai nuo sąsmaukos iki paskutinio optinės sistemos paviršiaus turi teigiamas ir neigiamas vertes. Iš to galima atskirti, ar sistemą praėjęs lazerio pluoštas konverguoja, ar diverguoja. Jei atstumas yra teigiamas, vadinasi, sąsmauka yra prieš paskutinį paviršių, o tai reiškia, kad išėjęs pluoštas yra diverguojantis; atvirkščiai yra su konverguojančiu pluoštu. Kiekvienam skėščių ir atstumų iki sąsmaukos matricių elementui galima pritaikyti tokią formulę:

$$\theta_{xy} = \begin{cases} \varphi_{xy}, & w_{xy} > 0, \\ -\varphi_{xy}, & w_{xy} < 0, \end{cases} \quad (36)$$

čia φ_{xy} žymi skėščių matricos xy -ąją vertę, o w_{xy} – sąsmaukos padėčių matricos xy -ąją vertę. Dauginami skėsties vertę iš -1 pažymime, kad lazerio pluoštas yra konverguojantis.

Paskutinis likęs dalykas yra konvertuoti atstumus tarp lęšių į lęšių pozicijas l ašyje, kaip pavaizduota 6 pav. Turimi atstumai tarp lęšių yra atstumai tarp gretimų lęšių paviršių, todėl konvertuojant šiuos atstumus reikia atsižvelgti į lęšių storį centruose. Tuomet $L2$ lęšio atstumas l ašyje pagal paveikslėlių bus:

$$p_2 = y + s_3, \quad (37)$$

arba tiesiog atstumas tarp $L2$ ir $L3$ lęšių gretimų paviršių ir $L3$ lęšio storis s_3 . Pagal tą pačią logiką yra randama ir $L1$ lęšio pozicija.

$$\begin{aligned} p_1 &= x + p_2 + s_2 \\ &= x + y + s_2 + s_3. \end{aligned} \tag{38}$$

Turint (35)–(38) lygtis, galima pasakyti, kokiose l ašies pozicijose turi būti $L1$ ir $L2$ lęšiai, kad gautume lazerio pluoštą optinės sistemos išėjime su tam tikru didinimu m ir skėstimi θ . Motorizuoto lazerio pluošto plėstuvo mechaninės $L1$ ir $L2$ lęšių pozicijos yra fiksuojamos kalibruojant magnetinius absoliučios pozicijos jutiklius taip, kad nuskaitytos lęšių pozicijos atitiktų 6 pav. padėtis l ašyje.

4 Neuroninio tinklo struktūros parinkimas ir mokymas

Šiame darbe yra ieškoma lęšių L1 ir L2 pozicijų priklausomybė nuo didinimo parametro m_{xy} ir skėsties parametro θ_{xy} . Tam yra naudojamas atgalinio sklidimo neuroninis tinklas. Gerai parinktas ir paruoštas neuroninis tinklas suteiktų galimybę keisti lazerio pluošto didinimą ir skėstį tolydiniame intervale. Neuroninio tinklo modelio kūrimui ir mokymui panaudojama programinės įrangos sąsaja *Keras* [2].

4.1 Struktūra

Neuroninio tinklo struktūrai yra du pagrindiniai kriterijai – kaip galima mažesnis ir kaip galima tikslesnis.

Neuroninio tinklo dydis yra svarbus, nes jis bus naudojamas įterptinėje sistemoje, kuri valdys motorizuotą lazerio pluošto plėstuvą. Įterptinėse sistemose neuroninio tinklo dydį riboja statinė operatyvioji atmintis (SRAM), išliekamoji atmintis (FLASH) ir skaičiavimo sparta. Kuo didesnis neuroninis tinklas, tuo daugiau FLASH atminties naudojama ir lėčiau atliekami skaičiavimai, nes reikia daugiau procesoriaus ciklų. Taip pat mikrovaldiklio atmintį naudoja kitos funkcijos: komunikacija su kitais įrenginiais, motorų valdymas ir kitų parametrų skaičiavimas. Pavyzdžiui, populiarūs STM32F4 serijos mikrovaldikliai turi iki 512 *KB* FLASH atminties. Pagal tai galima spręsti, kiek maksimaliai parametrų gali turėti neuroninis tinklas. 512 *KB* = 4 096 000 bitų; jeigu parametrai yra *float32* tipo ir leidžiame visą FLASH atmintį išnaudoti tik neuroniniam tinklui, tai galimas parametrų skaičius yra $P \leq \frac{\gamma S}{32}$, čia γ žymi kokią dalį leidžiame naudoti FLASH atminties, o S – bitų skaičių. Pagal šią formulę $P \leq 128\,000$. Taigi, neuroninį tinklą turi sudaryti gerokai mažiau parametrų, kad mikrovaldiklis dar galėtų atlikti papildomus darbus. SRAM sunaudojamą atmintį ir neuroninio tinklo vykdymo laiką nėra taip paprasta įvertinti, todėl verta padaryti praktinį patikrinimą.

1 lentelė. [1] darbe tirtų neuroninių tinklų struktūros. Pateikiama, vidinių sluoksnių skaičius, neuronų skaičius juose ir bendras optimizuojamų parametrų skaičius. Įvesties ir išvesties sluoksniai visais atvejais turi po 2 neuronus. Konvergavimo sparta gauta atlikus tiesinę interpoliaciją vidutinio kvadratinio nuokrypio σ^2 priklausomybei nuo mokymo laiko. σ^2 vertės yra gautos po 10^6 epochų.

Vidinio sluoksnio nr.	Neuroninio tinklo pavadinimas			
	NT1	NT2	NT3	NT4
	Neuronų skaičius			
1	32	64	512	128
2	64	128	256	256
3	-	64	128	512
4	-	-	64	256
5	-	-	128	128
6	-	-	256	64
Parametrų skaičius	2338	16 898	215 874	337 602
Konvergavimo sparta, $\times 10^{-6}$	-1,44	-1,10	-0,79	-0,68
σ^2 , $\text{mm}^2 \times 10^{-4}$	60,99	8,71	16,16	23,38

Tikslumas svarbus, nes tinklas yra mokomas naudojant sintetinius duomenis. Fizinė sistema ir be teorinio modelio turi priežasčių, dėl kurių atsiranda papildomi netikslumai. Pavyzdžiui, ne visiškai lygiagretus optinių elementų išdėstymas optinėje ašyje, netobula optika ir sistemoje įdiegto magnetinio pozicijos jutiklio kalibravimo netikslumai (maksimali pozicijos skyra yra $1 \mu\text{m}$). Dėl šių priežasčių reikėtų turėti teorinį modelį, kuris kiek galima mažiau sukurtų papildomų netikslumų.

Pagal šiuos kriterijus [1] darbe buvo nustatyta, kad geriausiai tinka neuroninis tinklas, turintis 16 898 optimizuojamus svorinius koeficientus. Tirtų neuroninių tinklų struktūros ir apibendrinti rezultatai pateikti 1 lentelėje. Buvo pasirinktas *NT2*, nes mokymo metu per trumpiausią laiką įgijo mažiausią vidutinį kvadratinį nuokrypį σ^2 . Šio tinklo **įvesties sluoksnis turi 2 neuronus**, kurių vertės atitinka norimo didinimo m ir skėsties θ vertes. **Išvesties sluoksnis taip pat turi 2 neuronus**, kurie atitinka lęšių pozicijas p_1 ir p_2 . Taip pat **yra trys vidiniai sluoksniai su atitinkamai 64, 128 ir 64 neuronais**. Sluoksnių neuronai yra pilnai sujungti su gretimais sluoksniais. Visuose sluoksniuose pasirinkta neurono aktyvacijos funkcija *selu* [13]:

$$selu(net) = \lambda \begin{cases} net, & \text{jei } net > 0 \\ \alpha e^{net} - \alpha, & \text{jei } net \leq 0 \end{cases}, \quad (39)$$

čia λ yra normavimo daugiklis, o α – skaliaras.

4.2 Mokymas

Neuroninio tinklo svorių optimizavimui yra panaudojami sugeneruoti duomenys, kurie aptarti 3.4 sk., ir panaudojama *Adam* optimizavimo metodika [1]. Mažesnis duomenų rinkinys (100×100) yra naudojamas mokymui. Didesnis duomenų rinkinys (300×300) naudojamas neuroninio tinklo tikslumo įvertinimui ir vadinamas, validavimo duomenimis. Taip pasirinkta, kad validavimo metu būtų išbandomos tarpinės vertės tarp mokymo duomenų. Parametras, kuris minimizuojamas optimizavimo metu, yra vidutinis kvadratinis nuokrypis (prognozuojamų ir mokymo duomenų skirtumas), vidurkinant paklaidą yra pakeliama kvadratu, kas didelėms paklaidoms duoda didesnę svorį.

Neuroninis tinklas optimizuojamas pradžioje pateikiant 32 įvesties ir išvesties mokymo duomenų rinkinius, gavus išvesties vertes apskaičiuojami validavimo ir mokymo vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai. Pagal mokymo duomenų vidutinį kvadratinį nuokrypį *Adam* optimizatorius pakeičia svorius, o pagal validavimo vidutinį kvadratinį nuokrypį pakeičia optimizavimo parametrus. Ciklas vėl kartojamas su likusiais duomenimis, o pasibaigus duomenims laikoma, kad praėjo viena optimizavimo epocha. Kas 3000 epochų yra išsaugomas geriausias rezultatas ir patikrinama, kaip konverguoja neuroninio tinklo validavimo duomenų vidutinis kvadratinis nuokrypis ir su koku nuokrypiu prognozuojamos visos lęšių p_1 ir p_2 pozicijos. Taip pat kas 3000 epochų yra išsaugoma neuroninio tinklo modelio būseną, kad *Adam* optimizatoriaus parametrai *Keras* aplinkoje liktų nepakitę ir mokymas būtų tęsiamas.

Pastebėjus, kad vidutinis kvadratinis nuokrypis nemažėja arba yra pakankamai mažo dydžio (idealiu atveju $\sim 10^{-6} \text{ mm}^2$, dėl $1 \mu\text{m}$ skyros), mokymas yra sustabdomas.

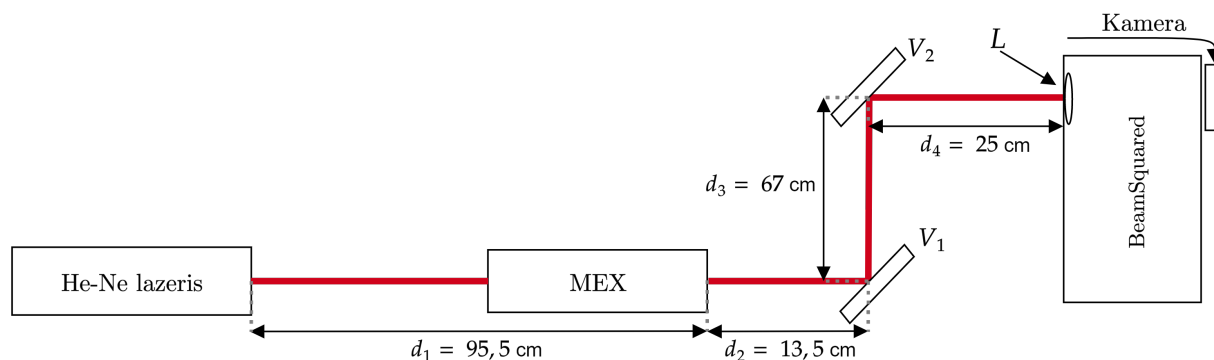
5 Eksperimentinis dirbtinio neuroninio tinklo patikrinimas

Paruošto neuroninio tinklo, skirto He-Ne lazeriui, veikimas realioje sistemoje yra patikrinamas dviem etapais. Pirmuoju neuroninio tinklo ir optinės sistemos modeliai patikrinami atliekant He-Ne lazerio pluošto parametrų matavimus perėjus optinę sistemą. Antruoju etapu tikrinama, ar neuroninis tinklas yra tinkamas naudojimui įterptinėje sistemoje. Abiems tikslams pasiekti naudojami prietaisai:

- NUCLEO-F446RE [14] prototipų kūrimui skirta plokštė.
- 5 mW, 632.8 nm Thorlabs He-Ne lazeris.
- $\times 1\text{--}\times 3$, Optogama motorizuotas pluošto plėstuvas – MEX [3].
- Du reguliuojami metaliniai veidrodėliai.
- BeamSquared-A [15] lazerio spindulio sklidimo analizatorius.
- Spiricon SP300-BSQ kamera [16], fiksuojanti ir analizuojanti bangos ilgius nuo 190 nm iki 1100 nm, 1928×1448 pikselių skyros ir $3.69 \mu\text{m}$ pikselio dydžio.
- $f = 401,15$ mm lęšis.

5.1 Validavimas realioje optinėje sistemoje

Atlikus lazerio pluošto parametrų matavimą, už motorizuoto pluošto plėstuvo optinės sistemos, galima patikrinti sumodeliuotą optinę sistemą ir paruoštą neuroninį tinklą. Neužtenka už pluošto plėstuvo pastatyti CCD kamerą ir pamatuoti išeinantį lazerio spindulį. Tokiu atveju dažnai susiduriama su problema, kad lazerio pluoštas netelpa į kameros matricą. Šią problemą galima išspręsti panaudojus papildomą lęšį.



9 pav. Principinė He-Ne lazerio, praėjusio pluošto plėstuvo optinę sistemą, parametrų matavimo schema. V_1 ir V_2 žymi reguliuojamus metalinius veidrodėlius, o d_1 , d_2 , d_3 , d_4 atstumus tarp atitinkamų elementų. MEX – motorizuotas pluošto plėstuvas, L žymi $f = 401,15$ mm lęšį be aberacijų.

Lazerio pluošto parametrų matavimo principinė schema pateikta 9 pav. He-Ne lazerio parametrai aprašyti 3.1 skyriuje. Lazerio pluošto plėstuvas (MEX) pakeičia He-Ne lazerio spindulio

erdvinius parametrus, kurie priklauso nuo 6 pav. atvaizduotų $L1$ ir $L2$ lęšių pozicijų. Reguluojami veidrodėliai V_1 ir V_2 reikalingi sureguliuoti lazerio spindulį. Jis turi sklįsti per visų naudojamų instrumentų optinę ašį z ir per lazerio pluošto sklįdimo analizatoriaus BeamSquared lęšio L centrą, kitu atveju matavimai gali būti neteisingi. Lęšis L turi 401,15 mm židinio nuotolį ir yra be aberacijų. BeamSquared gali automatiškai būdu išmatuoti pluošto parametrus už lęšio panaudojant kamerą ir transliacinę optinę sistemą, esančią viduje.

Spinduliui praėjus lęšį L yra sukuriama dirbtinė jo sąsmauka už lęšio, kaip atvaizduota 10 pav. dešinėje pusėje. Žinant sąsmaukos plotį, skėsties kampą ir atstumą nuo lęšio iki sąsmaukos, spindulio plotį galima sužinoti pagal tokį sąryšį:

$$W(z)^2 = W_0^2 + \Theta^2(z - z_0), \quad (40)$$

žymėjimai atitinka 10 pav. ir galioja pluoštams abiejuose lęšio pusėse bei pluošto x , y ašims atskirai. Nors sąsmauka, jos padėtis ir skėstis skiriasi prieš ir už lęšio, M^2 vertė, aprašoma sąryšiu

$$M^2 = \frac{W_0 \Theta \pi n}{4\lambda}, \quad (41)$$

išlieka tokia pati, kol neatsiranda sferinių aberacijų. n žymi lūžio rodiklį ir įprastai yra lygus 1, λ – bangos ilgis. Pagal šį sąryšį galima išanalizuoti lazerio spindulį už lęšio ir tuomet jį konvertuoti į matuojamą. Analizės metu reikia rasti dirbtinės sąsmaukos plotį ir poziciją, todėl yra atliekama serija lazerio pluošto pločio matavimų už ir prieš dirbtinę sąsmauką x ir y ašyse. Panaudojant netiesinį mažiausių kvadratų metodą yra aproksimuojama 40 lygtis ir gaunamos W_{02} , z_{02} , Θ_2 vertės x , y ašyse. M^2 gaunamas įstačius šias vertes į 41 lygtį. Pilnas matuojamo pluošto skėsties kampas gaunamas pagal sąryšį

$$\Theta_1 = \frac{W_{f2}}{f_\lambda}, \quad (42)$$

čia W_{f2} yra spindulio plotis lęšio L židinyje, f_λ – atitinkamo bangos ilgio lęšio židinio nuotolis. Tikros sąsmaukos plotį galima rasti pagal tokį sąryšį:

$$W_{01} = \frac{4\lambda M^2}{\pi \Theta_1}. \quad (43)$$

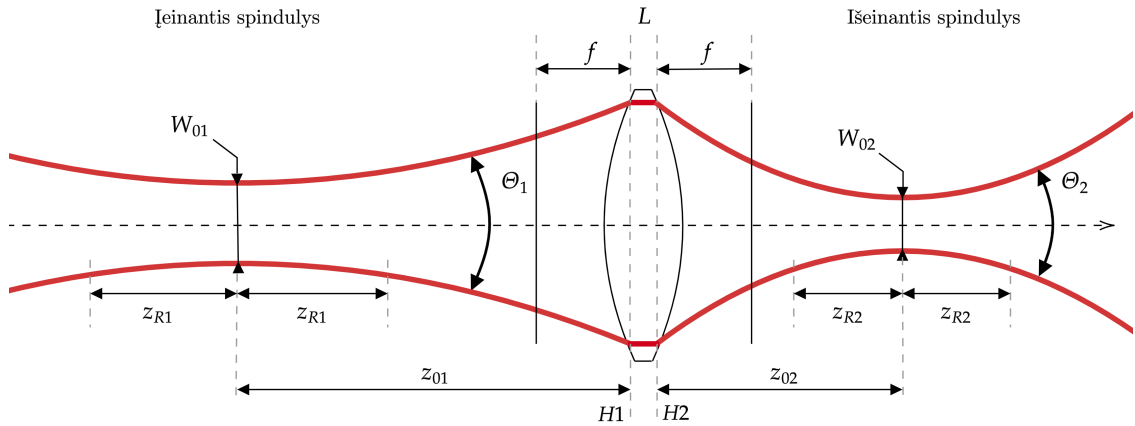
Matuojamo spindulio Relėjaus ilgio išraiška yra tokia:

$$z_{R1} = \frac{W_{01}}{\Theta_1}. \quad (44)$$

Galiausiai sąsmaukos atstumas nuo BeamSquared apertūros gali būti išreikštas taip:

$$z_{01} = \frac{f^2(z_{02} - f)}{z_{R2}^2 + (z_{02} - f)^2} + f - z_{lens}. \quad (45)$$

z_{lens} žymi atstumą nuo lęšio pagrindinės plokštumos $H1$ iki BeamSquared apertūros ir yra žinomas. Jeigu sąsmaukos pozicijos vertė yra teigiama, vadinasi, ji yra prieš lęšį L , neigiama vertė reiškia,



10 pav. Gauso pluošto parametrai prieš ir už lęšio L , kurio židinio nuotolis f . Įeinančio spindulio parametrai žymimi 1, o išeinančio 2. W_0 žymi sąsmaukos plotį, z_0 – sąsmaukos padėtį, Θ – pilną skėsties kampą tolimajame lauke, z_R – Relėjaus ilgį, $H1$ ir $H2$ - pagrindines lęšio plokštumas.

kad ji yra už lęšio. Sąsmaukos pozicijos atskaitos sistema gali būti pakeista. Tai padaroma papildomai įvedant atstumą nuo BeamSquared apertūros iki atskaitos vietos. Detalesnė informacija apie matavimo metodiką ir lazerio pluošto parametrų skaičiavimą yra pateikta BeamSquared vartotojo instrukcijoje [17].

Pirmiausia, panaudojant BeamSquared, bet išėmus iš optinės sistemos lazerio pluošto plėstuvą, yra pamatuojamas lazeris. Prieš atliekant matavimą nustatomas atstumas nuo BeamSquared apertūros iki lazerio. Pagal 9 pav. atstumas yra 201 cm. Nustačius atstumą bus galima palyginti ar sutampa modelio parametrai su išmatuotais. Išmatavus lazerį, atgal į sistemą įstatomas lazerio pluošto plėstuvai.

Tikrinant neuroninio tinklo veikimą yra pasirenkamas įvesties parametrų rinkinys (m_{inp}, θ_{inp}) . Didinimai parenkami intervale $[1, 3]$ su 0,1 žingsniu. Kiekvienam skėsties parametrai parenkama vertė, kuri atitinka sąryšį $\theta_{inp} = \theta_{laser}/m_{inp}$, čia $\theta_{laser} = 0,496$ mrad ir yra modeliuoto lazerio skėstis. Įvedus šias vertes į neuroninį tinklą yra gaunamos atitinkamos lęšių pozicijos p_1 ir p_2 . Prieš pradėdant lazerio pluošto už pluošto plėstuvo optinės sistemos matavimus, įvedamas atstumas nuo BeamSquared apertūros iki MEX, kuris pagal 9 pav. yra 105,5 cm. Viena iš lęšių pozicijų porų yra įvedama į motorizuotą lazerio pluošto plėstuvą, kuris motorų pagalba nustato šias pozicijas lęšiams $L1$ ir $L2$. Taip atliekami matavimai visoms tiriamoms pozicijoms. $1\times$ didinimo atveju yra pasitikrinama, ar rezultatai yra geri, jei ne, yra pareguliuojami veidrodėliai ir MEX magnetinių pozicijos jutiklių kalibracinės vertės.

Atlikus matavimus rezultatai yra gaunami lazerio pluošto x ir y ašyse. Atskirai matuojant ašis galima patikrinti lazerio pluošto simetriškumą. Gaunami šie Gauso pluošto parametrai: skėstis, sąsmaukos pozicija, sąsmaukos plotis, Relėjaus ilgis, M^2 . Modeliuojant optinę sistemą nebuvo išskirtos x ir y ašys (tariama, kad abiejuose ašyse Gauso pluoštas yra toks pats), todėl, įsitikinus, kad pluoštas turi mažą asimetriškumą, išmatuoti parametrai šiose ašyse yra suvidurkinami.

Išmatuotą skėstį galima iškart palyginti su tikėtina (θ_{inp}). Didinimo parametro palyginimui su tikėtinomis vertėmis reikia atlikti papildomus lazerio pluošto ir pluošto už MEX skaičiavimus, pa-

naudojant 2 sąryšį. Visi parametrai, išskyrus z (atstumą nuo sąsmaukos), šiame sąryšyje yra gaunami iš matavimų. z galima apskaičiuoti, iš išmatuotos sąsmaukos pozicijos ir 9 pav. pateiktų atstumų tarp instrumentų. Pirmiausia reikia apskaičiuoti koks yra He-Ne lazerio spindulys už MEX optinės sistemos, kai sistemoje nėra pluošto plėstuvo. Matavimai duoda informaciją apie sąsmaukos padėtį lazerio padėties atžvilgiu, o iš 9 pav. žinoma, kad nuo lazerio iki MEX paskutinio lęšio dešiniojo paviršiaus (6 pav.) atstumas yra 95,5 cm. Šių dydžių suma duoda z vertę ir ją įstačius į 2 sąryšį yra apskaičiuojamas pluošto spindulys. Skaičiuojant lazerio pluošto dydį už MEX, yra išmatuota sąsmaukos padėtis MEX paskutinio lęšio dešiniojo paviršiaus atžvilgiu, todėl z vertė ir yra ši padėtis. Didinimai apskaičiuojami paėmus santykį spindulio, praėjusio MEX optinę sistemą, su lazerio spinduliu už MEX optinės sistemos (be MEX).

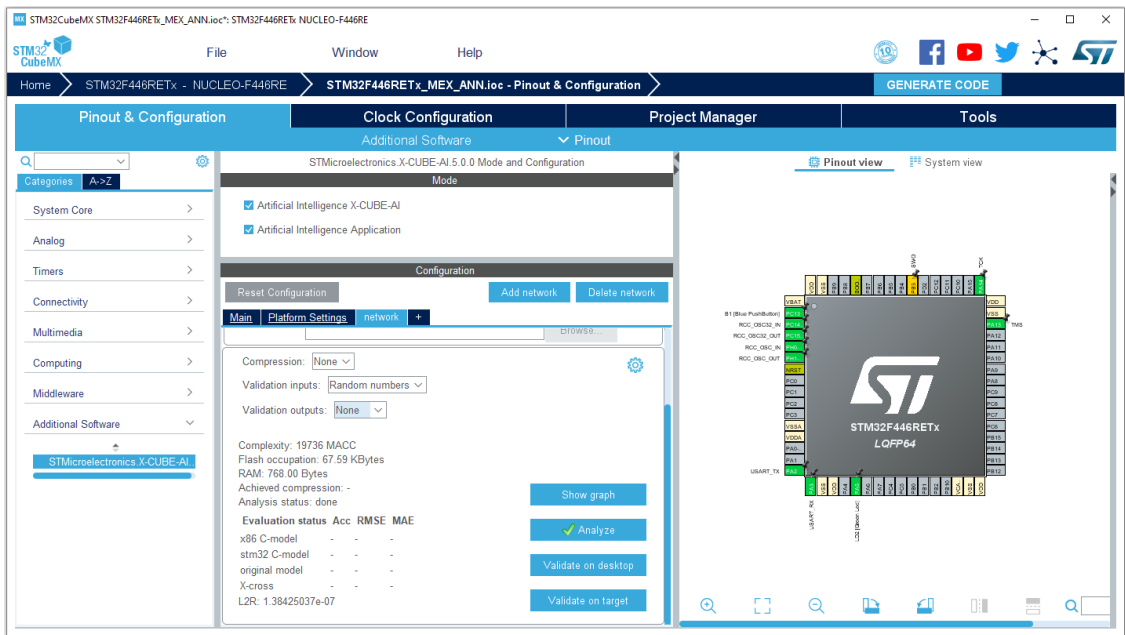
5.2 Tinkamumo patikrinimas mikrovaldiklyje

Darbe yra naudojama STMicroelectronics sukurta NUCLEO-F446RE prototipų kūrimo plokštė. Joje yra integruotas STM32F446RE mikrovaldiklis ir jo programavimui skirtas ST-LINK. Mikrovaldiklis turi 512 KB FLASH atminties ir 128 KB SRAM atminties. Jo veikimas paremtas aukšto našumo ARM Cortex-M4 procesoriumi, kurio taktinis dažnis yra iki 180 MHz. Pasirinktas būtent šis mikrovaldiklis, nes jis turi užtekinai komunikacijos sąsajų, reikalingų motorizuoto pluošto plėstuvo valdymui, ir yra tinkamo dydžio.

STMicroelectronics yra sukūrusi įrankių (STM32CubeMX, STM32CubeIDE, X-CUBE-AI), kurie palaiko NUCLEO-F446RE plokštę ir leidžia įvertinti *Keras* programinės sąsajos pagalba sukurtų neuroninių tinklų modelių, tinkamumą plokštei. STM32CubeMX yra grafinis įrankis, suteikiantis galimybę lengvai konfigūruoti STM32 mikrovaldiklius, o STM32CubeIDE suteikia aplinką programinio kodo kūrimui ir kompiliavimui. X-CUBE-AI yra biblioteka, padedanti kurti neuroninius tinklus, skirtus STM32 mikrovaldikliams. Šių įrankių pagalba galima įvertinti, kiek neuroninis tinklas sunaudoja FLASH ir SRAM atminties mikrovaldiklyje, kokia paklaida yra tarp *Keras* neuroninio tinklo modelio kompiuteryje ir mikrovaldiklyje. Taip pat galima įvertinti vieną iš svarbesnių parametrų – kiek laiko užtrunka gauti išvesties vertes mikrovaldiklyje. Ilgas uždelsimas būtų netinkamas realaus laiko sistemos veikimui.

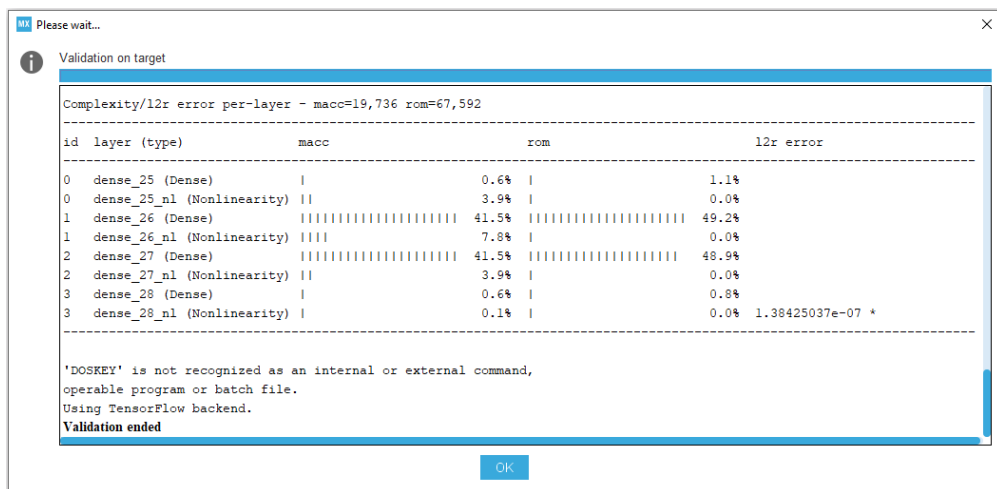
Pirmiausia yra patikrinama, ar neuroninio tinklo modelis gali būti sutalpintas į mikrovaldiklį. STM32CubeMX aplinkoje yra sukuriamas naujas projektas ir pasirenkama, kad jis bus skirtas NUCLEO-F446RE plokštei. Leidžiamame programai visas plokštės išorines komunikacijas sukonfigūruoti numatytauoju režimu. Tokiu būdu bendrosios paskirties įvesties/išvesties (GPIO) jungtys ir mikrovaldiklio registrai yra sukonfigūruojami taip, kad veiktų universalus asinchroninis imtuvassiuštuvass (USART), kuris leidžia palaikyti nuosekliąją komunikaciją tarp kompiuterio ir mikrovaldiklio. Toliau projekte pridedama papildoma programa – X-CUBE-AI. Nustatoma, kad ši programa skirta neuroninio tinklo validavimui ir, kad komunikacija bus vykdoma per USART. Tuomet pridedamas, *Keras* sąsaja sukurtas ir apmokytas, neuroninio tinklo modelis *hdf5* formatu. X-CUBE-AI išanalizuoja modelį ir pateikia nuskaityto modelio sluoksnių ir parametrų skaičių. Sukonfigūruotas STM32CubeMX langas pavaizduotas 11 pav.

Jei analizė pavyko ir išanalizuotas modelis su tikroju modeliu sutampa – sukuriamas *C* kodo



11 pav. STM32CubeMX programos pagrindinis valdymo langas, kai yra sukonfigūruotas STM32F446RE mikrovaldiklis ir įkeltas tiriamas neuroninis tinklas. Vidurinėje skiltyje matomi neuroninio tinklo validavimo nustatymai, dešinėje mikrovaldiklio GPIO jungčių konfigūracijos.

projektas mikrovaldikliui, su tiriamu neuroniniu tinklu. Tai padaroma STM32CubeMX aplinkoje pasirenkant, kad naudojamas kodo redaktorius yra STM32CubeIDE, ir sugeneruojant C kodo programą. Ši programa leidžia nuskaityti neuroninio tinklo architektūrą mikrovaldiklyje ir gauti neuroninio tinklo išvesties vertes. NUCLEO-F446RE plokštė prijungiama per USB sąsają, tai leidžia STM32CubeIDE komunikuoti su plokštėje integruotu ST-LINK programatoriumi ir inicijuoti programos įrašymą į plokštę. Baigus rašymą STM32CubeMX aplinkoje atliekamas neuroninio tinklo validavimas mikrovaldiklyje. Šis procesas suteikia informaciją apie neuroninio tinklo naudojamą FLASH ir SRAM atminčių dydį, neuroninio tinklo architektūrą ir paskaičiuoja L2R paklaidą. Validavimo rezultatų pavyzdys pateiktas 12 pav. L2R paklaida parodo tikslumą tarp C kodo ir *Keras*



12 pav. Neuroninio tinklo validavimo mikrovaldiklyje rezultatų ataskaitos pavyzdys STM32CubeMX aplinkoje.

neuroninio tinklo modelio gaunamų išvesties verčių, kai įvesties vertės abiem modeliams yra vie-

nodos. L2R yra skaičiuojama pagal tokią formulę:

$$e_i = \frac{\|F_j - f_i\|}{\|F_j\|}, \quad (46)$$

čia F_j žymi C kodo j sluoksnio išvesties verčių masyvą, o f_i *Keras* modelio atitinkamą i sluoksnio išvesties verčių masyvą. Lyginant vertes yra tariama, kad įkeltas *Keras* modelis yra tobulas, tokiu būdu įvertinama paklaida, atsirandanti tik dėl skirtingų kompiuterio ir mikrovaldiklio architektūrų.

Neuroninio tinklo išvesties verčių skaičiavimo spartos tyrimui skirto projekto paruošimas vyksta panašia tvarka, kaip ir validavimo tyrimo. Importuojant į projektą X-CUBE-AI nustatoma, kad programa yra skirta našumo tyrimui. STM32F446RE mikrovaldiklis gali veikti iki 180 MHz, todėl STM32CubeMX aplinkoje nustatomas, mikrovaldiklio sistemos dažnis. Sugeneruojamas C kodas ir panaudojant STMCubeIDE, programa įrašoma į mikrovaldiklį. Ši programa sugeneruoja atsitiktines neuroninio tinklo įvesties vertes ir skaičiuoja procesoriaus taktų skaičių. Programa atlieka 16 tokių iteracijų ir suvidurkintą rezultatą išsiunčia per virtualiąją nuosekliąją komunikaciją, iš kur jis gali būti nuskaitytas per USB jungtį, panaudojant terminalą. Nuskaitytų rezultatų pavyzdys pateiktas 13 pav. Gauti rezultatai yra išsaugomi ir sukuriamas naujas projektas su mažesniu mikrovaldiklio sistemos dažniu. Tyrimas atliekamas 60 – 180 Mhz dažnių intervale, kas 20 Mhz.

```
Running PerfTest on "network" with random inputs <16 iterations>...  
.....  
Results for "network", 16 inferences @180MHz/180MHz <complexity: 19736 MACC>  
duration      : 1.234 ms <average>  
CPU cycles    : 222215 -8148/+11490 <average,-/+>  
CPU Workload  : 0%  
cycles/MACC   : 11.25 <average for all layers>  
used stack    : 300 bytes  
used heap     : 0:0 0:0 <req:allocated,req:released> cfg=0  
Running PerfTest on "network" with random inputs <16 iterations>...  
.....
```

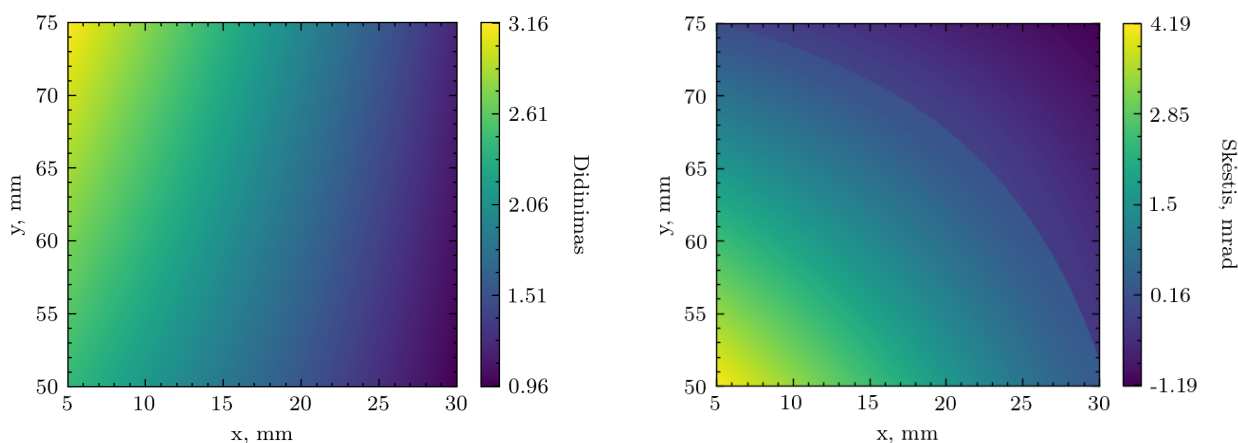
13 pav. Neuroninio tinklo išvesties verčių skaičiavimo spartos testo ataskaitos pavyzdys terminale.

6 Rezultatai

6.1 Sumodeliuotų duomenų apžvalga

Atlikus He-Ne lazerio pluošto sklaidimo modeliavimą per 6 pav. atvaizduotą optinę sistemą, buvo gautos lęšio $L3$ dešiniojo paviršiaus skėsties ir didinimų vertės skirtingose lęšių $L1$ ir $L2$ pozicijose.

Buvo sugeneruoti dviejų dydžių skėsties ir didinimų duomenys – 100×100 ir 300×300 . Didesni duomenų rinkiniai atvaizduojami 14 pav., 100×100 rinkiniai neatvaizduojami, nes didesni rinkiniai apima mažesnių rinkinių vertes. Iš 14a ir 14b pav. matoma, kad lazerio pluošto plėstumas sumodeliuotais atstumais tarp lęšių (x ir y), gali įgyti didinimo vertes $0,96 \times -3,16 \times$ ribose ir pakeisti modeliuoto He-Ne lazerio skėstį nuo $-1,2$ mrad iki $4,19$ mrad; čia minusas reiškia, kad lazerio pluoštas, praėjęs optinę sistemą, yra konverguojantis. Atidžiau pažiūrėjus į duomenis matoma, kad turint fiksuotą didinimo arba skėsties parametą nebūtinai yra pasiekiamos maksimalios arba minimalios skėstčių ir didinimų vertės.



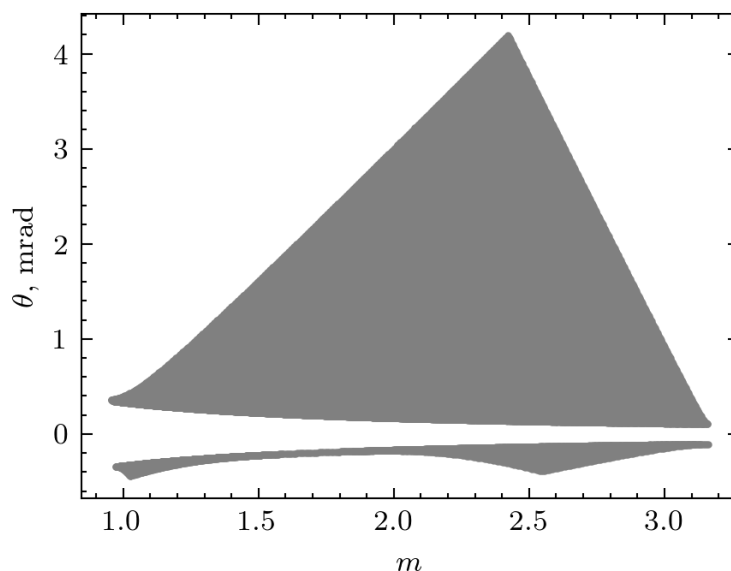
(a) Didinimo priklausomybė nuo atstumų tarp lęšių x ir y .

(b) Skėsties priklausomybė nuo atstumų tarp lęšių x ir y .

14 pav. Sumodeliuoti He-Ne lazerio, praėjusio pluošto plėstuvo optinę sistemą, duomenys. Čia x ir y atitinka atstumus tarp lęšių, kaip atvaizduota 6 pav.

Didinimo ir skėstčių vertės yra suporuotos. Visos galimos šių verčių kombinacijos tirtose lęšių pozicijose p_1 ir p_2 pateiktos 15 pav., čia m žymi didinimo parametą, o θ – skėsties. Iš karto galima pastebėti, kad pozicijų, kur lazerio pluoštas tampa konverguojančiu, yra nedaug. Dėl mažų fokusavimo galimybių, ši optinė sistema negalėtų būti rekomenduojama lazerio fokusavimui. Ties $\sim 1 \times$ didinimu yra nedaug pozicijų su skirtingomis skėstimis, o ties $\sim 2,5 \times$ didinimu skėstį galima didinti iki ~ 4 mrad. Tarpas tarp teigiamų ir neigiamų skėsties verčių atsiranda dėl Gauso pluošto savybių. Mažiausia galima Gauso pluošto skėstis priklauso nuo difrakcijos. Įprastai, skėstis nebūna neigiama, bet šiame darbe neigiama skėstis naudojama tam, kad būtų galima atskirti, kur praėjęs optinę sistemą lazerio pluoštas konverguoja, o kur diverguoja. Taip pat didėjant didinimo parametrai tarpas siaurėja, nes didėja ir sąsmauka, o dėl to mažėja minimali skėstis. Taip yra išlaikomas 5 sąryšis.

Šie duomenys buvo naudojami neuroninio tinklo mokymui ir optimizavimui. Skėstčių, didinimų ir jas atitinkančių pozicijų p_1 , p_2 mažesni (100×100) duomenų rinkiniai naudojami mokymui, o

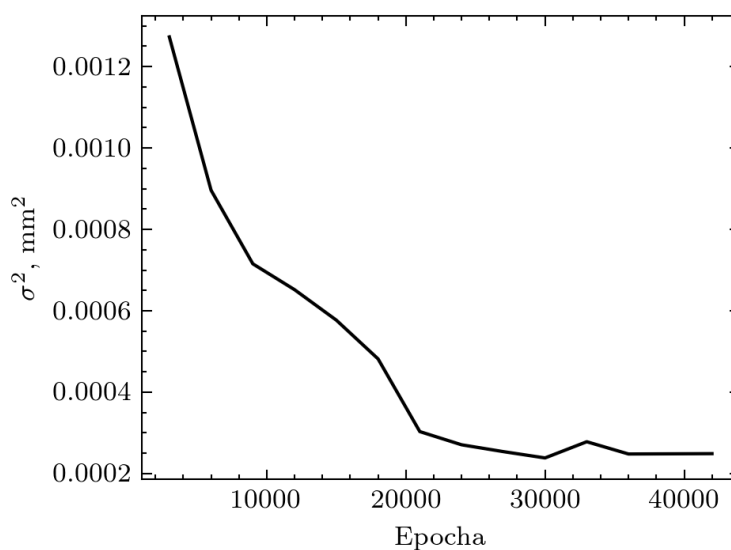


15 pav. Visos sumodeliuotos didinimų ir skėsčių kombinacijos.

didesni (300×300) – neuroninio tinklo optimizavimui.

6.2 Dirbtinio neuroninio tinklo tikslumas

Neuroninio tinklo vidutinio kvadratinio nuokrypio konvergavimo kreivė, gauta mokymo metu, pateikta 16 pav., čia vertės pateiktos kas 3000 epochų [3000, 42 000] intervale. Pirmosios 3000 epochų yra neatvaizduojamos, nes tuo metu vyksta staigus konvergavimas, todėl šis laikotarpis nėra svarbus. Iš kreivės matoma, kad po $3 \cdot 10^4$ epochų buvo vidutinio kvadratinio nuokrypio (σ^2) minimumas – $2,38 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$, po dar 3000 epochų jis padidėjo ir vėliau nusistovėjo ties verte $2,49 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$. Per paskutines 9000 epochų nebuvo pasiektas naujas vidutinio kvadratinio nuokrypio minimumas, todėl mokymas buvo sustabdytas.

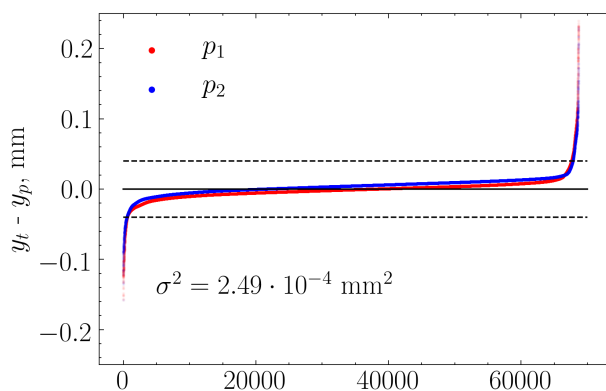


16 pav. Neuroninio tinklo vidutinio kvadratinio nuokrypio (σ^2) priklausomybė nuo epochos.

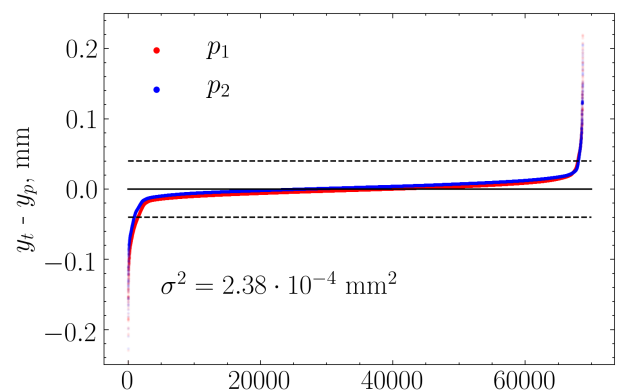
Reikia pasirinkti, ties kuria epocha rezultatas yra geriausias. Kai $\sigma^2 = 2,49 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$, skirtu-

mas tarp testavimo duomenų lęšių pozicijų p_1 , p_2 (6 pav.) ir neuroninio tinklo pozicijų, kai didinimų ir skėsciu vertės yra tos pačios, pateiktas 17a pav. Analogiški rezultatai, kai $\sigma^2 = 2,38 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$, pateikti 17b pav. Šiuose grafikuose neryškios vietos reiškia, kad tokių taškų yra mažiau. Matoma, kad 17a pav. atveju, lyginant su 17b pav., abi pozicijos turi mažiau taškų, kur jų vertės yra per didelės. Iš grafikų padaryti palyginimą apie vertes, kurios yra prognozuojamos per mažos, yra sunku, nes jie atrodo panašūs. Nubrėžus $\pm 40 \mu\text{m}$ ribas, kurios 17 pav. abiejuose grafikuose atvaizduojamos brūkšninėmis linijomis, galima palyginti, kaip šiose ribose prognozuojamos pozicijos. Į šį intervalą $\sigma^2 = 2,49 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ atveju, lęšio $L1$ pozicijų p_1 patenka 97,6%, o lęšio $L2$ pozicijų p_2 – 97,9%. $\sigma^2 = 2,38 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ atveju, pozicijų p_1 patenka 96,7%, o p_2 – 97,7%. Tai reiškia, kad nors ir 17b pav. atveju vidutinis kvadratinis nuokrypis yra mažesnis, didesnė dalis p_1 ir p_2 pozicijų yra per didelės arba per mažos, bet taškai esantys $\pm 40 \mu\text{m}$, paklaidos intervale yra prognozuojami tiksliau. Didelės valdomų lęšių pozicijų paklaidos šiam darbui nėra geras rezultatas, todėl tariama, kad 17a pav. rezultatai yra geresni už 17b pav. Visgi, kai $\sigma^2 = 2,49 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$, keli procentai (p_1 – 2,4%, p_2 – 2,1%) pozicijų turi didesnes paklaidas už $\pm 40 \mu\text{m}$.

Kadangi atlikus neuroninio tinklo mokymą liko pozicijų su didelėmis paklaidomis, verta patikrinti, kokius didinimo m ir skėsties θ , įvesties parametrus šios pozicijos atitinka. 18 pav. pilkai atvaizduojamos visos testavimo duomenų didinimų ir skėsciu poros ir kiekvienam taškui atitinkamos lęšių pozicijos p_1 ir p_2 . Vietos, kur bent viena iš pozicijų viršija $\pm 40 \mu\text{m}$ paklaidos ribą (17a pav.), yra atvaizduotos raudona (p_1) ir mėlyna (p_2) spalvomis. Neigiamos θ vertės reiškia, kad lazerio pluoštas yra fokusuojamas. Iš grafiko matosi, kad taškai su didelėmis paklaidomis nėra visiškai atsitiktiniai, o susikongruavę duomenų kraštuose. Didžioji dalis tokių taškų yra ties riba, kur lazerio pluoštas iš diverguojančio tampa konverguojančiu. Ši vieta yra ypatinga ir dėl to priartinta 18 pav. įterptame grafike. Žinoma, kad idealus Gauso pluoštas negali turėti nulinės skėsties. Minimalią skėstį nusako difrakcija ir ji priklauso nuo bangos ilgio ir sąsmaukos dydžio (5 lygtis). Gauso pluoštas yra simetriškas sąsmaukos pozicijos atžvilgiu. Jeigu, praėjusio optinę sistemą lazerio spindulio sąsmauka yra už optinės sistemos, lazerio spindulys yra fokusuojamas. Suderinus optinę sistemą taip, kad būtų gaunama minimali skėstis prie kokios nors didinimo vertės, ir bandant toliau mažinti



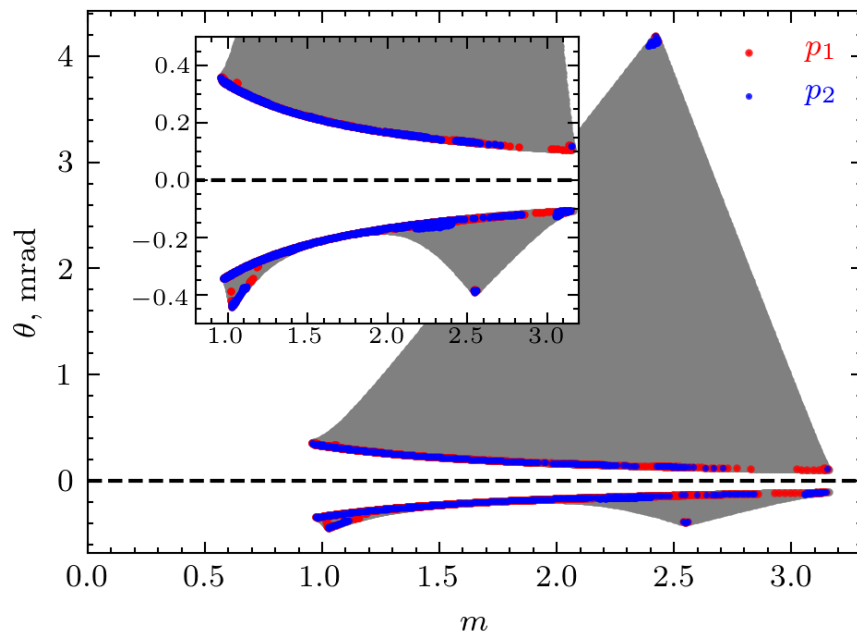
(a) Po $4,2 \cdot 10^4$ epochų.



(b) Po $3 \cdot 10^4$ epochų.

17 pav. Neuroninio tinklo lęšių pozicijų p_1 ir p_2 prognozuojamų (y_p) verčių skirtumas nuo testavimo duomenų (y_t) po skirtingo epochų skaičiaus. Abiem atvejais skirtumai atvaizduojami didėjimo tvarka. x – ašyje žymimas taško numeris. σ^2 žymi vidutinį kvadratinį nuokrypį.

skėstį, kaip aptarta 1.2 skyrelyje, lazerio pluoštas pradeda konverguoti su nenuline skėtimi. Taigi, dėl Gauso pluošto ir optinės sistemos savybių, neuroninio tinklo svoriai yra sunkiai optimizuojami šioje vietoje, nes kelių mikrometrų pozicijos pokytis gali lemti staigų skėsties įvesties parametro šuolį iš teigiamo į neigiamą. Jeigu neuroninis tinklas šioje vietoje galėtų tiksliau prognozuoti pozicijas, tikėtina, kad praktiškai tai nepadėtų. Realioje sistemoje atsirastų papildomos sisteminės paklaidos, dėl kurių, siekiant minimaliai diverguojančio pluošto, gali būti gautas konverguojantis. Kitose vietose esantys taškai su dideliu nuokrypiu nėra niekuo ypatingi ir tėra optimizavimo pasekmė. Analogiškas 18 pav. grafikas, kai $\sigma^2 = 2,38 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$, yra labai panašus ir vizualiai skirtumo nėra matyti, todėl jis nėra pateikiamas.



18 pav. Grafikuose pilkai atvaizduojamos visos sumodeliuotos He-Ne lazerio didinimų m ir skėsciu θ vertės. p_1 ir p_2 žymi didinimų ir skėsciu vertes, kur neuroninio tinklo išvesties verčių nesutapimas su testavimo duomenimis yra didesnis už $40 \mu\text{m}$.

Apibendrinant neuroninio tinklo pozicijų tikslumą, galima teigti, kad tinkamesnis neuroninis tinklas yra su $2,49 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ vidutiniu kvadratinu nuokrypiu, nes didesnę dalis taškų yra tiksliau prognozuojama. Šio neuroninio tinklo didžioji dalis lęsių pozicijų p_1 ir p_2 yra $< 40 \mu\text{m}$ tikslumu. Prie daugumos didinimo verčių, kai skėstis yra minimali, lęsių pozicijos yra prognozuojamos su didžiausiomis paklaidomis.

6.3 He-Ne lazerio matavimų rezultatai

Prieš atliekant motorizuoto lazerio pluošto plėstuvo matavimus pagal 9 pav. schemą, buvo atliktas He-Ne lazerio matavimas. Tuomet buvo nustatytos motorizuoto pluošto plėstuvo lęsių pozicijos, esant skirtingoms didinimo ir skėsties vertėms, ir atlikti lazerio pluošto parametrų matavimai už motorizuoto pluošto plėstuvo optinės sistemos.

Modeliuoto He-Ne lazerio su darant eksperimentą išmatuotais parametrais palyginimas pateiktas 2 lentelėje. Pirmoje eilutėje yra pateikti 3 skyriuje modeliuoto He-Ne lazerio sąsmaukos dydžio,

2 lentelė. Modeliuoto ir išmatuoto He-Ne lazerio parametrų palyginimas. w_0 – sąsmaukos pusplotis, θ_0 – pusės kampo skėstis, z_R – Relėjaus ilgis, z_0 – sąsmaukos pozicija lazerio apertūros atžvilgiu, neigiama vertė reiškia, kad sąsmauka yra prieš apertūrą. Skirtumas rodo, kiek procentų skiriasi lazerio parametrai.

	$w_0, \mu\text{m}$	θ_0, mrad	z_R, m	z_0, mm
Modeliuotas	405,5	0,496	0,816	-34,16
Išmatuotas	414,9	0,500	0,828	-47,56
Skirtumas	2,29%	0,80%	1,46%	32,8%

skėsties, Relėjaus ilgio ir sąsmaukos pozicijos (lazerio apertūros atžvilgiu) parametrai. Antroje eilutėje šie parametrai yra He-Ne lazerio prieš atliekant matavimus už motorizuoto lazerio pluošto plėstuvo optinės sistemos. Paskutinėje eilutėje pateikta, koks yra procentinis skirtumas tarp šių parametrų. Matoma, kad lazerio sąsmauka, skėstis ir Relėjaus ilgis turi skirtumą iki kelių procentų, tačiau sąsmaukos padėčių skirtumas yra 32,8%. Skirtumas tarp sąsmaukos, skėsties ir Relėjaus atsiranda dėl to, kad modeliuojamas lazeris yra tobulas, tariama, kad jo $M^2 = 1$, o eksperimento metu išmatuoto lazerio $M^2 = 1,028$. Taip pat matuojant lazerį atsiranda paklaida dėl instrumentų išstatymo – lazerio spindulys nėra visiškai lygiagretus sistemos optinei ašiai. Skirtumas tarp sąsmaukos pozicijų atsiranda dėl instrumentų išstatymo ir dėl atstumų tarp matavimo schemos instrumentų paklaidos, dėl ko atsiranda nesutapimas tarp atskaitos sistemų. 32,8% skirtumas yra 1,34 cm, o matavimo schema yra 2,01 m ilgio. Tokiu atstumu yra nesunku padaryti vieno centimetro paklaidą. Atstumų paklaida tarp instrumentų abiejose sistemose, prieš modeliuojant lazerį ir prieš atliekant naujus matavimus, atsiranda, nes matavimo schema buvo iš naujo surenkama. Ši paklaida neturi didelės įtakos skaičiuojant lazerio spindulio dydį. Pavyzdžiui, išmatuoto lazerio spindulio pusplotis už 1 m nuo sąsmaukos yra 0,639 mm, o už 1,0134 m yra 0,644 mm. Tai reiškia, kad spindulio pusplotis per 1,34 cm pakito tik 5 μm . Pokytis Relėjaus ilgio zonoje būtų dar mažesnis. Galima teigti, kad 2 lentelėje matomas sąsmaukos pozicijų skirtumas didelės įtakos didinimų matavimams neturi.

Lęšių $L1$ ir $L2$ pozicijos p_1, p_2 , kuriose buvo atliekami He-Ne lazerio spindulio parametrų matavimai už motorizuoto pluošto plėstuvo optinės sistemos, pateiktos 3 lentelėje. Pozicijos buvo gautos į neuroninį tinklą įvedus lentelėje pateiktus m_{inp} ir θ_{inp} parametrus, kur m_{inp} yra intervale $[1, 3]$ su žingsniu 0,1, o skėstis kiekvienam didinimo parametrai atitinka sąryšį $0,496/m_{inp}$, čia 0,496 mrad yra modeliuoto lazerio skėstis. Taip parinkus didinimo ir skėsties įvesties parametrus, yra tenkinamas optinis invariantas. Šiose pozicijose buvo iš naujo sumodeliuotas He-Ne lazerio pluošto sklidimas per 6 pav. pateiktą optinę sistemą, kuris leidžia palyginti, ar teoriškai šios pozicijos yra teisingos. Neuroninio tinklo išvesties pozicijas atitinkantys didinimai ir skėstys 3 lentelėje pateikti m_T ir θ_T stulpeliuose. Matoma, kad lęšis $L1$ nuo $1\times$ iki $3\times$ didinimo pajuda 3,15 mm, o lęšis $L2$ tame pačiame intervale pajuda 25,49 mm, vadinasi, lazerio parametrai lęšio $L2$ pozicijos poslinkiui nėra tokie jautrūs, kaip $L1$ lęšio poslinkiui. Verta atkreipti dėmesį, kad neuroninis tinklas ir pozicijas p_1 prognozuoja šiek tiek prasčiau (6.2 sk.). Lyginant m su m_T , matomas labai geras sutapimas su teoriniu modeliu – maksimalus $|m_T - m| = 0,001$. Galima teigti, kad su šiomis įvesties vertėmis pozicijos teoriškai labai gerai atitinka didinimo parametą. Skėsties θ ir θ_T sutapimas yra

šiek tiek prastesnis. Skirtumas $|\theta_T - \theta|$ yra intervale $[0, 0,002]$ mrad ir tik $1 \times$ didinimo atveju nesutapimas yra $0,007$ mrad. Atvejis, kai įvesties parametrai $m = 1$ ir $\theta = 0,496$ mrad yra ypatingas, nes lazerio parametrai, generuojant duomenis už optinės sistemos, buvo įvertinami, kai p_2 pozicijos yra intervale $[50, 75]$ mm. Neuroninio tinklo prognozuojama p_2 pozicija yra $48,242$ mm, reiškia, kad neuroninis tinklas išmoko įvertinti, kokie bus lazerio parametrai pozicijose, kuriose, atliekant mokymą, nebuvo informacijos.

3 lentelė. Eksperimentui naudojamo neuroninio tinklo įvesties didinimo m_{inp} ir skėsties θ_{inp} parametų vertės bei juos atitinkančios išvesties pozicijų vertės p_1 ir p_2 . m_T ir θ_T rodo, kokie yra teoriniai skėsties ir didinimo parametrai atitinkamose p_1 ir p_2 pozicijose.

Nr.	Įvestis		Išvestis			
	m_{inp}	θ_{inp} , mrad	p_1 , mm	p_2 , mm	m_T	θ_T , mrad
1	3,0	0,165	80,323	73,729	3,000	0,166
2	2,9	0,171	81,035	73,311	2,900	0,171
3	2,8	0,177	81,723	72,868	2,800	0,176
4	2,7	0,184	82,365	72,384	2,700	0,182
5	2,6	0,191	82,951	71,840	2,600	0,191
6	2,5	0,198	83,511	71,269	2,500	0,198
7	2,4	0,207	84,006	70,640	2,400	0,207
8	2,3	0,216	84,457	69,967	2,300	0,216
9	2,2	0,225	84,857	69,242	2,200	0,224
10	2,1	0,236	85,159	68,420	2,100	0,235
11	2,0	0,248	85,369	67,505	2,000	0,248
12	1,9	0,261	85,497	66,512	1,900	0,261
13	1,8	0,276	85,489	65,384	1,800	0,276
14	1,7	0,292	85,353	64,129	1,700	0,292
15	1,6	0,310	85,067	62,725	1,599	0,310
16	1,5	0,331	84,563	61,109	1,499	0,331
17	1,4	0,354	83,837	59,273	1,399	0,353
18	1,3	0,382	82,805	57,147	1,300	0,381
19	1,2	0,413	81,397	54,633	1,199	0,412
20	1,1	0,451	79,528	51,664	1,099	0,449
21	1,0	0,496	77,173	48,242	1,001	0,489

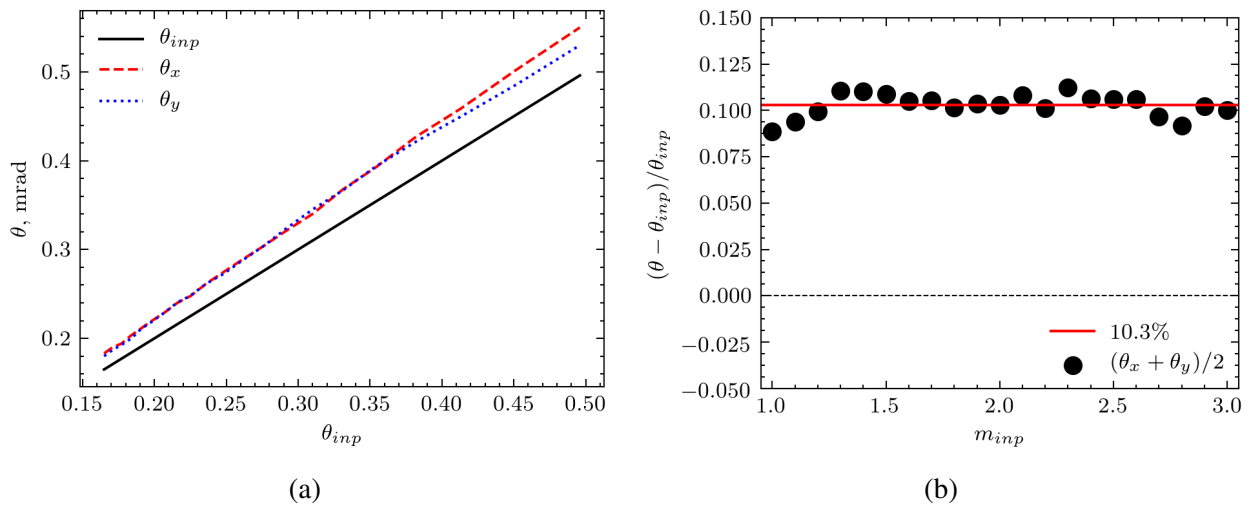
Atlikus He-Ne lazerio pluošto parametų matavimus už pluošto plėstuvo optinės sistemos, 3 lentelėje pateiktose p_1 ir p_2 pozicijose, buvo gautos sąsmaukos dydžio, skėsties, sąsmaukos pozicijos (lęšio $L3$ dešiniojo paviršiaus atžvilgiu), Relėjaus ilgio ir M^2 vertės. Rezultatai gauti atskirai x ir y ašyse, statmenose optinei ašiai z . Visi matavimai, išskyrus skėstį, pateikti 4 lentelėje. Abiejuose ašyse matomos tokios pačios tendencijos visiems parametrams. Sąsmaukos dydis, pozicija ir Relėjaus ilgis didėja, kai įvesties didinimo parametras (m_{inp}) didėja, o skėsties parametras (θ_{inp}) proporcingai mažėja. Toks rezultatas yra dėl 42–45 sąryšių. Skirtingos parametų vertės x ir y ašyse reiškia, kad matuotas lazerio pluoštas turi asimetriškumo savybių. Sąsmaukos pusplotio vertės w_{0x} ir w_{0y} daugiausiai skiriasi 21 eilutėje ir asimetriškumas yra $w_{0y}/w_{0x} = 1,04$. Mažiausias asimetriškumas yra 14 eilutėje – $1,00002$. Vadinasi pluoštas yra mažai asimetriškas visais atvejais. Lentelėje matomos M^2 vertės pasako, kaip pakito pluošto kokybė. Žinoma, kad be pluošto plėstuvo lazerio $M^2 = 1,028$. Įstačius pluošto plėstuvą ši vertė visuose lęšių pozicijose išliko labai mažai pakitusi

4 lentelė. He-Ne lazerio pluošto matavimo rezultatai x ir y ašyse, kai pluošto plėstuvo lęšiai yra dirbtinio neuroninio tinklo nustatytose pozicijose. Čia w_0 – sąsmaukos pusplotis, z_R – Relėjaus ilgis, z_0 – sąsmaukos atstumas nuo lęšio $L3$ dešiniojo paviršiaus, neigiama vertė reiškia, kad sąsmauka yra lęšio kairėje pusėje. Matavimai pateikti tokia pačia eilės tvarka, kaip 3 lentelėje.

Nr.	$w_{0x}, \mu\text{m}$	$w_{0y}, \mu\text{m}$	z_{0x}, mm	z_{0y}, mm	z_{Rx}, mm	z_{Ry}, mm	M_x^2	M_y^2
1	1138,476	1158,581	-7770,750	-7768,830	6219,117	6428,686	1,034	1,036
2	1095,584	1116,741	-7271,854	-7248,556	5763,997	5971,814	1,034	1,036
3	1075,901	1079,638	-6798,777	-6794,450	5540,695	5607,481	1,037	1,032
4	1021,529	1043,598	-6321,789	-6301,356	5023,176	5221,384	1,031	1,035
5	978,616	984,815	-5854,432	-5841,749	4625,742	4665,009	1,028	1,032
6	941,674	948,745	-5424,185	-5406,262	4288,485	4344,248	1,026	1,028
7	901,109	902,466	-5011,260	-4996,214	3936,906	3939,938	1,024	1,026
8	858,785	862,696	-4616,973	-4583,064	3576,257	3590,168	1,023	1,029
9	832,120	835,268	-4239,672	-4217,493	3360,733	3367,000	1,023	1,028
10	786,072	791,088	-3869,298	-3848,148	3003,520	3024,209	1,021	1,027
11	752,260	758,454	-3516,998	-3490,219	2740,844	2782,159	1,025	1,026
12	714,340	721,214	-3172,345	-3171,569	2478,187	2508,592	1,022	1,029
13	675,822	675,490	-2856,092	-2841,819	2224,565	2220,405	1,019	1,020
14	639,766	639,754	-2541,157	-2537,156	1990,040	1974,428	1,021	1,029
15	601,974	600,809	-2266,211	-2245,261	1770,464	1741,780	1,016	1,029
16	558,499	566,84	-2006,827	-1968,888	1520,496	1545,818	1,018	1,032
17	524,455	528,771	-1741,053	-1708,968	1336,741	1343,992	1,021	1,032
18	484,473	491,906	-1515,849	-1484,956	1134,117	1167,479	1,027	1,029
19	449,654	460,796	-1297,106	-1279,392	980,413	1025,318	1,024	1,028
20	414,547	427,972	-1103,818	-1072,297	827,007	882,786	1,031	1,030
21	377,869	394,551	-915,242	-917,618	687,244	744,228	1,031	1,038

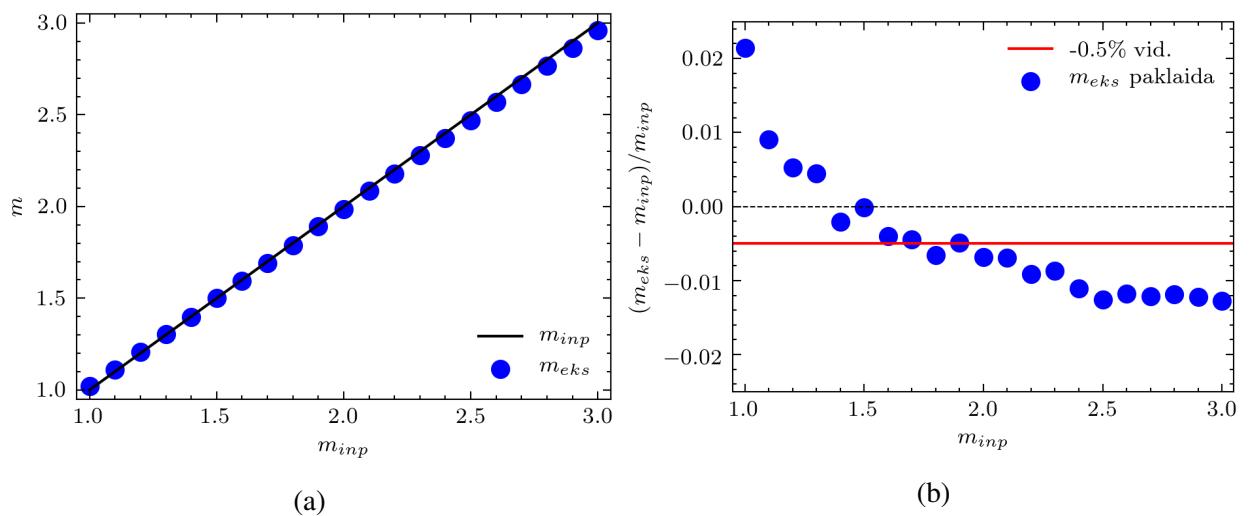
– kartais į gerą pusę, o kartais į blogą, jei siekiama tobulo Gauso pluošto. Labiausiai pluoštas suprastėjo 1-2 eilutėse, čia M^2 padidėjo 0,67%. Daugiausiai pagerėjo 13 eilutėje, čia M^2 sumažėjo 0,83%. 19-oje eilutėje M^2 liko nepakitęs.

Skėsties matavimo rezultatai x ir y ašyse pateikti 19a pav., čia kiekvienos ašies skėsties kreivė yra nupiešta prie atitinkamo neuroninio tinklo skėsties įvesties parametro θ_{inp} . Buvo tikimasi gauti pateiktą juodą kreivę. Matoma, kad abiejose matavimo ašyse skėstis yra didesnė negu buvo tikėtasi. Skėsties vertės atskirose ašyse yra labai artimos viena kitai. Skirtumas matomas prie didesnių skėsties verčių, kurios atitinka neuroninio tinklo įvesties didinimo parametrus $m_{inp} \in [1, 1,4]$. Tai dar kartą patvirtina, kad prie mažų didinimų išmatuotas lazerio pluoštas yra labiausiai asimetriškas, nes atliekant eksperimentą pagal 43 sąryšį sąsmauka priklauso nuo išmatuotos skėsties. Kai x ir y ašys yra suvidurkintos, išmatuotų skėsties verčių procentinis skirtumas nuo tikėtinų skėsties verčių prie atitinkamų didinimų (m_{inp}) pateiktas 19b pav. Matoma, kad skėsties matavimo paklaida visais atvejais yra panaši ir vidutiniškai skėstis yra 10,3% didesnė. Mažiausia paklaida yra $m_{inp} = 1$ atveju – 8,9%, o kai $m_{inp} = 2,3$ paklaida yra didžiausia – 11,2%. Viena iš priežasčių, kodėl galėjo atsirasti šis nesutapimas, yra judančių lęšių pozicijų tikslumas. Nors naudojant lazerio pluošto plėstuva, lęšių pozicijos gali būti keičiamos 1 μm tikslumu, tai nereiškia, kad lęšių $L1$ ir $L2$ atskaitos sistema yra parinkta visiškai teisingai. Iš 1.2 sk. žinoma, kad išlaikant atstumą tarp lęšių $L1$ ir $L2$, galima padidinti arba sumažinti skėstį, atskaitos sistemą pastumiant į kurią nors pusę. Tokiu metodu būtų



19 pav. Eksperimentiniai He-Ne lazerio skėsties matavimai: a) skėsties (θ) priklausomybė nuo neuroninio tinklo skėsties įvesties parametro θ_{inp} . Kreivė θ_{inp} yra idealus atvejis, o θ_x ir θ_y kreivės yra gautos eksperimentiniu būdu atitinkamai x ir y ašyse kurios yra statmenos optinei ašiai z , b) procentinė skėsties, suvidurkintos x , y ašyse $((\theta_x + \theta_y)/2)$, matavimo paklaida nuo skėsties įvesties parametro θ_{inp} , prie atitinkamų įvesties didinimo parametru m_{inp} .

galima sumažinti skėsties paklaidas.



20 pav. Eksperimento rezultatų palyginimas su teoriniu modeliu: a) atvaizduojami gauti didinimo rezultatai (m_{eks}) kartu su tikėtiniais (m_{inp}) pagal teorinį modelį, b) atvaizduojama eksperimento ir teorijos procentinė paklaida.

Panaudojus 4 lentelės rezultatus ir 2 sąryšį, buvo apskaičiuota, kokio dydžio yra lazerio spindulys ant pluošto plėstuvo lęšio $L3$ dešiniojo paviršiaus. Žinant lazerio pluošto dydį šioje vietoje galima apskaičiuoti, koks yra jo didinimas už optinės sistemos (6 pav.). Gauti eksperimentinio didinimo (m_{eks}) rezultatai atvaizduoti 20a pav., čia jie palyginami su neuroninio tinklo didinimo parametrais – m_{inp} ir yra matomas geras sutapimas. Procentinė paklaida atvaizduota 20b pav. Vidutinė procentinė didinimų paklaida yra $-0,5\%$, reiškia, daugiau pozicijų yra prognozuojamos mažesnės, tai yra matoma ir grafike. Kai $m_{inp} = 1,5$, paklaida yra mažiausia – $-0,015\%$. Didžiausia paklaida yra, kai $m_{inp} = 1$, čia m_{eks} yra $2,14\%$ didesnis už teorinę vertę. Šis skirtumas taip pat gali atsirasti

dėl lęšių $L1$ ir $L2$ atskaitos sistemos netikslumų. Paklaida nėra didelė, nes lazerio pluošto dydis nėra toks jautrus lęšių pozicijų paklaidoms. Verta pastebėti, kad didinimo rezultatai skyla į dvi dalis ir norint juos pasiekti labai tikslūs būtų galima atskirti didelių ir mažų didinimų atvejus.

Rezultatų apibendrinimui yra pateikta 5 lentelė, kurioje yra pateikti neuroninio tinklo tyrimui naudoti įvesties parametrai m_{inp} ir θ_{inp} . Taip pat atitinkamai gauti eksperimentiniai rezultatai m_{eks} ir θ_{eks} . Lentelėje yra pateikti santykiniai eksperimento ir įvesties parametrų dydžiai. Matoma, kad didinimo parametrų santykis visose lęšių pozicijose yra panašus ir artimas vienetui. Skėsties parametrų santykis taip pat visose pozicijose yra panašus, bet didesnis už vienetą. Šie rezultatai reiškia, kad yra gaunamos siekiamos lazerio pluošto parametrų pasikeitimo tendencijos.

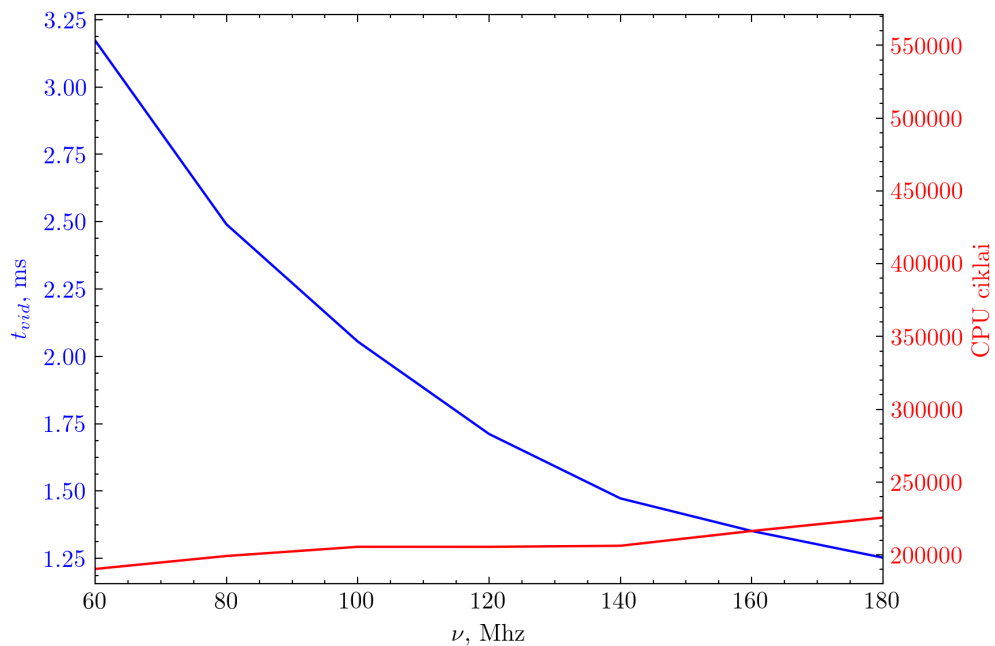
5 lentelė. Tikėtinų (didinimas - m_{inp} , skėstis - θ_{inp}) ir išmatuotų (m_{eks} , θ_{eks}) He-Ne lazerio parametrų rezultatų palyginimas, kai pluošto plėstuvo optinės sistemos lęšiai $L1$ ir $L2$ yra 3 lentelėje pateiktose pozicijose.

Nr.	$m_{inp}, \mu\text{m}$	m_{eks}	$m_{eks} \setminus m_{inp}$	$\theta_{inp}, \text{mrad}$	$\theta_{eks}, \text{mrad}$	$\theta_{eks} \setminus \theta_{inp}$
1	3,0	2,96	0,99	0,165	0,182	1,10
2	2,9	2,86	0,99	0,171	0,189	1,11
3	2,8	2,77	0,99	0,177	0,193	1,09
4	2,7	2,67	0,99	0,184	0,202	1,10
5	2,6	2,57	0,99	0,191	0,211	1,10
6	2,5	2,47	0,99	0,198	0,219	1,11
7	2,4	2,37	0,99	0,207	0,229	1,11
8	2,3	2,28	0,99	0,216	0,240	1,11
9	2,2	2,18	0,99	0,225	0,248	1,10
10	2,1	2,09	1,00	0,236	0,262	1,11
11	2,0	1,99	1,00	0,248	0,274	1,10
12	1,9	1,89	0,99	0,261	0,288	1,10
13	1,8	1,79	0,99	0,276	0,304	1,10
14	1,7	1,69	0,99	0,292	0,323	1,11
15	1,6	1,59	0,99	0,310	0,343	1,11
16	1,5	1,50	1,00	0,331	0,367	1,11
17	1,4	1,40	1,00	0,354	0,393	1,11
18	1,3	1,31	1,01	0,382	0,424	1,11
19	1,2	1,21	1,01	0,413	0,454	1,10
20	1,1	1,11	1,01	0,451	0,493	1,09
21	1,0	1,02	1,02	0,496	0,540	1,09

6.4 Dirbtinio neuroninio tinklo veikimas mikrovaldiklyje

Įrašius konvertuotą į C kodą neuroninį tinklą, kurio $\sigma^2 = 2,49 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$, į NUCLEO-F446RE prototipų kūrimo plokštę buvo nustatyta, kad yra sunaudojama 13,2% (67,59 KB) visos FLASH atminties. Atliekant išvesties verčių skaičiavimą nustatyta, kad naudojama 0,6% (768 baitai) visos SRAM atminties. Patikrinus, kaip skiriasi C kodo gaunamos išvesties vertės nuo $Keras$ modelio verčių, nustatyta, kad L2R paklaida yra $1,38 \times 10^{-7}$. Pagal STMicroelectronics, jei L2R vertė yra $< 0,01$, laikoma, kad išvesties verčių sutapimas yra geras. Šiuo atveju galima teigti, kad sutapimas yra labai geras.

Neuroninio tinklo skaičiavimo spartos STM32F446RE mikrovaldiklyje priklausomybė nuo jo procesoriaus taktinio dažnio ν pateikta 21 pav., čia t_{vid} yra vidutinis laiko tarpas, kurį užtrunka mikrovaldiklis apskaičiuoti neuroninio tinklo išvesties vertes. CPU ciklai parodo, kiek vidutiniškai praėjo procesoriaus ciklų. Padidinus dažnį nuo 60 MHz iki 180 MHz, t_{vid} pakinta nuo 3,17 ms iki 1,25 ms ir šis pokytis nėra tiesinis. Tuo tarpu, CPU ciklų skaičius pakinta nuo 190 320 iki 225 540. Nuo 100 MHz iki 140 MHz CPU ciklų skaičius beveik nepakito, todėl ir t_{vid} šiame intervale kito praktiškai tiesiškai.



21 pav. He-Ne lazeriui skirto neuroninio tinklo išvesties parametrų skaičiavimo vidutinės spartos t_{vid} priklausomybė nuo STM32F446RE mikrovaldiklio procesoriaus taktinio dažnio ν . CPU ciklai rodo kiek, vidutiniškai reikia procesoriaus ciklų apskaičiuoti išvesties vertes. Vertės gautos kiekvienam dažniui vidurkinant 16 matavimų.

Nustačius 180 MHz procesoriaus dažnį buvo išmatuota, kiek kiekviename neuroninio tinklo sluoksnyje, mikrovaldiklis užtrunka laiko atlikti *net* (15) sumos ir neurono aktyvacijos (39) skaičiavimus. Rezultatai pateikti 6 lentelėje, čia pirmas vidinis sluoksnis reiškia, kad tai yra sluoksnis, einantis po įvesties sluoksnio. Greičiausiai yra apskaičiuojamas išvesties sluoksnis, o lėčiausiai ant-ras vidinis sluoksnis. Šie sluoksniai turi atitinkamai 2 ir 128 neuronus. Yra du vidiniai sluoksniai, turintys po 64 neuronus, jų aktyvacijos laikai yra beveik tokie pat, bet *net* skaičiavimo trukmė stipriai skiriasi. Aktyvacijos laikų sutapimas yra dėl to, kad skaičiavimo trukmė priklauso tik nuo *net* vertės ir neuronų skaičiaus sluoksnyje. Skirtumas tarp *net* skaičiavimo atsiranda, nes *net* sumos ilgis priklauso nuo prieš tai buvusio sluoksnio neuronų skaičiaus. Prieš pirmą vidinį sluoksnį yra įvesties sluoksnis, kuris turi du neuronus, o prieš trečią vidinį sluoksnį yra sluoksnis, turintis 128 neuronus, todėl trečiojo vidinio sluoksnio skaičiavimo trukmė yra ilgesnė už antrojo.

Atlikus neuroninio tinklo validavimą mikrovaldiklyje galima teigti, kad neuroninis tinklas, kurio $\sigma^2 = 2,49 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$, yra tinkamas naudojimui STM32F446RE mikrovaldiklyje. Neuroninis tinklas su tokia struktūra sunaudoja mažą dalį FLASH ir SRAM atminties, dėl ko neapriboja mikrovaldiklio tik neuroninio tinklo skaičiavimu. Išvesties verčių skaičiavimo trukmė yra 1–3 ms, o toks

6 lentelė. Kiekvieno neuroninio tinklo sluoksnio *net* sumos ir aktyvacijos skaičiavimo laikai *STM32F446RE* mikrovaldiklyje, kai taktinis dažnis 180 MHz.

Sluoksnis	Neurono procesas	Neuronų sk.	<i>t</i> , ms
Vidinis 1	<i>net</i>	64	0,022
Vidinis 1	Aktyvacija	64	0,104
Vidinis 2	<i>net</i>	128	0,380
Vidinis 2	Aktyvacija	128	0,202
Vidinis 3	<i>net</i>	64	0,365
Vidinis 3	Aktyvacija	64	0,101
Išvesties	<i>net</i>	2	0,010
Išvesties	Aktyvacija	2	0,009

laiko tarpas realaus laiko sistemoje nėra didelis. Ilgiau užtrunka nusiųsti užklausą mikrovaldikliui ar gauti atsakymą.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Sukurtas ir apmokytas dirbtinis neuroninis tinklas (DNT), kuris leidžia $<40 \mu\text{m}$ tikslumu prognozuoti lazerio pluošto plėstuvo lęšių pozicijas, kai skėsties ir didinimo parametrai atitinka optinį invariantą.
2. Atlikus eksperimentinius pluošto plėstuvo matavimus, kai jo lęšiai yra DNT pateiktose pozicijose, nustatyta, kad didinimo parametras yra valdomas $\sim 0,5 \%$ tikslumu, o skėsties parametras įgyja pastovią $\sim 10 \%$ dydžio paklaidą, kurią įmanoma kompensuoti nekeičiant didinimo.
3. Mikrovaldiklyje įrašyto DNT veikimui reikalingi skaičiavimai naudoja tik kelis procentus valdiklio atminties, neturi įtakos tinklo rezultatų paklaidoms (papildoma paklaida tesiekia $\sim 10^{-7}$) ir atliekami per 1–3 ms, kas nesukelia trikdžių plėstuvo valdymui realiu laiku.
4. Dirbtinis neuroninis tinklas yra tinkamas ir efektyvus būdas motorizuoto pluošto plėstuvo lęšių pozicijų valdymui.

Literatūra

- [1] Liupševičius, D. (2020), *Lazerio pluošto plėstuvo lęšių pozicijų optimizavimas automatiniam valdymui: Mokslo tiriamasis darbas III*. Vilnius: Vilniaus universitetas.
- [2] F. Chollet *et al.*, “Keras.” <https://keras.io>, 2015. Tikrinta: 2020-05-26.
- [3] “Compact motorised laser beam expander MEX.” <https://www.optogama.com/>. Tikrinta: 2020-05-26.
- [4] M. Csele, *Fundamentals of light sources and lasers*. John Wiley & Sons, 2011.
- [5] A. Yariv, *Quantum Electronics*. Wiley, 1989.
- [6] H. Kogelnik, On the Propagation of Gaussian Beams of Light Through Lenslike Media Including those with a Loss or Gain Variation, *Applied Optics*, 1965, **4**, 1562.
- [7] T. Munakata, *Fundamentals of the New Artificial Intelligence: Neural, Evolutionary, Fuzzy and More (Texts in Computer Science)*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2nd ed., 2008.
- [8] D.-A. Clevert, T. Unterthiner, S. Hochreiter, Fast and Accurate Deep Network Learning by Exponential Linear Units (ELUs), 2015.
- [9] D. P. Kingma, J. Ba, Adam: A method for stochastic optimization, *arXiv preprint arXiv:1412.6980*, 2014.
- [10] J. Duchi, E. Hazan, Y. Singer, Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization, *Journal of Machine Learning Research*, 2011, **12**, 2121–2159.
- [11] T. Tieleman, G. Hinton, Lecture 6.5 - rmsprop: Divide the gradient by a running average of its recent magnitude, 2012.
- [12] A. Meurer, C. P. Smith, M. Paprocki *et al.*, SymPy: symbolic computing in Python, *PeerJ Computer Science*, Jan. 2017, **3**, e103.
- [13] G. Klambauer, T. Unterthiner, A. Mayr, S. Hochreiter, Self-normalizing neural networks, *CoRR*, 2017, **abs/1706.02515**.
- [14] “NUCLEO-F446RE Development Board.” <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f446re.html#overview>. Tikrinta: 2020-05-28.
- [15] “BeamSquared-A.” <https://www.ophiropt.com/laser--measurement/beam-profilers/products/M2-Beam-Propagation-Analysis/BeamSquared/A>. Tikrinta: 2020-05-26.
- [16] “SP300 Beam Profiling camera.” <https://www.ophiropt.com/laser--measurement/beam-profilers/products/Beam-Profiling/Camera-Profiling-with-BeamGage/SP300>. Tikrinta: 2020-05-26.
- [17] Ophir Spiricon, *BeamSquared User Guide*.

Automatic Control of Laser Beam Expander Settings Using Artificial Neural Network

Donatas Liupševičius

Summary

Laser beam expanders are often crucial elements of modern laser systems. They are used in research and are constituent elements in industry applications from medical treatment to laser micromachining. It is convenient to have the laser beam expander, which allows adjusting laser beam divergence and magnification. Also, there is an advantage if laser beam expander can be easily integrated into the automated modern laser system and has lenses that are motorized and can be controlled using a computer. The problem is to find a method on how to precisely determine lenses positions of laser beam expander for desired beam parameters.

In this work, motorised laser beam expander [3] is used, which allows us to precisely set lenses positions. The method to find optimal positions of laser beam expander lenses for the desired magnification and divergence parameters is developed using an artificial neural network, which later is verified experimentally.

The main **goal** of this work is to show that a motorised beam expander with an integrated artificial neural network can effectively and precisely control He-Ne laser beam size and divergence parameters. To reach this goal, *SymPy* [12] is used to simulate synthetic data of He-Ne laser beams passed through the investigated optical system, shown in Fig. 6. After acquiring a synthetic data neural network with appropriate architecture is created and trained. Then, beam propagation analyzer BeamSquared [15] is used to verify experimentally if correct He-Ne laser beam magnification and divergence values are obtained after the He-Ne beam passes through the beam expander optical system. Lastly, the performance and validation tests for the neural network in the *STM32F446RE* microcontroller are performed.

A simulated optical system for the He-Ne laser beam expander was modelled using an *ABCD* matrix analysis. The mean squared error of $2,49 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ after training a neural network on the simulated data for $4,2 \cdot 10^4$ epochs was reached. Average error from expected value for magnification of $-0,5\%$ and divergence of $10,3\%$ was obtained. The neural network memory usage of $13,2\%$ for FLASH and $0,6\%$ for SRAM in *STM32F446RE* microcontroller was determined. Average time of $1,25 \text{ ms}$ for neural network output calculation at 180 MHz microprocessor frequency was measured.

Based on the results, it was concluded that motorised beam expander with an integrated artificial neural network can effectively and precisely determine its lenses positions for the requested parameters for He-Ne laser.