

CONTRIBUȚII LA STUDIUL SCANERELOR LASER CU PRISME RISLEY PENTRU TOMOGRAFIA DE COERENȚĂ OPTICĂ, CU APLICAȚII ÎN MĂSURĂTORILE INDUSTRIALE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul Inginerie mecanică
de către

Ing. DÎMB ALEXANDRU LUCIAN

Președintele comisiei:	prof.univ.dr.ing. LELEA DORIN
Conducător științific:	prof.univ.dr.ing. DUMA VIRGIL-FLORIN
Referenți științifici:	prof.univ.dr.ing. TARNIȚĂ DANIELA
	prof.univ.dr.ing. GRUDESCU CORINA
	prof.univ.dr.ing. GUINĂ MIRCEA

Ziua susținerii tezei: 27 OCTOMBRIE 2023

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|---|
| 1. Automatică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 2. Chimie | 12. Ingineria Sistemelor |
| 3. Energetică | 13. Inginerie Energetică |
| 4. Inginerie Chimică | 14. Calculatoare și Tehnologia Informației |
| 5. Inginerie Civilă | 15. Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | 16. Inginerie și Management |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 17. Arhitectură |
| 8. Inginerie Industrială | 18. Inginerie Civilă și Instalații |
| 9. Inginerie mecanică | 19. Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale |
| 10. Știința Calculatoarelor | |

Universitatea Politehnica Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul Școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2023

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300223 Timișoara, Bd. Vasile Pârvan 2B
Tel./fax 0256 404677
e-mail: editura@upt.ro

Cuvânt înainte

Această teză de doctorat reprezintă rezultatul unor ani de muncă asiduă, cercetare intensivă și pasiune în domeniul meu de specializare. Prin această lucrare, am încercat să aduc o contribuție cât se poate de semnificativă la cunoașterea și înțelegerea domeniului, precum și să propun soluții inovatoare la problemele identificate. Această parte personală își propune să ofere o perspectivă generală asupra obiectivelor, motivației și conținutului tezei.

Scopul principal al cercetării mele a fost de a investiga și de a înțelege prismele Risley, precum și integrarea și folosirea acestora în procesul de scanare laser, care constituie o provocare complexă și actuală în domeniul meu de specializare datorită numeroaselor aplicații. Prin intermediul studiului literaturii de specialitate și prin utilizarea unor metode și tehnici de simulare avansate, dar și prin experimente, am explorat diferite aspecte ale acestei teme, căutând să aduc o contribuție în înțelegerea sa și în identificarea de soluții eficiente de analiză și optimizare a acestor sisteme.

Pe parcursul realizării tezei, am beneficiat de sprijinul și îndrumarea unor persoane remarcabile, cărora le sunt profund recunoscător. În primul rând, doresc să îmi exprim gratitudinea față de profesorul meu coordonator, domnul Prof. Dr.-habil. Virgil-Florin Duma, pentru îndrumarea sa expertă, pentru ghidajul său valoros și pentru susținerea necondiționată acordată pe tot parcursul acestei cercetări. Fără îndrumarea și încurajarea sa constantă, acest proiect nu ar fi fost posibil.

De asemenea, doresc să adresez sincere mulțumiri colegilor și prietenilor mei, care mi-au oferit sprijinul lor constant și au împărtășit cu mine idei și perspective valoroase pe parcursul dezvoltării acestei teze. Contribuțiile lor au fost deosebite și au adus o nouă dimensiune cercetării mele.

Nu în ultimul rând, aș dori să mulțumesc familiei mele pentru susținerea necondiționată, încrederea și iubirea lor. Fără sprijinul lor constant și înțelegerea lor, nu aș fi putut realiza această teză.

Dedic această teză doctorat celei care a fost Wanda. Am avut privilegiul de a avea alături acest suflet special, care mi-a oferit sprijinul și încurajarea necesare pentru a face față dificultăților și pentru a-mi menține echilibrul mental. Eforturile și timpul acordate de către această suflet pentru a mă asculta, a înțelege provocările cu care m-am confruntat și a mă sprijini în procesul de vindecare au fost neprețuite.

Această teză de doctorat este rezultatul unei călătorii captivante și provocatoare. Prin aceasta, îmi propun să aduc o contribuție în domeniul meu de specializare și să deschid noi direcții de cercetare. Sper că rezultatele și concluziile prezentate în această lucrare vor stârni interesul și vor oferi o bază solidă pentru cercetări viitoare în acest domeniu.

În încheiere, aș dori să mulțumesc încă o dată tuturor celor implicați în realizarea acestei teze de doctorat. Sper că această lucrare va fi apreciată și că va aduce contribuții de interes în domeniul meu de specializare.

Timișoara, Octombrie 2023

DÎMB ALEXANDRU LUCIAN

DÎMB ALEXANDRU LUCIAN

Contribuții la studiul scannerelor laser cu prisme Risley pentru tomografia de coerență optică, cu aplicații în măsurătorile industriale

Teze de doctorat ale UPT, Seria X, Nr. YY, Editura Politehnica, 2023, 136 pagini, 67 figuri, 28 tabele.

ISSN:

ISBN:

Cuvinte cheie

prisme Risley; scanere optomecanice; scan patterns; program de proiectare mecanică; simulări; analiza multi-parametrică; scanare cu laser; simetrie; rugozitate; parametrii de rugozitate, tomografia de coerență optică, OCT, metrologie.

Rezumat

Cercetarea prezentată în această teză de doctorat se concentrează pe două direcții distincte.

În prima parte, studiul multi-parametric al scan pattern-urilor laser al prismelor Risley rotative a implicat analiza independentă a fiecărui parametru al sistemului de scanare cu o pereche de prisme Risley. Prin simulări grafice și corelații analitice, s-a demonstrat acuratețea metodei de studiu a scan pattern-urilor. S-a realizat o analiză a formelor și dimensiunilor scan pattern-urilor, identificând reguli esențiale pentru proiectarea optimă a scannerelor cu prisme Risley. Apoi s-a constatat că parametrul M al lui Marshall (raportul vitezelor unghiulare ale prismelor rotative) este cheia care determină simetriile scan pattern-urilor, în timp ce alți parametri nu au influență asupra simetriei, ci a dimensiunilor acestora. O nouă noțiune, structurile de simetrie, a fost introdusă, facilitând proiectarea scannerelor cu prisme Risley prin abordarea grafică mai rapidă a metodei simetriei scan pattern-urilor. Nu în ultimul rând, s-au dezvoltat modele de scanare secundare ale prismelor Risley prin simulări grafice pentru mărirea gradului de umplere al câmpului de scanare.

A doua parte a tezei a abordat tomografia de coerență optică / Optical Coherence Tomography (OCT), tehnică imagistică interferențială în care scanare laser joacă un rol esențial, pentru determinarea și analiza rugozității suprafețelor metalice. Parametrii rugozității au fost determinați cu ajutorul OCT și analizați metrologic, obținându-se rezultate care concordă în anumite limite cu parametrii cunoscuți (determinați însă mecanic) ai calelor comerciale de rugozitate.

În concluzie, cercetarea a evidențiat importanța prismelor Risley în sistemele de scanare și a adus contribuții în dezvoltarea și optimizarea acestor dispozitive, precum și în utilizarea tomografiei de coerență optică (OCT) cu scanare laser pentru analiza rugozității suprafețelor metalice.

CUPRINS

LISTĂ DE FIGURI	7
LISTĂ DE TABELE	14
1. INTRODUCERE	16
1.1 Tipuri de scanere laser	17
1.2 Modalități de scanare.....	20
1.3 Aplicații ale scanerelor laser	22
2. TIPURI DE SCANERE CU PRISME RISLEY	25
2.1. Scaner cu perechi de prisme de rotație / dublete	25
2.2. Scaner cu trei prisme de rotație	26
2.3. Scaner cu o pereche de prisme oscilante	27
2.4. Combinație de prismă rotativă și oscilantă	27
2.5. Problema directă și inversă	28
2.6. Structura și obiectivele tezei de doctorat	30
Bibliografie	32
3. SCAN PATTERN-URI EXACTE ALE PRISMELOR RISLEY ROTATIVE OBȚINUTE CU METODA GRAFICĂ: ANALIZĂ MULTI-PARAMETRICĂ.....	34
3.1. Noțiuni generale	34
3.2 Scanere cu perechi de prisme Risley rotative.....	35
3.3 Rezultatele scan pattern-urilor și simulărilor: forme ale scan pattern-urilor .	39
3.4 Analiza multi-parametrică a deviațiilor unghiulare.....	45
3.5 Analiza dimensiunilor scan pattern-urilor: reguli de bază pentru proiectarea scan pattern-urilor, deci a scanerelor	49
3.5.1 Câmpul de scanare al sistemului cu o pereche de prisme Risley rotative ..	49
3.5.2 Zona oarbă (internă) a scan pattern-urilor	51
3.6 Concluzii.....	51
Bibliografie	52
4. SIMETRII ALE SCAN PATTERN-URILOR ALE SCANERELOR LASER CU PRISME RISLEY ROTATIVE	56
4.1. Noțiuni generale	56
4.3. Metoda grafică pentru a studia simetria scan pattern-urilor.....	58
4.4. Rezultate: scan pattern-uri pentru diferiți parametri ai scanerului	60
4.4.1 Scan pattern-uri generate pentru valori întregi ale lui M	60
4.4.2 Scan pattern-uri generate pentru valori fracționale ale lui M.....	65
4.4.3 Scan pattern-uri generate pentru două valori particulare ale lui M.....	66
4.4.4 Scan pattern-uri generate pentru diferite valori ale lui k	67
4.4.5 Scan pattern-uri generate pentru diferite valori ale unghiului prisme $\theta = \theta_1 = \theta_2$	68
4.4.6 Scan pattern-uri generate pentru diferite valori ale indicelui de refracție $n = n_1 = n_2$	69
4.5 Analiza multi-parametrică a scan pattern-urilor	70
4.5.1 Analiza cu privire la valorile întregi ale lui M	70
4.5.2 Analiza cu privire la valorile fracționale ale lui M	74
4.5.2 Analiza cu privire la alți parametri ai scanerului	75
4.6 Aspecte geometrice legate de simetriile scan pattern-urilor.....	75
4.7 Concluzii.....	80

Bibliografie	80
5. SCAN PATTERN-URI SECUNDARE ALE UNEI PERECHI DE PRISME RISLEY DE ROTAȚIE	84
5.1 Noțiuni generale	84
5.2. Scanner cu o pereche de prisme Risley rotative utilizat. Metodă grafică.....	84
5.3 Simulări	88
5.4. Concluzii.....	97
Bibliografie	97
6. STUDIUL EXPERIMENTAL	98
6.1 Stand experimental	98
6.2 Validări experimentale pentru capitolul 3	100
6.3 Validări experimentale pentru capitolul 4	102
6.4 Validări experimentale pentru capitolul 5	103
Bibliografie	113
7. APLICAȚIILE TOMOGRAFIEI DE COERENȚĂ OPTICĂ ÎN EVALUAREA RUGOZITĂȚII SUPRAFEȚELOR MATERIALELOR METALICE	114
7.1. Noțiuni introductive	114
7.2. Metodă experimentală	117
7.3. Metodă tomografiei de coerență optică	120
7.4. Metode utilizate pentru determinarea parametrilor de rugozitate Rz și Ra, cu ajutorul B-scan-urilor.....	120
7.5. Determinarea Ra și Rz folosind diferite valori de prag ale sistemului OCT.	122
7.6. Determinarea Rz și Ra pentru calele comerciale de rugozitate cu Rz 20 μm și Ra 3,6 μm folosind pragul 245	123
7.7. Determinarea Rz și Ra pentru calele comerciale de rugozitate cu Rz 40 μm și Ra 9,8 μm folosind pragul 180	125
7.8. Determinarea Rz și Ra pentru calele comerciale de rugozitate cu Rz 80 μm și Ra 18 μm folosind pragul 180	126
7.9. Discuția rezultatelor	129
7.10 Concluzie	130
Bibliografie	131
8. CONCLUZII	134
ANEXA 1 – LISTA CU PUBLICAȚII	137
ANEXA 2 – ECUAȚIILE PRISMEI OPTICE	140
Acknowledgments	141

LISTĂ DE FIGURI

Capitolul 1

- Figura 1.1 Scaner laser cu cap poligonal rotativ - Schiță proprie după [1]
Figura 1.2 Sistem de scanare laser galvoscaner (GS) 2D cu două axe perpendiculare (GS X pentru scanarea pe axa rapidă și GS Y pentru scanarea pe axa lentă) - Schiță proprie după [1]
Figura 1.3 Scaner laser cu o pereche de prisme Risley rotative - Schiță proprie după [28, 33, 34]
Figura 1.4 Exemple de scan pattern-uri pentru: a) scanarea raster, b) scanarea în spirală, c) scanarea Lissajous, d) scanarea cu prisme Risley.

Capitolul 2

- Figura 2.1 Scaner cu o pereche de prisme de rotație – Simulare proprie făcută în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța) după [1,2]
Figura 2.2 Scaner cu o pereche de dublete de rotație – Simulare proprie făcută în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța) după [3]
Figura 2.3 Scaner cu trei prisme de rotație – Simulare proprie făcută în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța) după [4]
Figura 2.4 Scaner cu o pereche de prisme oscilante – Simulare proprie făcută în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța) după [5,6]
Figura 2.5 Scaner format din o prismă rotativă și oscilantă – Simulare proprie făcută în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța) după [7]

Capitolul 3

- Figura 3.1 (a) Pereche de prisme Risley rotative, modelate cu un program de proiectare mecanică disponibil comercial, CATIA V5R20. (b,c) Două fascicule de lumină generate cu CATIA V5R20 pentru simularea scanării cu o pereche de prisme Risley rotative. Scan pattern-urile obținute pentru prismele care se rotesc în aceeași direcție sunt prezentate în albastru, în timp ce scan pattern-urile obținute pentru prismele care se rotesc în direcții opuse sunt prezentate în roșu.
Figura 3.2 Cele patru configurații posibile ale unui scaner laser cu o pereche de prisme Risley rotative: (a) ab-ab; (b) ab-ba; (c) ba-ba; (d) ba-ab. Notații: „a” denotă dioptrul perpendicular pe axa optică și „b” dioptrul înclinat. Fiecare configurație este prezentată în două poziții caracteristice extreme ale dispozitivului, și anume cu un unghi relativ de rotație între cele două prisme $\varphi = 0$ (coloana 1) și $\varphi = \pi$ (rad) (coloana 2).

- Figura 3.3 Cercuri obținute în planul scanat când una dintre prisme este fixă (poziționată în patru poziții succesive, la 0° , 90° , 180° și 270°) iar cealaltă este mobilă. Cele patru cercuri mai mari corespund situației în care prisma 1 (poziționat mai departe de ecran decât prisma 2) este mobilă. Valorile de pe axe sunt în milimetri. Primul număr reprezintă unghiul de rotație al prismei 1 și al doilea L pe cel al Prismei 2, de exemplu $0:0...360$ înseamnă că prisma 1 este fixă (în poziția 0°) și că Prisma 2 se rotește de la 0 la 360° ; $0...360:90$ înseamnă că Prisma 1 efectuează o rotație completă în timp ce Prisma 2 este fixată la 90° față de poziția sa $\varphi=0$) din figura 3.2(d1).
- Figura 3.4 Studiul scan pattern-urilor produse de o pereche de prisme Risley rotative (adică, configurația ba-ab din Figura 3.2d) pentru $L = 1$ m, $e = 25$ mm și pentru: (a) $|M| = 2$; (b) $|M| = 4$; (c) $|M| = 6$; (d) $|M| = 8$. (1) Coloana din stânga, $M > 0$; (2) coloana din dreapta, $M < 0$. Cazul $k = 1$ a fost luat în considerare pentru prisme identice cu un unghi de deviere individual $D = (n-1)\theta = 2^\circ$. Valorile de pe axe sunt în milimetri.
- Figura 3.5 Studiul scan pattern-urilor produse de configurația ba-ab a prismelor Risley rotative (figura 3.2d), pentru $L = 1$ m, $e = 25$ mm și $|M| = 6$, cu: (a) $k = 1/2$; (b) $k = 2$; (c) $k = 3$; (d) $k = 5$. (1) Coloana din stânga, $M > 0$; (2) coloana din dreapta, $M < 0$. Valorile de pe axe sunt în milimetri.
- Figura 3.6 Figura 3.6. Studiul scan pattern-urilor produse de configurația ba-ab a prismelor Risley rotative (Figura 3.2d), pentru $L = 1$ m, și $|M| = 6$, cu: (a) $D = 2^\circ$, (b) $D = 4^\circ$ și (c) $D = 6^\circ$. (1) Coloana din stânga, $M > 0$; (2) coloana din dreapta, $M < 0$. Valorile de pe axe sunt în milimetri.
- Figura 3.7 Scan pattern-uri produse de configurația ba-ab a prismelor Risley (figura 3.2.d), pentru $k = 1$, $M = 6$ și (a) $L = 10$ m; (b) $L = 100$ m. Valorile de pe axe sunt în milimetri
- Figura 3.8 Comparatie între scan pattern-uri ale celor patru configurații de scanner prezentate în figura 3.2, pentru $|M| = 8$ și $k = 1$ (acesta din urmă obținut pentru $D_1 = D_2 = 10^\circ$). (a) Coloana din stânga, $M > 0$; (b) coloana din dreapta, $M < 0$. Valorile de pe axe sunt în milimetri.
- Figura 3.9 (a) Abaterile unghiulare maxime D_j^{max} , $j = a, b, c, d$ în funcție de unghiul θ al prismelor identice, prezentate în comparație cu cea aproximativă/liniarizată, D_{lin}^{max} , Ecuația (3.7); (b) eroarea absolută dintre abaterile unghiulare maxime și aproximarea lor liniară. A fost considerat un indice de refracție $n = 1,517$ pentru ambele prisme
- Figura 3.10 Abateri unghiulare maxime, D_j^{max} , $j = a, b, c, d$, în funcție de unghiul θ al prismelor identice pentru două valori ale indicelui de refracție: $n=1,517$ și $n'=1,7$. Fiecare configurație de scanner, (a-d) este luată în considerare separat, în timp ce deviațiile unghiulare exacte sunt comparate cu cea aproximativă/liniarizată pentru fiecare indice de refracție

Capitolul 4

- Figura 4.1 (a) Scanare laser cu o pereche de prisme Risley rotative - modelare cu metoda grafică dezvoltată în [40,41] folosind un program de proiectare mecanică disponibil comercial, CATIA V5R20. (b–e) Cele patru configurații posibile ale acestui tip de scanner, cu prismele optice orientate diferit cu dioptrul „a” (perpendicular pe axa optică) și dioptrul „b” (înclinată față de axa optică). Într-una din notațiile comune în domeniu, aceste patru configurații sunt denumite: (b) ab-ab; (c) ab-ba; (d) ba-ba; (e) ba-ab.
- Figura 4.2 Traieectoria fascicului laser (reduc la axa centrală) prin configurația ba-ab a unui scanner cu o pereche de prisme Risley de rotație pentru două poziții relative (extreme) ale prismelor, cu un unghi relativ de rotație de (a) 0 și a (b) π (rad) între ele — pentru care se obține unghiurile de abateri maxime și minime D_{max} și respectiv, D_{min} .
- Figura 4.3 Mănunchiuri de raze simulate cu CATIA V5R20 pentru scannerul laser cu prisme Risley în configurația ba-ab, pentru: (a) $M = 3$ și (b) $M = -3$. O convenție de culoare este utilizată pe tot parcursul acestui studiu, ca în [40,41]: albastrul corespunde scan pattern-urilor obținute de prisme care se rotesc în aceeași direcție (adică, pentru $M > 0$), în timp ce roșu corespunde scan pattern-urilor obținute de prisme care roțiți în direcții opuse (adică pentru $M < 0$).
- Figura 4.4 Simetrie în scan pattern-ul simulat pentru $M = 2$
- Figura 4.5 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = -2$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 4.5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $2\pi/3$; (b) de la $-\pi/3$ la $\pi/3$; (c) de la 0 la $\pi/3$.
- Figura 4.6 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = 3$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la π ; (b) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (c) de la 0 la $\pi/2$
- Figura 4.7 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = -3$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $\pi/2$; (b) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (c) de la 0 la π ; (d) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (e) de la 0 la $\pi/4$.
- Figura 4.8 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = 4$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $2\pi/3$; (b) de la $-\pi/3$ la $\pi/3$; (c) de la 0 la π ; (d) de la 0 la $\pi/3$.
- Figura 4.9 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = -4$, evidențiind structurile de simetrie definite în dubcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $2\pi/5$; (b) de la $-\pi/5$ la $\pi/5$; (c) de la 0 la π ; (d) de la 0 la $\pi/5$.
- Figura 4.10 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = 5$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $\pi/2$; (b) de la $-\pi/4$ la $\pi/4$; (c) de la 0 la π ; (d) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (e) de la 0 la $\pi/4$.

- Figura 4.11 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = -5$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $\pi/3$; (b) de la $-\pi/6$ la $\pi/6$; (c) de la 0 la π ; (d) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (e) de la $-\pi/6$ la 0.
- Figura 4.12 Scan pattern-urile simulate pentru (a) $M = 1,6$ și (b) $M = 1,8$, cu (1) întregul scan pattern-ul și (2) una dintre structurile de simetrie în formă de spirală extrase din scan pattern.
- Figura 4.13 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru (a) $M = \infty$ (adică pentru $\omega_1 = 0$) și pentru (b) $M = 0$ (adică pentru $\omega_2 = 0$). Scan pattern-urile care cresc succesiv din fiecare figură corespund valorilor crescătoare succesive ale abaterilor unghiulare (egale) prismei $D_1 = D_2 = 2^\circ$ (scan pattern-uri violet); 4° (scan pattern-uri portocalii); 6° (scan pattern-uri verzi); 10° (scan pattern-uri albastre).
- Figura 4.14 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru (1) $M = 6$ și (2) $M = -6$, pentru două valori ale parametrului $k = \theta_2/\theta_1 = D_2/D_1$: (a) $k = 5$ (pentru $D_2 = 10^\circ$ și $D_1 = 2^\circ$) și (b) $k = 1/5$ (pentru $D_2 = 2^\circ$ și $D_1 = 10^\circ$)
- Figura 4.15 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru (1) $M > 0$ și (2) $M < 0$, pentru două valori absolute ale acestui parametru: (a) $|M| = 3$ și (b) $|M| = 6$. Scan pattern-urile care cresc succesiv din fiecare figură corespund valorilor crescătoare succesive ale unghiurilor de deviere a prisme (egale) $D_1 = D_2 = 2^\circ$ (scan pattern albastru); 4° (scan pattern portocaliu); 6° (scan pattern gri); 10° (scan pattern galben).
- Figura 4.16 Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru (a) $M = 6$ și (b) $M = -6$, pentru trei valori crescătoare succesive ale indicelui de refracție (egal) al celor două prisme: $n = 1,517$, $n' = 1,7$ și $n'' = 1,9$. Scan pattern-urile corespunzătoare cresc succesiv: albastru pentru n , portocaliu pentru n' și verde pentru n'' .
- Figura 4.17 Extragerea din (a) scan pattern simulat pentru $M = 5$ (b) coordonatele polare $r(\varphi)$ și coordonatele carteziene (c1) $x(\varphi)$ și (c2) $y(\varphi)$ ale punctului curent P a scan pattern-ului (așa cum se arată în exemplul din figura 4.4).
- Figura 4.18 Extragerea din (a) scan pattern simulat pentru $M = -5$ (b) coordonatele polare $r(\varphi)$ și coordonatele carteziene (c1) $x(\varphi)$ și (c2) $y(\varphi)$ ale punctului curent P a scan pattern-ului
- Figura 4.19 Caracteristicile dimensionale ale scan pattern-urilor simulate generate de o pereche de prisme Risley de rotație, obținute pentru (a) $M = 5$ și (b) $M = -5$, evidențiate în tabelele 4.2, respective 4.3.

Capitolul 5

- Figura 5.1 (a) Simularea procesului de scanare efectuată cu o pereche de prisme Risley rotative - utilizând un program de proiectare mecanică disponibil comercial (CATIA V5R20). Fascicul de lumină generat pentru aceleași direcții de rotație ale celor două prisme Risley (b) și pentru direcții de rotație opuse ale celor două prisme (c). În întregul studiu, se utilizează următoarea convenție de culoare: scan pattern-urile obținute pentru prisme care se rotesc

- în aceeași direcție sunt prezentate în albastru, în timp ce scan pattern-urile care se rotesc în direcții opuse sunt prezentate în roșu.
- Figura 5.2 Scanner laser cu o pereche de prisme Risley rotative, configurație ab-ab: modele de scanare, (0) principal (Scan 0) și secundar (adică (1) Scan 1, (2) Scan 2 și (3) Scanare 3). Fiecare caz este prezentat în cele două poziții caracteristice extreme ale dispozitivului: cu un unghi relativ de rotație între cele două prisme $\varphi = 0$ (coloana 1) și $\varphi = \pi$ [rad] (coloana 2).
- Figura 5.3 Scan pattern principal (Scan 0, albastru) și secundare (Scan 1-portocaliu, Scan 2-verde și Scan 3-albastru, respectiv, în primele trei rânduri), produse de o pereche de prisme Risley în configurație ab-ab pentru $k = 0,5$, cu (a) $M = 4$ și (b) $M = -4$. Al patrulea rând sunt comparate toate scan pattern-urile
- Figura 5.4 Scan pattern principal (Scan 0, albastru) și secundare (Scan 1-portocaliu, Scan 2-verde și Scan 3-albastru, respectiv, în primele trei rânduri), produse de o pereche de prisme Risley în configurație ab-ab pentru $k = 1$, cu (a) $M = 4$ și (b) $M = -4$. Al patrulea rând sunt comparate toate scan pattern-urile
- Figura 5.5 Scan pattern principal (Scan 0, albastru) și secundare (Scan 1-portocaliu, Scan 2-verde și Scan 3-albastru, respectiv, în primele trei rânduri), produse de o pereche de prisme Risley în configurație ab-ab pentru $k = 2$, cu (a) $M = 4$ și (b) $M = -4$. Al patrulea rând sunt comparate toate scan pattern-urile
- Figura 5.6 Coordonatele x și y ale punctului laser în planul scanat pentru scan pattern principal (Scan 0, albastru) și secundare (Scan 1-portocaliu, Scan 2-verde și Scan 3-albastru), produse de o pereche de prisme Risley în configurație ab-ab pentru $k = 0,5$ (a), $k=1$ (b), $k=2$ (c) cu $M = 4$
- Figura 5.7 Coordonatele x și y ale punctului laser în planul scanat pentru scan pattern principal (Scan 0, albastru) și secundare (Scan 1-portocaliu, Scan 2-verde și Scan 3-albastru), produse de o pereche de prisme Risley în configurație ab-ab pentru $k = 0,5$ (a), $k=1$ (b), $k=2$ (c) cu $M = -4$
- Figura 5.8 Scan patterns produse de o pereche de prisme Risley în configurația ab-ab, într-o comparație pentru $k = 0,5$ (albastru), $k = 1$ (portocaliu) și $k = 2$ (verde), cu (a) $M = 4$ și (b) $M = -4$: (0) Scan 0 (principal) și secundar, (1) Scan 1, (2), Scan 2 și (3) Scan 3.
- Figura 5.9 Coordonatele x și y ale punctului laser în planul scanat, într-o comparație pentru $k = 0,5$ (albastru), $k = 1$ (portocaliu) și $k = 2$ (verde): (0) Scan 0 (principal) și secundar, (1) Scan 1, (2), Scan 2 și (3) Scan 3, pentru $M = 4$.
- Figura 5.10 Coordonatele x și y ale punctului laser în planul scanat, într-o comparație pentru $k = 0,5$ (albastru), $k = 1$ (portocaliu) și $k = 2$ (verde): (0) Scan 0 (principal) și secundar, (1) Scan 1, (2), Scan 2 și (3) Scan 3, pentru $M = -4$.

Capitolul 6

- Figura 6.1 a) prezentare explodată cu indicarea componentelor în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20; b) prezentare isometrică în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20; c) stand experimental manual în laboratorul de optomecatronică
- Figura 6.2 Studiu experimental al scan pattern-urilor obținute cu două prisme Risley rotative: (a) configurație construită cu componente Thorlabs disponibile comercial. Suprapuse, dar ușor rotite unul față de celălalt, scan pattern-uri simulate (albastru și roșu) și experimentale (negru), determinate pentru (b) $|M| = 4$, (c) $|M| = 8$, cu (1) $M > 0$ și (2) $M < 0$.
- Figura 6.3 Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental: (a) configurație construită cu componente Thorlabs - utilizate și în [4,5]. Suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru (1) $M > 0$ și în roșu pentru (2) $M < 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru (b) $|M| = 2$ și (c) $|M| = 6$.
- Figura 6.4 Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = 4$, $k = 0.5$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.
- Figura 6.5 Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = -4$, $k = 0.5$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.
- Figura 6.6 Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = 4$, $k = 1$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.
- Figura 6.7 Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = -4$, $k = 1$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.
- Figura 6.8 Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = 4$, $k = 2$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.
- Figura 6.9 Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = -4$, $k = 2$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.

Capitolul 7

- Figura 7.1 Sistemul SS-OCT: a) configurația sistemului SS-OCT din laboratorul de optomecatronică; b) schema de funcționare a sistemului SS-OCT.
- Figura 7.2 Cale comerciale de rugozitate cu valorile nominale ale parametrilor de rugozitate Rz 20, 40 și 80 μm și Ra 3.6, 9.8, 18 μm
- Figura 7.3 a) B-scan 250.1 b) Graficul profilului de rugozitate obținut în Excel
- Figura 7.4 a) B-scan 250.2 b) Graficul profilului de rugozitate obținut în Excel
- Figura 7.5 a) B-scan 250.3 b) Graficul profilului de rugozitate obținut în Excel
- Figura 7.6 a) B-scan 250.4 b) Graficul profilului de rugozitate obținut în Excel
- Figura 7.7 Grafice valorile parametrilor Rz și Ra pentru cala comercială de rugozitate cu Rz de 20 μm și Ra de 3,6 μm
- Figura 7.8 Grafice valorile parametrilor Rz și Ra pentru cala comercială de rugozitate cu Rz de 40 μm și Ra de 9,8 μm
- Figura 7.9 Grafice valorile parametrilor Rz și Ra pentru cala comercială de rugozitate cu Rz de 80 μm și Ra de 18 μm

Anexe

- Figura A1 Prisma optică. Notății: n , indice de refracție; θ , unghiul prisme. D reprezintă unghiul de deviere al prisme.

LISTĂ DE TABELE

Capitolul 3

- Tabel 3.1 Ecuatiile celor patru posibile configurații cu o pereche de prisme Risley rotative (figura 3.2) — pentru cazurile abaterilor unghiulare maxime (1) și minime (2).
- Tabel 3.2 Unghiul prismei limită $\theta_j^{lin}(rad)$, $j=a,b,c,d$ în ceea ce privește indicele de refracție (cazul prismelor identice, adică $k = 1$).

Capitolul 4

- Tabelul 4.1 Studiul simetriilor scan pattern-urilor privind raportul M
- Tabelul 4.2 Parametrii care definesc simetriile scan pattern-urilor — obținute cu metoda grafică din exemplul din Figura 19, pentru $M = 5$.
- Tabelul 4.3 Parametrii care definesc simetriile scan pattern-urilor — obținute cu metoda grafică din exemplul din Figura 19, pentru $M = -5$.

Capitolul 6

- Tabelul 6.1 Listă cu componentele disponibile comerciale pentru standul experimental manual propus
- Tabelul 6.2 Analiza erorilor razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus cea simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.2.
- Tabelul 6.3 Raza simulată (R) versus experimentală (Re) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor - așa cum a fost determinată în investigația prezentată în figura 6.3
- Tabelul 6.4 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.4
- Tabelul 6.5 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.4
- Tabelul 6.6 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.5
- Tabelul 6.7 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.5
- Tabelul 6.8 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.6
- Tabelul 6.9 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.6

- Tabelul 6.10 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.7
- Tabelul 6.11 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.7
- Tabelul 6.12 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.8
- Tabelul 6.13 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.8
- Tabelul 6.14 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.9
- Tabelul 6.15 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.9

Capitolul 7

- Tabelul 7.1 Parametrii de rugozitate
- Tabelul 7.2 Valorile parametrilor Ra și Rz pentru cala comercial de rugozitate cu valoare nominală Rz 20 μm obținute la diferite praguri ale sistemului OCT
- Tabelul 7.3 Valorile parametrilor Ra și Rz pentru cala comercial de rugozitate cu valoare nominală Rz 40 μm obținute la diferite praguri ale sistemului OCT
- Tabelul 7.4 Valorile parametrilor Ra și Rz pentru cala comercial de rugozitate cu valoare nominală Rz 80 μm obținute la diferite praguri ale sistemului OCT
- Tabelul 7.5 Valorile parametrilor Rz și Ra pentru cala comercială de rugozitate cu Rz de 20 μm și Ra de 3,6 μm
- Tabelul 7.6 Valorile parametrilor Rz și Ra pentru cala comercială de rugozitate cu Rz de 40 μm și Ra de 9,8 μm
- Tabelul 7.7 Valorile parametrilor Rz și Ra pentru cala comercială de rugozitate cu Rz de 80 μm și Ra de 18 μm
- Tabelul 7.8 Tabel de sinteză cu parametrii de rugozitate pentru calele comerciale de rugozitate de 20, 40, 80

1. INTRODUCERE

Procesul de scanare se referă la acțiunea de a căuta sau a examina în mod sistematic un obiect sau un mediu pentru informații sau caracteristici specifice [1,2]. Procesul implică de obicei deplasarea unui dispozitiv, cum ar fi un scanner sau un senzor, pe suprafața unui obiect sau mediu pentru a captura date.

În contextul scanării documentelor, de exemplu, procesul de scanare implică utilizarea unui scanner pentru a captura o imagine a unui document fizic și a o converti într-un format digital care poate fi stocat sau manipulat pe un computer. În contextul controlului de securitate, procesul de scanare ar putea implica utilizarea detectoarelor de metale sau a aparatelor cu raze X pentru a detecta arme sau alte obiecte interzise asupra oamenilor sau asupra bunurilor acestora. În general, procesul de scanare este adesea folosit în situațiile în care este necesar să se colecteze informații sau să se detecteze caracteristici sau anomalii specifice într-un context dat.

Procesele de scanare se pot clasifica după mai multe criterii:

A. În funcție de parametrul conținutului spațio-temporal, procesul de scanare poate fi temporal sau spațial:

a) *Scanarea spațială* implică măsurarea sau analiza unei zone geografice, cum ar fi un teren, o regiune sau o țară. Această măsurare poate fi realizată folosind diverse tehnologii, cum ar fi sateliți, drone sau camere video. Scanarea spațială poate fi utilizată în domenii cum ar fi cartografierea, monitorizarea mediului, planificarea urbană sau agricultura de precizie.

b) *Scanarea temporală*, pe de altă parte, implică măsurarea sau analiza unui interval de timp sau a unui eveniment specific. Această măsurare poate fi realizată prin colectare și analiză de date temporale, cum ar fi datele meteorologice, datele sociale sau datele economice. Scanarea temporală poate fi utilizată în domenii cum ar fi cercetarea socială, analiza pieței sau analiza riscurilor și securității.

B. În funcție de numărul parametrilor monitorizați, procesul de scanare poate fi uniparametric și multiparametric:

a) *Scanarea uniparametrică* implică utilizarea unei singure metode de scanare pentru a analiza un parametru. Un exemplu obișnuit este un scanner laser 2D utilizat pentru scanarea documentelor sau crearea de imagini digitale din documente fizice.

b) Pe de altă parte, *scanarea multiparametrică* implică utilizarea mai multor metode de scanare pentru a examina anumiți parametri de interes.

C. În funcție de tipul parametrului studiat, scanarea poate fi:

a) *Scanarea mecanică* se referă la utilizarea unei sonde mecanice pentru a explora și a analiza suprafețele materialelor. Un exemplu în acest sens îl constituie microscopia de forță atomică (AFM), respectiv profilometria utilizată pentru măsurarea rugozității – aspect abordat în această teză în capitolul 7 printr-o altă metodă, de scanare optică / laser.

b) *Scanarea în spectrul optic* se referă la procesul de a analiza și de a interpreta semnale luminoase sau imagini pentru a extrage informații despre caracteristicile lor, cum ar fi culoarea, intensitatea radiometrică (sau fotometrică) și structura. Această

tehnică este folosită în diverse domenii, inclusiv în industria de imprimare, în imagistica medicală și în tehnologia de recunoaștere a imaginilor. În industria de imprimare, scanarea în spectrul optic este utilizată pentru a transforma documente tipărite în imagini digitale sau invers. În imagistica medicală, scanarea în spectrul optic poate fi utilizată pentru a examina structurile interne ale corpului uman, cum ar fi ochiul (în speță retina sau corneea), prin intermediul tomografiei de coerență optică / optical coherence tomography (OCT). Această tehnică utilizează lumina pentru a crea imagini detaliate ale țesuturilor și a structurilor interne ale corpului uman. În tehnologia de recunoaștere a imaginilor, scanarea în spectrul optic este utilizată pentru a extrage informații, pentru a recunoaște caractere, obiecte sau forme și pentru a le transforma într-un format digital.

Scanarea în spectrul optic este metoda de scanare utilizată pentru studiul rugozității suprafețelor metalice, studiu prezentat în detaliu în capitolul 7. Acest studiu de cercetare a fost realizat cu sistemul de tomografie în coerență optică din cadrul laboratorului de optomecatronică.

c) În funcție de parametrul studiat, scanarea mai poate fi în *spectrul auditiv, organoleptică, termică sau magnetică*.

D. În funcție de impactul asupra mediului considerat, procesul de scanare poate fi pasiv sau activ:

a) *Scanarea pasivă* implică detectarea semnalelor sau a radiațiilor care sunt emise de un obiect sau de un corp și prelucrarea acestor semnale pentru a obține informații despre structura și proprietățile obiectului sau corpului. De exemplu, scanarea cu raze X este o tehnică de scanare pasivă, pentru a obține imagini ale structurilor interne ale corpului uman; la fel OCT-ul în domeniul scanării laser.

b) *Scanarea activă* implică generarea de către o sursă de semnale (sau de radiații), cu modificarea în acest fel a proprietăților vizate ale mediului scanat.

1.1 Tipuri de scanere laser

A. Scanner laser cu cap poligonal rotativ

Un cap de scanare cu oglindă poligonală [3-7] (figura 1.1), cunoscut și sub denumirea de sistem de scanare cu oglindă poligonală sau scanner poligonal, este un dispozitiv optic utilizat în diverse aplicații, inclusiv scanarea laser, imprimarea cu laser și sistemele de proiecție cu laser.

Componentele de bază ale unui cap de scanare cu oglindă poligonală includ: oglindă poligonală (componenta centrală a capului de scanare; este o oglindă rotativă în formă de poligon cu multiple fețe plate dispuse în jurul circumferinței sale, ce constituie oglinzi fabricate din materiale de înaltă precizie pentru a asigura o reflecție precisă), motor, sursă de lumină – laserul, componente optice (lentile și oglinzi).

Când fasciculul laser este direcționat pe oglinda poligonală în rotație, fiecare fațetă a oglinzii reflectă fasciculul la un unghi variabil datorită rotației sale. Odată ce oglinda se rotește rapid, fasciculul laser reflectat balansează pe o zonă unidimensională (în linie), scanând suprafața țintă. Viteza de rotație determină viteza scanării, iar numărul de fețe determină frecvența procesului de scanare.

Capetele de scanare cu oglindă poligonală oferă mai multe avantaje, inclusiv scanarea cu viteză mare, dată de viteza de rotație mare (~70000 rpm), controlul precis al fasciculului laser și un design mecanic relativ simplu. Aceste caracteristici le fac potrivite pentru aplicații care necesită scanare rapidă și precisă. Cu toate acestea,

există unele limitări, cum ar fi posibilitatea de distorsiuni optice și necesitatea de elemente de corecție optică suplimentare pentru a compensa schimbările unghiului de scanare la diferite fețe ale oglinzii.

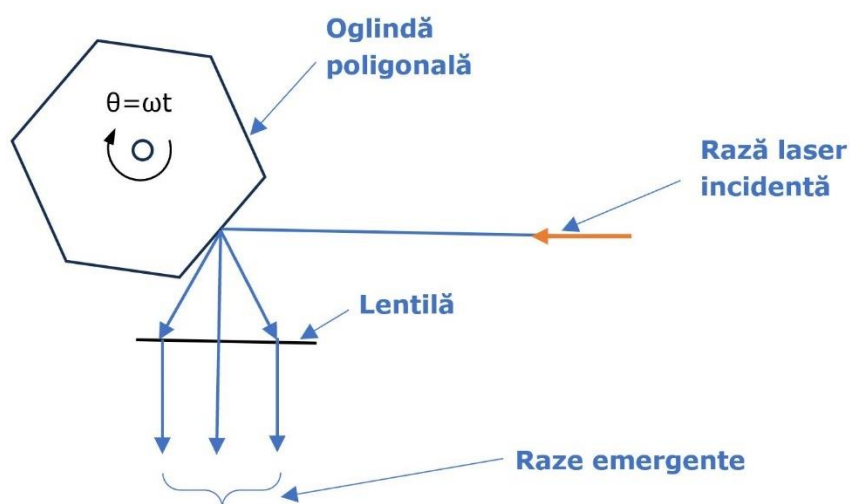


Figura 1.1 – Scanner laser cu cap poligonal rotativ - Schiță proprie după [1]

B. Scanerle galvanometrice

Un scanner galvanometric (figura 1.2), denumit și galvoscaner, este un dispozitiv utilizat pentru direcționarea și focalizarea precisă a unui fascicul laser. Acesta este folosit în aplicații, inclusiv imprimante laser, gravură cu laser, prelucrare cu laser, proiectoare de lumini, microscopie confocală sau tehnologie LIDAR.

Funcționarea unui scanner galvanometric se bazează pe mișcarea unui sistem de oglinzi galvanometrice care sunt controlate de către dispozitive electromagnetice, cunoscute sub numele de galvanometre. Aceste galvanometre pot roti (în regim oscilant) oglinzile în jurul axelor lor, ceea ce permite direcționarea și focalizarea fasciculului laser în diferite direcții.

Scanerle galvanometrice sunt capabile să miște fasciculul laser într-o serie rapidă de puncte sau forme, ceea ce le permite să deseneze imagini vectoriale, să graveze, să realizeze prelucrări precise sau să efectueze scanări rapide ale diverselor suprafețe (de exemplu în imagistica OCT, abordată în capitolul 7).

Principalele avantaje ale scanerelor galvanometrice includ viteza mare de scanare, precizia și capacitatea de a lucra cu diverse materiale și suprafețe. Cu toate acestea, există și limite, cum ar fi dimensiunea limitată a zonei de scanare și distorsiunile pe care le pot crea la marginile acesteia.

În funcție de aplicație, scanerle galvanometrice pot fi controlate direct sau integrate în sisteme mai complexe de control și automatizare pentru a obține funcționalitatea și performanța dorită.

Un scanner galvanometric este integrat și în sistemul tomografiei de coerență din laboratorul de optomecatronică utilizat pentru studiul rugozității suprafețelor metalice, studiu tratat în capitolul 7.

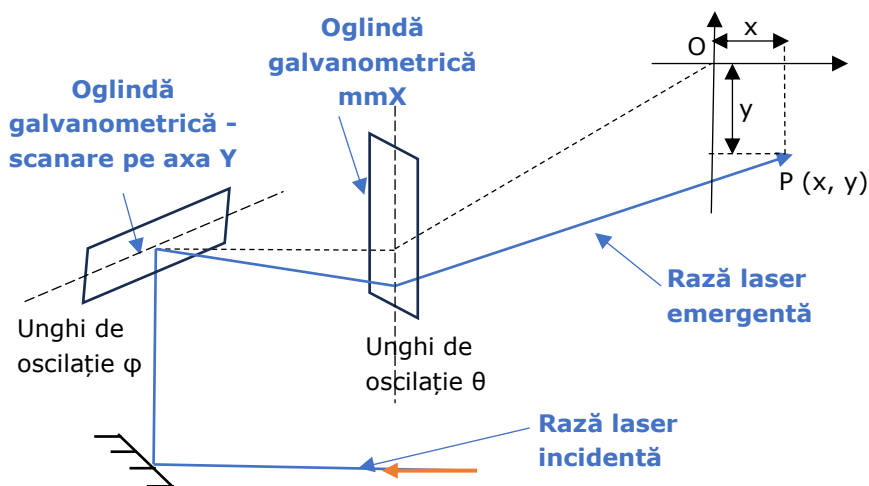


Figura 1.2 – Sistem de scanare laser galvoscaner (GS) 2D cu două axe perpendiculare (GS X pentru scanarea pe axa rapidă și GS Y pentru scanarea pe axa lentă) - Schiță proprie după [1]

C. Scanerile refractive – scanerile cu prisme Risley

Scanerile laser cu prisme Risley constau [11-13] (figura 1.3), în cea mai comună configurație, dintr-o pereche de prisme rotative, cu unghiurile prismelor θ_1 , respectiv θ_2 . Aceste prisme se rotesc în jurul axelor lor optice de rotație cu vitezele unghiulare ω_1 , respectiv ω_2 . Mecanismul de funcționare al prismelor Risley se bazează pe fenomenul de deviere a luminii în interiorul prismelor. Când lumina trece printr-o prismă, ea suferă refracției, respectiv o schimbare a direcției sale de propagare, datorită diferenței de indice de refracție dintre prismă și mediul din jur (Anexa 1). Prin rotirea prismei în jurul axei sale, unghiul de deviere D al fasciculului de lumină poate fi controlat cu precizie.

Scanerile laser cu prisme Risley sunt utilizate într-o varietate de aplicații, inclusiv interferometrie [14,15], holografie [16], polarimetrie [17], atenuarea luminii [18], poziționarea unor ținte aeriene (de exemplu a sateliților [19]), scanarea laser [20-23] - de exemplu în imagistica biomedicală, pentru microscopia confocală / confocal microscopy (CM) [24] sau pentru tomografia optică de coerență / Optical Coherence Tomography (OCT) [25]. Prismele Risley sunt o alternativă la scanerile galvanometrice (GS) [26], la cele cu oglinzi poligonale/polygonal mirrors (PM) [27] sau la sistemele micro-electro-mecanice / Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) [28]. Acestea sunt, de asemenea, cuplate cu alte scanere, de exemplu GS, pentru a realiza nu numai scanarea bi-dimensională (2D), dar și tri-dimensională (3D) [29].

Întreg studiul de cercetare prezentat în această teză a fost realizat cu o pereche de prisme Risley rotative, folosind toate cele patru configurații care se pot obține în funcție de orientarea celor două prisme între ele (capitolul 3).

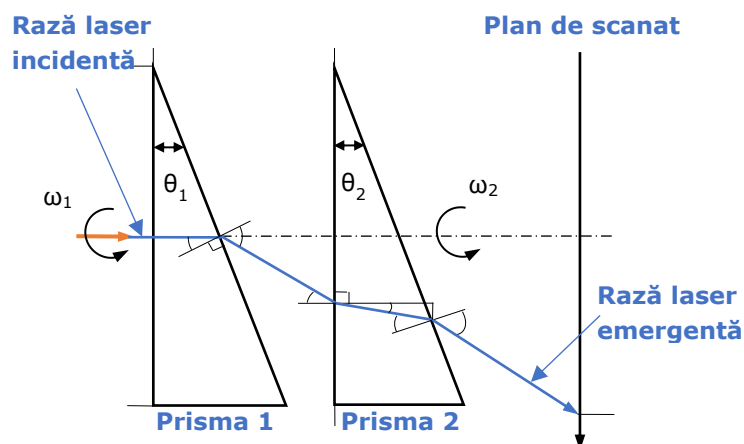


Figura 1.3 – Scanner laser cu o pereche de prisme Risley rotative - Schiță proprie după [28, 33, 34]

1.2 Modalități de scanare

În era tehnologiei avansate, scanarea laser (și nu numai) joacă un rol esențial în obținerea datelor și imaginilor din lumea înconjurătoare. Diverse tehnici de scanare au fost dezvoltate pentru a satisface nevoile dintr-o multitudine de domenii, de la imagistică și optică, până la robotica avansată și aplicații medicale. Am prezentat pe scurt în continuare patru dintre cele mai utilizate metode de scanare: scanarea raster, scanarea în spirală, scanarea Lissajous și scanarea cu prisme Risley.

Cea mai utilizată tehnică de scanare este scanarea raster [30] (figura 1.4 a). Această metodă constă în mișcarea unei raze laser pe o traiectorie liniară, în mod obișnuit de la stânga la dreapta și de sus în jos, dar posibil și în formă de zig-zag, pentru a acoperi o zonă plană / bidimensională. Ceea ce face ca această tehnică să fie atât de utilizată este precizia cu care poate obține datele, pixel cu pixel, făcând posibilă obținerea de imagini clare și detaliate. Aplicațiile scanării raster sunt extinse, fiind folosită în imagistica medicală, cartografiere, inspecții industriale și multe altele.

Scanarea în spirală (figura 1.4 b) este o tehnică ce implică mișcarea unei raze laser într-un tipar spiralat de la interior spre exterior [31]. Acest model de scanare este adesea folosit în aplicații optice și în domeniul divertismentului sau în aplicații de artă vizuală. De exemplu, în industria divertismentului, scanarea în spirală poate fi utilizată pentru proiecții sau pentru a crea efecte vizuale. În cadrul aplicațiilor medicale, această tehnică poate fi folosită pentru investigații ale țesuturilor, identificând eventualele modificări sau anomalii.

Tehnica de scanare Lissajous (figura 1.4 c) se inspiră din modelele matematice numite curbe Lissajous [32]. Aceste curbe sunt generate în funcție de raportul dintre două frecvențe de oscilație (a celor două galvoscanere) pe axe

perpendicularare (figura 1.2), ceea ce duce la crearea unor figuri complexe. Scanarea Lissajous poate fi utilizată pentru a produce modele de scanare cu un grad de libertate și versatilitate mai ridicată. În industria optică, această tehnică poate fi aplicată de exemplu în sistemele LIDAR pentru o mai bună acuratețe în măsurători și detecții.

Scanarea cu prisme Risley [28, 33, 34] (figura 1.4.d) implică rotirea a două prisme într-un mod sincronizat pentru a obține o mișcare precisă a unei raze laser. Această tehnică oferă un control excelent asupra direcției și vitezei scanării, fiind folosită în aplicații unde se cere precizie și stabilitate. Aceasta permite o scanare în care nu există alte mișcări în afară de rotația prismelor, ceea ce poate reduce uzura mecanică și îmbunătățește fiabilitatea comparativ cu cele trei modalități de mai sus, realizate cu elemente oscilante, mai lente.

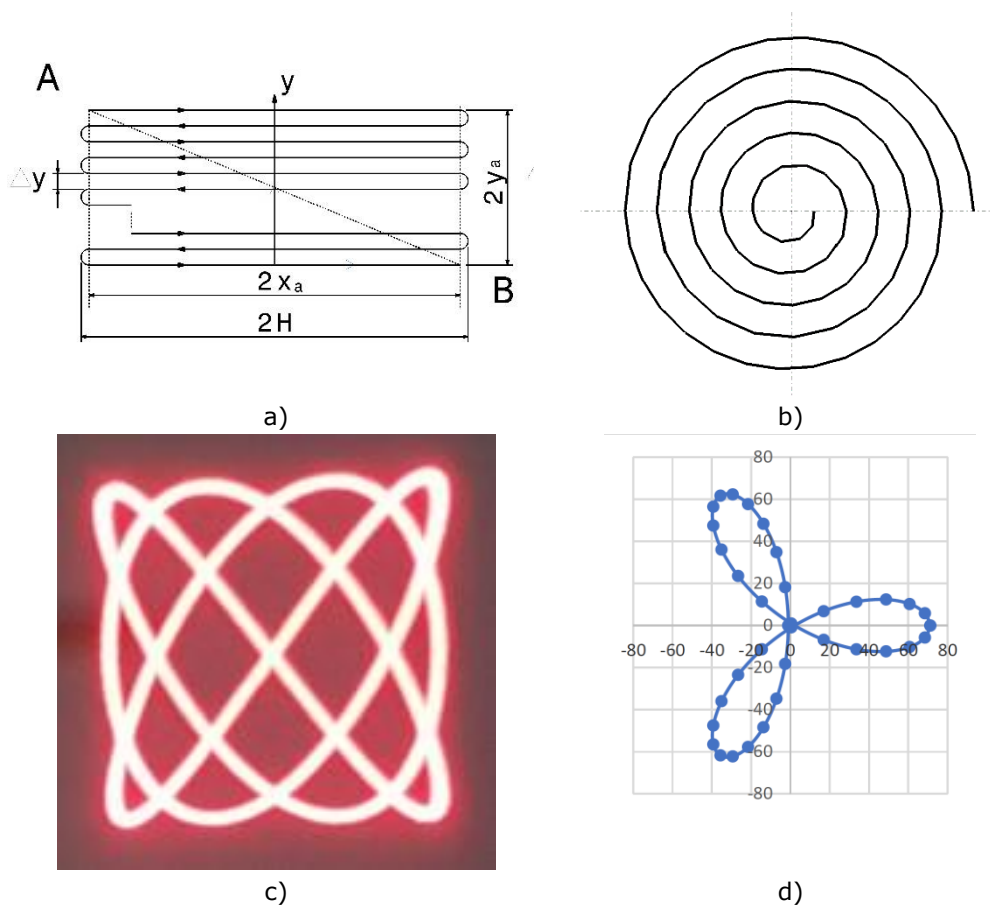


Figura 1.4 – Exemple de scan pattern-uri pentru: a) scanarea raster, b) scanarea în spirală (schițe proprii), c) scanarea Lissajous (determinare experimentală), d) scanarea cu prisme Risley (simulare în CATIA – v. capitolul 3).

1.3 Aplicații ale scannerelor laser

Scannerele laser reprezintă dispozitive tehnologice avansate care utilizează fascicule de lumină coerentă (laser) sau necoerentă pentru a obține date despre suprafețele și obiectele scanate sau pentru a le procesa într-un mod controlat. Datorită preciziei lor înalte și capacității de a înregistra informații în format uni-, bi- sau tri-dimensional, aceste instrumente au devenit esențiale începând încă din anii 1970 într-o gamă largă de domenii științifice și industriale.

În domeniul comercial scannerele laser se utilizează la scanarea codurilor de bare, precum și la imprimarea laser.

Scannerele laser au redefinit modul în care producția și procesele industriale sunt gestionate, oferind eficiență și calitate superioară a produselor finite. Câteva exemple de aplicații industriale ale laserelor: industria aeronautică, industria auto, industria electronică, industria medicală și nu numai.

Laserul are multiple aplicații în imagistică și este folosit în diverse tehnologii și proceduri medicale. Principalele aplicații în imagistică sunt: tomografia cu coerentă optică (OCT), radiografia cu laser, endoscopia sau fototerapia.

Scannerele laser au adus contribuții semnificative în domeniul biomedicinii, aducând avantaje în cercetarea și terapia medicală. Aplicațiile biomedicale includ: chirurgia cu laser, tratamentul cancerului, dermatologie, fototerapia, biopsia cu laser, imagistica medicală, stimularea creșterii țesuturilor.

Una dintre cele mai relevante aplicații ale scanării (cu diferite radiații) este microscopia prin scanare. Există diverse tehnici de microscopie prin scanare, cum ar fi: microscopia electronică prin scanare, microscopia de forță atomică, microscopia laser confocală.

Laserul a devenit o sursă de exprimare artistică, deschizând noi orizonturi pentru artiști și oferindu-le posibilitatea de a crea opere captivante. Aplicațiile laserului în artă au evoluat rapid, permițând artiștilor să exploreze noi tehnici, efecte vizuale spectaculoase și să aducă arta la un nivel cu totul nou. Câteva dintre aplicațiile laserului în artă: proiecții artistice, sculpturi laser, light art, holograme artistice, spectacole de lumini, body art cu laser, artă digitală interactivă.

În domeniul testării non-destructive, scannerele laser oferă o modalitate eficientă și precisă de a inspecta materialele și structurile, fără a le afecta integritatea. Aplicațiile de testare non-destructivă includ: controlul nedistructiv al sudurilor, detectarea defectelor în materialele compozite, măsurarea grosimii materialelor, detectarea defectelor în suprafețe metalice, analiza defectelor în materiale ceramice, analiza de tensiuni.

Remote Sensing este o tehnologie de monitorizare care utilizează laserul pentru a măsura proprietățile fizice ale obiectelor din mediul înconjurător, de la distanță. Această tehnologie poate fi utilizată într-o varietate de aplicații, cum ar fi: monitorizarea atmosferei, monitorizarea oceanului, cartografierea terenurilor, monitorizarea agriculturii, monitorizarea clădirilor.

În această teză, am analizat o anumită modalitate de scanare, scanarea cu prisme Risley, capabilă să fie utilizată în aplicațiile amintite anterior. De asemenea am folosit tomografia de coerență optică (OCT) care se bazează pe scanarea laser pentru studiul rugozității suprafețelor metalice, așa cum se poate observa în capitolul 7.

Bibliografie

- [1] Marshall, G.F.; Stutz, G.E. (Eds.) Handbook of optical and laser scanning, 2nd ed.; CRC Press: London, UK, 2011.
- [2] L. Beiser, B. Johnson, Scanners, Chap. 19, in Handbook of Optics, M. Bass, Ed., Mc. Graw-Hill, New York, 1995, 19.1–19.57.
- [3] Y. Li, Single-mirror beam steering system: analysis and synthesis of high-order conic-section scan patterns, Appl. Opt. 2008, 47, 386–398.
- [4] W.Y. Oh, S.H. Yun, G.J. Tearney, B.E. Bouma, 115 kHz tuning repetition rate ultrahigh-speed wavelength-swept semiconductor laser, Opt. Lett. 2005, 30, 3159–3161.
- [5] S.H. Yun, C. Boudoux, G.J. Tearney, B.E. Bouma, High-speed wavelength-swept semiconductor laser with a polygon-scanner-based wavelength filter, Opt. Lett. 2003, 28, 1981–1983.
- [6] L. Liu, N. Chen, C.J.R. Sheppard, Double-reflection polygon mirror for high-speed optical coherence microscopy, Opt. Lett. 2007, 32, 3528–3530.
- [7] V.-F. Duma, Polygonal mirror laser scanning heads: characteristic functions, Proc. Rom. Acad. Ser. A, 2017, 18, 25–33.
- [8] R.P. Aylward, Advances and technologies of galvanometer-based optical scanners, Proc. SPIE 1999, 3787, 158–164.
- [9] J. Montagu, Scanners –galvanometric and resonant, in: Encyclopedia of Optical Engineering, Taylor & Francis, 2003, 2465–2487.
- [10] W.R. Benner, Laser Scanners: Technologies and Applications, Pangolin Laser Systems, Inc., 2016.
- [11] A. Li, W. Yi, Q. Zuo, W. Sun, Performance characterization of scanning beam steered by tilting double prisms, Opt. Express 24, 2016, 20, 23543–23556.
- [12] W.C. Warger II, C.A. DiMarzio, Dual-wedge scanning confocal reflectance microscope, Opt. Lett. 2007, 32, 2140–2142.
- [13] A. Li, W. Sun, X. Liu, W. Gong, Laser coarse-fine coupling tracking by cascaded rotation Risley-prism pairs, Appl. Opt. 2018, 57, 3873–3880.
- [14] Bass, M., Ed., [Handbook of optics], Mc. Graw-Hill Inc., New York, 19.1-19.57, 1995.
- [15] Montagu, J. Scanners-galvanometric and resonant. In Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2003, 2465–2487.
- [16] Li, Y. and Katz, J., "Asymmetric distribution of the scanned field of a rotating reflective polygon," Appl. Opt. 1997, 36, 342-352.
- [17] Duma, V.-F. Polygonal mirror laser scanning heads: Characteristic functions. Proc. Rom. Acad. Ser. A 2017, 18, 25–33.
- [18] Riza, N. A. and Yaqoob, Z., "Submicrosecond speed optical coherence tomography system design and analysis by use of acousto-optics," Appl. Opt. 2003, 42, 2003.
- [19] Rosell, F. A., "Prism scanner," J. Opt. Soc. Am. 50, 521, 1960.
- [20] Marshall, G. F., "Risley Prism Scan Patterns," Proc. SPIE 3787, 74-86, 1999.
- [21] Garcia-Torales, G., Flores, J. L., and Muñoz, R. X., "High precision prism scanning system," Proc. SPIE 2007, 6422, 64220X.

- [22] Yang, Y. Analytic solution of free space optical beam steering using Risley prisms. *J. Lightwave Technol.* 2008, 26, 3576–3583.
- [23] Li, Y. Third-order theory of the Risley-prism-based beam steering system. *Appl. Opt.* 2011, 50, 679–686.
- [24] Li, A.; Sun, W.; Liu, X.; Gong, W. Laser coarse-fine coupling tracking by cascaded rotation Risley-prism pairs. *Appl. Opt.* 2018, 57, 3873–3880.
- [25] Li, A., Liu, L. Sun, J., Zhong, X., Wang, L., Liu, D., and Luan, Z., "Research on a scanner for tilting orthogonal double prisms," *Appl. Opt.*, 2003, 45, 8063-8069.
- [26] Florea, C., Sanghera, J., and Aggarwal, I., "Broadband beam steering using chalcogenide-based Risley prisms," *Opt. Engineering*, 2011, 50, 033001.
- [27] Li, Y., "Closed form analytical inverse solutions for Risley-prism-based beam steering systems in different configurations," *Appl. Opt.* 2011, 50, 4302-4309.
- [28] Lavigne, V.; Ricard, B. Fast Risley prisms camera steering system: Calibration and image distortions correction through the use of a three-dimensional refraction model. *Opt. Eng.* 2007, 46, 43201.
- [29] Duma, V.-F.; Schitea, A. Laser scanners with rotational Risley prisms: Exact scan patterns. *Proc. Rom. Acad. Ser. A* 2018, 19, 53–60.
- [30] Duma, V.-F. Laser scanners with oscillatory elements: Design and optimization of 1D and 2D scanning functions. *Appl. Math. Model.* 2019, 67, 456–476.
- [31] Carrasco-Zevallos, O.M.; Viehland, C.; Keller, B.; McNabb, R.P.; Kuo, A.N.; Izatt, J.A. Constant linear velocity spiral scanning for near video rate 4D OCT ophthalmic and surgical imaging with isotropic transverse sampling. *Biomed. Opt. Express* 2018, 9, 5052.
- [32] Hwang, K.; Seo, Y.-H.; Ahn, J.; Kim, P.; Jeong, K.-H. Frequency selection rule for high definition and high frame rate Lissajous scanning. *Sc. Rep.* 2017, 7, 14075.
- [33] Duma, V.-F.; Dimb, A-L. Exact Scan Patterns of Rotational Risley Prisms Obtained with a Graphical Method: Multi-Parameter Analysis and Design. *Appl. Sci.* 2021, 11, 8451.
- [34] A.-L. Dimb and V.-F. Duma, Symmetries of Scan Patterns of Laser Scanners with Rotational Risley Prisms, *Symmetry* 2023, 15(2), 336.

2. TIPURI DE SCANERE CU PRISME RISLEY

2.1. Scaner cu perechi de prisme de rotație / dublete

Un scaner cu două prisme Risley rotative [1, 2] funcționează prin propagarea fasciculelor de lumină care trec prin cele două prisme optice plasate una după cealaltă și rotite în jurul unei axe optice de simetrie și de rotație comună. Prin rotația acestor prisme în mod sincronizat, fasciculele de lumină sunt deviate într-un mod controlat și direcționate spre un plan de proiecție. Acest tip de scaner a fost abordat în studiul prezentat în această teză de doctorat.

Figura 2.1 prezintă construcția unui scaner format dintr-o pereche de prisme de rotație.

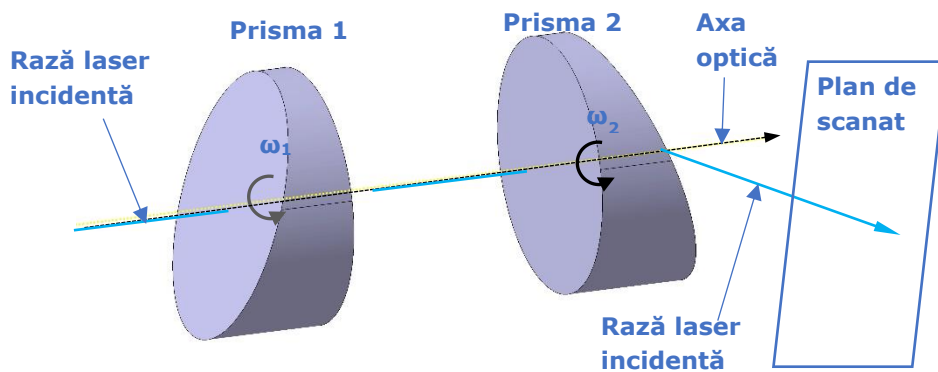


Figura 2.1 Scaner cu o pereche de prisme de rotație – simulare proprie făcută în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța) după [1,2]

Pentru a minimiza dispersia optică s-au construit scanere mai complexe, cu pereche de dublete [3]. Aceste tip de scanere este prezentat în figura 2.2.

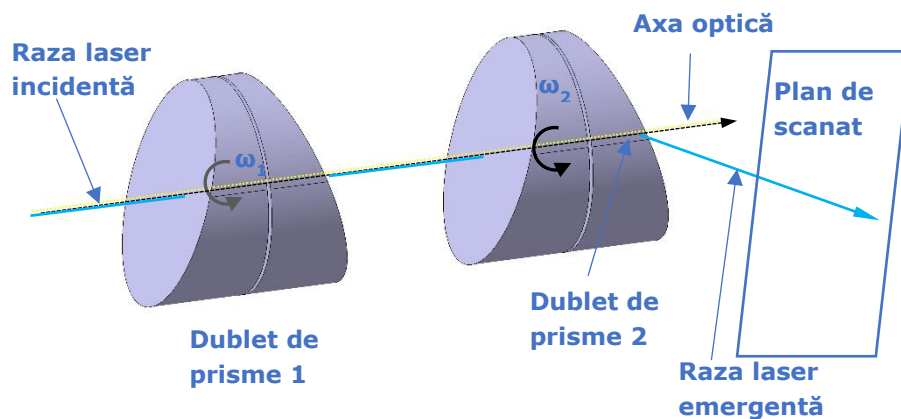


Figura 2.2 Scanner cu o pereche de dublete de rotație – simulare proprie făcută în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța) după [3].

2.2. Scanner cu trei prisme de rotație

Pentru a obține o precizie mai mare a fascicolului laser și a spotului laser pe suprafața scanată s-a demonstrat că algoritmul unui scanner format din trei prisme rotaționale [4] compensează posibile erori, favorizând creșterea preciziei. Trebuie menționat că acest algoritm este valabil pentru scanerile formate din trei prisme subțiri (de tip "pană"). Un astfel de scanner este prezentat în figura 2.3.

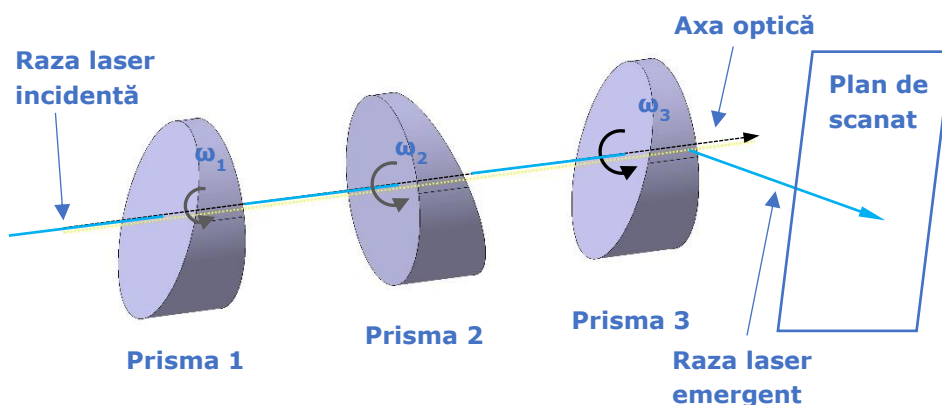


Figura 2.3 Scanner cu trei prisme de rotație – simulare proprie făcută în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța) după [4].

2.3. Scaner cu o pereche de prisme oscilante

O serie de studii au demonstrat că un scaner format din două prisme oscilante [5, 6] prezintă o precizie mult mai mare de dirijare a fascicolului laser, în comparație cu alte scanere uzuale.

De asemenea s-a realizat și problema inversă a acestui tip de scaner propus, folosind exemple numerice reale pentru parametrii scanerului, pentru a determina poziția prismelor care direcționează fascicolul laser către ținte date în spațiul liber.

Toate aceste studii, precum și soluțiile analitice și numerice ajută la investigarea scan pattern-urilor acestor tip de scanere, scanere cu potențial în aplicațiile domeniilor ingineresti.

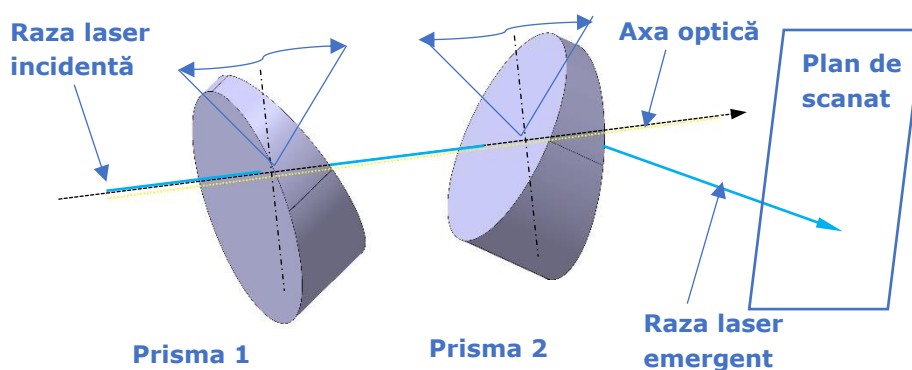


Figura 2.4 Scaner cu o pereche de prisme oscilante – simulare proprie făcută în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța) după [5,6].

2.4. Combinație de prismă rotativă și oscilantă

Sistemele de comunicații optice au prezentat o nevoie emergentă de scanare și urmărire a țintelor dinamice cu precizie ridicată. Din nefericire, scanerelor obișnuite întâmpină dificultăți în furnizarea de informații suficiente privind depistarea țintei sau nu au o rezoluție mare de scanare din cauza parametrilor optici și structurii optomecanice fixe. Pentru a elimina această problemă s-a construit un nou scaner cu prisme în cascadă, care combină cele două moduri de scanare ale mișcărilor de rotire și oscilantă [7].

Această metodă de scanare nu numai că îndeplinește cerințele menționate mai sus, dar poate obține și o varietate de moduri și traiectorii de scanare, ceea ce are o importanță inginerescă importantă pentru soluția de direcționare a unui fascicul bine focusat pentru a urmări și poziționa o țintă dinamică.

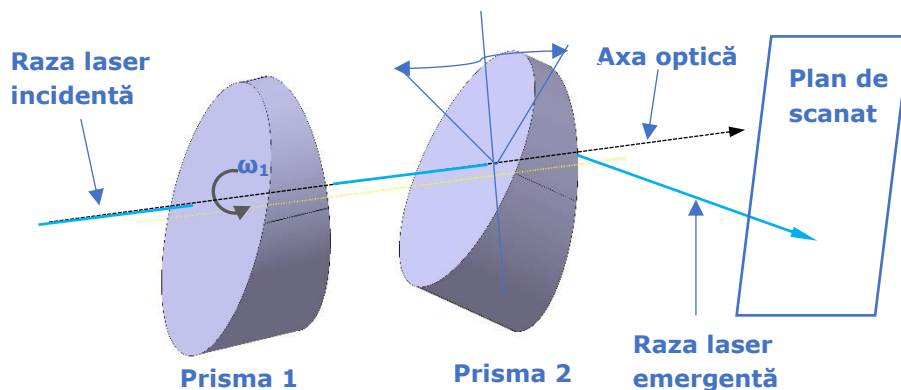


Figura 2.5 Scanner format dintr-o prismă rotativă și una oscilantă – simulare proprie făcută în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța) după [7].

2.5. Problema directă și inversă

A. Scanere cu prisme de rotație

Studiile inițiale care au analizat dispozitivele de scanare cu prisme Risley au abordat acest subiect atât în mod direct, cât și invers.

Parametrii de proiectare pentru aceste tipuri de scanare au folosit aproximarea de ordinul întâi a legii refracției [2, 8], obținându-se astfel ecuațiile aproximative de proiectare pentru curbele care definesc modelele de scanare obținute cu aceste scanere.

Definitiviu pentru acest subiect a fost studiul lui Marshall [9] care a introdus doi parametri importanți, cunoscuți ca și **parametrii lui Marshall: M , care reprezintă raportul vitezelor de rotație și k , care este raportul unghiilor prismelor**. Acești parametri sunt de mare impact, pentru că ajută la caracterizarea scan pattern-urilor obținute cu dispozitive scanare care folosesc primele Risley.

S-a dezvoltat o soluție matematică relativ dificilă pentru a defini direcțiile fasciculului laser produs de un sistem de scanare care folosește prisme Risley, luându-se în considerare toate configurațiile, în funcție de pozițiile relative ale prismelor în sistem [10]. S-au furnizat formulele analitice pentru a determina poziția spotului laser pe planul scanat. Pentru problema inversă s-a folosit matricea jacobiană pentru a analiza traiectoria laserului. Algoritmii utilizați pentru determinarea orientării prismelor, astfel încât să se obțină traiectoria dorită sunt metoda trust regin și metoda Newton implementate în Matlab, dovedindu-se că ambele sunt eficiente.

Un alt studiu a presupus trasarea unor axe neparaxiale pentru a analiza câmpul de scanare, produs de un sistem de scanare laser cu prisme Risley [11]. Prin această analiză s-a pus bazele teoriei de ordin III de aproximare a scanerelor cu prisme Risley. Acuratețea teoriei aproximative a fost comparată cu soluția numeric exactă; astfel s-a demonstrat că aproximarea de ordin III poate să fie utilizată pentru a arăta distorsiuni optice în scan pattern-uri și poate fi o soluție simplă a problemei inverse, când prismele Risley sunt utilizate la comunicațiile în spațiul liber.

O altă cercetare care a completat studiul anterior a presupus trasarea razelor neparaxiale prin sistemele cu prisme Risley pentru toate cele patru configurații posibile [12], în funcție de orientările relative ale prismelor, în condițiile în care indicele de refracție al materialelor prismelor și unghiul prismelor sunt diferite. S-a ajuns la concluzia că cele patru configurații se pot împărți în două grupe pentru care s-au dezvoltat o abordare unificată care să permită folosirea a două modele matematice, pentru a caracteriza cele patru configurații posibile ale sistemelor de scanare cu prisme Risley. Au fost dezvoltate soluții analitice și pentru problema inversă atât pentru indicarea poziției, cât și pentru a sintetiza scan pattern-urile. Rezultatele s-au comparat cu teoria de ordin III folosită în studiul anterior și s-a ajuns la concluzia că în ciuda faptului că diferența unghiulară abordată în cele două teorii este mică, eroarea de poziție corespunzătoare în urmărirea țintei are posibilitatea să fie mai mare decât dimensiunea liniară maximă a țintei urmărite.

B. Scanere cu prisme oscilantă

Într-un studiu multiparametric [5, 6] în care s-au luat în considerare parametrii sistemului de scanare (unghiurile prismelor, grosimea și indicele de refracție al prismelor, distanța dintre cele două prisme, precum și distanța dintre scanner și dispozitivul receptor) s-a studiat precizia scannerului precum și distorsiunea fasciculului [13, 14], deci s-a analizat performanța și eficiența sistemului. S-a ajuns la concluzia că este o metodă promițătoare de scanare și poate realiza o precizie mai mare decât scanerul cu prisme Risley rotaționale. Pentru a avea control asupra mișcării s-a investigat relația neliniară dintre unghiurile de înclinare al prismelor și unghiul de deviere al fasciculului emergent. Rezultatele obținute pot fi o temelie pentru dezvoltarea sistemului de scanare cu duble prisme oscilante.

S-au studiat și scanerul cu prisme duble oscilante, deoarece acest tip de dispozitive sunt valoroase pentru că prezintă un raport de reducere de 1/100 la rata de schimbare a unghiului de deviere a fasciculului, în raport cu unghiul de înclinare al fiecărei prisme. Pentru a determina traiectoria unei ținte este necesar să se știe modul de determinare a unghiului de înclinare a prismelor duble. Odată obținute aceste unghiuri, motoarele de control pot fi controlate pentru a acționa cele două prisme, încât să se obțină traiectoria dorită. O aplicație importantă la care sunt folosite aceste scanere este direcționarea unei ținte la distanță. Acest studiu arată relațiile dintre scan pattern-ul obținut în funcție de parametrii structurali ai scannerului, dar pune și baza schemei de control activ al mișcării produse de un sistem cu prisme Risley dublu oscilante.

C. Scanere cu combinație de prismă rotativă și oscilantă

A fost analizat un sistem de scanare format din două prisme în cascadă: una rotațională [7], care execută mișcare de rotație și una oscilantă. În urma analizei teoretice s-a determinat că atât câmpul de scanare vertical cât și cel orizontal nu sunt mai mici de $\pm 10^\circ$, cu o precizie de scanare mai bună de $50 \mu\text{rad}$.

Comparativ cu sistemele prezentate anterior, cu prisme care execută doar mișcări de rotație, respectiv doar mișcări de oscilație, scanerul combinat execută mișcări relativ modeste; ele reduc sursele de eroare și îmbunătățesc performanța sistemului, pentru a obține o precizie bună, ceea ce le face aplicabile în diferite domenii de scanare.

2.6. Structura și obiectivele tezei de doctorat

Teza de doctorat propusă cuprinde un total de opt capitole, împărțite în două părți distincte. Primele două capitole sunt dedicate introducerii în tema cercetării, oferind contextul general și revizuirea literaturii relevante. Următoarele cinci capitole constituie partea principală a tezei și prezintă cercetarea originală, explorând subiectul în detaliu din diferite perspective. Ultimul capitol, al optulea, este dedicat concluziilor, în care se rezumă rezultatele cercetării și se trag concluziile finale, oferindu-se și perspective ale cercetării.

Capitolul 1 – INTRODUCERE

Acest capitol prezintă domeniul scanerelor laser, acoperind trei aspecte importante: tipurile de scanere laser disponibile pe piață (scaner laser cu cap poligonal rotativ, scanerul galvanometric și **scanerul refractiv – scanerul cu prisme Risley**); diferitele modalități de scanare utilizate în această tehnologie (scanarea raster, scanarea în spirală, scanarea Lissajous și **scanarea cu prisme Risley**); o scurtă prezentare a aplicațiilor acestor scanere laser în diverse domenii. Întreg studiul prezentat în această teză a fost realizat utilizând scanere cu perechi de prisme Risley rotative, folosind toate cele patru configurații care se pot obține în funcție de orientarea celor două prisme între ele (capitolul 3). S-a analizat modalitatea de scanare cu aceste prisme Risley. De asemenea am folosit tomografia de coerență optică (OCT), care se bazează pe scanarea laser, pentru studiul rugozității suprafețelor metalice - capitolul 7.

Capitolul 2 - TIPURI DE SCANERE CU PRISME RISLEY

În acest capitol s-a făcut o clasificare a tipurilor de scanere cu prisme Risley, inclusiv scanerul cu perechi de prisme de rotație/dublete, scanerul cu trei prisme de rotație, scanerul cu o pereche de prisme oscilante și combinații de prisme rotative și oscilante. De asemenea, se analizează stadiul actual al cercetării în domeniu, evidențindu-se evoluțiile și descoperirile recente, punctându-se problema directă și cea inversă asociată cu scanerul Risley.

Capitolul 3 - SCAN PATTERN-URI EXACTE ALE PRISMELOR RISLEY ROTATIVE OBȚINUTE CU METODA GRAFICĂ: ANALIZĂ MULTI-PARAMETRICĂ

Capitolul 3 prezintă un studiu în care am efectuat o analiză detaliată a scan pattern-urilor de scanare ale unei perechi de prisme Risley rotative. Această analiză implică toți parametrii de construcție ai scanerului, pe lângă parametrii lui Marshall: M (raportul vitezelor unghiulare), k (raportul dintre unghiurile prismelor), e (distanța dintre prisme), L (lungimea de la sistem la planul scanat), n_1 și n_2 (indicele de refracție al prismelor), θ_1 și θ_2 (unghiurile prismelor); dar și pentru cele patru configurații posibile ale unui scaner laser cu o pereche de prisme Risley rotative. Pentru simularea acestor pattern-uri de scanare am utilizat o metodă grafică exactă (în contrast cu metodele existente, aproximative) și ușor de folosit (în contrast cu metodele analitice, relativ complexe), metodă grafică introdusă de conducătorul de doctorat din 2014 și dezvoltată ulterior în 2018 [15]. Prin analiza multi-parametrică a formei și dimensiunilor pattern-urilor de scanare am identificat reguli de bază care pot fi folosite pentru proiectarea optimă a scanerelor optomecanice cu prisme Risley, adaptate diferitelor cerințe ale aplicațiilor.

Capitolul 4 - SIMETRII ALE SCAN PATTERN-URILOR ALE SCANERELOR LASER CU PRISME RISLEY ROTATIVE

În acest capitol am investigat, într-o analiză multi-parametrică (utilizând toate caracteristicile sistemului) simetriile pattern-urilor de scanare generate de o pereche de prisme Risley rotative, care reprezintă cel mai răspândit tip de scanner laser cu astfel de elemente refractive. Pentru această analiză am utilizat metoda grafică, ca și în capitolul 3.

Rezultatele simulărilor au scos în evidență faptul că parametrul M (raportul vitezelor de rotație al prismelor) este factorul determinant pentru simetriile scan pattern-urilor. Alți parametri precum unghiurile prismelor (împreună cu raportul lor), indicii de refracție și dimensiunile scannerului au influențat doar dimensiunile acestor scan pattern-uri. De asemenea am introdus o noțiune nouă, cea de "**structuri de simetrie**" și am furnizat o definiție convenabilă pentru a facilita generarea întregului model de scanare prin replicarea unei părți a acestuia folosind simetria. Am ilustrat diverse cazuri specifice și am acoperit o gamă variată de parametri, inclusiv valorile fracționale ale lui M , pentru a realiza analiza completă a subiectului.

Capitolul 5 - SCAN PATTERN-URI SECUNDARE ALE UNEI PERECHI DE PRISME RISLEY DE ROTAȚIE

Acest capitol a adus în discuție diverse scan pattern-uri secundare obținute cu ajutorul prismelor Risley, folosind metoda grafică dezvoltată, și utilizând programul de proiectare mecanică CATIA V5R20.

Pentru aceasta am creat un sistem parametrizat în program, care a fost adaptat configurației alese, luând în considerare ecuațiile de bază ale prismelor și numărul de refracții și reflexii interioare din sistemul optic. Am analizat cazul a două prisme Risley rotative neidentice, cu unghiuri maxime de deviere de 2° și 4° (corespunzând valorilor $k = 0,5$, $k = 1$ și $k = 2$ pentru scanner), pentru două valori ale parametrului M , ± 4 . Pentru fiecare dintre aceste cazuri, am prezentat simulări grafice, precum și graficele coordonatelor x și y ale punctului de incidență pe planul scanat. Rezultatele prezentate în acest capitol reprezintă un studiu în curs, care va continua și după finalizarea acestei teze de doctorat, fiind o direcție de cercetare deschisă.

Capitolul 6 - STUDIUL EXPERIMENTAL

În scopul testării și studierii amănunțite a scan pattern-urilor generate de un sistem de scanare cu două prisme Risley rotative, am dezvoltat și utilizat un stand experimental dedicat, pe care îl prezintă acest capitol. Obiectivul principal al acestui stand experimental a fost să testeze și să valideze teoriile și ipotezele formulate anterior. Prin intermediul acestui stand, am reușit să obținem validări experimentale pentru scan pattern-urile simulate exact, aferente studiilor din capitolul 3, 4, respectiv 5. Pe lângă validarea teoretică, standul experimental ne-a permis să analizăm comportamentul și performanța sistemelor de scanare cu prisme Risley prin compararea scan pattern-urilor simulate cu cele obținute experimental. Eventualele erori rezultate au fost investigate și acestea se datorează atât nealinierii perfecte a componentelor standului experimental, cât și ajustărilor cu precizii limitate ale parametrilor care definesc sistemul. Standul experimental configurat cu componente comerciale de la firma Thorlabs permite rotirea separată a celor două prisme Risley cu un pas unghiular minim de $2'$.

Capitolul 7 - APLICAȚIILE TOMOGRAFIEI DE COERENȚĂ OPTICĂ ÎN EVALUAREA RUGOZITĂȚII SUPRAFEȚELOR MATERIALELOR METALICE

În acest capitol am efectuat măsurători de rugozitate pe trei cale comerciale de rugozitate folosind tehnologia de tomografie de coerență optică (OCT), bazată pe scanarea laser punct-cu-punct (1000 puncte pentru un B-scan / secțiune optică). Aceste cale comerciale au valori nominale ale parametrilor de rugozitate Rz de 20, 40 și 80 μm și valori nominale ale parametrilor Ra de 3,6, 9,8 și 18 μm . Scopul principal al cercetării a fost de a determina dacă valorile parametrilor de rugozitate Rz și Ra obținute prin intermediul OCT sunt compatibile cu valorile nominale ale acestor cale comerciale de rugozitate. Rezultatele au indicat că, pe măsură ce valorile parametrilor de rugozitate au crescut, diferențele între cele două metode de determinare a rugozității au devenit tot mai mici. În particular, pentru calele de rugozitate cu valori nominale de 40 și 80 μm , valorile obținute cu OCT au fost satisfăcătoare comparativ cu valorile obținute pentru calea de 20 μm .

Capitolul 8 – CONCLUZII

Prismele Risley pot fi utilizate într-o gamă variată de domenii și aplicații datorită capacității lor de a genera scan pattern-uri precise și controlabile. Câteva aspecte relevante privind importanța acestor prisme: scanarea optică, precizie, control și flexibilitate (permit crearea de scan pattern-uri cu caracteristici specifice, precum dimensiune, formă, simetrie și uniformitate), eficiență și viteză, aplicații diversificate (scanarea laser în teledetecție și cartografie, sistemele de imagistică medicală, măsurătorile și inspecțiile optice, precum și în domeniul divertismentului și artelor vizuale, etc).

Obiectivele tezei de doctorat "*CONTRIBUȚII LA STUDIUL SCANNERELOR LASER CU PRISME RISLEY PENTRU TOMOGRAFIA DE COERENȚĂ OPTICĂ, CU APLICAȚII ÎN MĂSURĂTORILE INDUSTRIALE*" sunt următoarele:

- a) Pe baza stadiului actual al cercetării pe plan internațional privitoare la scanerile laser cu prisme Risley s-a definit **obiectivul principal** al tezei: aplicarea metodei grafice introdusă de profesorul coordonator [15] pentru studiul traiectelor / scan pattern-urilor sistemelor de scanare cu o pereche de prisme Risley rotative.
- b) **Al doilea obiectiv** al tezei este de a aplica scanarea laser (cu galvoscaner) în tomografia de coerență optică pentru studiul rugozității pieselor metalice.

Având în vedere utilizarea noii metode grafice introduse în [15] pentru studiul și optimizarea scanării cu prisme Risley, precum și a noutății utilizării OCT pentru determinarea rugozității, întreaga parte a tezei cuprinsă în capitolele 3-7 constituie contribuții originale.

Bibliografie

- [1] Marshall, G.F.; Stutz, G.E. (Eds.) Handbook of optical and laser scanning, 2nd ed.; CRC Press: London, UK, 2011.
- [2] Bass, M. Handbook of Optics, 3rd ed.; Mc. Graw-Hill Inc.: New York, NY, USA, 2009; pp. 30.1–30.68.

- [3] Florea, C.; Sanghera, J.; Aggarwal, I. Broadband beam steering using chalcogenide-based Risley prisms. *Opt. Eng.* 2011, 50, 033001.
- [4] Li, A.; Gong, W.; Zhang, Y.; Liu, X. Investigation of scan errors in the three-element Risley prism pair. *Opt. Express* 2018, 26, 25322–25335.
- [5] Li, A.; Yi, W.; Zuo, Q.; Sun, W. Performance characterization of scanning beam steered by tilting double prisms. *Opt. Express* 2016, 24, 23543–23556.
- [6] Li, A.; Ding, Y.; Bian, Y.; Liu, L. Inverse solutions for tilting orthogonal double prisms. *Appl. Opt.* 2014, 53, 3712–3722.
- [7] Li, A.; Jiang, X.; Sun, J.; Wang, L.; Li, Z.; Liu, L. Laser coarse-fine coupling scanning method by steering double prisms. *Appl. Opt.* 2012, 51, 356–364.
- [8] Rosell, F.A. Prism scanner. *J. Opt. Soc. Am.* 1960, 50, 521.
- [9] Marshall, G.F. Risley Prism Scan Patterns. *Proc. SPIE* 1999, 3787, 74–86.
- [10] Yang, Y. Analytic solution of free space optical beam steering using Risley prisms. *J. Lightwave Technol.* 2008, 26, 3576–3583.
- [11] Li, Y. Third-order theory of the Risley-prism-based beam steering system. *Appl. Opt.* 2011, 50, 679–686.
- [12] Y. Closed form analytical inverse solutions for Risley-prism-based beam steering systems in different configurations. *Appl. Opt.* 2011, 50, 4302–4309.
- [13] Sun, J.; Liu, L.; Yun, M.; Wan, L.; Zhang, M. Distortion of beam shape by a rotating double prism wide-angle laser beam scanner. *Opt. Eng.* 2006, 45, 043004.
- [14] Lavigne, V.; Ricard, B. Fast Risley prisms camera steering system: Calibration and image distortions correction through the use of a three-dimensional refraction model. *Opt. Eng.* 2007, 46, 43201.
- [15] Duma, V.-F.; Schitea, A. Laser scanners with rotational Risley prisms: Exact scan patterns. *Proc. Rom. Acad. Ser. A* 2018, 19, 53–60.

3. SCAN PATTERN-URI EXACTE ALE PRISMELOR RISLEY ROTATIVE OBTINUTE CU METODA GRAFICĂ: ANALIZĂ MULTI-PARAMETRICĂ

3.1. Noțiuni generale

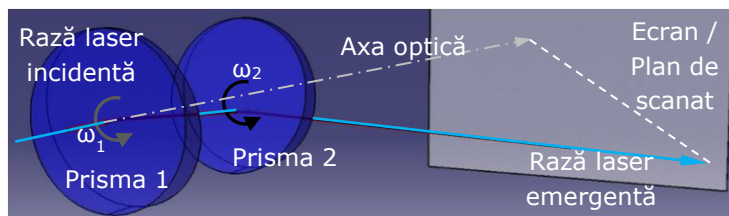
Prismele Risley sunt unul dintre cele mai rapide sisteme optomecanice bidimensionale (2D) [1-18], fiind utilizate într-o gamă largă de aplicații [3-25]. Dezavantajul lor este neliniaritatea mare a scan pattern-urilor, pe care le produc, spre deosebire de cele mai comune (dar mai lente) modalități de scanare descrise în capitolul 1: spirală [47,48] sau raster cu scanere galvanometrice 2D cu două axe (GS) [26-31] sau cu sisteme micro-electro-mecanice (MEMS) cu oglinzi oscilante [32-34,50,51], acesta din urmă utilizându-se pentru fabricarea cu laser sau pentru imagistică [31,35-37], pentru tomografia cu coerență optică (OCT) [38-42] pentru investigații biomedicale [32-42] sau testarea nedistructivă [43-46], în care scanarea laser electromecanică laterală este esențială în majoritatea variantelor.

Scopul acestui capitol este de a prezenta și a dezvolta metoda grafică [49,60,61], care este o alternativă demonstrată a abordărilor analitice [7,11,51-58] sau numerice [59] și care, după cunoștințele noastre, a fost introdusă în [49] pentru a determina și caracteriza, folosind un program de proiectare mecanică disponibil comercial (în cazul nostru CATIA V5R20 Dassault Systems, Paris, Franța) în simularea scan pattern-urile prismelor Risley rotative. Abaterile unghiulare ale acestui tip de scanner sunt deduse teoretic pentru a caracteriza diametrul exterior/câmpul vizual și diametrul interior (al zonei oarbe) al scan pattern-urilor, dar și a formei de inel. Această analiză multi-parametrică se realizează în corelație cu forma scan pattern-urilor, luând în considerare cele patru configurații posibile ale scannerelor laser cu o pereche de prisme Risley de rotație, precum și toți parametrii acestora: unghiurile prismelor, indicii de refracție, vitezele de rotație, distanța dintre cele două prisme și distanța de la sistem la planul scanat. Sunt luați în considerare și parametrii sintetici ai lui Marshall, adică rapoartele vitezelor de rotație și ale unghiurilor prismelor. Din această analiză sunt extrase reguli de bază pentru proiectarea acestui scanner optomecanic, atât în ceea ce privește formele, cât și dimensiunile scan pattern-urilor, care urmează să fie produse. Un exemplu de validare experimentală completează în capitolul 6 analiza matematică și simulările efectuate.

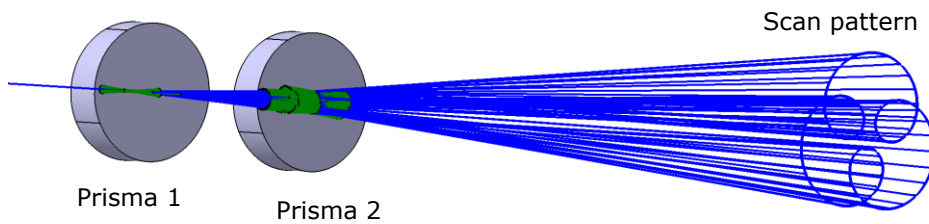
Capitolul prezintă o serie din rezultatele publicate în [Duma, V.-F.; Dimb, A.-L. Exact Scan Patterns of Rotational Risley Prisms Obtained with a Graphical Method: Multi-Parameter Analysis and Design. Appl. Sci. 2021, 11, 8451; **IF 2.838**; <https://doi.org/10.3390/app11188451>].

3.2 Scanere cu perechi de prisme Risley rotative

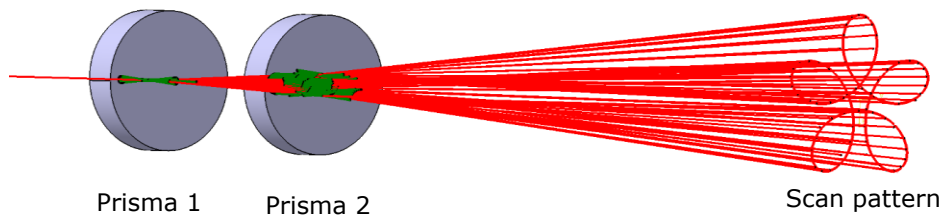
Schema de principiu a unui scanner laser cu o pereche de prisme Risley rotative este prezentată în figura 3.1.a, care prezintă principiul procesului de modelare a prismelor rotaționale realizat, folosind programul CATIA V5R20 și modul în care aceasta permite simularea procesului de scanare, adică a refracției unui fascicul laser (considerat redus la o singură rază centrală) prin intermediul sistemului prismatic. O ipoteză (și caracteristică) simplificatoare a întregului studiu este că îl realizăm în limitele opticii geometrice. Astfel, toate fasciculele laser (gaussiene) sunt considerate reduse la razele lor centrale, iar dependența indicilor de refracție ai materialelor prismelor de lungimile de undă laser nu sunt luate în considerare. După cum s-a subliniat în subcapitolul 2.6, există studii axate pe probleme de dispersie care apar în special atunci când sunt utilizate prisme optice, în loc de pene optice [15].



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1 (a) Pereche de prisme Risley rotative, modelate cu un program de proiectare mecanică disponibil comercial, CATIA V5R20. (b,c) Două fascicule de lumină generate cu CATIA V5R20 pentru simularea scanării cu o pereche de prisme Risley rotative. Scan pattern-urile obținute pentru prismele care se rotesc în aceeași direcție sunt prezentate în albastru, în timp ce scan pattern-urile obținute pentru prismele care se rotesc în direcții opuse sunt prezentate în roșu.

Figura 3.1.b,c arată rezultatele simulării, cu două fascicule de raze, generate pentru cele două prisme care se rotesc în aceeași direcție (figura 3.1.b) și, respectiv, în direcții opuse (figura 3.1.c). Mănunchiurile de raze sunt intersectate cu un plan (ecranul din figura 3.1.a) situat la o anumită distanță de scaner. Scan pattern-urile astfel obținute sunt prezentate în linii punctate la capătul fasciculelor de lumină. Această procedură simplă este utilizată în continuare în subcapitolul 3.3 (dar și în capitolele 4, 5 și 6) pentru a obține diferite forme ale scan pattern-urilor.

În figura 3.1.b,c, cele două fascicule de raze au fost obținute pentru un anumit modul al M , (b) pentru $M > 0$ (când cele două prisme se rotesc în aceeași direcție) și (c) pentru $M < 0$ (când două prisme se rotesc în direcții opuse). Ca și *convenție de culoare scan pattern-urile obținute pentru $M > 0$ sunt reprezentate cu albastru, în timp ce cele obținute pentru $M < 0$ sunt reprezentate cu roșu.*

Parametrii caracteristici ai sistemului sunt (figura 3.2): θ_1 și θ_2 , unghiurile prismelor; n_1 și n_2 , indicii de refracție ai materialelor prisme 1 și respectiv prisme 2 (indici care sunt considerați constanți, deoarece nu ținem cont de dispersie în lucrarea de față); ω_1 și ω_2 , vitezele de rotație ale prismelor; e , distanța dintre cele două prisme (măsurată între dioptrii perpendiculari pe axa de simetrie / optică a componentelor sistemului); și L , distanța de la scaner (dioptrul final perpendiculară pe axa optică) la ecran. Analiza unor astfel de scanere ar trebui să se bazeze și pe parametrii sintetici ai lui Marshall: k , raportul unghiurilor prismelor (definit inițial în [4] într-un mod mai particular, ca raport al unghiurilor de deviere $D=(n-1)\theta$ al fiecărei prisme, obținut folosind aproximarea unghiurilor mici) și M , raportul vitezelor de rotație [4]:

$$k = \theta_2/\theta_1 \text{ și } M = \omega_2/\omega_1 \quad (3.1)$$

Pot fi obținute patru combinații posibile ale pozițiilor relative, ale celor două prisme luând în considerare toate orientările posibile diferite ale dioptrilor prisme [6]. Prin notarea cu „a” al dioptrului perpendicular pe axa optică iar cu „b” cel înclinat, aceste configurații sunt după cum urmează (figura 3.2): (a) ab-ab; (b) ab-ba; (c) ba-ba; (d) ba-ab.

Pozițiile extreme ale celor două prisme de rotație sunt considerate în figura 3.2 și anume pentru un unghi relativ de rotație ϕ între cele două prisme egal cu 0 (pe coloana 1) și, respectiv, egal cu π (pe coloana 2). Traiectoriile fasciculului laser (considerat redus la raza sa centrală) sunt indicate în figura 3.2 pentru fiecare configurație de scaner. Din legea refracției lui Snell, precum și din considerații geometrice simple, ecuațiile prisme pentru fiecare dintre cele patru configurații de scaner (luând în considerare cele două poziții relative ale prismelor din figura 3.2) sunt prezentate în tabelul 3.1. Sunt necesare pentru a realiza simulările, dar și pentru a deduce și analiza abaterile unghiulare ale fasciculului prin sistem.

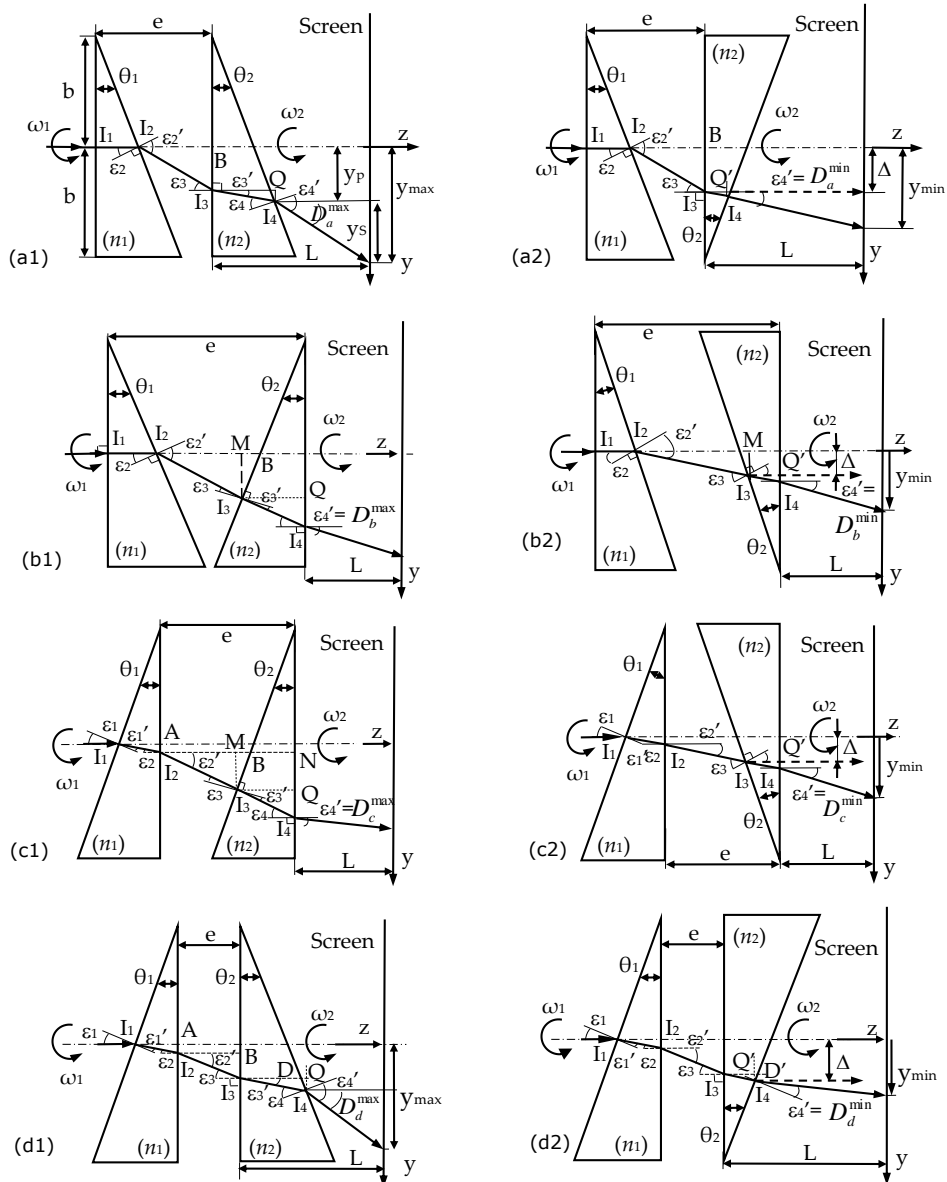


Figura 3.2. Cele patru configurații posibile ale unui scanner laser cu o pereche de prisme Risley rotative: (a) ab-ab; (b) ab-ba; (c) ba-ba; (d) ba-ab. Notății: „a” denotă dioptrul perpendicular pe axa optică și „b” dioptrul înclinat. Fiecare configurație este prezentată în două poziții caracteristice extreme ale dispozitivului, și anume cu un unghi relativ de rotație între cele două prisme $\varphi = 0$ (coloana 1) și $\varphi = \pi$ (rad) (coloana 2).

Configurația (Figura 3.2)	(a) Scanner ab-ab	(b) Scanner ab-ba	(c) Scanner ba-ba	(d) Scanner ba-ab
Unghi de incidentă	$\varepsilon_1 = 0$		$\varepsilon_1 = -\theta_1$	
Punct I ₁	$\varepsilon_1' = \varepsilon_1$		$\sin\varepsilon_1 = n_1 \sin\varepsilon_1'$	
Prisma 1	$\varepsilon_2 = \theta_1$		$-\varepsilon_1' + \varepsilon_2 = \theta_1$	
Punct I ₂	$n_1 \sin\varepsilon_2 = \sin\varepsilon_2'$			
Intre prisme	$\varepsilon_2' - \varepsilon_3 = \theta_1$	$\varepsilon_2' - \varepsilon_3 = \theta_1 \pm \theta_2$	$\varepsilon_2' - \varepsilon_3 = \pm\theta_2$	$\varepsilon_2' = \varepsilon_3$
Punct I ₃	$\sin\varepsilon_3 = n_2 \sin\varepsilon_3'$			
Prisma 2	$\mp\varepsilon_3' \pm \varepsilon_4 = \theta_2$		$-\varepsilon_3' + \varepsilon_4 = \pm\theta_2$	
Punct I ₄	$n_2 \sin\varepsilon_4 = \sin\varepsilon_4'$			
Unghi de deviere $D_j^{max,min}$ $j = a, b, c, d$	$D_a^{max,min} = \varepsilon_4' \mp \theta_2$	$D_b^{max,min} = \varepsilon_4'$	$D_c^{max,min} = \varepsilon_4'$	$D_d^{max,min} = \varepsilon_4' \mp \theta_2$

Tabelul 3.1 Ecuțiile celor patru posibile configurații cu o pereche de prisme Risley rotative (figura 3.2) — pentru cazurile abaterilor unghiulare maxime (1) și minime (2).

Observație: Primul semn din fiecare dintre aceste expresii se referă la cazul devierii maxime D_j^{max} , $j = a, b, c, d$ (pentru $\varphi = 0$), iar al doilea semn se referă la cazul devierii minime D_j^{min} , $j = a, b, c, d$ (pentru $\varphi = \pi$).

Ca o remarcă necesară, aceste ecuații pot fi utilizate în simulări pentru a urmări razele prin sistemul de prisme, prin „rotirea” (de fapt redesenarea) fiecărei prisme folosind programul de proiectare mecanică în diferite poziții. Cu toate acestea, ele nu oferă analitic direcțiile razelor emergente pentru a genera scan pattern-uri. Pentru acestea din urmă, trebuie luate în considerare abordările matematice complexe evidențiate în subcapitolele 2.5, respectiv 2.6, de exemplu [5-7].

Unghiurile de deviere minimă și maximă $D_j^{max,min}$, $j = a, b, c, d$ pot fi deduse ușor prin combinarea (pe fiecare dintre cele patru coloane din tabelul 3.1) a ecuațiilor fiecărei configurații de scanner.

Din figura 3.2.a, pentru scannerul (a) ab-ab:

$$D_a^{max,min} = \arcsin \left\{ n_2 \sin \left[\pm\theta_2 + \arcsin \frac{\sin[\arcsin(n_1 \sin\theta_1) - \theta_1]}{n_2} \right] \right\} \mp \theta_2 \quad (3.2)$$

Din figura 3.2.b, pentru scannerul (b) ab-ba:

$$D_b^{max,min} = \arcsin \left\{ n_2 \sin \left[\pm\theta_2 + \arcsin \frac{\sin[\arcsin(n_1 \sin\theta_1) - (\theta_1 \pm \theta_2)]}{n_2} \right] \right\} \quad (3.3)$$

Din figura 3.2.c, pentru scanerul (c) ba-ba:

$$D_c^{\max,\min} = \arcsin \left\{ n_2 \sin \left[\pm \theta_2 + \arcsin \frac{\sin \left\{ \arcsin \left[n_1 \sin \left(\theta_1 - \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n_1} \right) \right] \mp \theta_2 \right\}}{n_2} \right] \right\} \quad (3.4)$$

Din figura 3.2.d, pentru scanerul (d) ba-ab:

$$D_d^{\max,\min} = \arcsin \left\{ n_2 \sin \left[\pm \theta_2 + \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \left(\theta_1 - \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n_1} \right) \right) \right] \right\} \mp \theta_2 \quad (3.5)$$

Luând în considerare aproximația de ordinul întâi / pentru unghiuri mici / gaussiană, din ecuațiile (3.2)–(3.5) unghiurile de deviere liniarizate / aproximative au, pentru toate cele patru configurații, următoarea ecuație generală:

$$D_{\text{lin}}^{\max,\min} = (n_1 - 1)\theta_1 \pm (n_2 - 1)\theta_2 \quad (3.6)$$

Prin urmare, pentru cazul particular al prismelor identice, când $n_1 = n_2 = n$ și $\theta_1 = \theta_2 = \theta$:

$$D_{\text{lin}}^{\max} = 2(n-1)\theta \text{ and } D_{\text{lin}}^{\min} = 0 \quad (3.7)$$

3.3 Rezultatele scan pattern-urilor și simulărilor: forme ale scan pattern-urilor

Folosind un program de proiectare mecanică disponibil comercial, CATIA5V20, luând în considerare rotațiile finite ale celor două prisme prezentate în figura 3.1.a, fasciculele de raze pot fi obținute, așa cum se demonstrează în figura 3.1.b,c. Prin urmare, prin intersectarea lor cu un anumit plan (adică ecranul poziționat la distanța L față de dioptrul final perpendicular pe axa optică de rotație - Figura 3.2), se pot obține scan pattern-urile generate. În acest subcapitol, în cea mai mare parte se consideră că o anumită configurație a scanerului, cea din figura 3.2.d efectuează scanarea, în timp ce este oferită și o comparație a scan pattern-urilor obținute cu toate cele patru configurații din figura 3.2a–d.

Pentru a înțelege mai bine cinematica spotului laser, în Figura 3.3 este luat în considerare cazul când una dintre prisme este fixă, iar cealaltă este mobilă. Astfel, pentru patru poziții diferite rotite cu 90° din prisma fixă, rotirea celeilalte prisme produce patru cercuri în planul scanat - câte unul pentru fiecare poziție a prisme fixe. Datorită poziției longitudinale diferite a celor două prisme (adică de-a lungul axei optice de rotație), cercurile obținute atunci când Prisma 1 este mobilă și Prisma 2 este fixă sunt mai mari, deoarece Prisma 1 este situată la o distanță mai mare de ecran.

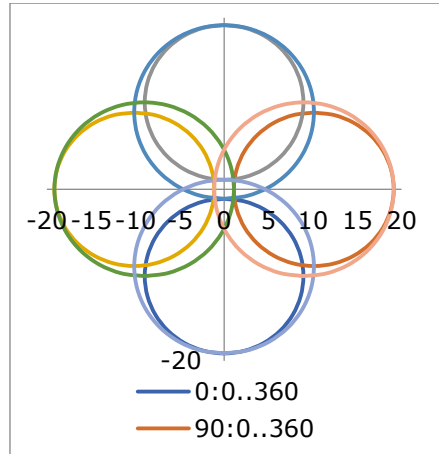


Figura 3.3. Cercuri obținute în planul scanat când una dintre prisme este fixă (poziționată în patru poziții succesive, la 0° , 90° , 180° și 270°) iar cealaltă este mobilă. Cele patru cercuri mai mari corespund situației în care Prisma 1 (poziționată mai departe de ecran decât Prisma 2) este mobilă. Valorile de pe axe sunt în milimetri. Primul număr reprezintă unghiul de rotație al Prismei 1 și al doilea pe cel al Prismei 2, de exemplu $0:0\dots360$ înseamnă că prisma 1 este fixă (în poziția 0°) și că Prisma 2 se rotește de la 0 la 360° ; $0\dots360:90$ înseamnă că Prisma 1 efectuează o rotație completă în timp ce Prisma 2 este fixată la 90° față de poziția sa $\varphi=0$) din figura 3.2(d1).

Prin combinarea celor două mișcări de rotație ale prismelor, se obține o curbă de tip Rhodonea / rose, deși cu ecuații diferite față de astfel de curbe clasice (care se generează cu mecanisme cu bare) [62], așa cum se arată în figura 3.1 pentru același $|M|$, cu sens opus de rotație a prismelor (figura 3.1.c), față de sensul de rotație identic (figura 3.1.b). Exemple de astfel de scan pattern-uri, cu o analiză multi-parametrică efectuată luând în considerare parametrii M și k din ecuația (3.1), precum și ceilalți parametri constructivi ai scannerelor sunt furnizate în Figurile 3.4–3.8.

În figura 3.4, scan pattern-urile sunt generate pentru cel mai frecvent caz de prisme identice, adică de $k = 1$ (obținut pentru $D_1 = D_2 = 2^\circ$) și mai multe valori ale lui M , pozitive pe coloana 1 și negative pe coloana 2: (a) $|M| = 2$; (b) $|M| = 4$; (c) $|M| = 6$; (d) $|M| = 8$. $|M| = 4$ caz corespunde construcțiilor din figura 3.1.

Se poate observa că numărul de bucle ale unui scan pattern este $\mu = M - 1$ pentru $M > 0$ (de exemplu, $\mu = 1$ pentru $M = 2$, $\mu = 2$ pentru $M = 3$, etc.). Diferența dintre valorile pozitive și negative ale lui M poate fi văzută, ca $\mu = |M| + 1$ pentru $M < 0$ (de exemplu, $\mu = 3$ pentru $M = 2$, $\mu = 4$ pentru $M = 3$ etc.). Din această comparație, numărul de bucle este, în general, așa cum s-a observat pentru prima dată în [4]:

$$\mu = |M - 1|, \quad (3.8)$$

Din această discuție se poate extrage o altă ecuație relevantă, simplă, referitoare la numărul de bucle ale unui scan pattern, obținut pentru același $|M|$:

$$\mu(M < 0) = \mu(M > 0) + 2 \quad (3.9)$$

De asemenea, se poate observa (mai ușor pentru $|M|$ mai mic), că specific curbelor generate cu prisme Rislei este modul în care buclele sunt generate spre interior pentru $M > 0$, în timp ce pentru $M < 0$ buclele sunt generate spre exterior.

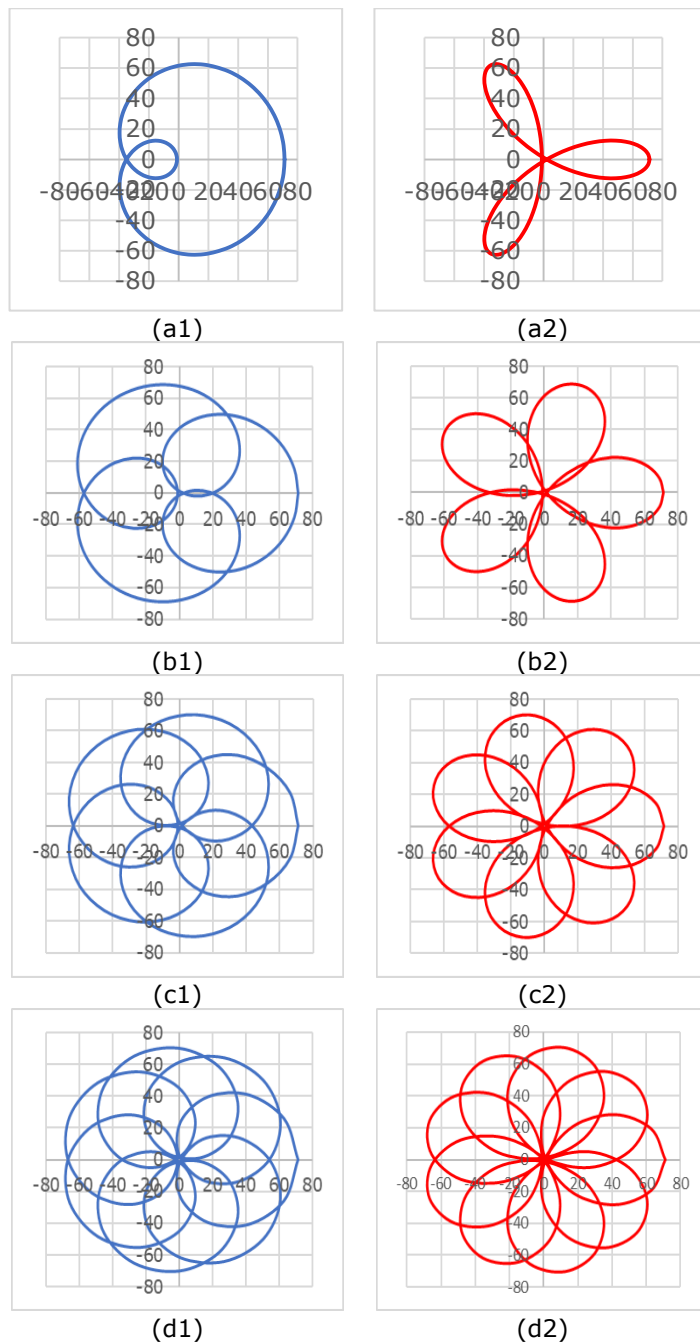


Figura 3.4. Studiul scan pattern-urilor produse de o pereche de prisme Risley rotative (adică, configurația ba-ab din Figura 3.2d) pentru $L = 1$ m, $e = 25$ mm și pentru: (a) $|M| = 2$; (b) $|M| = 4$; (c) $|M| = 6$; (d) $|M| = 8$. (1) Coloana din stânga, $M > 0$; (2) coloana din dreapta, $M < 0$. Cazul $k = 1$ a fost luat în considerare pentru prisme identice cu un unghi de deviere individual $D = (n-1)\theta = 2^\circ$. Valorile de pe axe sunt în milimetri.

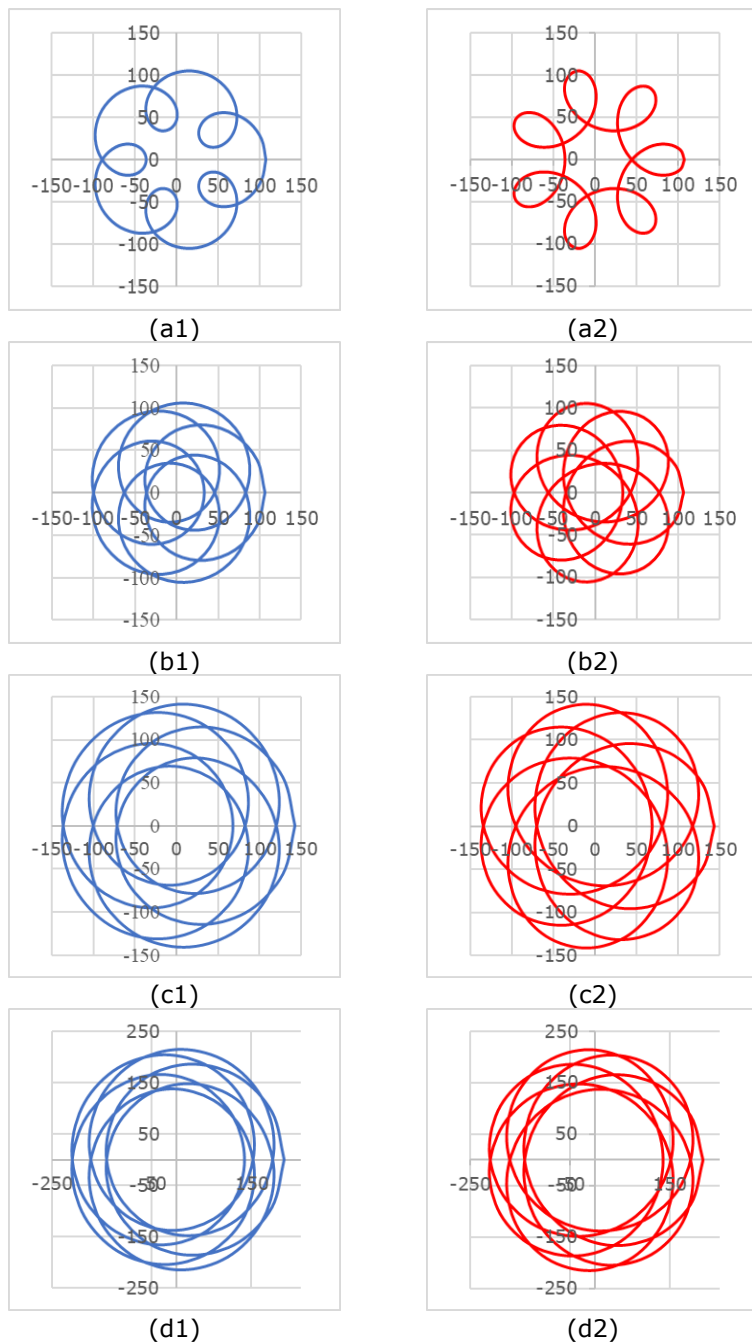


Figura 3.5. Studiul scan pattern-urilor produse de configurația ba-ab a prismelor Risley rotative (figura 3.2d), pentru $L = 1$ m, $e = 25$ mm și $|M| = 6$, cu: (a) $k = 1/2$; (b) $k = 2$; (c) $k = 3$; (d) $k = 5$. (1) Coloana din stânga, $M > 0$; (2) coloana din dreapta, $M < 0$. Valorile de pe axe sunt în milimetri.

În figura 3.5 sunt prezentate scan pattern-urile obținute pentru $|M| = 6$, pentru valori crescătoare ale lui k : de la (a) $k = 2/4 = 1/2$ (obținut pentru $D_1 = 4^\circ$ și $D_2 = 2^\circ$) până la (b) $k = 4/2 = 2$ (pentru $D_1 = 2^\circ$ și $D_2 = 4^\circ$), (c) $k = 6/2 = 3$ (pentru $D_1 = 2^\circ$ și $D_2 = 6^\circ$) și (d) $k = 10/2 = 5$ (pentru $D_1 = 2^\circ$ și $D_2 = 10^\circ$). Cazul intermediar $k = 2/2 = 1$ pentru acest $|M|$ a fost deja prezentat în figura 3.4.c. Ca o remarcă, aceste valori specifice au fost alese deoarece astfel de prisme Risley sunt disponibile comercial, de exemplu de la firma Thorlabs [63].

Din figura 3.5, făcând o comparație de-a lungul fiecăreia dintre cele două coloane, se poate observa că pe măsură ce k crește, buclele se intersectează din ce în ce mai mult. Acest lucru se datorează variației devierii unghiulare minime care poate fi obținută pe măsură ce θ_2 crește — în cazul configurației scannerului din figura 3.2.d — din ecuația (3.5). Această discuție este făcută în detaliu în subcapitolul 3.5.

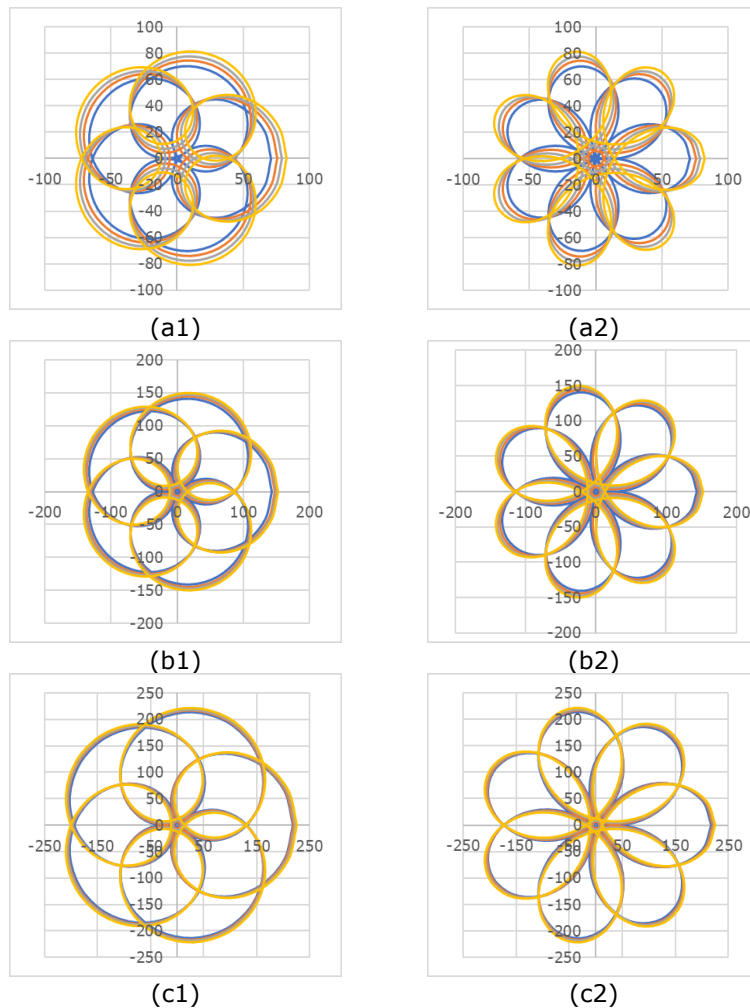


Figura 3.6. Studiul scan pattern-urilor produse de configurația ba-ab a prismelor Risley rotative (Figura 3.2.d), pentru $L = 1$ m, și $|M| = 6$, cu: (a) $D = 2^\circ$, (b) $D = 4^\circ$ și (c) $D = 6^\circ$. (1) Coloana din stânga, $M > 0$; (2) coloana din dreapta, $M < 0$. Valorile de pe axe sunt în milimetri.

Figura 3.6 prezintă diferențele dintre scan pattern-urile obținute pentru patru valori posibile ale distanței e dintre cele două prisme Risley identice și pentru $M = 6$ (coloana 1) și $M = -6$ (coloana 2). Aceste valori ale lui e sunt diferite pentru fiecare pereche de prisme, luând în considerare unghiurile de devierii (individuale) ale acestora: (a) $D = 2^\circ$, (b) $D = 4^\circ$ și (c) $D = 6^\circ$. Cazul $D = 10^\circ$ nu mai este prezentat aici, deoarece este similar cu acesta din urmă, dar valorile obținute sunt analizate în subcapitolul 3.5 și pentru un astfel de caz.

Concret, cele două valori ale lui e sunt considerate pornind de la una mică care (abia) evită situația în care prismele s-ar atinge, până la o valoare maximă e_{\max} specifică fiecărui D . Pentru acesta din urmă condiția să aibă încă refracțiile în interiorul prismelor pentru diametrul lor $2b$ a fost luată în considerare pentru fiecare pereche de prisme. Constatarea acestor valori e_{\max} s-a făcut pur grafic (nu analitic), folosind programul de proiectare mecanică.

Figura 3.7 prezintă scan pattern-urile când se variază semnificativ valorile distanței L de la scanner la ecran. Astfel, a fost considerată o creștere de 10 ori pentru L de la un scan pattern la altul, adică de la $L = 10$ la 100 m. Cazul $L = 1$ m a fost deja luat în considerare în figura 3.4.c.

Pentru a încheia această prezentare, în figura 3.8 sunt arătate diferențele dintre scan pattern-urile celor patru configurații de scanner din figura 3.2. Cazul lui $|M| = 8$ și de $k = 1$ (obținut de această dată pentru $D_1 = D_2 = 10^\circ$). Prismele cu unghi mare au fost considerate ca un exemplu pentru a distinge mai bine între scan pattern-uri. Ordinea scan pattern-urilor în funcție de dimensiunea lor/raza exterioră/FOV este, în toate graficele din figura 3.8, de la cel mai mic la cel mai mare: (c), (b), (d) și (a).

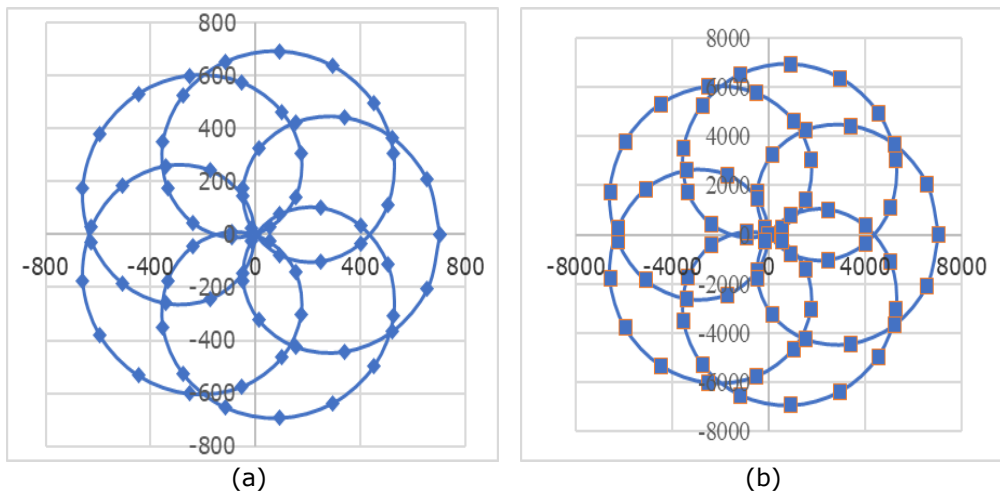


Figura 3.7. Scan pattern-uri produse de configurația ba-ab a prismelor Risley (figura 3.2.d), pentru $k = 1$, $M = 6$ și (a) $L = 10$ m; (b) $L = 100$ m. Valorile de pe axe sunt în milimetri

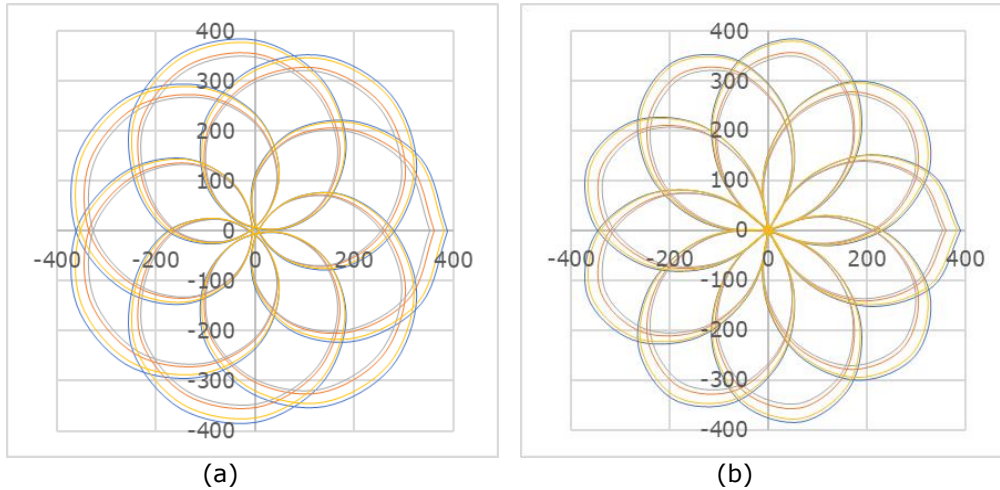


Figura 3.8. Comparație între scan pattern-uri ale celor patru configurații de scanner prezentate în figura 3.2, pentru $|M| = 8$ și $k = 1$ (acesta din urmă obținut pentru $D_1 = D_2 = 10^\circ$). (a) Coloana din stânga, $M > 0$; (b) coloana din dreapta, $M < 0$. Valorile de pe axe sunt în milimetri.

3.4 Analiza multi-parametrică a deviațiilor unghiulare

Analiza se referă la abaterile unghiulare ale celor patru configurații de scanere prezentate în figura 3.2, caracterizate cu expresiile date prin ecuațiile (3.2) până la (3.5).

Figura 3.9.a prezintă devierile unghiulare maxime ale razelor laser, D_j^{max} , $j = a, b, c, d$ în funcție de unghiul prismelor, pentru cazul prismelor identice, deci cu $n_1 = n_2 = n$ și $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ (adică cu $k = 1$). Aceste valori exacte ale devierilor sunt comparate cu cele date de valoarea aproximativă/liniarizată, D_{lin}^{max} , dată de ecuația (3.7). Se poate observa că acesta din urmă este aceeași, indiferent de configurația scannerului. Figura 3.9.b oferă eroarea dintre cazul în care abaterile unghiulare maxime sunt luate în considerare în aproximarea lor liniară, în loc de valorile lor exacte. Se poate observa că această aproximare poate fi aproximativ valabilă până la un unghi de prismă de $0,087 \text{ rad} = 10^\circ$ (deci și pentru penele optice). Pentru prismele cu un unghi mai mare, trebuie luate în considerare expresiile exacte ale devierilor unghiulare.

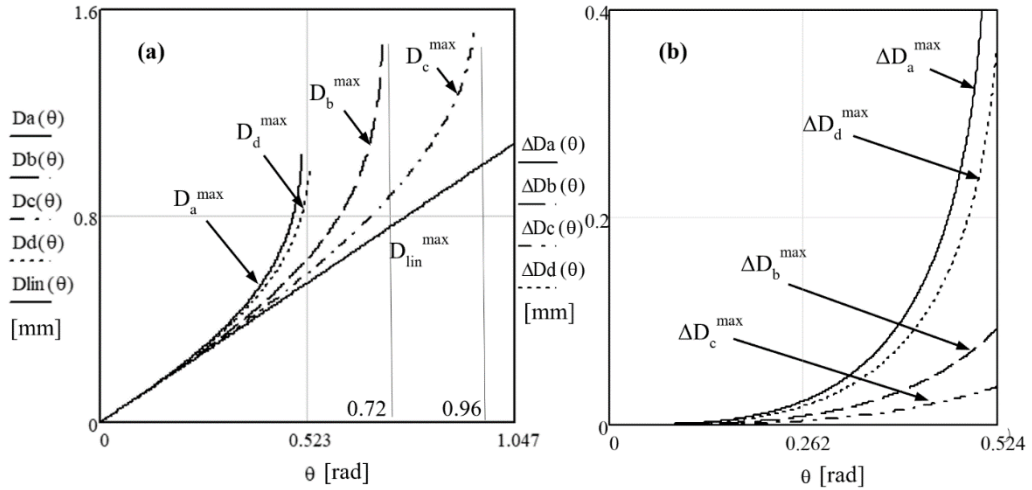


Figura 3.9. (a) Abaterile unghiulare maxime D_j^{\max} , $j = a, b, c, d$ în funcție de unghiul θ al prismelor identice, prezentate în comparație cu cea aproximativă/liniarizată, D_{lin}^{\max} , Ecuația (3.7); (b) eroarea absolută dintre abaterile unghiulare maxime și aproximarea lor liniară. A fost considerat un indice de refracție $n = 1,517$ pentru ambele prisme

O altă concluzie, care poate fi extrasă din acest studiu din figura 3.9.b este că, din figura 3.2, configurațiile (a) și (d) au neliniarități mult mai mari decât configurațiile (b) și (c). Cea mai puternică neliniaritate se referă la configurația (a), în timp ce cea mai slabă caracterizează configurația (c).

Din figura 3.9 se poate observa că un unghi limită al prisme, θ_j^{lim} , $j = a, b, c, d$, poate fi determinat pentru fiecare configurație de scanner, în funcție de indicele de refracție n al prismelor, așa cum se remarcă și din figura 3.10.

Din figura 3.2.a, acest unghi limită al prisme este obținut din condițiile pentru evitarea reflexiilor totale pe al doilea și al patrulea dioptru a scannerului. Aceste condiții sunt:

$$\varepsilon'_2 < \pi/2 \text{ and } \varepsilon'_4 < \pi/2 \quad (3.10)$$

Folosind ecuațiile fiecărui scanner din tabelul 3.1, aceste inecuații pot da valori limită ale unghiurilor fiecărei prisme, θ_1 și θ_2 . Pentru cazul particular al prismelor identice și folosind aproximarea unghiurilor mici, aceste inecuații pot furniza apoi o valoare limită aproximativă a θ_j^{lim} , $j = a, b, c, d$. Este important de remarcat din figurile 3.9 și 3.10 că astfel de limite sunt mai mari decât cele exacte, care sunt mai mici atunci când nu se utilizează aproximarea gaussiană. Folosind pentru unghiurile limită ale fiecărei prisme, notațiile sunt:

$$\varepsilon_{1l} = \arcsin 1/n_1 \text{ and } \varepsilon_{2l} = \arcsin 1/n_2, \quad (3.11)$$

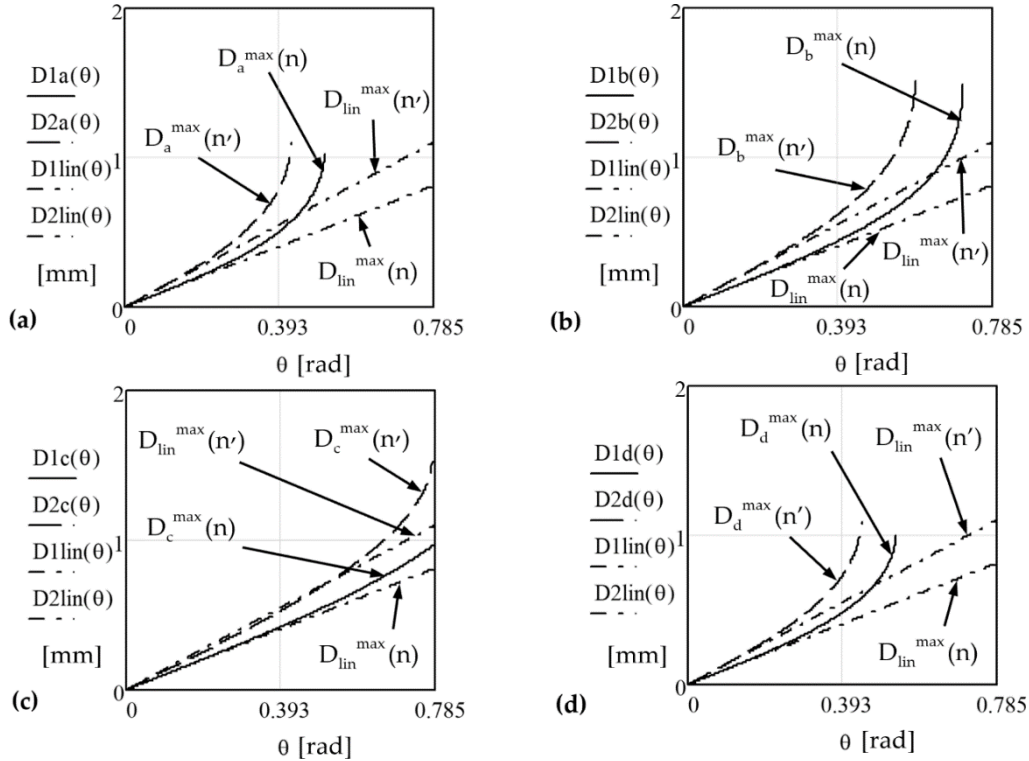


Figura 3.10. Abateri unghiulare maxime, D_j^{max} , $j = a, b, c, d$, în funcție de unghiul θ al prismelor identice pentru două valori ale indicelui de refracție: $n=1,517$ și $n'=1,7$. Fiecare configurație de scanner, (a-d) este luată în considerare separat, în timp ce deviațiile unghiulare exacte sunt comparate cu cea aproximativă/liniarizată pentru fiecare indice de refracție

Din figura 3.2.a, pentru scannerul (a) ab-ab, condițiile pentru a avea un fascicul emergent din scanner sunt:

$$\theta_1 < \varepsilon_{1l} \text{ and } \theta_2 < \varepsilon_{2l} - \arcsin \frac{\sin[\arcsin(n_1 \sin \theta_1) - \theta_1]}{n_2} \quad (3.12)$$

din care, pentru prisme identice și pentru unghiuri mici:

$$\theta < n/(n-1 + \sqrt{n^2-1}) = \theta_a^{lim}. \quad (3.13)$$

Din figura 3.2.b, pentru scannerul (b) ab-ba, condițiile pentru a avea un fascicul emergent din scanner sunt:

$$\theta_1 < \varepsilon_{1l} \text{ and } n_2 \sin(\theta_2 - \varepsilon_{2l}) - \theta_2 < \theta_1 - \arcsin(n_1 \sin \theta_1) \quad (3.14)$$

din care, pentru prisme identice și pentru unghiuri mici:

$$\theta < n/2(n-1) = \theta_b^{lim}. \quad (3.15)$$

Din figura 3.2.c, pentru scanerul (c) ba-ba, condițiile pentru a avea un fascicul care iese din scaner sunt:

$$\theta_1 - \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n_1} < \varepsilon_{1l} \text{ and } n_2 \sin(\varepsilon_{2l} - \theta_2) > \sin \left\{ \arcsin \left[\theta_1 - \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n_1} \right] - \theta_2 \right\}, \quad (3.16)$$

din care, pentru prisme identice și pentru unghiuri mici, condiția (15) este valabilă și în acest caz, deci $\theta_c^{lim} = \theta_b^{lim}$. Cu toate acestea, acest lucru nu este adevărat pentru unghiurile limită exacte care se referă la curbele neliniare ale abaterilor unghiulare maxime din figura 3.9a.

Din figura 3.2.d, pentru scanerul (d) ba-ab, condițiile pentru a avea un fascicul care iese din scaner sunt:

$$\theta_1 - \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n_1} < \varepsilon_{1l} \text{ and } n_2 \sin(\varepsilon_{2l} - \theta_2) > n_1 \sin \theta_1 - \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n_1}, \quad (3.17)$$

din care, pentru prisme identice și pentru unghiuri mici:

$$\theta < n/(2n - 1) = \theta_d^{lim} \quad (3.18)$$

În timp ce accentul în această analiză a fost pus pe variația abaterilor unghiulare, o altă abordare, axată în întregime pe unghiurile limită ale prismelor Risley, a fost făcută în [50].

Parametrul de care depind abaterile este indicele de refracție al prismelor. Prin urmare, a doua parte a acestui studiu a abaterilor unghiulare maxime este prezentată în figura 3.10, unde unghiurile D_j^{max} , $j = a, b, c, d$ sunt prezentate ca funcții ale unghiului prisme $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, la fel, dar pentru două valori ale indicelui de refracție al celor două prisme (când $n_1 = n_2$): pentru $n = 1,517$ (ca în figura 3.9) și pentru $n' = 1,7$. Se poate observa că deviația unghiulară maximă, deci câmpul vizual, este ușor crescut atunci când se folosesc prisme Risley cu un indice de refracție mai mare, deși limita prisme unghiulare θ_d^{lim} care poate fi aleasă este mai mică pentru un n mai mare. Ultimul aspect este în acord cu ecuația (3.18).

Valorile determinate grafic pentru unghiurile limită, pentru ambii indici de refracție considerați, sunt extrase din figura 3.10 din tabelul 3.2.

Configurația scanerului	Indice refracție	
	$n = 1.517$	$n' = 1.7$
Figura 2a	$\theta_a^{lim}(n) = 0.523 = \pi/6$	$\theta_a^{lim}(n') \cong 0.43$
Figura 2b	$\theta_b^{lim}(n) = 0.72$	$\theta_b^{lim}(n') \cong 0.6$
Figura 2c	$\theta_c^{lim}(n) = 0.96$	$\theta_c^{lim}(n') \cong 0.785 = \pi/4$
Figura 2d	$\theta_d^{lim}(n) = 0.53$	$\theta_d^{lim}(n') \cong 0.45 \cong \pi/7$

Tabelul 3.2. Unghiul prisme limită $\theta_j^{lim}(rad)$, $j = a, b, c, d$ în ceea ce privește indicii de refracție (cazul prismelor identice, adică $k = 1$).

Observație: Trebuie subliniat că aceste unghiuri limită (exacte) trebuie utilizate în general, în timp ce valorile aproximative obținute în ecuația (3.13), (3.15) și (3.18) sunt limitate la domeniul unghiului mic (adică, pentru $\theta < 10^\circ$).

3.5 Analiza dimensiunilor scan pattern-urilor: reguli de bază pentru proiectarea scan pattern-urilor, deci a scanerelor

Trebuie făcută o corelație necesară între scan pattern-urile analizate în subcapitolul 3.3 și abaterile unghiulare în subcapitolul 3.4. Acest lucru permite analiza multi-parametrică a dimensiunilor scan pattern-urilor, pentru a completa analiza parametrilor formelor acestora, efectuată pe exemple în subcapitolul 3.3. Aceste două tipuri de analize (corelate) permit extragerea regulilor de bază pentru proiectarea scanerelor cu prismă Risley pentru a satisface cerințele anumitor aplicații.

3.5.1 Câmpul de scanare al sistemului cu o pereche de prisme Risley rotative

a) Studiu cu privire la unghiurile prismelor

Una dintre cele mai comune cerințe ale aplicațiilor este să aibă cel mai mare câmp de scanare posibil. Din figura 3.9 se poate observa că alegerea optimă a orientării prisme pentru a atinge acest câmp maxim este în configurația (a) din Figura 3.2, urmată de configurația (d). În schimb, configurațiile (b) și (c) produc, folosind aceeași pereche de prisme (identice), o deviere unghiulară maximă mult mai mică. Aceeași inegalitate:

$$D_a^{max} > D_d^{max} > D_b^{max} > D_c^{max}, \forall \theta \quad (3.19)$$

poate fi observată din analiza scan pattern-urilor simulate din figura 3.8. Totuși, ceea ce nu poate fi obținut în întregime din simulări este limita unghiului prisme pentru care inegalitatea (3.19) încă se menține. Astfel, din figura 3.9.a se poate observa că acest unghi limită este $\pi/8$ rad. Acest lucru face ca concluzia de mai sus să fie valabilă pentru pene optice, care au unghiuri de prismă mai mici decât (aproximativ) $\pi/18$ rad (deviația unei singure prisme este $D = 10^\circ$ pentru $\theta = 18^\circ 9'$ pentru $n = 1,517$).

Deoarece $\theta = \pi/8$ rad este unghiul limită pentru scanerelor cu prisme Risley în configurațiile (a) și (d), din figura 3.9, dacă se urmărește să se atingă unghiuri de devieri maxime mai mari și, prin urmare, un câmp de scanare mai mare, (b) poate fi utilizată până la unghiuri de prismă de $\theta \approx 0,72$ rad, sau configurația (c) pentru până la $\theta \approx 0,96$ rad (ambele valori evaluate pentru $n = 1,517$).

Din punctul de vedere al acestor unghiuri limită ale prisme, ar trebui luată în considerare analiza din subcapitolul 3.4, bazată pe condiția de a se evita reflexia totală asupra celui de-al doilea dioptru a fiecărei prisme și, prin urmare, ecuația (3.12) pentru (a), ecuația (3.14) pentru (b), ecuația (3.16) pentru (c) și ecuația (3.17) pentru (d).

De asemenea, s-ar putea lua în considerare un caz $k \neq 1$, prin urmare folosind prisme diferite, pentru a crește câmpul vizual. O astfel de abordare ar da rezultate care se află între cazurile de mai sus de configurații (a) până la (d) (cu prisme identice), într-o analiză mai complicată care ar putea face obiectul unei optimizări viitoare, dar poate fi prea complicată pentru a fi de interes în practică. Prin urmare, se poate lua în considerare un scanner (mai simplu) cu prisme identice fără a eșua într-un proces de optimizare din punctul de vedere al câmpului de scanare. Abaterile unghiulare maxime, respectiv ecuațiile (3.2)–(3.5), precum și cele liniare, respectiv ecuația (3.6), dau câmpul vizual maxim al scan pattern-ului pentru fiecare

configurație. Din figura 3.4 această rază este identică pentru diferite valori ale lui M și din figura 3.5 crește cu k , în acord cu ecuația (3.5) pentru configurația (d).

După cum s-a concluzionat în secțiunea anterioară, trebuie de asemenea subliniat că, din figura 3.9, configurațiile (a) și (d) au cele mai puternice neliniarități ale deviației cu creșterea unghiului prisme, în timp ce configurațiile (b) și (c) au cele mai mici. S-ar putea folosi această concluzie pentru a construi un scaner cu unghiuri ale prisme apropiate de valorile din tabelul 3.2, de exemplu (pentru un anumit n), pentru a maximiza deviația unghiulară și, prin urmare, câmpul de scanare.

b) Studiu cu privire la indicele de refracție n al prismelor

Din figura 3.10, prin alegerea unei valori mai mari pentru n (pentru ambele prisme, deoarece cazul $k = 1$ a fost luat în considerare și aici pentru simplitate), se poate atinge același unghi maxim de deviere și, prin urmare, același câmp de scanare, pentru un unghi de prisme mai mic. θ , deși neliniaritatea curbei D_j^{max} este aproximativ aceeași. În domeniul unghiurilor mici, totuși, există un câștig clar din alegerea unui n mai mare, deoarece D_{lin}^{max} este mai mare, atât din graficele din figura 3.10, cât și din ecuația (3.7).

c) Studiu cu privire la distanța e dintre cele două prisme

Din figura 3.6, cel mai semnificativ câștig în ceea ce privește e din punctul de vedere al câmpului vizual este pentru prismele cu $D = 2^\circ$ și mai puțin pentru $D = 4^\circ$, în timp ce pentru $D = 6^\circ$ sau 10° (acesta din urmă nereprezentat în figura 3.6, deoarece ultimele două cazuri sunt prea asemănătoare), acest câștig devine mai puțin important. În concluzie, ar trebui să mergem pe o creștere de e doar pentru pene optice cu unghi mic, în special cu $D = 2^\circ$ (pentru care $\theta = 3^\circ 53'$ pentru $n = 1,517$). Aspectul relevant este că, pentru un astfel de sistem, e poate fi crescut mult (adică până la 350 mm în figura 3.6.a), deși trebuie luat în considerare și un compromis între câștigul câmpului de scanare și dimensiunile sistemului. O "pliere" a sistemului pentru o distanță atât de mare "e" ar putea fi luată în considerare în acest caz, folosind oglinzi suplimentare, ca și pentru alte tipuri de scanere, poligonale sau galvanometrice [64].

d) Studiu cu privire la distanța L de la scaner la țintă

Soluția de creștere a câmpului vizual prin creșterea L poate fi aplicabilă numai în unele situații, deoarece, în general, mărimea lui L este impusă de aplicația în sine. Pentru teledetecție sau pentru detectarea în securitate și apărare, de exemplu, L este mare, iar relația simplă $2LD_{lin}^{max}$ poate fi aplicată pentru raza câmpului de scanare.

Un caz interesant este reprezentat de aplicațiile care au valori intermediare ale lui L , de până la (sau în jur de) 1 m, așa cum au fost considerate în toate studiile din figurile 3.4 – 3.6, precum și din figurile 3.8 – 3.10. Pentru astfel de situații (în metrologie optică, fabricație cu laser, imprimare 3D, etc.) și mai ales când distanța de la scaner la planul țintă este menținută constantă, L poate fi mărită (după cum s-a subliniat pentru dimensiunea e mai sus) fără mărirea dimensiunilor sistemului prin utilizarea a trei sau chiar doar cu două oglinzi suplimentare [64]. Astfel, se poate obține o creștere suplimentară a câmpului de scanare.

e) Studiu cu privire la configurația scannerului

Din scan pattern-urile celor patru configurații de scanner prezentate în figura 3.8 (pentru $|M| = 8$ și $D_1 = D_2 = 10^\circ$), dimensiunea/câmpul de scanare al acestor scan pattern-uri este mai mare pentru configurația (a) decât pentru (d), (b) și (c). Aceasta corespunde exact (și provine din) ordinea abaterilor unghiulare maxime de la analiza din figura 3.9 (vezi ecuația 3.20). În plus, se poate observa că scan pattern-urile sunt apropiate, două câte două, pe de o parte pentru configurațiile (a) cu (d), și pe de altă parte pentru configurațiile (b) cu (c), evidențiate și în figura 3.9.a.

3.5.2 Zona oarbă (internă) a scan pattern-urilor

Acest aspect al discului alb (neatinș de razele laser) central este deosebit de important în practică, pentru aplicații precum prelucrarea cu laser. O metodă pentru a produce un asemenea disc în centrul câmpului vizual (și cea mai de încredere) implică utilizarea prismelor Risley identice, deoarece expresiile razelor $\Delta_j, j=a,b,c,d$ nu depind de distanța L până la țintă, așa cum se poate observa și din figura 3.4. Acest lucru este important în aplicațiile în care această distanță L este variabilă și nu poate fi controlată (imagistică, în scopuri biomedicale sau industriale, teledetecție, CAD/CAM cu scanere laser, etc).

Există aplicații în care întregul disc corespunzător lui D_j^{max} trebuie acoperit în cel mai convenabil mod, de exemplu cu partea interioară a buclelor care trece prin axa optică de rotație pentru a minimiza timpul de scanare fără a crește factorul de umplere într-un mod neutil pentru aplicație (teledetecție) pentru reperarea țintelor de anumite dimensiuni într-un anumit câmp de scanare. Se poate obține cu ușurință folosind metoda grafică o distanță L pentru o anumită valoare a lui e pentru care această condiție este îndeplinită [49]. Reciproc, pentru o anumită distanță L față de planul scanat, se poate lua în considerare distanța e între prisme în acest sens. Deși acest lucru poate să nu dea întotdeauna rezultate satisfăcătoare din cauza parametrilor specifici scannerului, se poate vedea din exemplele din figura 3.4 că se poate obține o situație când chiar și pentru $k = 1$ scan pattern-urile (adică vârfulurile buclelor) sunt foarte aproape de centrul câmpului vizual (în acest caz, la 1 mm pentru un câmp total cu o rază de 71,2 mm obținut pentru $L = 1$ m). Astfel, acoperirea întregului câmp poate fi realizată eficient.

3.6 Concluzii

A fost efectuat un studiu multi-parametric al scan pattern-urilor unei perechi de prisme Risley rotative. Au fost abordate aspecte teoretice ale abaterilor unghiulare (minime și maxime, exacte și aproximative). Simulările scan pattern-urilor au fost efectuate cu metoda grafică exactă, ușor de utilizat, care, după cunoștințele noastre, a fost introdusă în [49] și dezvoltată ulterior [66]. Această analiză multi-parametrică atât a abaterilor, cât și a scan pattern-urilor a fost efectuată luând în considerare toți parametrii constructivi ai scannerului, precum și parametrii lui Marshall [4]. S-a realizat o corelație între aspectele analitice și simulări, după cum s-a subliniază prin exemple. Astfel, s-a demonstrat că teoria și simulările se validează reciproc. S-a făcut și o validare experimentală a simulării efectuate, așa cum se arată în acest studiu, dar și

în (alte) exemple diferite din [49,61,65]. Analiza multi-parametrică a formelor și a dimensiunilor (exterioare și interioare) ale scan pattern-urilor (în formă de inel) a permis extragerea regulilor de bază pentru a sprijini proiectarea optimă a scanerelor optomecanice cu prisme Risley pentru cerințele diferitelor aplicații [66].

Bibliografie

- [1] Marshall, G.F.; Stutz, G.E. (Eds.) Handbook of optical and laser scanning, 2nd ed.; CRC Press: London, UK, 2011.
- [2] Bass, M. Handbook of Optics, 3rd ed.; Mc. Graw-Hill Inc.: New York, NY, USA, 2009; pp. 30.1–30.68.
- [3] Rosell, F.A. Prism scanner. *J. Opt. Soc. Am.* 1960, 50, 521.
- [4] Marshall, G.F. Risley Prism Scan Patterns. *Proc. SPIE* 1999, 3787, 74–86.
- [5] Yang, Y. Analytic solution of free space optical beam steering using Risley prisms. *J. Lightwave Technol.* 2008, 26, 3576–3583.
- [6] Li, Y. Third-order theory of the Risley-prism-based beam steering system. *Appl. Opt.* 2011, 50, 679–686.
- [7] Y. Closed form analytical inverse solutions for Risley-prism-based beam steering systems in different configurations. *Appl. Opt.* 2011, 50, 4302–4309.
- [8] Wang, Z.; Cao, J.; Hao, Q.; Zhang, F.; Cheng, Y.; Kong, X. Superresolution imaging and field of view extension using a single camera with Risley prisms. *Rev. Sci. Instrum.* 2019, 90, 33701.
- [9] Li, A.; Liu, X.; Gong, W.; Sun, W.; Sun, J. Prelocation image stitching method based on flexible and precise boresight ad-justment using Risley prisms. *JOSA A* 2019, 36, 305–311.
- [10] Li, A.; Yi, W.; Zuo, Q.; Sun, W. Performance characterization of scanning beam steered by tilting double prisms. *Opt. Express* 2016, 24, 23543–23556.
- [11] Li, A.; Ding, Y.; Bian, Y.; Liu, L. Inverse solutions for tilting orthogonal double prisms. *Appl. Opt.* 2014, 53, 3712–3722.
- [12] Li, A.; Jiang, X.; Sun, J.; Wang, L.; Li, Z.; Liu, L. Laser coarse-fine coupling scanning method by steering double prisms. *Appl. Opt.* 2012, 51, 356–364.
- [13] Garcia-Torales, G.; Strojnik, M.; Paez, G. Risley prisms to control wave-front tilt and displacement in a vectorial shearing interferometer. *Appl. Opt.* 2002, 41, 1380–1384.
- [14] Duma, V.-F.; Nicolov, M. Neutral density filters with Risley prisms: Analysis and design. *Appl. Opt.* 2009, 48, 2678–2685.
- [15] Florea, C.; Sanghera, J.; Aggarwal, I. Broadband beam steering using chalcogenide-based Risley prisms. *Opt. Eng.* 2011, 50, 033001.
- [16] Zhou, Y.; Fan, D.; Fan, S.; Chen, Y.; Liu, G. Laser scanning by rotating polarization gratings. *Appl. Opt.* 2016, 55, 5149–5157.
- [17] Roy, G.; Cao, X.; Bernier, R.; Roy, S. Enhanced scanning agility using a double pair of Risley prisms. *Appl. Opt.* 2015, 54, 10213–10226.
- [18] Li, A.; Gong, W.; Zhang, Y.; Liu, X. Investigation of scan errors in the three-element Risley prism pair. *Opt. Express* 2018, 26, 25322–25335.
- [19] Cheng, Y.-S.; Chang, R.-C. Characteristics of a prism-pair anamorphic optical system for multiple holography. *Opt. Eng.* 1998, 37, 2717.
- [20] Kiyokura, T.; Ito, T.; Sawada, R. Small Fourier transform spectroscopy using an integrated prism-scanning interferometer. *Appl. Spectrosc.* 2001, 55, 1628–1633.
- [21] Oka, K.; Kaneko, T. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms. *Opt. Express* 2003, 11, 1510–1519.

- [22] Tao, X.; Cho, H.; Janabi-Sharifi, F. Optical design of a variable view imaging system with the combination of a telecentric scanner and double wedge prisms. *Appl. Opt.* 2010, 49, 239–246.
- [23] Warger, W.C.; DiMarzio, C.A. Dual-wedge scanning confocal reflectance microscope. *Opt. Lett.* 2007, 32, 2140–2142.
- [24] Liu, L.; Wang, L.; Sun, J.; Zhou, Y.; Zhong, X.; Luan, Z.; Liu, D.; Yan, A.; Xu, N. An Integrated Test-Bed for PAT Testing and Verification of Inter-Satellite Lasercom Terminals. *Proc. SPIE* 2007, 6709, 670904.
- [25] Piyawattanametha, W.; Ra, H.; Qiu, Z.; Friedland, S.; Liu, J.T.C.; Loewke, K.; Kino, G.S.; Solgaard, O.; Wang, T.D.; Mandella, M.J.; et al. In vivo near-infrared dual-axis confocal microendoscopy in the human lower gastrointestinal tract. *J. Biomed. Opt.* 2012, 17, 021102.
- [26] Montagu, J. Scanners-galvanometric and resonant. In *Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2003; pp. 2465–2487.
- [27] Benner, W.R. *Laser Scanners: Technologies and Applications*; Pangolin Laser Systems Inc.: Lexington, KY, USA, 2016.
- [28] Duma, V.-F.; Tankam, P.; Huang, J.; Won, J.J.; Rolland, J.P. Optimization of galvanometer scanning for Optical Coherence Tomography. *Appl. Opt.* 2015, 54, 5495–5507.
- [29] Li, Y. Beam deflection and scanning by two-mirror and two-axis systems of different architectures: A unified approach. *Appl. Opt.* 2008, 47, 5976–5985.
- [30] Duma, V.-F. Polygonal mirror laser scanning heads: Characteristic functions. *Proc. Rom. Acad. Ser. A* 2017, 18, 25–33.
- [31] Duma, V.-F. Laser scanners with oscillatory elements: Design and optimization of 1D and 2D scanning functions. *Appl. Math. Model.* 2019, 67, 456–476.
- [32] Strathman, M.; Liu, Y.; Keeler, E.G.; Song, M.; Baran, U.; Xi, J.; Sun, M.-T.; Wang, R.; Li, X.; Lin, L.Y. MEMS scanning mi-cromirror for optical coherence tomography. *Biomed. Opt. Express* 2015, 6, 211.
- [32] Gora, M.J.; Suter, M.J.; Tearney, G.J.; Li, X. Endoscopic optical coherence tomography: Technologies and clinical applications. *Biomed. Opt. Express* 2017, 8, 2405–2444.
- [34] Cogliati, A.; Canavesi, C.; Hayes, A.; Tankam, P.; Duma, V.-F.; Santhanam, A.; Thompson, K.P.; Rolland, J.P. MEMS-based handheld scanning probe with pre-shaped input signals for distortion-free images in Gabor-Domain Optical Coherence Microscopy. *Opt. Express* 2016, 24, 13365–13374.
- [35] Podoleanu, A.Gh.; Rosen, R.B. Combinations of techniques in imaging the retina with high resolution. *Prog. Retin. Eye Res.* 2008, 27, 464–499.
- [36] Grulkowski, I.; Gorczynska, I.; Szkulmowski, M.; Szlag, D.; Szkulmowska, A.; Leitgeb, R.A.; Kowalczyk, A.; Wojtkowski, M. Scanning protocols dedicated to smart velocity ranging in Spectral OCT. *Opt. Express* 2009, 17, 23736–23754.
- [37] Ju, M.J.; Heisler, M.; Athwal, A.; Sarunic, M.V.; Jian, Y. Effective bidirectional scanning pattern for optical coherence tomography angiography. *Biomed. Opt. Express* 2018, 9, 2336.
- [38] Huang, D.; Swanson, E.A.; Lin, C.P.; Schuman, J.S.; Stinson, W.G.; Chang, W.; Hee, M.R.; Flotte, T.; Gregory, K.; Puliafito, C.A.; et al. Optical coherence tomography. *Science* 1991, 254, 1178–1181.
- [39] Drexler, W.; Liu, M.; Kumar, A.; Kamali, T.; Unterhuber, A.; Leitgeb, R.A. Optical coherence tomography today: Speed, contrast, and multimodality. *J. Biomed. Opt.* 2014, 19, 071412.
- [40] Hsieh, Y.-S.; Ho, Y.-C.; Lee, S.-Y.; Chuang, C.-C.; Tsai, J.-C.; Lin, K.-F.; Sun, C.-W. Dental Optical Coherence Tomography. *Sensors* 2013, 13, 8928–8949.

- [41] Schneider, H.; Park, K.-J.; Häfer, M.; Rüger, C.; Schmalz, G.; Krause, F.; Schmidt, J.; Ziebolz, D.; Haak, R. Dental Applications of Optical Coherence Tomography (OCT) in Cariology. *Appl. Sci.* 2017, 7, 472.
- [42] Erdelyi, R.-A.; Duma, V.-F.; Sinescu, C.; Dobre, G.M.; Bradu, A.; Podoleanu, A. Dental Diagnosis and Treatment Assessments: Between X-rays Radiography and Optical Coherence Tomography. *Materials* 2020, 13, 4825.
- [43] Meemon, P.; Yao, J.; Lee, K.-S.; Thompson, K.P.; Ponting, M.; Baer, E.; Rolland, J.P. Optical Coherence Tomography Enabling Non Destructive Metrology of Layered Polymeric GRIN Material. *Sci. Rep.* 2013, 3, 1709.
- [44] van't Oever, J.J.F.; Thompson, D.; Gaastra, F.; Groendijk, H.A.; Offerhaus, H.L. Early interferometric detection of rolling contact fatigue induced micro-cracking in railheads. *NDT E Int.* 2017, 86, 14–19.
- [45] Hutiu, G.; Duma, V.-F.; Demian, D.; Bradu, A.; Podoleanu, A.G. Assessment of ductile, brittle, and fatigue fractures of metals using optical coherence tomography. *Metals* 2018, 8, 117.
- [46] Duma, V.-F.; Sinescu, C.; Bradu, A.; Podoleanu, A. Optical Coherence Tomography Investigations and Modeling of the Sin-tering of Ceramic Crowns. *Materials* 2019, 12, 947.
- [47] Liu, J.; You, X.; Wang, Y.; Gu, K.; Liu, C.; Tan, J. The alpha-beta circular scanning with large range and low noise. *J. Microsc.* 2017, 266, 107–114.
- [48] Carrasco-Zevallos, O.M.; Viehland, C.; Keller, B.; McNabb, R.P.; Kuo, A.N.; Izatt, J.A. Constant linear velocity spiral scanning for near video rate 4D OCT ophthalmic and surgical imaging with isotropic transverse sampling. *Biomed. Opt. Express* 2018, 9, 5052.
- [49] Duma, V.-F.; Schitea, A. Laser scanners with rotational Risley prisms: Exact scan patterns. *Proc. Rom. Acad. Ser. A* 2018, 19, 53–60.
- [50] Hwang, K.; Seo, Y.-H.; Ahn, J.; Kim, P.; Jeong, K.-H. Frequency selection rule for high definition and high frame rate Lissajous scanning. *Sci. Rep.* 2017, 7, 14075.
- [51] Tanguy, Q.A.A.; Gaiffe, O.; Passilly, N.; Cote, J.-M.; Cabodevila, G.; Bargiel, S.; Lutz, P.; Xie, H.; Gorecki, C. Real-time Lissajous imaging with a low-voltage 2-axis MEMS scanner based on electrothermal actuation. *Opt. Express* 2020, 28, 8512.
- [52] Sun, J.; Liu, L.; Yun, M.; Wan, L.; Zhang, M. Distortion of beam shape by a rotating double prism wide-angle laser beam scanner. *Opt. Eng.* 2006, 45, 043004.
- [53] Lavigne, V.; Ricard, B. Fast Risley prisms camera steering system: Calibration and image distortions correction through the use of a three-dimensional refraction model. *Opt. Eng.* 2007, 46, 43201.
- [54] Zhou, Y.; Fan, S.; Chen, Y.; Zhou, X.; Liu, G. Beam steering limitation of a Risley prism system due to total internal reflection. *Appl. Opt.* 2017, 56, 6079–6086.
- [55] Bravo-Medina, B.; Strojnik, M.; Garcia-Torales, G.; Torres-Ortega, H.; Estrada-Marmolejo, R.; Beltrán-González, A.; Flores, J.L. Error compensation in a pointing system based on Risley prisms. *Appl. Opt.* 2017, 56, 2209–2216.
- [56] Li, A.; Yi, W.; Sun, W.; Liu, L. Tilting double-prism scanner driven by cam-based mechanism. *Appl. Opt.* 2015, 54, 5788–5796.
- [57] Zhou, Y.; Lu, Y.; Hei, M.; Liu, G.; Fan, D. Motion control of the wedge prisms in Risley-prism-based beam steering system for precise target tracking. *Appl. Opt.* 2013, 52, 2849–2857.
- [58] Lai, S.-F.; Lee, C.-C. Analytic inverse solutions for Risley prisms in four different configurations for positing and tracking systems. *Appl. Opt.* 2018, 57, 10172–10182.
- [59] Li, A.; Sun, W.; Liu, X.; Gong, W. Laser coarse-fine coupling tracking by cascaded rotation Risley-prism pairs. *Appl. Opt.* 2018, 57, 3873–3880.

- [60] Schitea, A.; Tuef, M.; Duma, V.-F. Modeling of Risley prisms devices for exact scan patterns. Proc. SPIE 2013, 8789, 878912.
- [61] Dimb, A.-L.; Duma, V.-F. Experimental validations of simulated exact scan patterns of rotational Risley prisms scanners. Proc. SPIE 2020, 11354, 113541U.
- [62] Erb, W. Rhodonea Curves as Sampling Trajectories for Spectral Interpolation on the Unit Disk. Constr. Approx. 2020, 53, 281–318.
- [63] Available online:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=147
(accessed on 25 July 2021).
- [64] Duma, M.-A.; Duma, V.-F. Theoretical approach on the linearity increase of scanning functions using supplemental mirrors. Proc. SPIE 2019, 11028, 1102817.
- [65] Duma, V.-F. A novel, graphical method to analyze optical scanners with Risley prisms. Proc. SPIE 2021, 11830, 118300F.
- [66] Duma, V.-F.; Dimb, A.-L. Exact Scan Patterns of Rotational Risley Prisms Obtained with a Graphical Method: Multi-Parameter Analysis and Design. Appl. Sci. 2021, 11, 8451; <https://doi.org/10.3390/app11188451>

4. SIMETRII ALE SCAN PATTERN-URILOR ALE SCANERELOR LASER CU PRISME RISLEY ROTATIVE

4.1. Noțiuni generale

Scanerile optice laser cu prisme Risley sunt unele dintre cele mai utilizate dispozitive de scanare bidimensionale (2D) [1-19], concurând cu scanerile galvanometre cu două axe [20-30], capete de scanare 2D cu o oglindă poligonală [31-34] sau sistemele micro-electro-mecanice (MEMS) cu oglinzi oscilatoare [35-37], capitolul 1.

Pe lângă avantajele deja cunoscute ale prismelor Risley rotative, și anume că sunt rapide și mai compacte, au costuri mai mici și permit o gamă largă de dimensiuni ale diametrului lor [38,39] – capitolul 2, studiul din acest capitol are scopul de a le oferi și avantajul vitezei de simulare mai mare în procesul de obținere al scan pattern-urilor, aplicând metoda simetriei.

Scanerile laser cu prisme Risley rotative produc scan pattern-uri care pot fi clasificate ca un tip de curbă rhodonea / rose [42], datorită simetriei lor. Prezentul studiu se bazează pe metoda grafică (vezi capitolul 3) dezvoltat [40,41] pentru a simula și analiza astfel de scan pattern-uri folosind un program de proiectare mecanică disponibil comercial, CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța). Această metodă grafică are atât avantajul simplității (în ceea ce privește scan pattern-urile analitice) cât și al generării scan pattern-urilor exacte (spre deosebire de scan pattern-urile aproximative). Scopul acestui capitol este de a utiliza această metodă pentru a studia proprietățile de simetrie ale scan pattern-urilor produse de o pereche de prisme Risley de rotație. Se efectuează o analiză multiparametrică, luând în considerare parametrii caracteristici ai scannerului abordat: indici și unghiuri de refracție ale prismelor, precum și vitezele de rotație ale acestora. În plus, sunt considerați parametrii lui Marshall definiți în capitolul 3: rapoartele vitezelor de rotație și ale unghiurilor prisme. Deoarece simetriile sunt identice pentru scan pattern-urile generate de toate cele patru configurații posibile ale unei perechi de prisme (și doar dimensiunile acestora sunt diferite), forma acestor scan pattern-uri este studiată doar pentru una dintre aceste configurații. Prin urmare, fără a pierde generalitatea, sunt determinate simetriile scan pattern-urilor produse de astfel de scanere, precum și unele dintre dimensiunile lor caracteristice. Au fost obținute reguli de bază pentru a putea genera modele adecvate pentru o anumită aplicație. Mai mult, am demonstrat că **simetriile existente simplifică procesul de obținere a scan pattern-urilor prin identificarea părților repetitive (definite ca structuri de simetrie) ale unui scan pattern.**

Capitolul prezintă o serie din rezultatele publicate în [A-L. Dimb, V.-F. Duma*, Symmetries of Scan Patterns of Laser Scanners with Rotational Risley Prisms, *Symmetry-Basel* **15**(2), 336 (2023); ISSN **2073-8994**; **IF 2.7/2022**; <https://doi.org/10.3390/sym15020336>].

4.2. Scanere laser cu o pereche de prisme Risley rotative

Schema unui scanner laser cu o pereche de prisme Risley este prezentată în Figura 4.a, extrasă din simulările pe care le-am efectuat folosind CATIA V5R20. O trăsătură caracteristică a unor astfel de scanere este că fiecare prismă este orientată cu unul dintre dioptrii ei (notat cu „a”) perpendicular pe axa optică a sistemului, care este axa sa de simetrie. Cealaltă dioptru al fiecărei prisme (notat cu „b”) este înclinat în raport cu axa optică. Având în vedere acest aspect, cele patru configurații posibile ale acestui sistem (așa cum este subliniat în întreaga literatură pe această temă) sunt prezentate în Figura 4.b–e. Fără a pierde generalitatea studiului de simetrie, în lucrarea de față este abordată doar una dintre aceste patru configurații (concret, ba-ab), deoarece s-a demonstrat în [41] că scan pattern-urile pe care le generează diferitele configurații au aceeași formă, ele se deosebesc doar prin dimensiuni.

Prismele 1 și 2 se rotesc cu vitezele unghiulare ω_1 și, respectiv, ω_2 . Fasciculul laser incident este orientat prin centrul axei optice de rotație și este refractat prin cei patru dioptrii către un plan/ecran scanat perpendicular pe axa optică de rotație. Poziția relativă curentă a prismelor produce un fascicul emergent care are un centru care intersectează ecranul într-un punct curent P. Poziția acestui punct poate fi caracterizată în sisteme de coordonate carteziene sau polare (se vor defini în secțiunea 4.4), ambele cu centrul în punctul O. Acest punct este intersecția dintre axa optică de rotație (adică direcția axei fasciculului incident) și ecranul.

Pe parcursul acestui capitol, pentru a evidenția doar aspectele de simetrie, fasciculele laser sunt considerate reduse la axele lor de simetrie, prin urmare intersecțiile lor cu ecranul sunt reduse la punctele P care definesc curbe specifice – scan pattern-uri. Diametrul finit al fasciculelor și, prin urmare, distorsiunile acestor puncte laser în planul scanat, care au fost abordate în literatura de specialitate [43,44], nu sunt subiectul prezentului studiu.

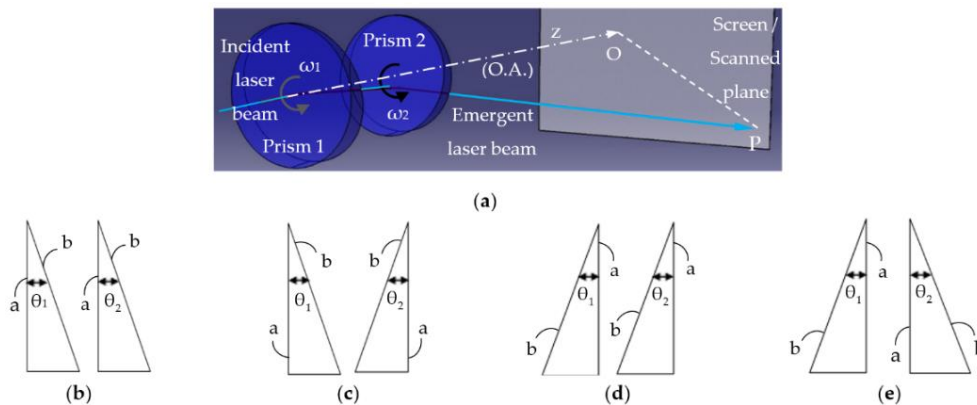


Figura 4.1. (a) Scanare laser cu o pereche de prisme Risley rotative - modelare cu metoda grafică dezvoltată în [40,41] folosind un program de proiectare mecanică disponibil comercial, CATIA V5R20. (b–e) Cele patru configurații posibile ale acestui tip de scanner, cu prismele optice orientate diferit cu dioptrul „a” (perpendicular pe axa optică) și dioptrul „b” (înclinată față de axa optică). Într-una din notațiile comune în domeniu, aceste patru configurații sunt denumite: (b) ab-ab; (c) ab-ba; (d) ba-ba; (e) ba-ab.

Ceilalți doi parametri caracteristici ai prismelor 1 și 2 (așa cum au fost marcați și în capitolul anterior) sunt indicii de refracție n_1 și n_2 , precum și unghiurile prismelor,

θ_1 și, respectiv, θ_2 . Ei definesc, folosind aproximarea unghiurilor mici, binecunoscutul unghi de devierii al fiecărei prisme în paraxial:

$$D_i = (n_i - 1) \cdot \theta_i, i = 1, 2 \quad (4.1)$$

Aceste caracteristici ale scanerelor cu prisme de rotație Risley l-au determinat pe Marshall (v. și capitolul 3) să-și definească parametrii M , raportul vitezelor de rotație și k , raportul unghiurilor prismelor (definit inițial ca raportul unghiurilor de deviere D_2 și D_1 ale penei optice) [15]:

$$M = \omega_2 / \omega_1 \text{ and } k = \theta_2 / \theta_1 = D_2 / D_1 \quad (4.2)$$

Acești parametri, împreună cu dimensiunile sistemului trebuie să fie luați în considerare în orice analiză a acestor scanere, prin urmare, sunt utilizați și în capitolul de față.

4.3. Metoda grafică pentru a studia simetria scan pattern-urilor

Luând în considerare cele două prisme din CATIA V5R20 și folosind ecuațiile de bază ale prismelor pentru această configurație a scanerului:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= -\theta_1; \sin \varepsilon_1 = n_1 \sin \varepsilon_1'; -\varepsilon_1' + \varepsilon_2 = \theta_1; n_1 \sin \varepsilon_2 = \sin \varepsilon_2'; \varepsilon_2' = \varepsilon_3; \\ \sin \varepsilon_3 &= n_2 \sin \varepsilon_3'; -\varepsilon_3' + \varepsilon_4 = \pm \theta_2; n_2 \sin \varepsilon_4 = \sin \varepsilon_4', \end{aligned} \quad (4.3)$$

ecuații scrise cu notațiile din figura 4.2. Fasciculele de raze produse atunci când cele două prisme se rotesc una față de alta pot fi obținute așa cum se arată în exemplele din figura 4.3 – similar cu cele expuse în capitolul 3. Pentru a simula rotațiile lor relative (adică, cu raportul M), două prisme sunt rotite progresiv cu trepte unghiulare care sunt în acest raport M . Prin intersectarea acestor fascicule cu un plan perpendicular pe axa optică, se obține scan pattern-ul (figura 4.3).

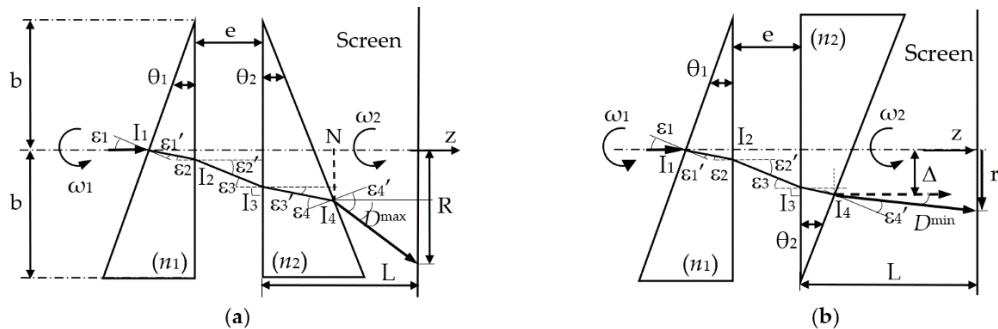


Figura 4.2. Traiectoria fascicului laser (reduc la axa centrală) prin configurația ba-ab a unui scaner cu o pereche de prisme Risley de rotație pentru două poziții relative (extreme) ale prismelor, cu un unghi relativ de rotație de (a) 0 și a (b) π (rad) între ele — pentru care se obține unghiurile de abateri maxime și minime D_{\max} și respectiv, D_{\min} .

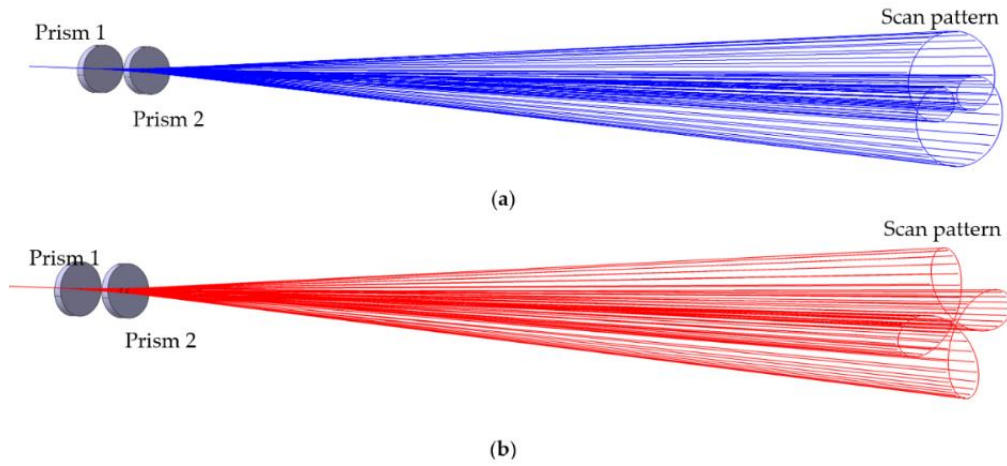


Figura 4.3. Fascicule de raze simulate cu CATIA V5R20 pentru scannerul laser cu prisme Risle în configurația ba-ab, pentru: (a) $M = 3$ și (b) $M = -3$. O convenție de culoare este utilizată pe tot parcursul acestui studiu, ca și în [40,41] și ca și în capitolul 3: albastrul corespunde scan pattern-urilor obținute cu prisme care se rotesc în aceeași direcție (adică, pentru $M > 0$), în timp ce roșu corespunde scan pattern-urilor obținute de prisme care roțiți în direcții opuse (adică pentru $M < 0$).

Din figura 4.2, folosind ecuațiile 4.3, expresiile pentru unghiul de deviere maxim și minim pentru scanner sunt:

$$D_{lin}^{max,min} = \arcsin \left\{ n_2 \sin \left[\pm \theta_2 + \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \left(\theta_1 - \arcsin \frac{\sin \theta_1}{n_1} \right) \right) \right] \right\} \mp \theta_2, \quad (4.4)$$

pentru cele două prisme rotite cu un unghi de 0 și, respectiv, π (rad) una față de cealaltă, așa cum a fost studiat în detaliu pentru toate cele patru configurații de scanner în [41].

Pentru cazul particular (obișnuit) al penelor optice, folosind aproximarea de ordinul întâi/paraxiale, ecuațiile (4.1) și (4.4) oferă expresiile unghiurilor de deviere liniarizate (adică aproximative) ale sistemului:

$$D_{lin}^{max,min} = D_1 \pm D_2, \quad (4.5)$$

Prin urmare, pentru două pene identice (adică pentru $n=n_1=n_2$ și $\theta=\theta_1=\theta_2$),

$$D_{lin}^{max} = 2(n-1)\theta \text{ and } D_{lin}^{min} = 0. \quad (4.6)$$

În cazul prismelor identice (nu neapărat pene optice), ca $D_{\min} = 0$, fasciculul emerge paralel cu axa optică (adică, după linia punctată din Figura 4.2b). Din ecuația (4.3), folosind geometria din Figura 4.2b, deviația liniară a fasciculului emergent în ceea ce privește axa optică este [41]:

$$\Delta(\theta) = b \cdot \tan \theta \cdot \tan \varepsilon_2 + e \cdot \tan[\arcsin(n \cdot \sin \varepsilon_2)], \text{ unde } \varepsilon_2 = \theta - \arcsin(\sin \theta / n) \quad (4.7)$$

unde e este distanța dintre cele două prisme (adică între dioptrii lor „a”), b este raza lor și L este distanța de la dioptrul „a” al prisme 2 la planul scanat. În toate simulările care urmează, parametrii scannerului considerați sunt (dacă nu sunt indicați altfel): $e = 25$ mm; $L = 1000$ mm; $n = 1,517$; $b = 25$ mm.

4.4. Rezultate: scan pattern-uri pentru diferiți parametri ai scannerului

Există anumite simetrii care pot fi observate în scan pattern-urile generate de scanerul cu prisme Risley rotaționale [15–19], inclusiv din studiile anterioare [40,41]. Folosind metoda grafică prezentată în secțiunea anterioară, modelele de scanare au fost obținute în cele ce urmează, cu referire la toți parametrii evidențiați mai sus: rapoartele lui Marshall M și k , unghiurile prismelor θ_1 și θ_2 , precum și indicii de refracție n_1 și n_2 .

4.4.1 Scan pattern-uri generate pentru valori întregi ale lui M

Pentru a observa simetria existentă a buclelor în scan pattern-uri (Figura 4.3), precum și dimensiunile lor pe axele x și y (Figura 4.4), au fost luate mai întâi în considerare câteva valori întregi ale lui M . Au fost aleși atât valori pare cât și impare, fiecare dintre ele atât pozitive cât și negative. În acest fel, au fost abordate un total de opt cazuri, pentru M egal cu ± 2 , ± 3 , ± 4 și ± 5 . În această subcapitol sunt luate în considerare două prisme identice, cu $D_1 = D_2 = 2^\circ$, prin urmare $k = 1$. Modelele de scanare pentru $M = 2$ și $M = -2$ sunt prezentate în Figurile 4.4, respective 4.5.

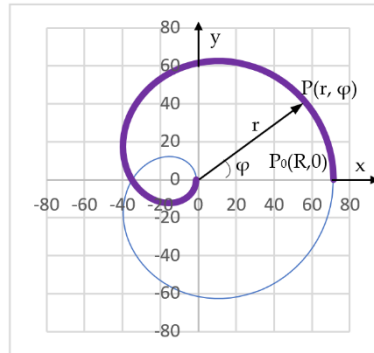


Figura 4.4. Simetrie în scan pattern-ul simulat pentru $M = 2$

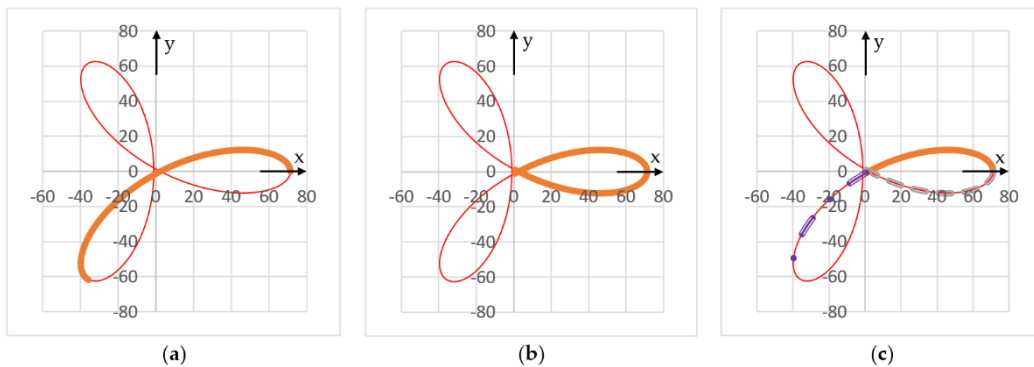


Figura 4.5. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = -2$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 4.5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $2\pi/3$; (b) de la $-\pi/3$ la $\pi/3$; (c) de la 0 la $\pi/3$.

Aceste simulări, precum și cele care urmează au fost realizate începând cu prisme plasate în poziția inițială din figura 4.2a. Prin urmare, punctul inițial al fiecărui scan pattern este $P_0(R, 0)$, cu aceste coordonate atât în sistemul cartezian, cât și în cel polar (adică, Oxy și, respectiv, $O\varphi$), așa cum se arată în figura 4.4 (și valabile pentru toate celelalte figuri cu simulările, de asemenea). Toate scan pattern-urile au fost generate în sensul acelor de ceasornic, primul punct P_0 care corespunde „vârfului” unei bucle plasat pe axa Ox . De asemenea, este plasat pe cercul care circumscrie scan pattern-ului, corespunzător câmpului de scanare al sistemului.

Figurile 4.6 și 4.7 prezintă scan pattern-urile pentru următoarele două valori, $M = 3$ și, respectiv, $M = -3$. Figurile 4.8 și 4.9 prezintă scan pattern-urile pentru $M = 4$ și respectiv $M = -4$, în timp ce figurile 4.10 și 4.11 arată scan pattern-urile obținute pentru $M = 5$ și respectiv $M = -5$.

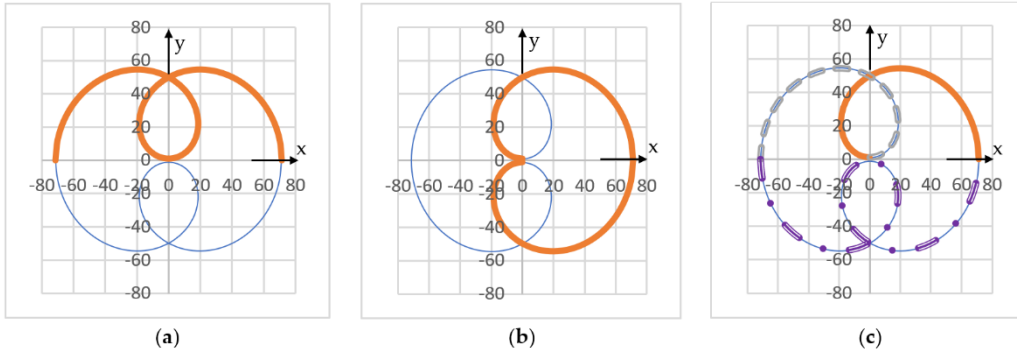


Figura 4.6. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = 3$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la π ; (b) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (c) de la 0 la $\pi/2$

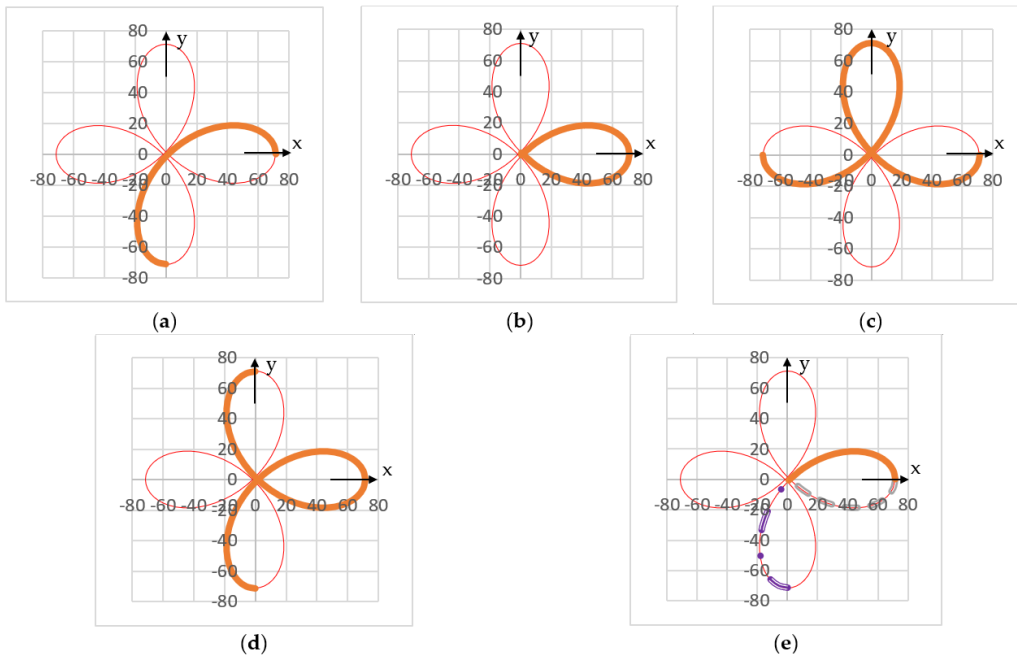


Figura 4.7. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = -3$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $\pi/2$; (b) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (c) de la 0 la π ; (d) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (e) de la 0 la $\pi/4$.

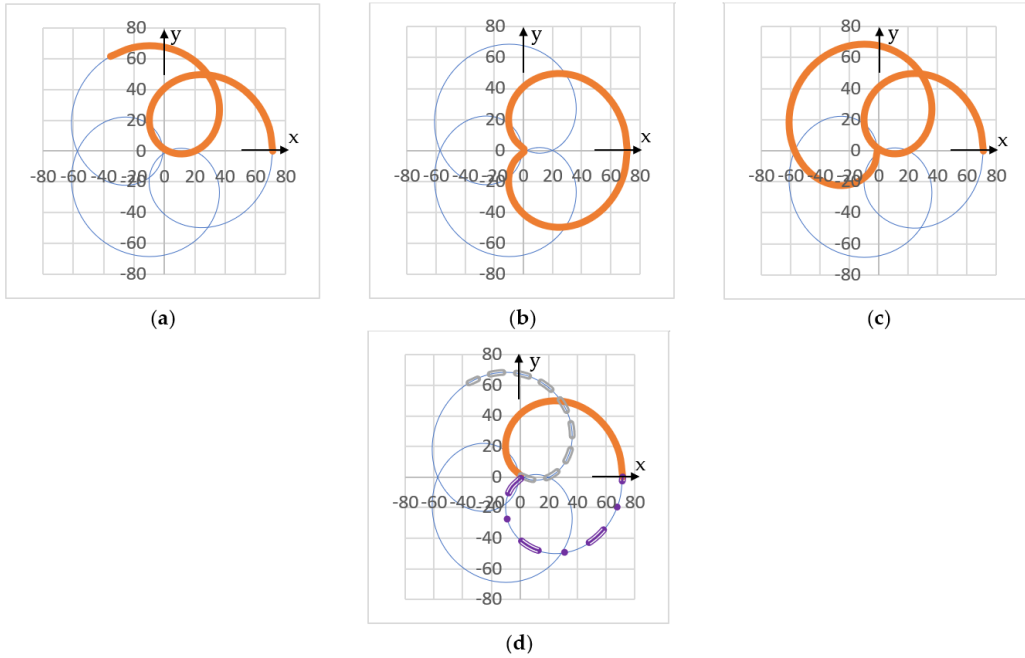


Figura 4.8. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = 4$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $2\pi/3$; (b) de la $-\pi/3$ la $\pi/3$; (c) de la 0 la π ; (d) de la 0 la $\pi/3$.

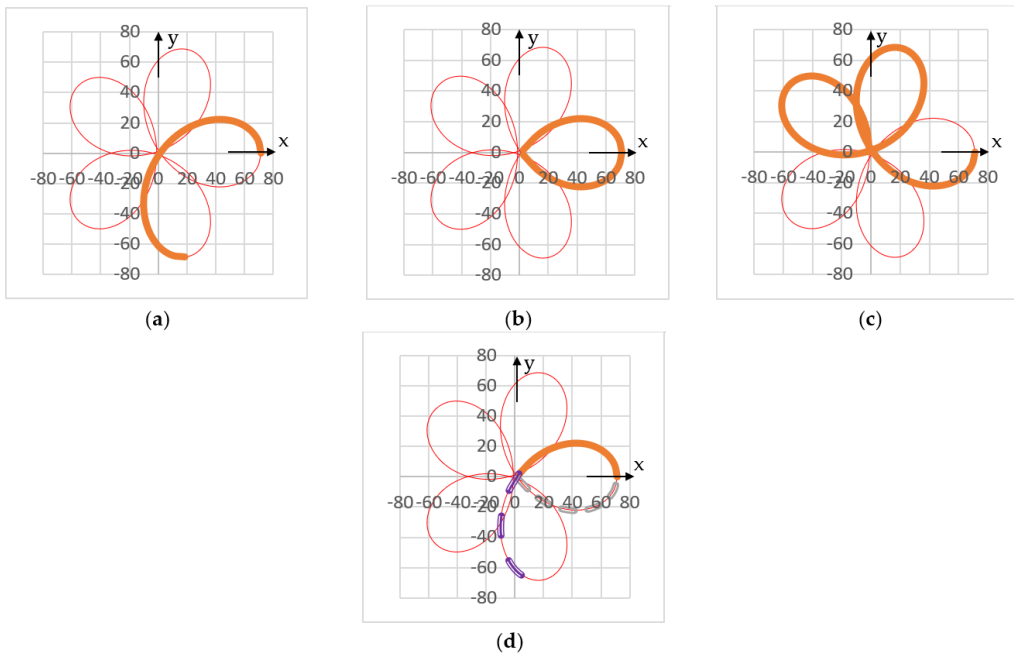


Figura 4.9. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = -4$, evidențiind structurile de simetrie definite în dubcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $2\pi/5$; (b) de la $-\pi/5$ la $\pi/5$; (c) de la 0 la π ; (d) de la 0 la $\pi/5$.

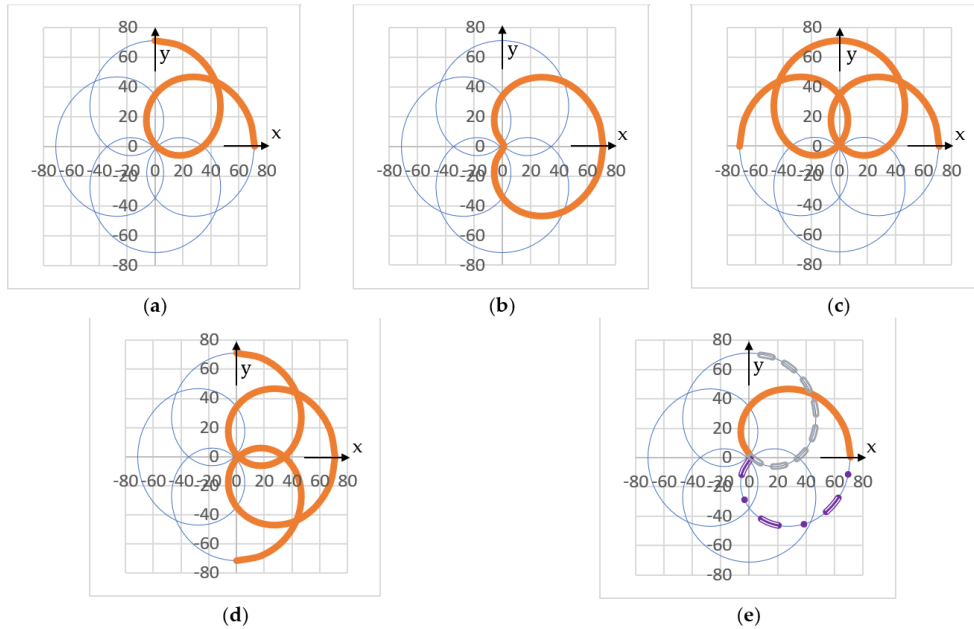


Figura 4.10. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = 5$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $\pi/2$; (b) de la $-\pi/4$ la $\pi/4$; (c) de la 0 la π ; (d) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (e) de la 0 la $\pi/4$.

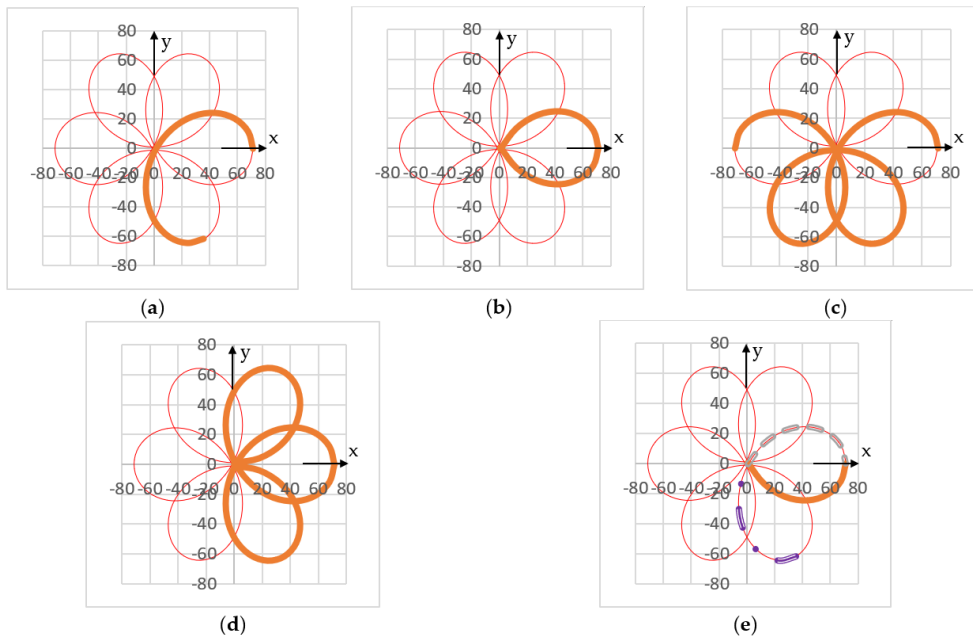


Figura 4.11. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = -5$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $\pi/3$; (b) de la $-\pi/6$ la $\pi/6$; (c) de la 0 la π ; (d) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (e) de la $-\pi/6$ la 0.

Alte două valori întregi ale lui M , egale cu ± 1 pot fi luate în considerare. Din studiul inițial din [40], dar și din figura 4.2a, se obține o traiectorie circulară cu raza R pentru $M = 1$. Pentru $M = -1$ se obține o traiectorie eliptică, așa cum se arată din [15].

Rotația în sensul acelor de ceasornic a fost definită în figura 4.2 ca direcție pentru ambelor viteze unghiulare de rotație - evidențiind astfel cazul $M > 0$ în figura 4.3a. În consecință, scan pattern-urile au fost generate în sensul acelor de ceasornic pentru $M > 0$. În cazul $M < 0$ din figura 4.3b, ω_1 a fost ales în sensul acelor de ceasornic, în timp ce ω_2 a avut sensul antiorar. Prin urmare, scan pattern-urile din figurile 4.5, 4.7, 4.9 și 4.11 au fost generate și în sensul acelor de ceasornic (adică, în sensul negativ al unghiului φ marcat în figura 4.4). Dacă direcțiile ω_1 și ω_2 ar fi ambele schimbate, scan pattern-urile ar fi în continuare aceleași pentru $M < 0$, dar ar fi generate în sens invers acelor de ceasornic.

Simetriile scan pattern-urilor pot fi obținute din toate simulările de mai sus efectuate cu privire la M . Acestea sunt discutate în subcapitolul următor, după completarea cu restul simulărilor, cu privire la toate caracteristicile scannerului. Este de remarcat faptul că astfel de simulări au fost validate experimental, pentru anumite valori diferite ale lui M , dar și pentru diferite configurații de scanner cu o pereche de prisme Risley, în mai multe studii preliminare, inclusiv [45,46]. Anumite validări experimentale au fost efectuate și în studiul inițial [40] pentru configurația ab-ba, precum și, într-o abordare mai completă, în [41]. O validare experimentală, pentru alte cazuri decât cele luate în considerare în studiile anterioare este efectuată în subcapitolul 4.7.

4.4.2 Scan pattern-uri generate pentru valori fracționale ale lui M

Scan pattern-urile produse pentru valorile fracționale ale lui M sunt de interes mai mic în aplicații. Dacă M este o fracție rațională, există o anumită simetrie, așa cum se poate observa în exemplele din figura 4.12.

În consecință, pentru $M = 1 + j/10$, unde $j = 2, 4, 6$ și 8 , există j astfel de structuri de simetrie/scan pattern-uri spiralate, așa cum sunt extrase în figura 12 (a2, b2) din toate traiectoriile care sunt prezentate în figura 12 (a1, b1). Deoarece numărul j este par în aceste exemple, $j/2$ curbe spirale sunt orientate spre dreapta și $j/2$ curbe sunt orientate spre stânga. Dacă M nu este o fracție rațională, atunci scan pattern-ul produs nu este închis și simetriile nu pot fi extrase pentru acea formă specifică, așa cum se arată, de exemplu, în [40].

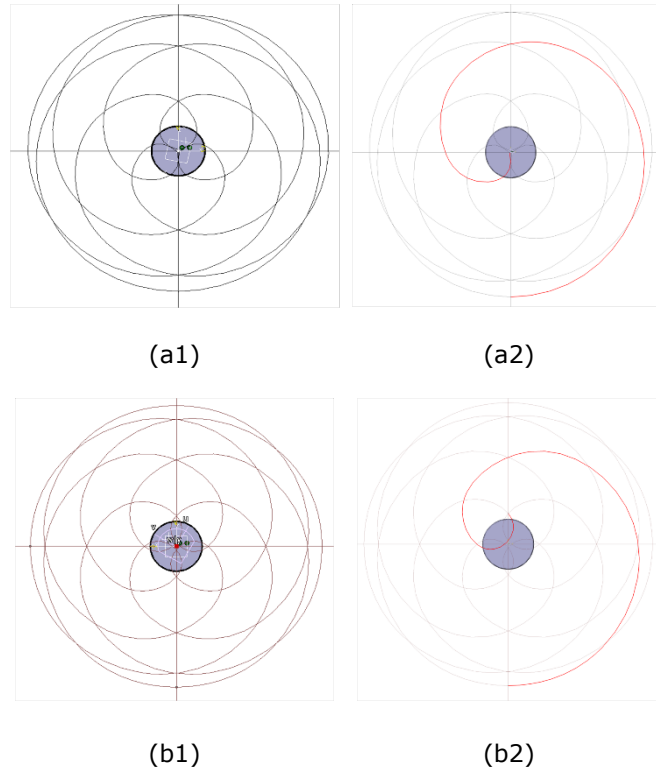


Figura 4.12. Scan pattern-urile simulate pentru (a) $M = 1,6$ și (b) $M = 1,8$, cu (1) întregul scan pattern-ul și (2) una dintre structurile de simetrie în formă de spirală extrase din scan pattern

4.4.3 Scan pattern-uri generate pentru două valori particulare ale lui M

Două cazuri particulare se obțin atunci când una dintre prisme este fixă și numai cealaltă este rotativă. Un astfel de studiu, referitor la faza inițială a prismelor este comun pentru numeroase lucrări care abordează astfel de sisteme [47] — ca punct de plecare al unui studiu privind scanarea cu prisme Risley [40,41]. Scanarea efectuată pentru astfel de cazuri este prezentată în figura 4.13:

(a) Prisma 1 este fixată în patru poziții succesive, distanțate egal cu un unghi $\Delta\varphi_1 = 90^\circ$ una față de cealaltă, în timp ce prisma 2 este mobilă. Prin urmare, din ecuația (4.2), $M = \omega_2/0 = \infty$ (unde au fost utilizate notațiile din figura 4.1).

(b) Prisma 1 este mobilă, iar Prisma 2 este fixă, aceasta din urmă poziționată în patru poziții, fiecare având un unghi $\Delta\varphi_2 = 90^\circ$ una față de alta. Prin urmare, în acest caz $M = 0/\omega_1 = 0$.

Se poate observa că scan pattern-urile circulare obținute au o rază mai mare în cazul din figura 4.13b, deoarece rotirea fasciculului laser este efectuată de la o distanță mai mare (adică, $L + e$) față de ecran (figura 4.2a). În cazul din figura 4.13a,

cercurile obținute sunt mai mici, deoarece fasciculul este rotit de prisma plasată mai aproape (adică, la distanța L) de ecran.

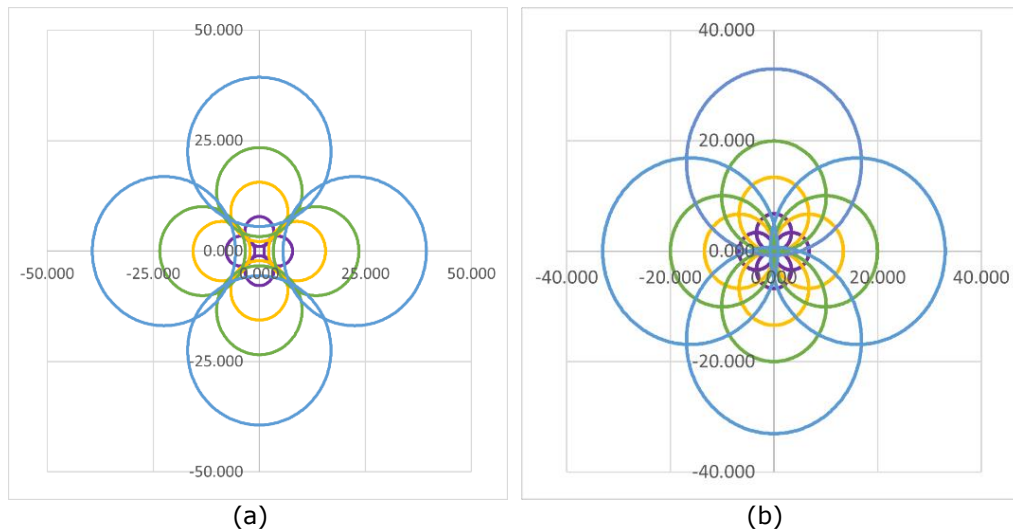


Figura 4.13. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru (a) $M = \infty$ (adică pentru $\omega_1 = 0$) și pentru (b) $M = 0$ (adică pentru $\omega_2 = 0$). Scan pattern-urile care cresc succesiv din fiecare figură corespund valorilor crescătoare succesive ale abaterilor unghiulare (egale) prisme $D_1 = D_2 = 2^\circ$ (scan pattern-uri violet); 4° (scan pattern-uri portocalii); 6° (scan pattern-uri verzi); 10° (scan pattern-uri albastre).

4.4.4 Scan pattern-uri generate pentru diferite valori ale lui k

O simulare a scan pattern-urilor este realizată în figura 4.14 pentru $|M| = 6$ (și pentru ambele valori, pozitiv și negativ pentru M), luând în considerare două valori ale raportului Marshall $k = \theta_2/\theta_1 = D_2/D_1$: (a) $k = 10^\circ/2^\circ = 5$ și (b) $k = 2^\circ/10^\circ = 1/5$. Se poate vedea impactul pe care parametrul k îl are asupra formei scan pattern-urilor, acesta fiind motivul pentru alegerea acestor valori contrastante ale raportului. Cu toate acestea, simetriile tiparelor sunt aceleași.

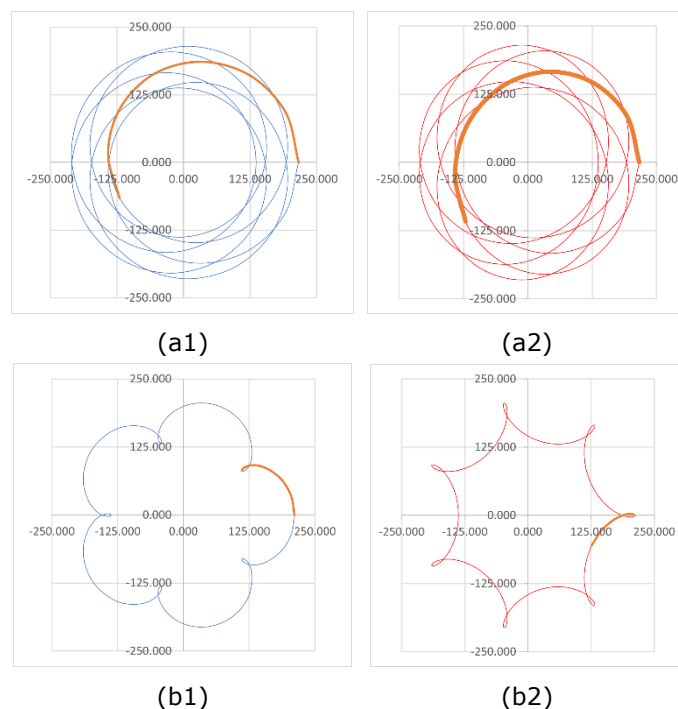


Figura 4.14. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru (1) $M = 6$ și (2) $M = -6$, pentru două valori ale parametrului $k = \theta_2/\theta_1 = D_2/D_1$: (a) $k = 5$ (pentru $D_2 = 10^\circ$ și $D_1 = 2^\circ$) și (b) $k = 1/5$ (pentru $D_2 = 2^\circ$ și $D_1 = 10^\circ$)

4.4.5 Scan pattern-uri generate pentru diferite valori ale unghiului prisme $\theta = \theta_1 = \theta_2$

Figura 4.15 prezintă o simulare a scan pattern-urilor obținute pentru două valori ale lui $|M|$, egale cu 3 și 6, atât pentru valorile pozitive cât și negative ale M . Au fost considerate perechi de prisme identice (deci scanere cu $k = 1$), cu unghiuri de deviere ale prismelor egale $D_1 = D_2 = 2^\circ$ (scan pattern albastru); 4° (scan pattern portocaliu); 6° (scan pattern gri); 10° (scan pattern galben). Prismele cu aceste unghiuri de deviere au fost alese pe parcursul studiului, după cum s-a mai subliniat, deoarece sunt disponibile în comerț [48]. Din același motiv, acestea au fost utilizate în validări experimentale ale teoriei și simulării legate de metoda grafică dezvoltată [40,41,45,46].

Se poate observa cum câmpul total al scan pattern-urilor generate crește în fiecare figură cu unghiul de deviere al prisme. Aceasta este în conformitate cu traiectoria fasciculului din figura 4.2a, care definește deviația liniară maximă R în planul scanat (adică, raza câmpului de scanare) - care urmează să fie analizată în secțiunile următoare.

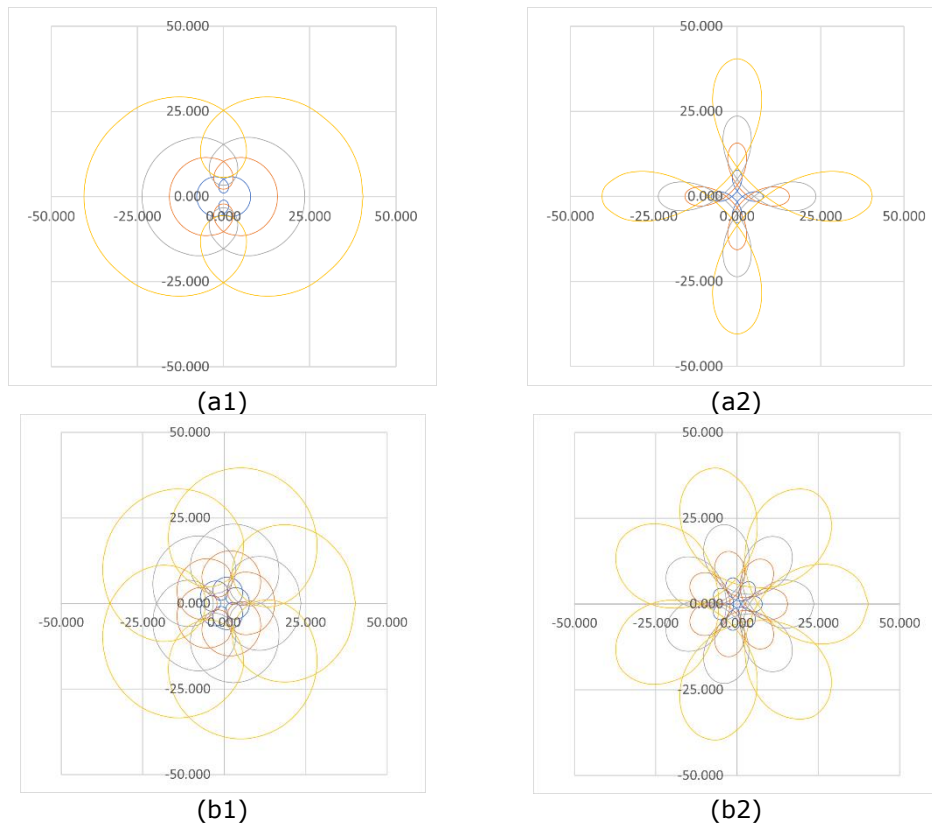


Figura 4.15. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru (1) $M > 0$ și (2) $M < 0$, pentru două valori absolute ale acestui parametru: (a) $|M| = 3$ și (b) $|M| = 6$. Scan pattern-urile care cresc succesiv din fiecare figură corespund valorilor crescătoare succesive ale unghiurilor de deviere a prisme (egale) $D_1 = D_2 = 2^\circ$ (scan pattern albastru); 4° (scan pattern portocaliu); 6° (scan pattern gri); 10° (scan pattern galben).

4.4.6 Scan pattern-uri generate pentru diferite valori ale indicelui de refracție $n = n_1 = n_2$

Figura 4.16 prezintă simulările scan pattern-urilor pentru $|M| = 6$, luând în considerare trei valori ale indicelui de refracție (egal) al celor două prisme (identice): $n = 1,517$, $n' = 1,7$ și $n'' = 1,9$. Se poate observa cum, pentru valorile crescătoare ale indicelui, dimensiunea (exterioară) R a scan pattern-urilor corespunzătoare (după cum este observat în figura 4.2a) crește succesiv, de asemenea, într-o progresie aproape aritmetică, dar care este de fapt determinată de unghiul de deviere maximă D_{\max} , așa cum se discută în subcapitolele următoare. Cu toate acestea, forma, deci simetriile scan pattern-urilor rămân aceleași, indiferent de acest parametru.

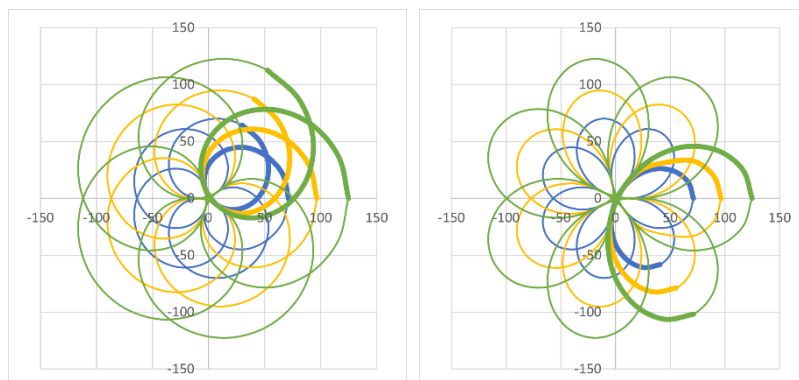


Figura 4.16. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru (a) $M = 6$ și (b) $M = -6$, pentru trei valori crescătoare succesive ale indicelui de refracție (egal) al celor două prisme: $n = 1,517$, $n' = 1,7$ și $n'' = 1,9$. Scan pattern-urile corespunzătoare cresc succesiv: albastru pentru n , portocaliu pentru n' și verde pentru n'' .

4.5 Analiza multi-parametrică a scan pattern-urilor

Mai multe concluzii legate de aspectele de simetrie pot fi extrase din simulări, pentru a servi drept reguli de bază pentru proiectarea unui scanner (adică, pentru alegerea optimă a parametrilor acestuia), pentru a obține scan pattern-urile dorite.

4.5.1 Analiza cu privire la valorile întregi ale lui M

- Simetriile scan pattern-urilor sunt identice pentru același M , dar cu un număr diferit de axe de simetrie, în funcție de semnul lui M , pentru toate simulările (figurile 4.4 – 4.16).
- Se obțin bucle interioare pentru $M > 0$, în timp ce bucle exterioare (sau "petale", în terminologia curbelor rhodonea / rose) se obțin pentru $M < 0$, acestea din urmă cu referire la curbele rhodonea [42]. Acest aspect poate fi observat din toate simulările efectuate, dar a fost evidențiat în diferite studii, începând cu cele seminale [15]. Semnul lui M nu influențează simetria, dar poate fi utilizat pentru a controla lățimea buclilor generate, precum și suprapunerea acestora (așa cum se arată în subcapitolul următor), pentru a ajusta în cele din urmă factorul de umplere al pattern-urilor.
- Numărul axelor de simetrie ale unui scan pattern este egal cu numărul său de bucle μ , deoarece din [15,40,41], dar și din toate simulările efectuate pentru M egale cu ± 2 , ± 3 , ± 4 , ± 5 și ± 6 (adică, din figurile 4.4 la 4.11, 4.15 și 4.16), se arată:

$$\mu = |M - 1| \quad (4.8)$$

Putem concluziona că raportul M este parametrul care determină în esență simetriile tiparelor. Această regulă poate fi verificată din fiecare simulare de mai sus. De exemplu, pentru $M = 2$, există o singură axă de simetrie, în timp ce pentru $M = -$

2, există trei astfel de axe (după cum se observă în figurile 4.4, respectiv 4.5). Această regulă este valabilă pentru toate valorile lui M , cu excepția cazurilor particulare de ± 1 , 0 și ∞ , așa cum sunt prezentate în tabelul 4.1.

- Unghiul dintre două axe de simetrie consecutive este (deoarece axele sunt egal distanțate):

$$\alpha = 2\pi/\mu \quad (4.9)$$

- Din ecuația (4.8) și observând rezultatele simulărilor efectuate se poate obține o relație între numărul de bucle (deci, între numărul de axe de simetrie) [41]:

$$\mu(M < 0) = \mu(M > 0) + 2 \quad (4.10)$$

- Un număr mai mare de bucle este important atunci când o anumită aplicație necesită maximizarea factorului de umplere - așa cum fac majoritatea aplicațiilor. În astfel de cazuri, utilizarea valorilor negative ale lui M este o metodă de optimizare.

- Numărul A de axe de simetrie poate fi observat din simulările efectuate, din figurile 4.4 - 4.16 (tabelul 4.1). Din scan pattern-urile obținute se poate observa că pentru o valoare impară de μ , $A = \mu$, în timp ce pentru o valoare pară de μ , $A = 2\mu/2$. Prin urmare, în toate situațiile:

$$A = \mu, \forall |M| \in N^* - \{1\} \quad (4.11)$$

- Din analiza tabelului 1 se poate obține o altă formă a ecuației (4.10), în ceea ce privește numărul de axe de simetrie:

$$A(M < 0) = A(|M| + 2) \quad (4.12)$$

- **Structurile de simetrie** pot fi definite folosind (sau extrase din) scan pattern-uri. Definim o astfel de structură de simetrie ca o parte continuă a scan pattern-ului, care pornește de la o axă de simetrie și poate genera întregul model, fiind replicat cu anumite unghiuri de rotație pentru un număr întreg de ori.

Scopul definirii și abordării unor astfel de structuri este de a ușura procesul de obținere a scan pattern-urilor. Dacă se obține (cu exactitate) o astfel de structură, care are o extensie angulară limitată, prin înmulțirea structurii de simetrie se poate obține întregul scan pattern-ului. Prin urmare, nu trebuie să se simuleze punct cu punct întregul model; obținerea uneia dintre structurile de simetrie ar fi suficientă.

Din definiția de mai sus, se poate observa că o structură de simetrie este caracterizată prin limitele ei unghiulare $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ în sistemul polar de coordonate $O r \varphi$ definit în figura 4.4. Teoretic, s-ar putea extrage o infinitate de structuri de simetrie; de exemplu, pentru $M = 3$, ele ar putea avea extensia unghiulară $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max} + n]$, unde φ_{\min} poate fi ales cu orice valoare între 0 și n . Pentru a evita ca numărul S de structuri de simetrie să fie nedeterminat în acest fel, am adăugat la definiția de mai sus condiția de a începe fiecare structură de simetrie de la o axă de simetrie (care în practică este Ox).

Unghiurile limită $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ sunt identificate în tabelul 4.1, deoarece sunt determinate pentru fiecare dintre structurile de simetrie S care pot fi identificate pentru fiecare model obținut în subcapitolul 4.4.1. Acest număr S este în relație clară cu valorile lui M și μ . Prin urmare, din tabelul 4.1 se pot obține unghiurile limită ale structurilor de simetrie:

- Pentru $M = 2 \Rightarrow \mu = 1$ și $S = 1$:

$$[\varphi_{min}, \varphi_{max}] = [0, \pi] \quad (4.13)$$

Prin urmare, scan pattern-ul complet poate fi obținut utilizând singura sa simetrie, în ceea ce privește Ox.

- Pentru $M \in \{-1, -2, 3\} \Rightarrow \mu \in \{2, 3\}$ și $S = 2$:

$$[\varphi_{min}, \varphi_{max}] = \begin{cases} [0, 2\pi/\mu] \\ [-\pi/\mu, \pi/\mu] \end{cases} \quad (4.14)$$

Așadar, scan pattern-ul complet poate fi obținut utilizând simetria sa față de Ox sau, respectiv față de Oy.

- Pentru $M=4 \Rightarrow \mu = 3$ și $S = 3$:

$$[\varphi_{min}, \varphi_{max}] = \begin{cases} [0, 2\pi/\mu] \\ [-\frac{\pi}{\mu}, \frac{\pi}{\mu}] \\ [0, \pi] \end{cases} \quad (4.15)$$

Prin urmare, scan pattern-ul complet poate fi obținut prin rotirea structurii de simetrie cu unghiuri de $2\pi/\mu$ de μ ori (pentru primele două structuri) sau prin utilizarea unei simetrii privind Ox (pentru a treia structură).

- Pentru $M \in \{-3, -4\}$ sau $|M| > 5 \Rightarrow \mu \geq 4$ și $S = 4$:

$$[\varphi_{min}, \varphi_{max}] = \begin{cases} [0, 2\pi/\mu] \\ [-\frac{\pi}{\mu}, \frac{\pi}{\mu}] \\ [0, \pi] \\ [-\pi/2, \pi/2] \end{cases} \quad (4.16)$$

Așadar, scan pattern-ul complet poate fi obținut prin rotirea structurii de simetrie cu $2\pi/\mu$ de μ ori (pentru primele două structuri) sau prin utilizarea unei simetrii cu privire la Ox sau cu privire la Oy, pentru a treia și a patra structură, respectiv.

Trebuie subliniat că, pentru a simplifica și mai mult procesul de obținere a unui scan pattern, se poate utiliza doar jumătate din bucla (care este generată cu precizie) prezentată în fiecare din ultimul grafic din figurile 4.4 - 4.11. Această jumătate de buclă poate fi apoi multiplicată folosind simetrii pentru a desena / obține întregul scan pattern.

• În aplicații, pentru a putea prezice cu precizie poziționarea spotului (laser) în fiecare moment și astfel, pentru a avea repetabilitate, valori întregi ale $|M| > 1$ sunt de cel mai mare interes, deoarece astfel de valori au proprietatea fundamentală de a genera scan pattern-uri închise, identice la fiecare rotație completă a prisme cu mișcare lentă (care este întotdeauna Prisma 1 - figurile 4.1 - 4.3). Mai mult, astfel de scan pattern-uri închise simplifică controlul procesului de scanare, care este întotdeauna o problemă – atât în ceea ce privește senzorii, cât și structurile de control pentru scanare de toate tipurile, atât cu elemente oscilatorii, cât și cu elemente rotative [49–51].

M	Raportul M	Figura	Număr lobi	Număr axe de simetrie * A	Structuri de simetrie		Observații
					Număr S	$[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$	
0	0	13b	1	1	-	-	Scan pattern-ul este un cerc excentric pe O
1	1	-	0	∞	∞	-	Scan pattern-ul este un cerc excentric pe O
	-1	-	2	2	1	$[0, \pi]$ $[-\pi/2, \pi/2]$	Scan pattern eliptic, cu axele principale (de simetrie) pe Ox și Oy
2	2	4	1	1	1	$[0, \pi]$	Axa de simetrie: Ox
	-2	5	3	3	2	$[0, 2\pi/3]$ $[-\pi/3, \pi/3]$	Axa de simetrie pe axa fiecărei bucle
3	3	6	2	2	2	$[0, \pi]$ $[-\pi/2, \pi/2]$	Axele de simetrie: Ox and Oy
	-3	7	4	4	4	$[0, \pi/2]$ $[-\pi/4, \pi/4]$ $[0, \pi]$ $[-\pi/2, \pi/2]$	Axele de simetrie: Ox, Oy (care sunt în acest caz axele de simetrie ale buclor), precum și prima și a doua bisectoare
4	4	8	3	3	3	$[0, 2\pi/3]$ $[-\pi/3, \pi/3]$ $[0, \pi]$	Axe de simetrie: axele de simetrie ale buclor, din care una este Ox
	-4	9	5	5	3	$[0, 2\pi/5]$ $[-\pi/5, \pi/5]$ $[0, \pi]$ $[-\pi/2, \pi/2]$	Din intervalele unghiulare ale structurilor de simetrie definite în subcapitolul 4.5.1, pentru fiecare caz corespunzător sau $ M > 5$ (prin urmare, pentru mai multe bucle/axe de

5	5	10	4	4	4	[0, $\pi/2$] [$-\pi/4$, $\pi/4$] [0, π] [$-\pi/2$, $\pi/2$]	simetrie), există patru metode posibile de a construi modelul de scanare complet fără a lua în considerare toate punctele sale:
	-5	11	6	6	4	[0, $\pi/2$] [$-\pi/4$, $\pi/4$] [0, π] [$-\pi/2$, $\pi/2$]	- prin rotirea structurii de simetrie cu unghiuri de $2\pi/\mu$ de μ ori (pentru primele două structuri, de intervale unghiulare [0, $2\pi/\mu$] sau [$-\pi/\mu$, π/μ]). - prin utilizarea unei simetrii în
6	6	15(b1) 16(1)	5	5	4	[0, $2\pi/5$] [$-\pi/5$, $\pi/5$] [0, π] [$-\pi/2$, $\pi/2$]	raport cu Ox sau în raport cu Oy, pentru a treia și respectiv a patra structură (definite de intervalele unghiulare [0, π] și [$-\pi/2$, respectiv $\pi/2$], din cauza modului în care au fost definite structurile de simetrie,
	-6	15(b2) 16(2)	7	7	4	[0, $2\pi/7$] [$-\pi/7$, $\pi/7$] [0, π] [$-\pi/2$, $\pi/2$]	cu primul punct pe una dintre axele Ox sau Oy, la fel ca mscă pattern-urile).
∞	∞	13a	1	1	-	-	Scan pattern-ul este un cerc excentric pe O

Tabelul 4.1. Studiul simetriilor scan pattern-urilor privind raportul M

4.5.2 Analiza cu privire la valorile fracționale ale lui M

- Valorile fracționale ale lui M au fost luate în considerare doar pe scurt în studiul de față deoarece, așa cum se arată în figura 4.12, astfel de rapoarte ale lui M produc mai multe curbe în formă de spirală. Astfel de scan pattern-uri sunt închise dacă M este o fracție rațională și, în acest caz, există o anumită simetrie; totuși, astfel de scan pattern-uri pot fi utilizate numai parțial, adică pentru unul dintre scan pattern-uri în formă de spirală. Din punct de vedere al procesului de scanare, astfel de cazuri nu prezintă un interes deosebit, deoarece din ecuația (4.1) se obțin pentru $\omega_1 > \omega_2$. Prin urmare, timpul de scanare este același ca în cazurile $M > 1$, egal cu perioada de rotație a prisme cu mișcare lentă (care este, în cazul $M > 1$, prisma 2 - figurile 4.1 -

4.3), în timp ce factorul de umplere nu este neapărat mai mare (căci acesta din urmă depinde doar de $|M|$ și de semnul lui M).

- Dacă M este o fracție irațională, atunci scan pattern-ul generat nu este închis și simetriile nu pot fi extrase pentru astfel de forme specifice; cu toate acestea, acest ultim caz poate fi de interes atunci când scopul aplicației este o densitate mare (adică factorul de umplere) a scan pattern-urilor, caz în care simetriile (precum și repetabilitate și eventual controlul) procesului ar putea deveni mai puțin importante.

- Pentru cazurile particulare de $M = 0$ sau $M = \infty$ (adică atunci când a doua prismă sau, respectiv, prima este fixă și numai cealaltă este mobilă), modelul de scanare produs este un cerc care este excentric față de punctul O . Un astfel de cerc are ca axă de simetrie dreapta $OP_0 = Ox$ - figura 4.13. Aceste cercuri pot fi plasate în diferite poziții, prin modificarea fazei inițiale a mișcării, adică prin deplasarea poziției prisme fixe.

4.5.2 Analiza cu privire la alți parametri ai scannerului

- Parametrul k determină doar forma buclilor, așa cum se arată de exemplu în figura 4.14. Se poate observa că, indiferent de valoarea lui k , se respectă simetriile date de parametrul M .

- Scan pattern-urile generate pentru diferiți indici de refracție n ai celor două prisme (identice) au aceleași simetrii care se obțin conform parametrului M . Cu toate acestea, se obțin dimensiuni diferite ale scan pattern-ului (așa cum se arată în exemplele din figura 4.16), în funcție de unghiurile de deviere minime și maxime. Aceste unghiuri D^{\min}, D^{\max} sunt furnizate de ecuația (4.4). Acestea produc devierile liniare (deci, câmpurile de scanare) deduse și validate experimental în [41] pentru toate cele patru configurații posibile ale unor astfel de scanere. Astfel de caracteristici dimensionale sunt, de asemenea, subliniate pe scurt în subcapitolul 4.6.

- Similar cu cazul indicelui n , unghiul θ al prismelor (identice) produce doar o scalare a scan pattern-urilor (figura 4.15). Aceste scan pattern-uri respectă simetriile realizate și pentru parametrul M , cu dimensiuni conform ecuației (4.4).

- Distanța e dintre cele două prisme și distanța L de la dioptrul „a” al celei de-a doua prisme și planul scanat nu au nici un efect asupra simetriilor. După cum s-a studiat în [41], acești parametri determină doar dimensiunile și nu forma scan pattern-urilor.

Ca o concluzie generală a acestei secțiuni, raportul M se dovedește a fi caracteristica esențială de luat în considerare, deoarece este singurul parametru al scannerului care dictează simetriile scan pattern-urilor.

4.6 Aspecte geometrice legate de simetriile scan pattern-urilor

Pentru toate scan pattern-urile obținute prin simulări, coordonatele carteziene (x, y) sau polare (r, φ) ale punctului curent P al scan pattern-urilor (indicat în figura 4.4) pot fi obținute prin utilizarea metodei grafice— așa cum se arată în exemplele din figurile 4.17 și 4.18 pentru M egal cu 5 și respectiv -5. În ambele figuri 4.17 și 4.18, au fost luate în considerare un total de 72 de puncte pentru rotația completă de 2π (rad) a prisme 1 cu mișcare lentă (figurile 4.1-4.3). Prin urmare, o mișcare

unghiulară incrementală de $\pi/36 = 10^\circ$ corespunde unghiului dintre două puncte succesive $P(r, \varphi)$ considerate pe traiectoria spotului laser.

Graficul $r(\varphi)$ are simetrii clare, cu mai multe vârfuri egale cu numărul μ de bucle pentru o perioadă de rotație a prisme 1 - a mișcării lente a sistemului din figura 4.1. Graficul $x(\varphi)$ este simetric în ceea ce privește mijlocul perioadei, deoarece Ox este o axă de simetrie pentru fiecare simulare. Graficul $y(\varphi)$ ar fi simetric dacă originea mișcării ar fi mutată la mijlocul perioadei de rotație (adică, la φ egal cu π).

În timp ce în subcapitolul anterior au fost extrase mai multe aspecte referitoare la simetrii, în cele ce urmează sunt evidențiate câteva trăsături dimensionale ale scan pattern-urilor care pot fi obținute prin metoda grafică, așa cum se obține din exemplul din figura 4.19 pentru $|M| = 5$ și pentru $k = 1$ (adică pentru prisme identice). Valorile acestor dimensiuni sunt prezentate în tablele 4.2 pentru $M = +5$ și în tabelul 4.3 pentru $M = -5$ (pentru parametrii scannerului indicați în subcapitolul 4.3).

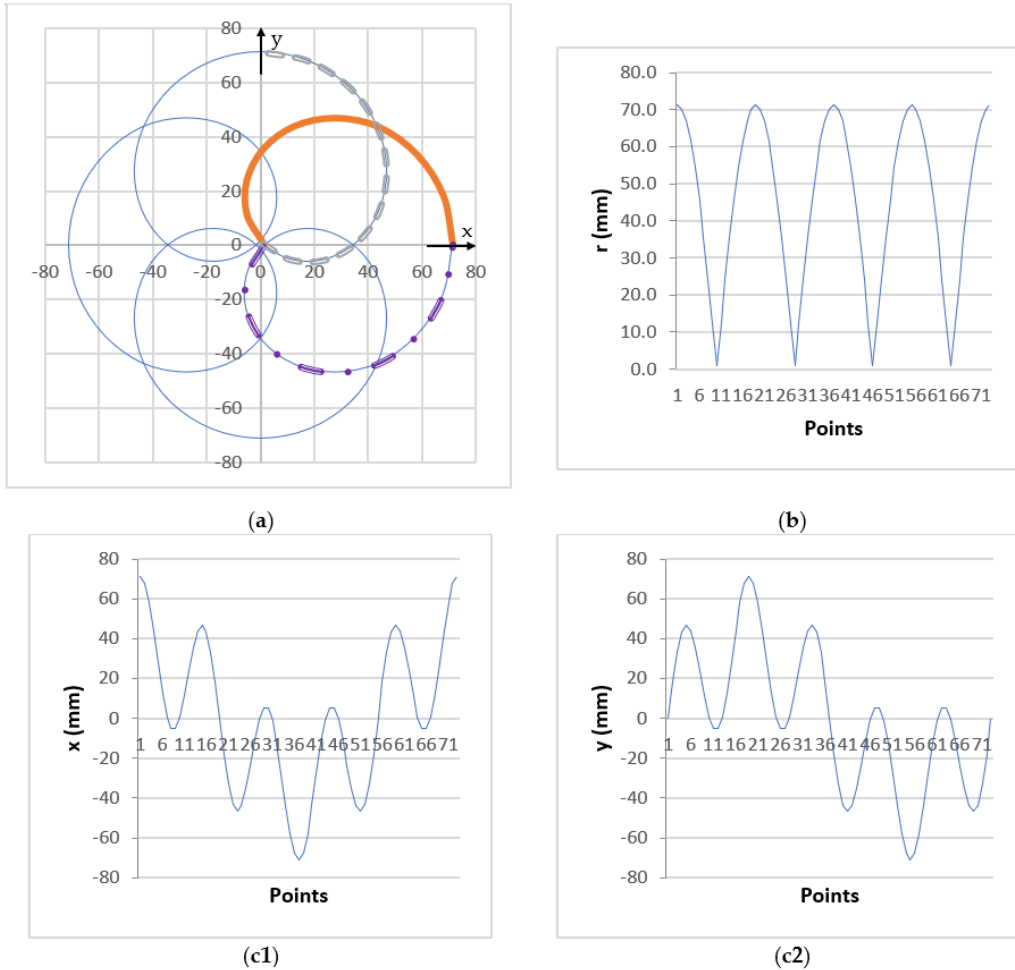


Figura 4.17. Extragerea din (a) scan pattern simulat pentru $M = 5$ (b) coordonatele polare $r(\varphi)$ și coordonatele carteziene (c1) $x(\varphi)$ și (c2) $y(\varphi)$ ale punctului curent P a scan pattern-ului (așa cum se arată în exemplul din figura 4.4)

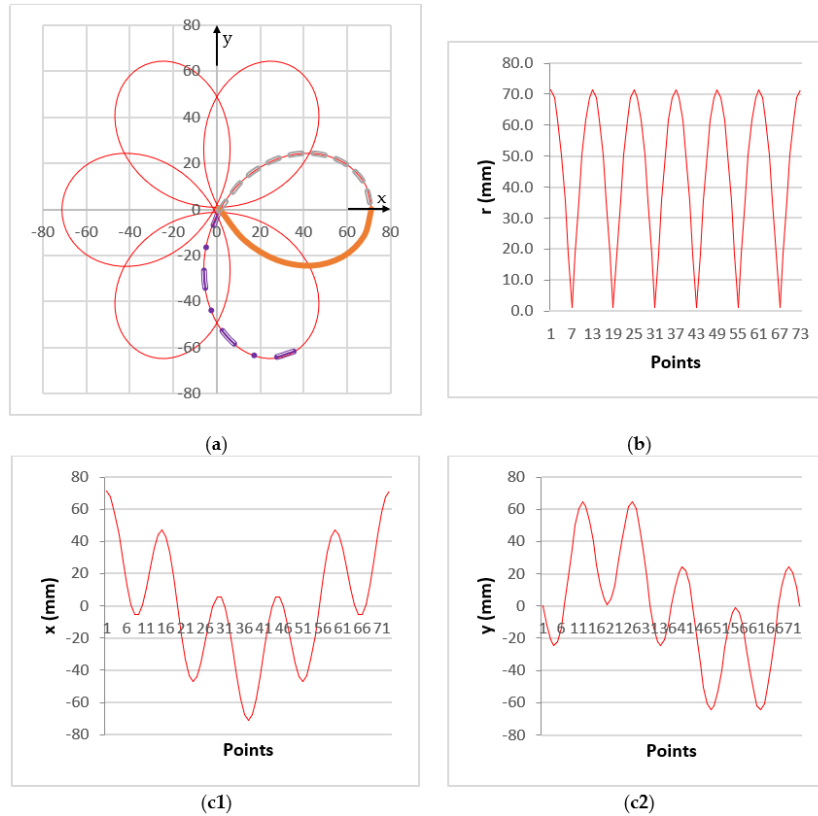


Figura 4.18. Extragerea din (a) scan pattern simulat pentru $M = -5$ (b) coordonatele polare $r(\varphi)$ și coordonatele carteziene (c1) $x(\varphi)$ și (c2) $y(\varphi)$ ale punctului curent P a scan pattern-ului

- Câmpul vizual al scannerului corespunde cercului circumscris scan pattern-ului și este caracterizat de raza R (figura 4.2a). Valoarea lui R poate fi obținută grafic folosind scan pattern-ul simulat din figura 4.19 (tabelele 4.2 și 4.3). Analitic are expresia

$$R = NI_4 + L \cdot \tan D^{max} \quad (4.17)$$

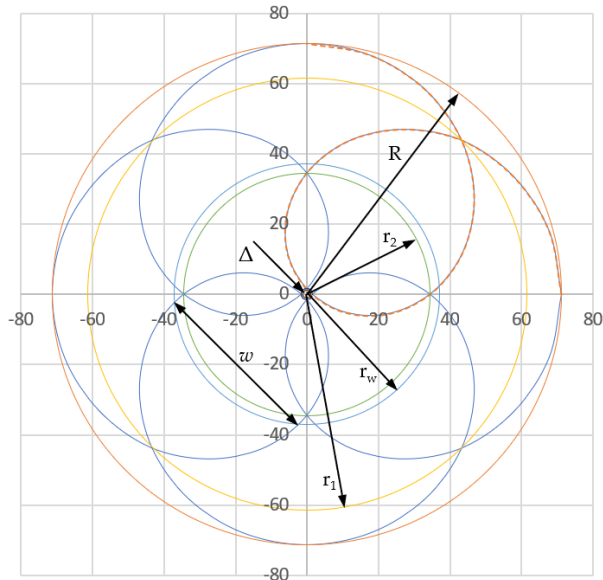
obținută utilizând abaterea liniară NI_4 prin cele două prisme (determinată analitic în [41]) și unghiul maxim de deviere exprimat în ecuația (4.4) - Figura 4.2a.

- Se poate obține raza Δ a cercului interior, înscrisă în scan pattern (tabele 4.2 și 4.3), în conformitate cu valoarea furnizată de ecuația (4.7) - identică pentru $M = 5$ și $M = -5$.

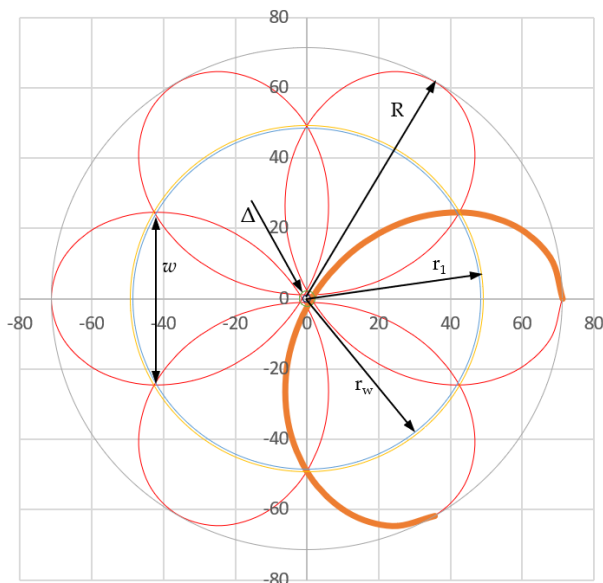
- Razele intersecțiilor buclelor pot fi determinate grafic: r_1 , r_2 și r_3 pentru $M = 5$ (figura 4.19a), precum și r_1 și r_2 pentru $M = -5$ (figura 4.19b), în timp ce analitic ar fi greu de obținut.

- Lățimea w a unei bucle se poate obține ușor și grafic, egală cu dublul coordonatei y maxime a unei bucle în ceea ce privește axa de simetrie a buclei; acest y_{max} poate fi obținut și din graficul din figurile 4.17(c2) și 4.18(c2).

- Raza r_w care unește punctele coordonatei y_{\max} se obține direct din figura 4.19, dar poate fi obținută și ca $(x(y_{\max})^2 + y_{\max}^2)^{1/2}$, folosind valori extrase din figurile 4.17 și 4.18.



(a)



(b)

Figura 4.19. Caracteristicile dimensionale ale scan pattern-urilor simulate generate de o pereche de prisme Risley de rotație, obținute pentru (a) $M = 5$ și (b) $M = -5$, evidențiate în tabelele 4.2, respectiv 4.3.

Parametrii scan pattern-urilor obținute grafic din figura 19	Figura 19a: $M = 5$	
	Linear/Radial (mm)	Unghiular * (°)
Coordonatele polare ale punctelor care definesc câmpul vizual /cercul circumscris scan pattern-ului (R)	71,265	0/90/180/270
Coordonatele polare ale punctelor care definesc prima intersecție (exterioară) a lobilor (r_1)	61,455	45/135/225/315
Lățimea maximă a lobilor (w)	37,121	3,591/86,409 93,591/176,409 183,591/266,409 273,591/356,409
Coordonatele polare ale punctelor care definesc a doua intersecție (mijlocul) (r_2)	34,442	0/90/180/270
Coordonatele polare ale punctelor care definesc a treia intersecție (interioară) (r_3)	1,550	0/90/180/270
Coordonatele polare ale cercului înscris în scan pattern (Δ)	1,069	0/90/180/270

Tabelul 4.2. Parametrii care definesc simetriile scan pattern-urilor — obținute cu metoda grafică din exemplul din Figura 4.19, pentru $M = 5$.

Parametrii scan pattern-urilor obținute grafic din figura 19	Figura 19b: $M = -5$	
	Linear/Radial (mm)	Unghiular * (°)
Coordonatele polare ale punctelor care definesc câmpul vizual /cercul circumscris scan pattern-ului (R)	71,265	0/60/120/180/240/300
Coordonatele polare ale punctelor care definesc prima intersecție (exterioară) a lobilor (r_1)	48,459	30/90/150/210/270/330
Lățimea maximă a lobilor (w)	49,165	29,505/30,495 89,505/90,495 149,505/150,495 209,505/210,495 269,505/270,495 229,505/230,495
Coordonatele polare ale punctelor care definesc a doua intersecție (mijlocul) (r_2)	2,205	30/90/150/210/270/330
Coordonatele polare ale punctelor care definesc a treia intersecție (interioară) (r_3)	-	-
Coordonatele polare ale cercului înscris în scan pattern (Δ)	1,069	30/90/150/210/270/330

Tabelul 4.3. Parametrii care definesc simetriile scan pattern-urilor — obținute cu metoda grafică din exemplul din Figura 4.19, pentru $M = -5$.

4.7 Concluzii

În acest capitol au fost determinate simetriile scan pattern-urilor produse de o pereche de prisme Risley rotative, care este cel mai comun tip de scanner laser cu astfel de elemente refractive. S-a folosit metoda grafică introdusă [40] și dezvoltată anterior [41]. Pe baza simulărilor efectuate, a fost efectuată o analiză multi-parametrică. S-a ajuns la concluzia că parametrul M a lui Marshall, raportul vitezelor de rotație ale celor două prisme este parametrul care determină simetriile scan pattern-urilor.

Alți parametri, cum ar fi unghiurile prismelor (precum și raportul acestora), indicii de refracție și dimensiunile scannerului, influențează exclusiv dimensiunile modelelor. În timp ce acest ultim aspect a fost abordat în detaliu în capitolul interior, bazat pe lucrarea [41], capitolul de față a arătat doar caracteristicile dimensionale ale scan pattern-urilor care sunt legate de simetrie. Totuși, din analiza referitoare la (în special valorile întregi ale lui) M au fost extrase reguli de bază referitoare la numărul de axe de simetrie și la caracteristicile geometrice ale scan pattern-urilor. O noțiune nouă, de **structuri de simetrie a fost introdusă și definită într-un mod convenabil pentru a permite generarea întregului model prin obținerea doar a unei părți a acestuia și apoi replicarea acestei părți folosind simetria.**

Au fost ilustrate cazuri specifice, precum și alte game de parametri ai scannerului, cum ar fi valorile fracționale ale lui M , pentru a putea realiza un studiu cuprinzător asupra subiectului. Aplicațiile scannerelor pot beneficia de această abordare grafică a metodei simetriei scan pattern-ului, care simplifică analiza și proiectarea scannerelor cu prisme Risley - efectuate anterior prin utilizarea unor metode analitice aproximative sau complexe. Cercetările viitoare vizează astfel de aplicații, în special legate de imagistica biomedicală și testarea nedistructivă. Cu toate acestea, potențialul scanării prismelor Risley pentru domenii precum procesarea cu laser, metrologia optică sau teledetecția este încă de exploatat pe deplin, iar acestea constituie alte căi de cercetare.

Bibliografie

- [1] Bass, M. Handbook of Optics, 3rd ed.; Mc. Graw-Hill Inc.: New York, NY, USA, 2009; pp. 30.1–30.68.
- [2] Marshall, G.F.; Stutz, G.E. (Eds.). Handbook of Optical and Laser Scanning, 2nd ed.; CRC Press: London, UK, 2011.
- [3] Kiyokura, T.; Ito, T.; Sawada, R. Small Fourier transform spectroscope using an integrated prism-scanning interferometer. Appl. Spectrosc. 2001, 55, 1628–1633.
- [4] Garcia-Torales, G.; Strojnik, M.; Paez, G. Risley prisms to control wave-front tilt and displacement in a vectorial shearing interferometer. Appl. Opt. 2002, 41, 1380–1384.
- [5] Oka, K.; Kaneko, T. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms. Opt. Express 2003, 11, 1510–1519.
- [6] Tao, X.; Cho, H.; Janabi-Sharifi, F. Optical design of a variable view imaging system with the combination of a telecentric scanner and double wedge prisms. Appl. Opt. 2010, 49, 239–246.
- [7] Wang, Z.; Cao, J.; Hao, Q.; Zhang, F.; Cheng, Y.; Kong, X. Superresolution imaging and field of view extension using a single camera with Risley prisms. Rev. Sci. Instrum. 2019, 90, 33701.

- [8] Li, A.; Liu, X.; Gong, W.; Sun, W.; Sun, J. Prelocation image stitching method based on flexible and precise boresight ad-justment using Risley prisms. *JOSA A* 2019, 36, 305–311.
- [9] Li, A.; Yi, W.; Zuo, Q.; Sun, W. Performance characterization of scanning beam steered by tilting double prisms. *Opt. Express* 2016, 24, 23543–23556.
- [10] Li, A.; Jiang, X.; Sun, J.; Wang, L.; Li, Z.; Liu, L. Laser coarse-fine coupling scanning method by steering double prisms. *Appl. Opt.* 2012, 51, 356–364.
- [11] Florea, C.; Sanghera, J.; Aggarwal, I. Broadband beam steering using chalcogenide-based Risley prisms. *Opt. Eng.* 2011, 50, 033001.
- [12] Zhou, Y.; Fan, D.; Fan, S.; Chen, Y.; Liu, G. Laser scanning by rotating polarization gratings. *Appl. Opt.* 2016, 55, 5149–5157.
- [13] Roy, G.; Cao, X.; Bernier, R.; Roy, S. Enhanced scanning agility using a double pair of Risley prisms. *Appl. Opt.* 2015, 54, 10213–10226.
- [14] Li, A.; Gong, W.; Zhang, Y.; Liu, X. Investigation of scan errors in the three-element Risley prism pair. *Opt. Express* 2018, 26, 25322–25335.
- [15] Marshall, G.F. Risley Prism Scan Patterns. *Proc. SPIE* 1999, 3787, 74–86.
- [16] Yang, Y. Analytic solution of free space optical beam steering using Risley prisms. *J. Light. Technol.* 2008, 26, 3576–3583.
- [17] Li, Y. Third-order theory of the Risley-prism-based beam steering system. *Appl. Opt.* 2011, 50, 679–686.
- [18] Li, Y. Closed form analytical inverse solutions for Risley-prism-based beam steering systems in different configurations. *Appl. Opt.* 2011, 50, 4302–4309.
- [19] Lai, S.-F.; Lee, C.-C. Analytic inverse solutions for Risley prisms in four different configurations for positing and tracking systems. *Appl. Opt.* 2018, 57, 10172–10182.
- [20] Montagu, J. Scanners-galvanometric and resonant. In *Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2003; pp. 2465–2487.
- [21] Benner, W.R. *Laser Scanners: Technologies and Applications*; Pangolin Laser Systems Inc.: Lexington, KY, USA, 2016.
- [22] Duma, V.-F.; Tankam, P.; Huang, J.; Won, J.J.; Rolland, J.P. Optimization of galvanometer scanning for Optical Coherence Tomography. *Appl. Opt.* 2015, 54, 5495–5507.
- [23] Duma, V.-F. Laser scanners with oscillatory elements: Design and optimization of 1D and 2D scanning functions. *Appl. Math. Model.* 2019, 67, 456–476.
- [24] Grulkowski, I.; Górczyska, I.; Szkulmowski, M.; Szlag, D.; Szkulmowska, A.; Leitgeb, R.A.; Kowalczyk, A.; Wojtkowski, M. Scanning protocols dedicated to smart velocity ranging in Spectral OCT. *Opt. Express* 2009, 17, 23736–23754.
- [25] Ju, M.J.; Heisler, M.; Athwal, A.; Sarunic, M.V.; Jian, Y. Effective bidirectional scanning pattern for optical coherence tomography angiography. *Biomed. Opt. Express* 2018, 9, 2336.
- [26] Liu, J.; You, X.; Wang, Y.; Gu, K.; Liu, C.; Tan, J. The alpha-beta circular scanning with large range and low noise. *J. Microsc.* 2017, 266, 107–114.
- [27] Carrasco-Zevallos, O.M.; Viehland, C.; Keller, B.; McNabb, R.P.; Kuo, A.N.; Izatt, J.A. Constant linear velocity spiral scanning for near video rate 4D OCT ophthalmic and surgical imaging with isotropic transverse sampling. *Biomed. Opt. Express* 2018, 9, 5052.
- [28] Hwang, K.; Seo, Y.-H.; Ahn, J.; Kim, P.; Jeong, K.-H. Frequency selection rule for high definition and high frame rate Lissajous scanning. *Sci. Rep.* 2017, 7, 14075.
- [29] Tanguy, Q.A.A.; Gaiffe, O.; Passilly, N.; Cote, J.-M.; Cabodevila, G.; Bargiel, S.; Lutz, P.; Xie, H.; Gorecki, C. Real-time Lissajous imaging with a low-voltage 2-axis MEMS scanner based on electrothermal actuation. *Opt. Express* 2020, 28, 8512.

- [30] Draelos, M.; Viehland, C.; McNabb, R.P.; Kuo, A.N.; Izatt, J.A. Adaptive point-scan imaging beyond the frame rate-resolution limit with scene-reactive scan trajectories. *Optica* 2022, 9, 1276–1288.
- [31] Li, Y. Beam deflection and scanning by two-mirror and two-axis systems of different architectures: A unified approach. *Appl. Opt.* 2008, 47, 5976–5985.
- [32] Duma, V.-F. Polygonal mirror laser scanning heads: Characteristic functions. *Proc. Rom. Acad. Ser. A* 2017, 18, 25–33.
- [33] Duma, V.-F.; Duma, M.-A. Optomechanical Analysis and Design of Polygon Mirror-Based Laser Scanners. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5592.
- [34] Available online: <https://www.scanlab.de/en/products/scan-systems> (accessed on 17 December 2022).
- [35] Gora, M.J.; Suter, M.J.; Tearney, G.J.; Li, X. Endoscopic optical coherence tomography: Technologies and clinical applications. *Biomed. Opt. Express* 2017, 8, 2405–2444.
- [36] Cogliati, A.; Canavesi, C.; Hayes, A.; Tankam, P.; Duma, V.-F.; Santhanam, A.; Thompson, K.P.; Rolland, J.P. MEMS-based handheld scanning probe with pre-shaped input signals for distortion-free images in Gabor-Domain Optical Coherence Microscopy. *Opt. Express* 2016, 24, 13365–13374.
- [37] Strathman, M.; Liu, Y.; Keeler, E.G.; Song, M.; Baran, U.; Xi, J.; Sun, M.-T.; Wang, R.; Li, X.; Lin, L.Y. MEMS scanning mi-cromirror for optical coherence tomography. *Biomed. Opt. Express* 2015, 6, 211.
- [38] Piyawattanametha, W.; Ra, H.; Qiu, Z.; Friedland, S.; Liu, J.T.C.; Loewke, K.; Kino, G.S.; Solgaard, O.; Wang, T.D.; Mandella, M.J.; et al. In vivo near-infrared dual-axis confocal microendoscopy in the human lower gastrointestinal tract. *J. Biomed. Opt.* 2012, 17, 021102.
- [39] Liu, L.; Wang, L.; Sun, J.; Zhou, Y.; Zhong, X.; Luan, Z.; Liu, D.; Yan, A.; Xu, N. An Integrated Test-Bed for PAT Testing and Verification of Inter-Satellite Lasercom Terminals. *Proc. SPIE* 2007, 6709, 670904.
- [40] Duma, V.-F.; Schitea, A. Laser scanners with rotational Risley prisms: Exact scan patterns. *Proc. Rom. Acad. Ser. A* 2018, 19, 53–60.
- [41] Duma, V.-F.; Dimb, A.-L. Exact Scan Patterns of Rotational Risley Prisms Obtained with a Graphical Method: Multi-Parameter Analysis and Design. *Appl. Sci.* 2021, 11, 8451.
- [42] Erb, W. Rhodonea Curves as Sampling Trajectories for Spectral Interpolation on the Unit Disk. *Constr. Approx.* 2020, 53, 281–318.
- [43] Sun, J.; Liu, L.; Yun, M.; Wan, L.; Zhang, M. Distortion of beam shape by a rotating double prism wide-angle laser beam scanner. *Opt. Eng.* 2006, 45, 043004.
- [44] Lavigne, V.; Ricard, B. Fast Risley prisms camera steering system: Calibration and image distortions correction through the use of a three-dimensional refraction model. *Opt. Eng.* 2007, 46, 43201.
- [45] Dimb, A.-L.; Duma, V.-F. Experimental validations of simulated exact scan patterns of rotational Risley prisms scanners. *Proc. SPIE* 2019, 11354, 113541U.
- [46] Dimb, A.-L.; Duma, V.-F. Simulations and experiments of laser scanning with a pair of rotational Risley prisms. *Proc. SPIE* 2022, 12170, 1217009.
- [47] Garcia-Torales, G. Risley prisms applications: An overview. *Proc. SPIE* 2022, 12170, 121700H.
- [48] Available online: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=147 (accessed on 17 December 2022).

- [49] Mnerie, C.; Preitl, S.; Duma, V.-F. Galvanometer-based scanners: Mathematical model and alternative control structures for improved dynamics and immunity to disturbances. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* 2017, 17, 1740006.
- [50] Chen, G.; Wang, Y. Control of a Digital Galvanometer Scanner Using a Discrete-Time Sliding-Mode Variable-Structure Controller Based on a Decoupled Disturbance Compensator. *Appl. Sci.* 2021, 11, 9788.
- [51] Hayakawa, T.; Watanabe, T.; Senoo, T.; Ishikawa, M. Gain-compensated sinusoidal scanning of a galvanometer mirror in proportional-integral-differential control using the pre-emphasis technique for motion-blur compensation. *Appl. Opt.* 2016, 55, 5640–5646.

5. SCAN PATTERN-URI SECUNDARE ALE UNEI PERECHI DE PRISME RISLEY DE ROTAȚIE

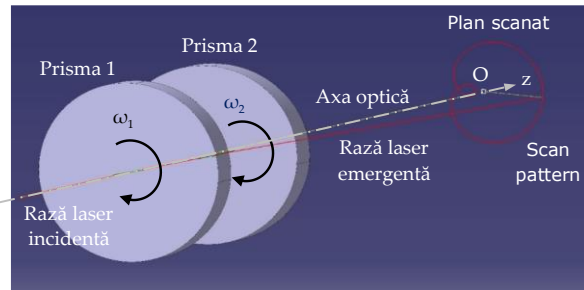
5.1 Noțiuni generale

Având la bază metoda grafică care a fost dezvoltată pentru toate cele patru configurații posibile de lasere scaner cu o pereche de prisme Risley rotative în [1], scopul acestui capitol este de a investiga modul în care pot fi generate scan pattern-uri secundare de către acest sistem de scanare. În timp ce problema reflexiilor totale în interiorul prismelor (și a modului de a le evita) a fost abordată în literatura de specialitate, aceasta este prima dată când sunt explorate modelele de scanare folosind reflexii secundare pe fațetele prismelor. Sunt discutate ecuațiile pentru obținerea unor astfel de modele de scanare secundare. Metoda grafică [1], ușor de utilizat pentru a genera modele exacte de scanare ale scanerelor cu prisme Risley este utilizată pentru a studia caracteristicile acestora. Se efectuează analiza lor multi-parametrică, cu privire la parametrii constructivi și funcționali, inclusiv rapoartele lui Marshall [2] – pentru toate cele patru configurații posibile ale scanerului. S-a efectuat și o validare experimentală în capitolul 6. Sunt discutate unele aplicații ale modelelor de scanare multiple care pot fi generate.

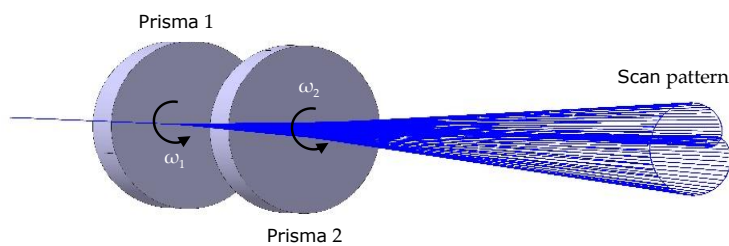
5.2. Scaner cu o pereche de prisme Risley rotative utilizat. Metodă grafică

Cel mai comun scaner cu prisme Risley constă din două prisme optice rotative (sau pene optice), fiecare plasată cu unul dintre dioptrii perpendicular pe axa optică a sistemului – Figura 5.1. După cum s-a prezentat în capitolele anterioare, prismele sunt caracterizate prin unghiurile prismelor θ_1 și, respectiv, θ_2 . Aceste prisme se rotesc în jurul axei lor optice, care este și axa lor de rotație, cu viteze unghiulare ω_1 și, respectiv, ω_2 . Fasciculul laser incident este îndreptat de-a lungul axei optice prin sistem și este deviat în funcție de orientarea relativă a celor două prisme (Figura 5.2.1).

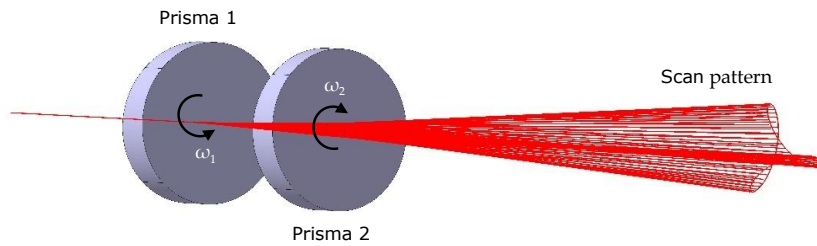
În acest studiu prezentăm simulările efectuate pentru trei sisteme de două prisme Risley rotative, cu unghiurile de deviere maxim egale cu 4° și 2° (scanerul are $k = 0,5$), 2° și 2° (scanerul are $k = 1$) și 2° și 4° (scanerul are $k = 2$) pentru două valori ale parametrului $M = \pm 4$. Rezultatele simulărilor sunt prezentate în Figura 5.2 și 5.3. Am folosit metoda grafică în acest studiu, făcând un sistem parametrizat realizat în programul de proiectare mecanică CATIAV5 R20 pentru fiecare sistem de scanare care generează cele patru scan pattern-uri, folosind ecuațiile (5.1-5.4). O suprapunere a celor patru modele de scanare obținute pentru fiecare valoare a lui M este realizată în Fig. 4, separat pentru $M > 0$ și $M < 0$. Se poate observa suprapunerea aproximativă a două dintre scan pattern-uri (în partea centrală a fiecărei figuri), deoarece au dimensiuni aproape identice. Pe de altă parte, două dintre scan pattern-urile secundare sunt mult mai mari, prin urmare cresc semnificativ câmpul de scanare.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.1. (a) Simularea procesului de scanare efectuată cu o pereche de prisme Risley rotative - utilizând un program de proiectare mecanică disponibil comercial (CATIA V5R20). Fascicul de lumină generat pentru aceleași direcții de rotație ale celor două prisme Risley (b) și pentru direcții de rotație opuse ale celor două prisme (c). În întregul capitol, ca și în cele anterioare, se utilizează următoarea convenție de culoare: scan pattern-urile obținute pentru prisme care se rotesc în aceeași direcție sunt prezentate în albastru, în timp ce scan pattern-urile care se rotesc în direcții opuse sunt prezentate în roșu.

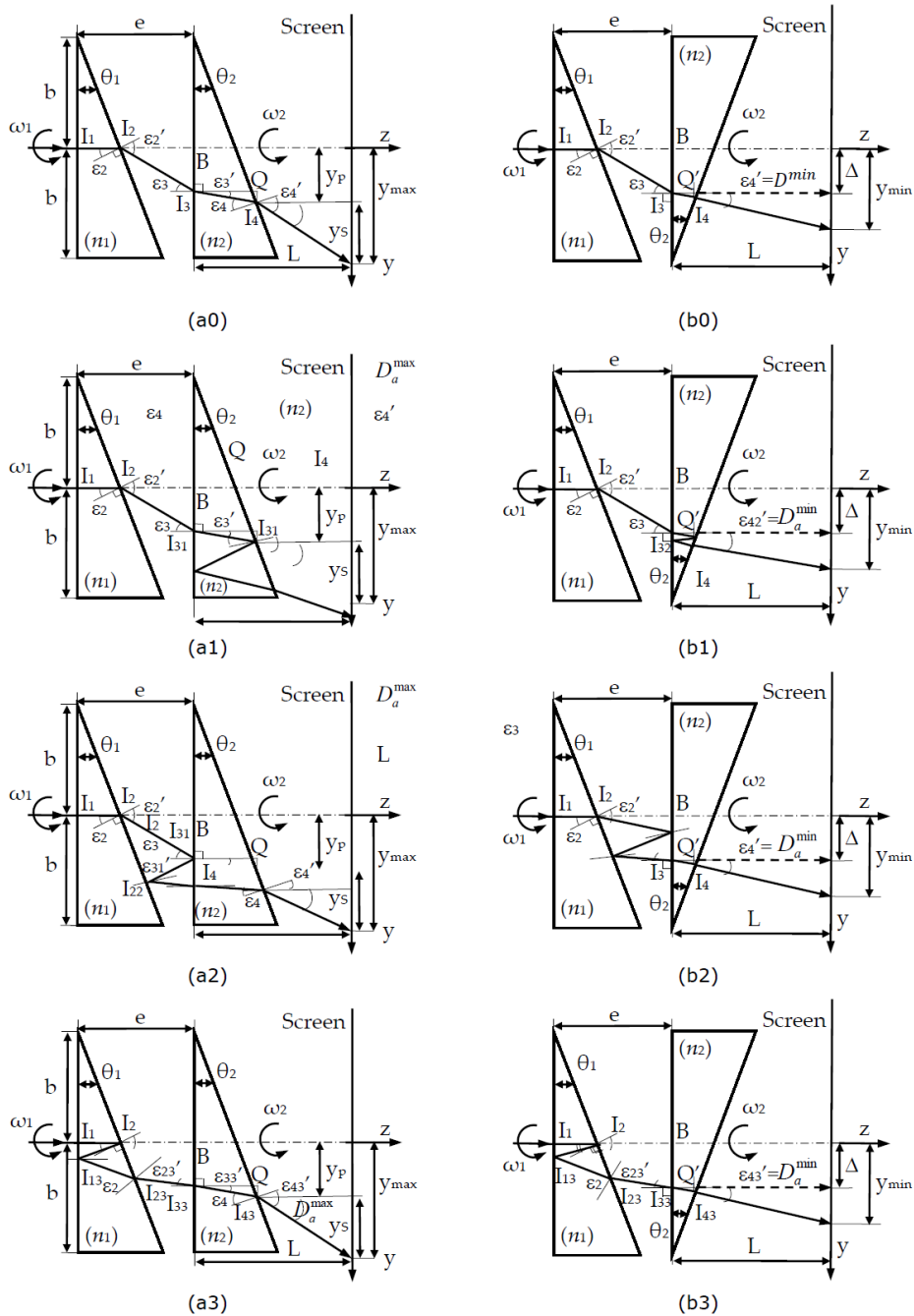


Figura 5.2 Scanner laser cu o pereche de prisme Risley rotative, configurație ab-ab: modele de scanare, (0) principal (Scan 0) și secundar (adică 1) Scan 1, (2) Scan 2 și (3) Scanare 3). Fiecare caz este prezentat în cele două poziții caracteristice extreme ale dispozitivului: cu un unghi relativ de rotație între cele două prisme $\varphi = 0$ (coloana 1) și $\varphi = \pi$ [rad] (coloana 2).

Ținând cont de pozițiile lor relative față de modul în care sunt așezate cele două prisme, pentru acest studiu am ales configurația ab-ab. În plus față de scan pattern-ul principal (Scan 0) – Figura 5.2 (a0), am obținut trei scan pattern-uri secundare (Scan 1, Scan 2 și Scan 3) – Figurile 5.2.2 (a1), (b2) și (c3), respectiv. Ecuțiile caracteristice pentru prismele Risley pentru aceste patru modele de scanare, în poziția inițială caracterizată printr-un unghi de rotație relativ egal cu 0 între cele două prisme sunt, cu notațiile din Figura 5.2, după cum urmează:

$$Scan(0) \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = 0 \\ \varepsilon_1' = \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 = \theta_1 \\ n_1 \sin \varepsilon_2 = \sin \varepsilon_2' \\ \varepsilon_2' - \varepsilon_3 = \theta_1 \\ \sin \varepsilon_3 = n_2 \sin \varepsilon_3' \\ \mp \varepsilon_3' \pm \varepsilon_4 = \theta_2 \\ n_2 \sin \varepsilon_4 = \sin \varepsilon_4' \end{array} \right. \quad (5.1)$$

$$Scan(1) \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = 0 \\ \varepsilon_1' = \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 = \theta_1 \\ n_1 \sin \varepsilon_2 = \sin \varepsilon_2' \\ \varepsilon_2' - \varepsilon_3 = \theta_1 \\ \sin \varepsilon_3 = n_2 \sin \varepsilon_3' \\ \mp \varepsilon_3' \pm \varepsilon_4 = \theta_2 \\ \varepsilon_4 = \varepsilon_{41}' \\ \varepsilon_4 + \varepsilon_3 = -\theta_1 \\ \varepsilon_{31}' = -\varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{31}' - \varepsilon_{41} = -\theta_2 \\ n_2 \sin \varepsilon_{41} = \sin \varepsilon_{41}' \end{array} \right. \quad (5.2)$$

$$Scan(2) \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = 0 \\ \varepsilon_1' = \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 = \theta_1 \\ n_1 \sin \varepsilon_2 = \sin \varepsilon_2' \\ \varepsilon_2' - \varepsilon_3 = \theta_1 \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_3' \\ \varepsilon_{22} = \varepsilon_3' \\ \varepsilon_{22}' = \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{32} = \varepsilon_{22}' \\ \sin \varepsilon_{32} = n_2 \sin \varepsilon_{32}' \\ \varepsilon_{32}' - \varepsilon_{42} = -\theta_2 \\ n_2 \sin \varepsilon_{42} = \sin \varepsilon_{42}' \end{array} \right. \quad (5.3)$$

$$Scan(3) \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = 0 \\ \varepsilon_1' = \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 = \theta_1 \\ \varepsilon_2' = \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{13} - \varepsilon_2' = -\theta_1 \\ -\varepsilon_{13} = -\varepsilon_{13}' \\ -\varepsilon_{13}' - \varepsilon_{13} = -\theta_1 \\ n_1 \sin \varepsilon_{23} = \sin \varepsilon_{23}' \\ \varepsilon_{23}' = \varepsilon_{33} \\ \sin \varepsilon_{33} = n_2 \sin \varepsilon_{33}' \\ \varepsilon_{33}' - \varepsilon_{43} = -\theta_2 \\ n_2 \sin \varepsilon_{43} = \sin \varepsilon_{43}' \end{array} \right. \quad (5.4)$$

Devierea unghiulară se poate determina cu ecuația generală 5.5, cu observația că primul semn se referă la cazul devierii maxime D_a^{max} (pentru $\varphi=0$), iar al doilea semn se referă la cazul abaterii minime D_a^{min} (pentru $\varphi=\pi$).

$$D_a^{max,min} = \varepsilon_4' \mp \theta_2, \quad i = \overline{0,3} \quad (5.5)$$

5.3 Simulări

Prezentarea simulărilor pentru acest studiu este făcută comparativ, după două aspecte diferite, astfel:

- Scan pattern-urile secundare (Scan 1, Scan 2, Scan 3) independent comparativ cu scan pattern-ul principal (Scan 0), pentru trei valori diferite ale lui k: k=0,5 în figura 5.3, k=1 în figura 5.4 și k=2 în figura 5.5, precum și graficele coordonatelor x și y ale punctului caracteristic din planul scanat – Figura 5.6 a), b) și c), pentru M=4, respectiv M=-4 – figura 5.7 a), b) și c)
- Scan pattern-urile secundare (Scan 1, Scan 2, Scan 3) comparativ între ele (suprapuse) în funcție de parametrul k – figura 5.8, precum și graficele coordonatelor x și y ale punctului caracteristic din planul scanat – Figura 5.9 a), b), c) și d) pentru M=4, respectiv M=-4 – figura 5.10 a), b), c) și d)

Am ales ca simulările să fie tratate comparativ pentru următoarele avantaje:

- Identificarea și alegerea scan pattern-ului necesar, în funcție de interesul scontat;
- Identificarea celei mai bune soluții alternative și imediat disponibilă, pe care o putem alege cu ușurință;
- Analiza eficientă a fiecărui scan pattern;
- Obținerea de noi informații și crearea unei baze de date, pentru a înțelege mai ușor domeniul lor de aplicare, dar și pentru studii viitoare.

a) Comparatie individuală între scan pattern-ul principal (Scan 0) cu scan pattern-urile secundare (Scan 1, Scan 2, Scan 3), în funcție de k

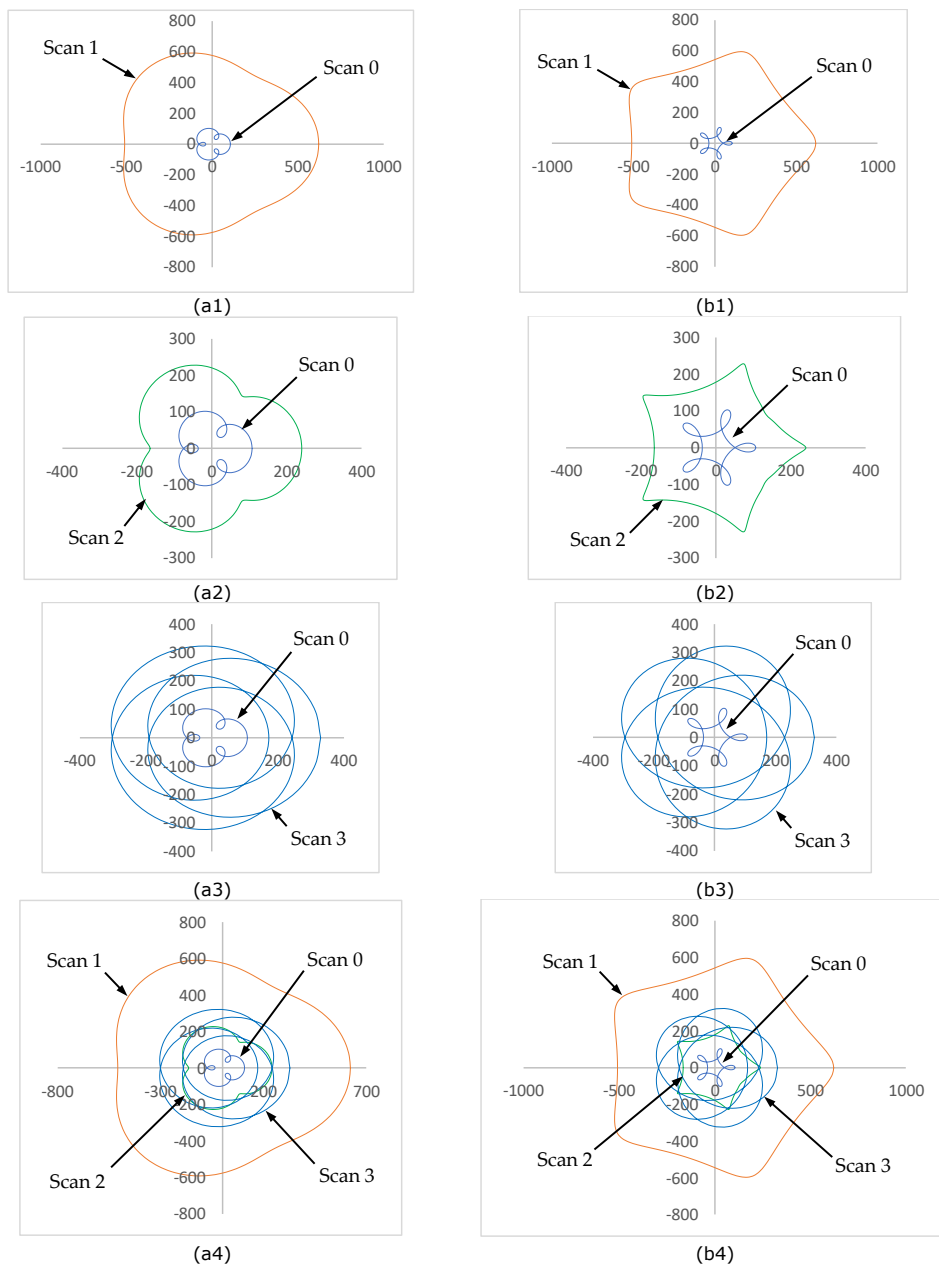


Figura 5.3 – Scan pattern principal (Scan 0, albastru) și secundare (Scan 1-portocaliu, Scan 2-verde și Scan 3-albastru, respectiv, în primele trei rânduri), produse de o pereche de prisme Risley în configurație ab-ab pentru $k = 0,5$, cu (a) $M = 4$ și (b) $M = -4$. În al patrulea rând sunt comparate toate scan pattern-urile

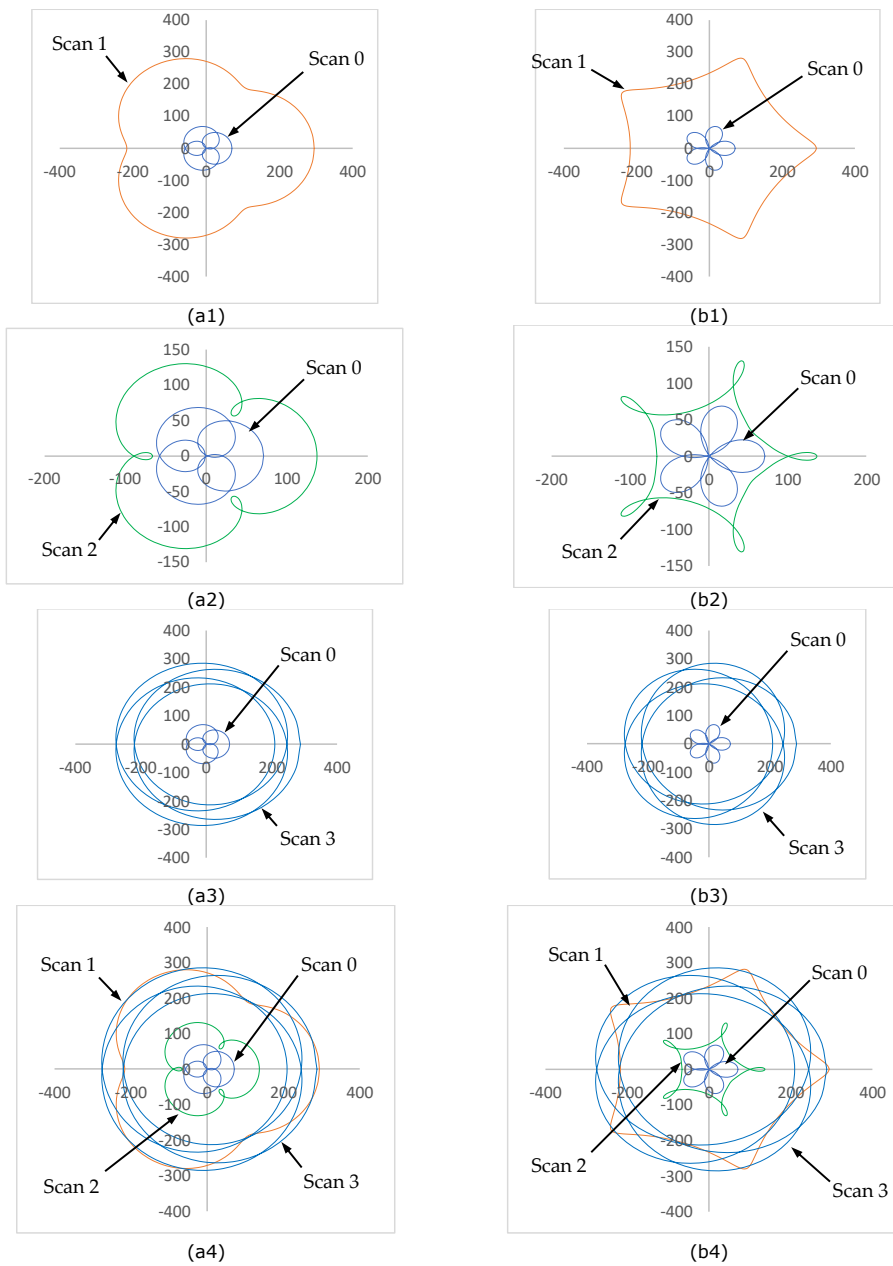


Figura 5.4 – Scan pattern principal (Scan 0, albastru) și secundare (Scan 1-portocaliu, Scan 2-verde și Scan 3-albastru, respectiv, în primele trei rânduri), produse de o pereche de prisme Risley în configurație ab-ab pentru $k = 1$, cu (a) $M = 4$ și (b) $M = -4$. În al patrulea rând sunt comparate toate scan pattern-urile

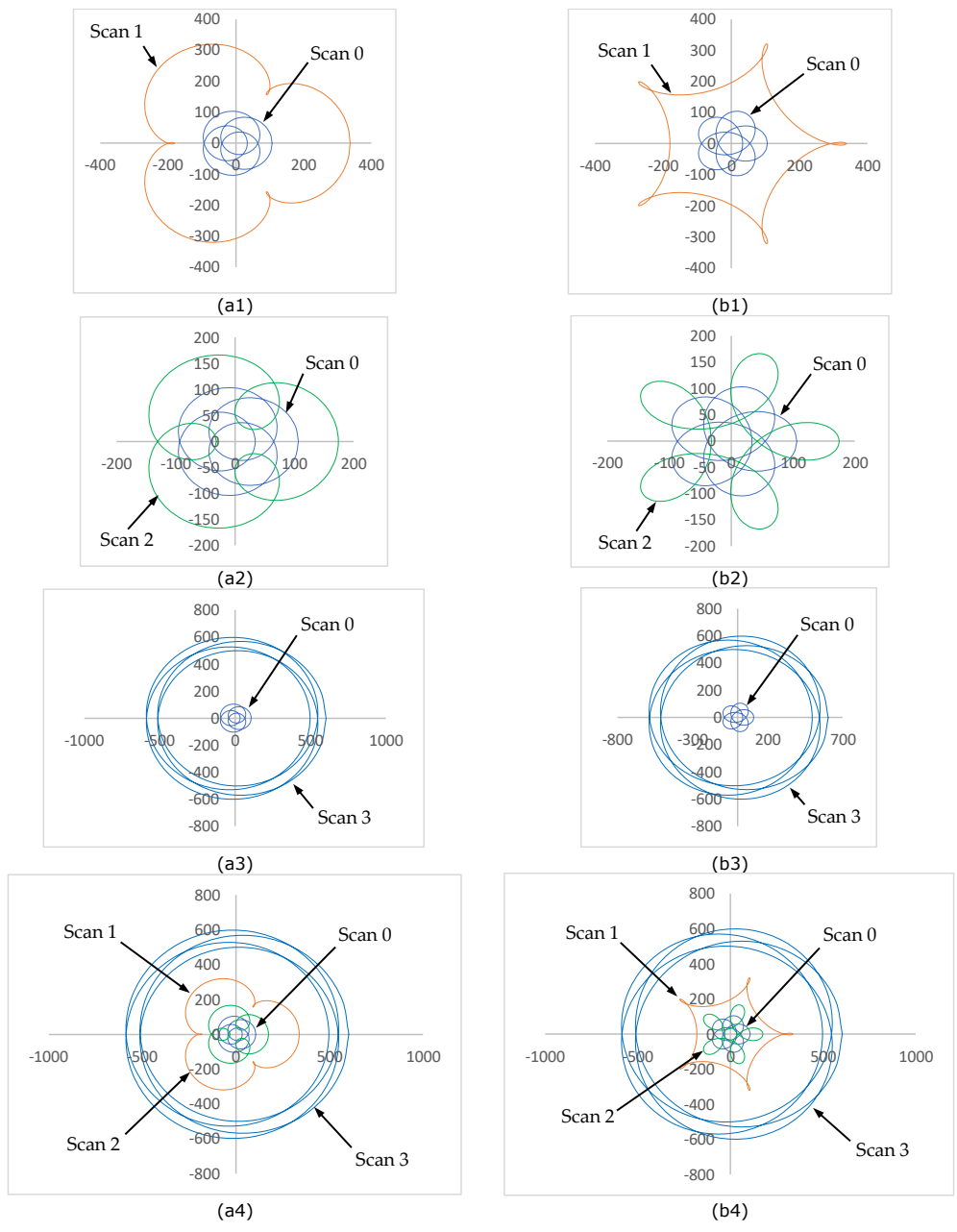
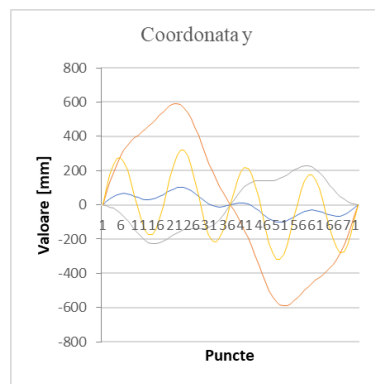
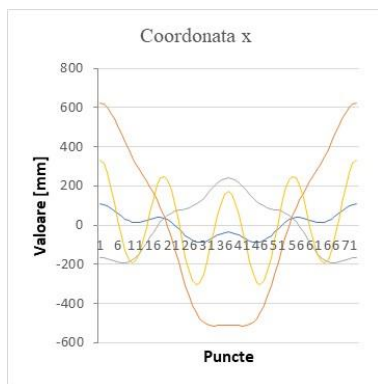
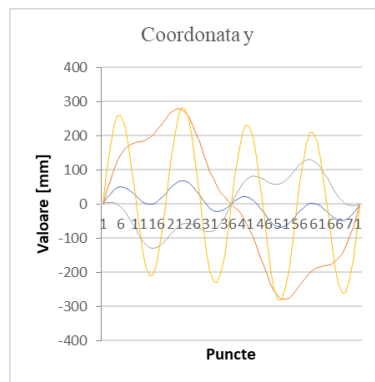
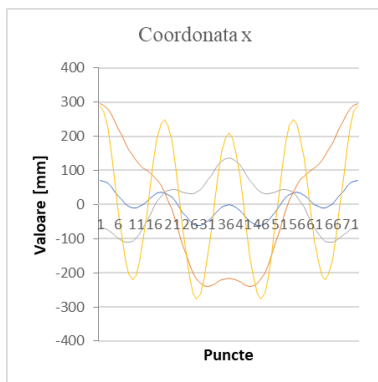


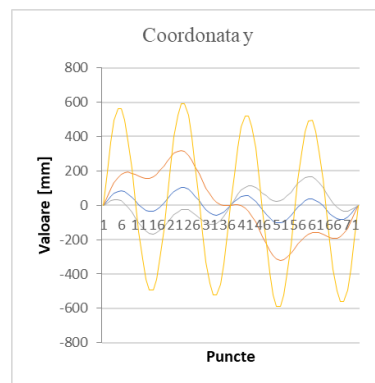
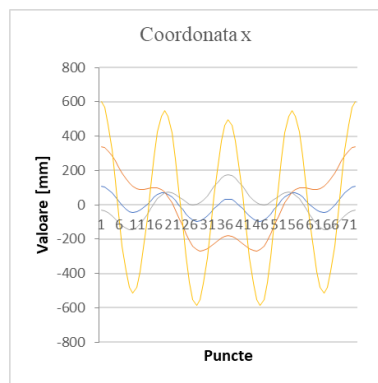
Figura 5.5 – Scan pattern principal (Scan 0, albastru) și secundare (Scan 1-portocaliu, Scan 2-verde și Scan 3-albastru, respectiv, în primele trei rânduri), produse de o pereche de prisme Risley în configurație ab-ab pentru $k = 2$, cu (a) $M = 4$ și (b) $M = -4$. În al patrulea rând sunt comparate toate scan pattern-urile



(a)

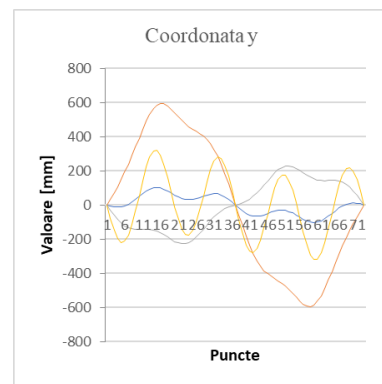
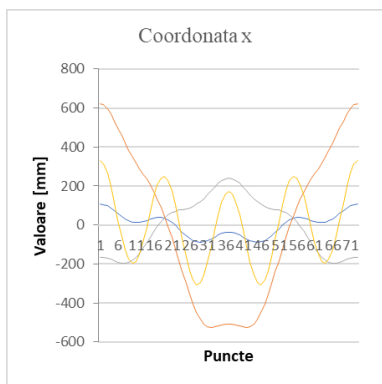


(b)

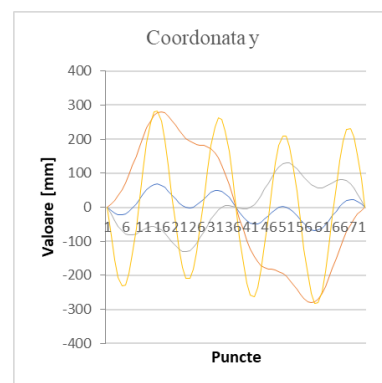
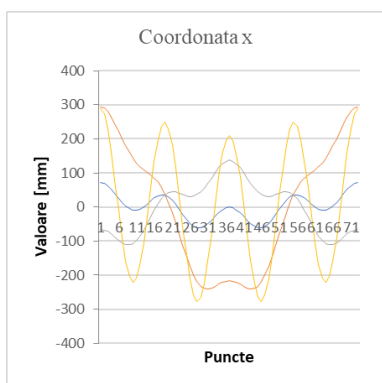


(c)

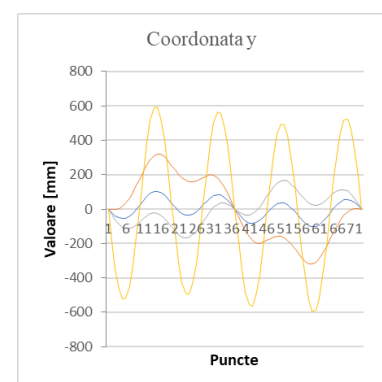
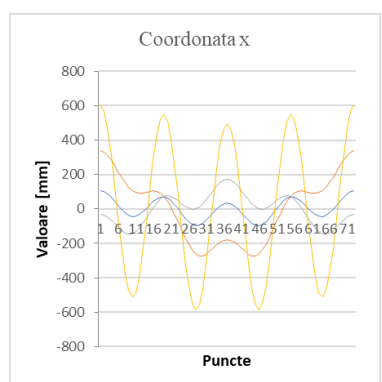
Figura 5.6 - Coordonatele x și y ale punctului laser în planul scanat pentru scan pattern-ul principal (Scan 0, albastru) și pentru cele secundare (Scan 1-portocaliu, Scan 2-verde și Scan 3-albastru), produse de o pereche de prisme Risley în configurație ab-ab pentru $k = 0,5$ (a), $k=1$ (b), $k=2$ (c) cu $M = 4$



(a)



(b)



(c)

Figura 5.7 - Coordonatele x și y ale punctului laser în planul scanat pentru scan pattern-ul principal (Scan 0, albastru) și secundare (Scan 1-portocaliu, Scan 2-verde și Scan 3-albastru), produse de o pereche de prisme Risley în configurație ab-ab pentru $k = 0,5$ (a), $k=1$ (b), $k=2$ (c) cu $M = -4$

b) Comparație între scan pattern principal (Scan 0) și scan pattern-urile secundare (Scan 1, Scan 2, Scan 3), în funcție de k

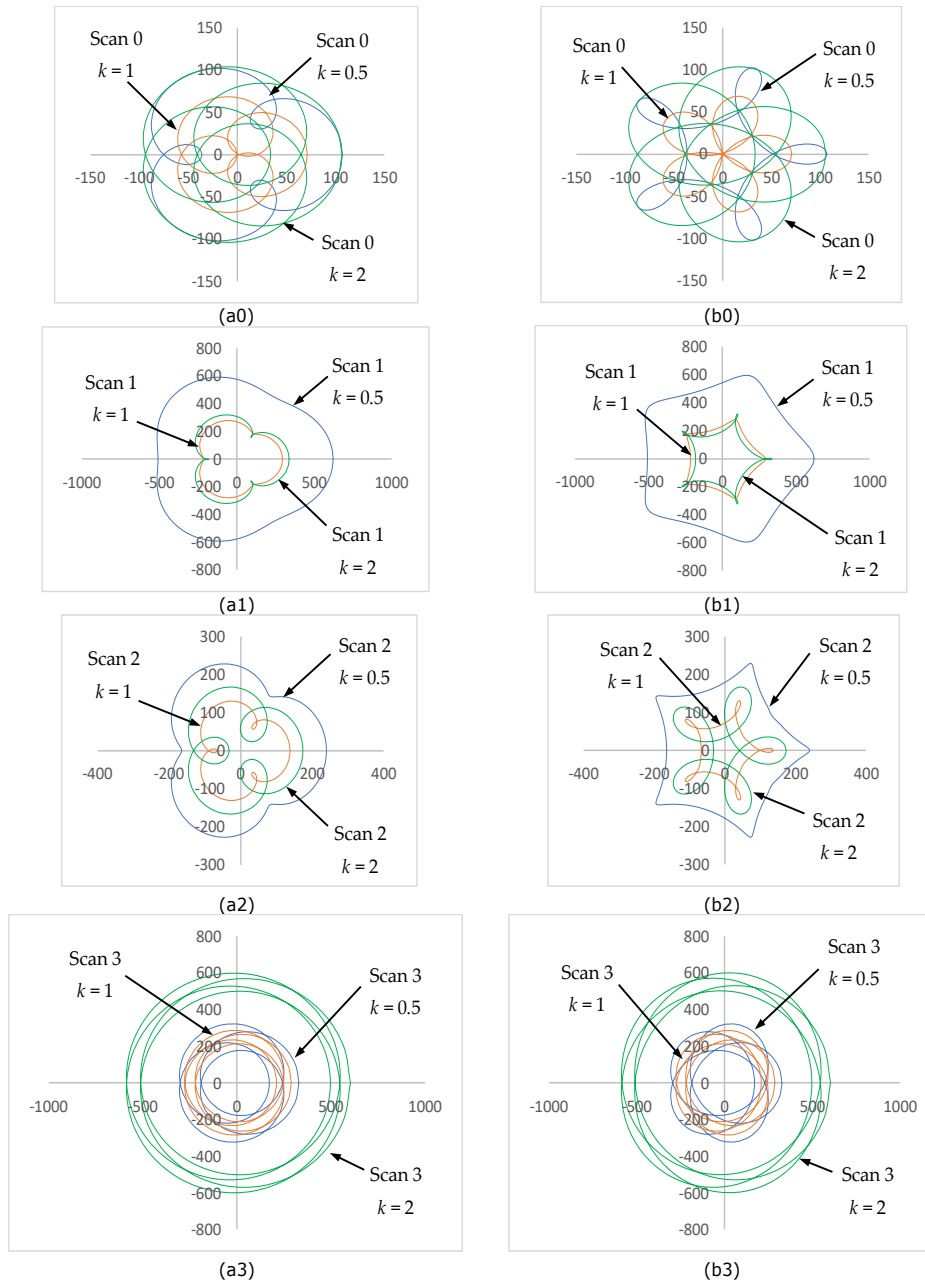
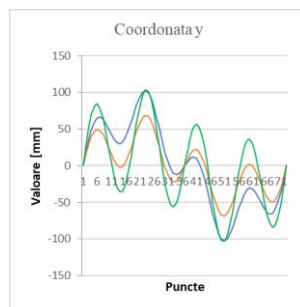
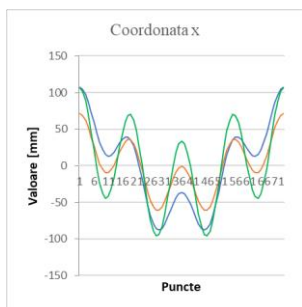
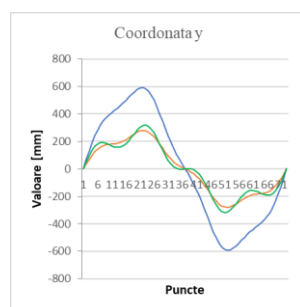
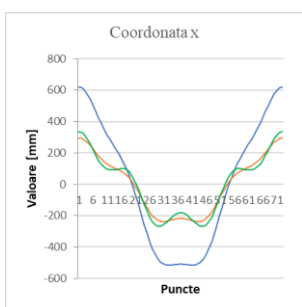


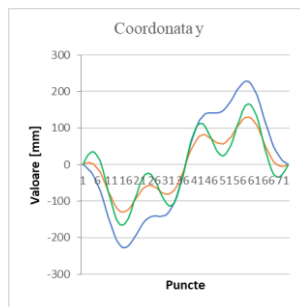
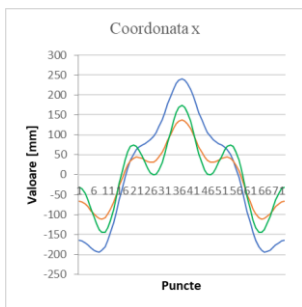
Figura 5.8 – Scan patterns produse de o pereche de prisme Risley în configurația ab-ab, într-o comparație pentru $k = 0,5$ (albastru), $k = 1$ (portocaliu) și $k = 2$ (verde), cu (a) $M = 4$ și (b) $M = -4$: (0) Scan 0 (principal) și secundar, (1) Scan 1, (2) Scan 2 și (3) Scan 3.



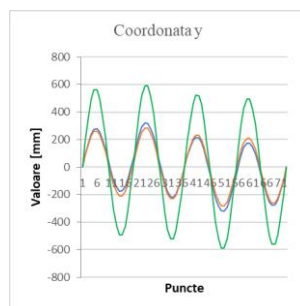
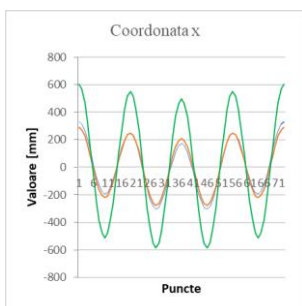
(a)



(b)

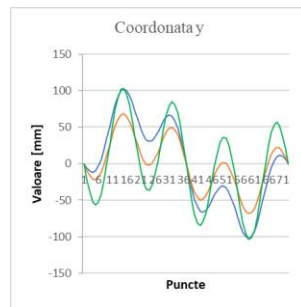
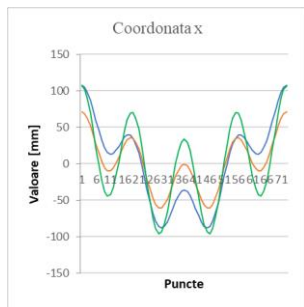


(c)

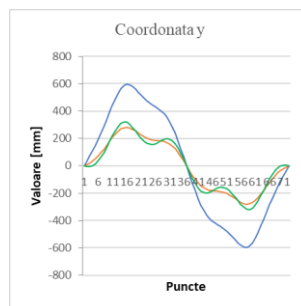
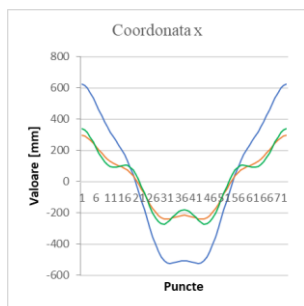


(d)

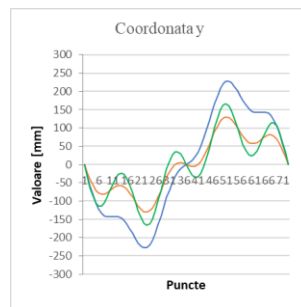
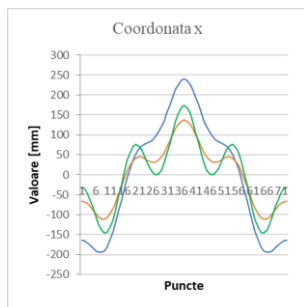
Figura 5.9 - Coordonatele x și y ale punctului laser în planul scanat, într-o comparație pentru $k = 0,5$ (albastru), $k = 1$ (portocaliu) și $k = 2$ (verde): (0) Scan 0 (principal) și secundar, (1) Scan 1, (2), Scan 2 și (3) Scan 3, pentru $M = 4$.



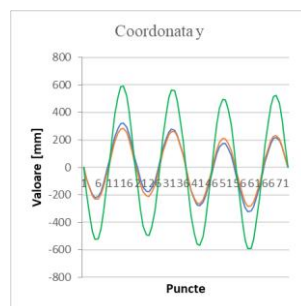
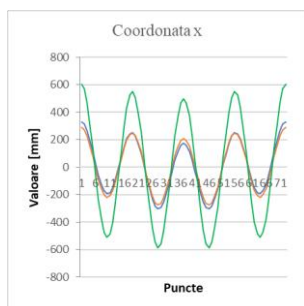
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.10 - Coordonatele x și y ale punctului laser în planul scanat, într-o comparație pentru $k = 0,5$ (albastru), $k = 1$ (portocaliu) și $k = 2$ (verde): (0) Scan 0 (principal) și secundar, (1) Scan 1, (2), Scan 2 și (3) Scan 3, pentru $M = -4$.

5.4. Concluzii

Acest capitol a prezentat câteva scan pattern-uri secundare ale prismelor Risley obținute cu metoda grafică dezvoltată folosind programul de proiectare mecanică CATIA V5R20. Pentru a realiza acest lucru s-a realizat în acest program un sistem parametrizat pentru configurația aleasă prin aplicarea ecuațiilor prismelor de bază, adaptate numărului considerat de refracții și reflexii interioare din interiorul sistemului optic.

S-a luat în considerare cazul a două prisme Risley rotative neidentice, unghiul maxim de deviere egal cu 2° și 4° (deci cu $k=0,5$, $k = 1$ și $k = 2$ pentru scaner), pentru două valori ale parametrului M , adică ± 4 . Pentru fiecare dintre aceste cazuri au fost prezentate simularea grafică, precum și graficele coordonatelor x și y ale punctului de incidență pe planul scanat. Principalul avantaj al studiului modelelor de scanare secundare ale prisme Risley este că măresc câmpul de scanare și factorul de umplere.

Aplicațiile artistice pot fi prima țintă a unor astfel de modele. Lucrările viitoare pe acest subiect includ dezvoltarea scanării prismelor Risley ca alternativă viabilă la scanarea raster (folosind scanere bazate pe galvanometru 2D, MEMS cu oglinzi oscilante sau sistem cu oglindă poligonală plus scaner 1D galvanometric), precum și la scanare spirală sau Lissajous. Cele prezentate în acest capitol reprezintă un studiu în curs, care continuă și după definitivarea acestei teze.

Bibliografie

- [1] Duma, V.-F.; Dimb, A-L. Exact Scan Patterns of Rotational Risley Prisms Obtained with a Graphical Method: Multi-Parameter Analysis and Design. Appl. Sci. 2021, 11, 8451.
- [2] Marshall, G.F. Risley Prism Scan Patterns. Proc. SPIE 1999, 3787, 74–86.

6. STUDIUL EXPERIMENTAL

6.1 Stand experimental

Pentru a putea realiza experimente, pentru a testa și a studia complet scan pattern-urile produse de un sistem de scanare cu două prisme Risley rotative, am dezvoltat și utilizat un stand experimental care va fi prezentat în continuare.

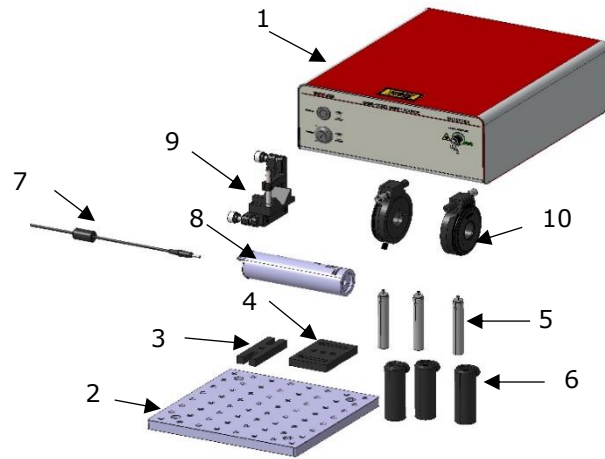
Scopul standului experimental a fost de a testa și valida teoriile și ipotezele realizate. Prin urmare acesta ne-au ajutat să validăm experimental scan pattern-urile simulate exact [1-5], pe care le-am obținut cu ajutorul programului de proiectare mecanică CATIA V5R20, folosind ecuațiile scrise pentru fiecare din cele patru configurații posibile în funcție de orientarea relativă a prismelor sistemului, pornind de la ecuațiile fundamentale ale prisme, dar și folosind cei doi parametrii introduși de Marshall și folosiți în cele trei capitole anterioare [6]: M – raportul vitezelor unghiulare, respectiv k – raportul unghiurilor prismelor.

Pe de altă parte am putut analiza comportamentul și performanța sistemelor de scanare cu prisme Risley, analizând erorile ce rezultă prin comparația dintre scan pattern-urile simulate și cele obținute experimental. Aceste erori se datorează nealinierii perfectă a componentelor standului experimental, dar și ajustării cu precizii limitate a parametrilor care definesc sistemul.

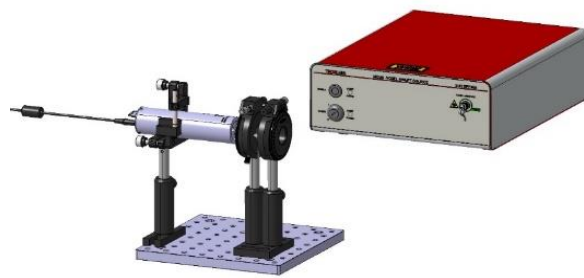
Nu în ultimul rând, scopul acestui stand experimental este de a ne permite să înțelegem și să validăm ideile pe care le-am propus inițial și pe care le vom aprofunda în viitor.

O configurație de stand experimental cu toate componentele disponibile comercial, de la firma Thorlabs [3], care permite ca două prisme Risley să fie rotite separat, cu un pas minim de $2'$, este prezentată în Figura 6.1: a) prezentare explodată cu indicarea componentelor în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20; b) prezentare isometrică în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20; c) stand experimental manual în laboratorul de optomecatronică.

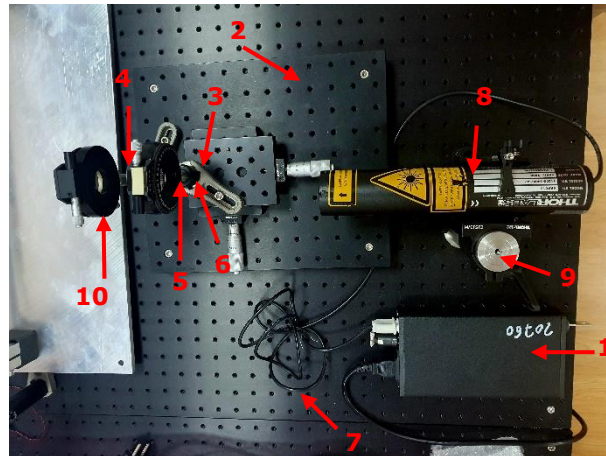
Elementele componente ale acestei configurații sunt prezentate în Tabelul 6.1.



a)



b)



c)

Figura 6.1 a) prezentare explodată cu indicarea componentelor în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20; b) prezentare isometrică în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20; c) stand experimental manual în laboratorul de optomecatronică.

Nr.	Denumire	Cod catalog	Cantitate (bucăți)
1	1060 nm MEMS-VCSEL Source, 60 kHz Sweep Rate, 48 mm MZI Delay	SL100060	1
2	Aluminum Breadboard, 200 mm x 200 mm x 12.7 mm, M6 Taps	MB2020/M	1
3	Mounting Base, 25 mm x 75 mm x 10 mm	BA1/M	1
4	Mounting Base, 25 mm x 75 mm x 10 mm	BA2/M	1
5	Ø12.7 mm Post Holder, Spring-Loaded Hex-Locking Thumbscrew, L=75 mm	PH75/M	3
6	Ø12.7 mm Optical Post, SS, M4 Setscrew, M6 Tap, L = 75 mm	TR75/M	3
7	15 V, 2.4 A Power Supply Unit with 3.5 mm Jack Connector for One K- or T-Cube	KPS101	1
8	Compact Laser Diode Module with Shutter, 635 nm, 4.0 mW	LDM635	1
9	Large Kinematic V-Clamp Mount, Metric	KM200V/M	1
10	High-Precision Rotation Mount for Ø1" (25.4 mm) Optics, Metric	PRM1/M	2

Tabel 6.1 – Listă cu componentele disponibile comerciale pentru standul experimental realizat.

6.2 Validări experimentale pentru capitolul 3

O configurație experimentală simplă a fost luată în considerare în [1,2] pentru a valida rezultatele simulărilor scanării cu prisme Risley (figura 6.2.a).

Toate componentele sunt disponibile comercial [3], inclusiv cele două prisme Risley care pot fi rotite separat, cu un pas minim de $2'$. Raza laser colimată trece prin ele și este proiectată pe un ecran (neprezentat în figură). Un anumit raport M , este simulat prin producerea mișcărilor unghiulare incrementale $\Delta\varphi_1$ și $\Delta\varphi_2$ ale celor două prisme (unde Prisma 2 este, ca și în simulări, cea apropiată de ecran); prin urmare, $M = \Delta\varphi_2/\Delta\varphi_1$.

În figura 6.2 au fost luate în considerare patru exemple, două pentru fiecare din următoarele valori $|M| = 4$ (b) și $|M| = 8$ (c). S-a putut observa un acord satisfăcător între simulări și experimente, așa cum am concluzionat în [1,2]. O comparație între scan pattern-urile simulate (albastru pentru $M > 0$ și roșu pentru $M < 0$) și experimentale (negre) poate fi făcută în figura 6.2, precum și diferența dintre cazul $M > 0$ (1) și $M < 0$ cazul (2), pentru același $|M|$. Pentru a distinge mai bine între simulări și experimente, scan pattern-urile corespunzătoare au fost prezentate ușor rotite unul față de celălalt.

Diferențele observate ca dimensiune între scan pattern-urile experimentale și cele simulate sunt cauzate de dificultăți în alinierea componentelor configurației, în ajustarea precisă a distanțelor e și L (între cele două prisme și de la a doua prismă la ecran - figura 3.2), precum și în diferența față de indicele de refracție al prismei luate în considerare în simulări și cel real, pentru lungimea de undă laser utilizată. Chiar și în limitele de mai sus, erorile relative legate de raza experimentală y_{max}^e al câmpului visual / scan pattern (figura 3.2) este de 2 până la 4% (tabelul 3.3), în ceea ce

privește raza simulată, de $y_{max} = 71,265$ mm (pentru $e = 25$ mm, $L = 1$ m și $n = 1,517$). Pentru a finaliza această analiză, razele experimentale y_{max}^e au fost măsurate pentru fiecare dintre bucele μ ale scan pattern-urilor din figura 6.2.

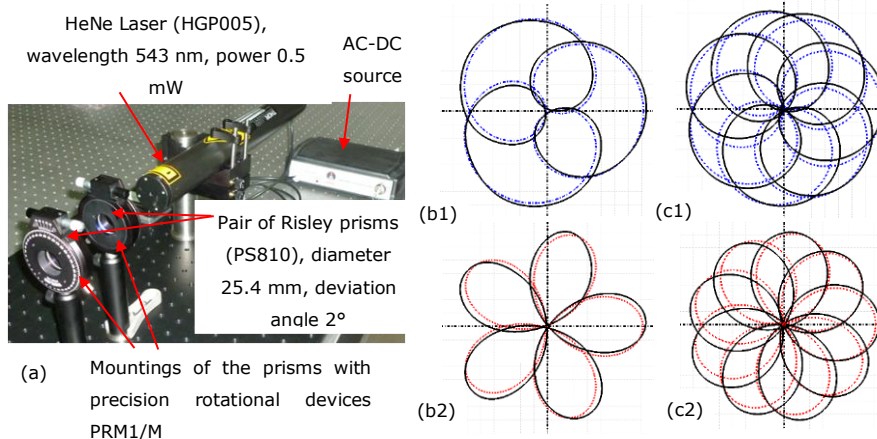


Figura 6.2. Studiu experimental al scan pattern-urilor obținute cu două prisme Risley rotative: (a) configurație construită cu componente Thorlabs disponibile comercial. Suprapuse, dar ușor rotite unul față de celălalt, scan pattern-uri simulate (albastru și roșu) și experimentale (negru), determinate pentru (b) $|M| = 4$, (c) $|M| = 8$, cu (1) $M > 0$ și (2) $M < 0$.

Raportul vitezelor unghiulare, ecuația 3.1	$M = 4$	$M = -4$	$M = 8$	$M = -8$
Valoarea medie a razei câmpului vizual: $\overline{y_{max}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} y_{max}^e$	72,709	72,827	72,961	73,794
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\overline{y_{max}^e} - y_{max}^e)^2}$	0,591	0,645	1,336	1,708
Eroare relativă: $\varepsilon\% = (\overline{y_{max}^e} - y_{max}) \cdot 100/y_{max}$	2,027	2,192	2,207	3,548

Tabelul 6.2. Analiza erorilor razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus cea simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.2.

6.3 Validări experimentale pentru capitolul 4

Ca și în lucrările [1,2,4,5], a fost utilizată configurație experimentală simplă din figura 6.1 pentru a valida rezultatele simulărilor de scanare cu o pereche de prisme Risley (figura 6.3.a). Toate componentele utilizate sunt disponibile comercial [3], cu câte o pereche de prisme Risley; fiecare prismă este rotită separat, cu un pas minim disponibil de 2'. Laserul HeNe produce un fascicul care trece prin sistem și produce un model de scanare pe un ecran (neprezentat în figură).

Raportul dorit M a fost simulat prin producerea mișcărilor unghiulare incrementale $\Delta\phi_1$ și, respectiv, $\Delta\phi_2$ ale celor două prisme (unde prismă 1 este, ca și în simulări, cea apropiată de laser). În acest fel, se obține $M = \Delta\phi_2/\Delta\phi_1$. Parametrii sistemului sunt $e = 25$ mm și $L = 1$ m (adică distanțele dintre cele două prisme, respectiv, de la prismă 2 la ecran - figura 6.3), în timp ce prismele considerate sunt caracterizate prin $D = 2^\circ$.

Patru exemple de validări experimentale sunt prezentate în figura 6.3, pentru $|M| = 2$ și $|M| = 6$. Scan pattern-urile simulate (reprezentate cu albastru pentru $M > 0$ și cu roșu pentru $M < 0$) au fost comparate cu pattern-urile experimentale (desenate cu negru) în toate cele patru cazuri. Pentru a distinge cele două tipuri de modele, acestea au fost considerate cu o anumită schimbare de rotație unul față de celălalt. S-a obținut o bună coorcondanță între simulări și experimente, ca și în diferite lucrări, unde au fost luate în considerare alte valori ale lui M (vezi celelalte subcapitole). Această validare este obținută din erorile relative ϵ între raza simulată (R) și cea experimentală (R^e) a câmpului total al scan pattern-ului (tabelul 6.3). În întreaga analiză, razele experimentale R^e au fost măsurate pentru fiecare dintre buclele μ (figura 6.3).

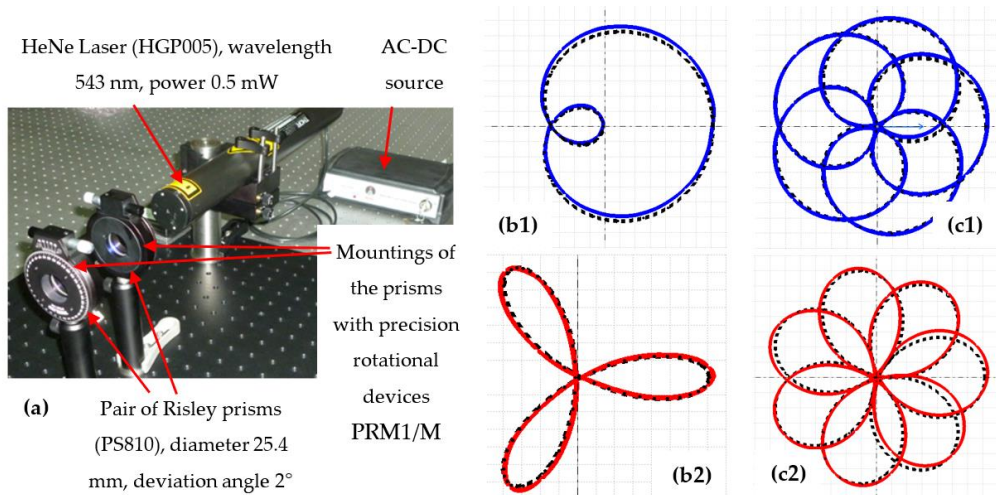


Figura 6.3 Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental: (a) configurație construită cu componente Thorlabs - utilizate și în celelalte subcapitole. Scan pattern suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru (1) $M > 0$ și în roșu pentru (2) $M < 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru (b) $|M| = 2$ și (c) $|M| = 6$.

Există aceleași limitări ale acestui studiu experimental care provoacă diferențe precum cele din tabelul 6.3 între scan pattern-urile simulate și cele experimentale: erori în alinierea componentelor de configurare, în ajustarea distanțelor e și L , precum și în diferența față de indicele de refracție al prismă luată în considerare în simulări și cea reală, pentru lungimea de undă luminoasă utilizată.

Dezvoltarea unor configurații experimentale mai precise este una dintre direcțiile de lucru în grupul de cercetare.

Raportul vitezelor unghiulare	M=2	M=-2	M=6	M=-6
Valoarea medie a razei câmpului vizual: $\bar{R}^e = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} R^e$	70,846	72,692	72,125	72,544
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\bar{R}^e - R^e)^2}$	0,001	0,387	0,536	0,858
Eroare relativă: $\varepsilon^{\%} = (\bar{R}^e - R^e) \cdot 100/R$	-0,588	2,003	1,206	1,794

Tabelul 6.3. Raza simulată (R) versus experimentală (R^e) a câmpului vizual al scan pattern-urilor - așa cum a fost determinată în investigația prezentată în figura 6.3.

6.4 Validări experimentale pentru capitolul 5

Cu configurație experimentală simplă prezentată anterior în figura 6.1 s-au validat experimental scan pattern-urile secundare ale unui sistem de scanare cu prisme Risley, discutate în capitolul 5.

O comparație între scan pattern-urile simulate (albastru pentru $M > 0$ și roșu pentru $M < 0$) și cele experimentale (negre) poate fi făcută în figurile 6.4 - 6.9, precum și diferența dintre cazurile $M > 0$ și $M < 0$, pentru același $|M|$. Pentru a distinge mai bine între simulări și experimente, scan pattern-urile corespunzătoare au fost prezentate tot ușor rotite unul față de celălalt, ca și în subcapitolele anterioare. Alți parametri folosiți au fost $e = 25$ mm, $L = 1$ m și $n = 1,517$. S-a analizat atât raza maximă y_{\max} , cât și raza minimă y_{\min} a scan pattern-urilor simulate.

Au fost analizate trei valori ale parametrului k :

a) În figura 6.4, respectiv în figura 6.5, pentru parametrul $k = 0.5$ au fost luate în considerare opt exemple, patru pentru fiecare din următoarele valori $|M| = 4$, câte unul pentru fiecare scan pattern obținut: principal (Scan 0), secundar (Scan 1, Scan 2 și Scan 3).

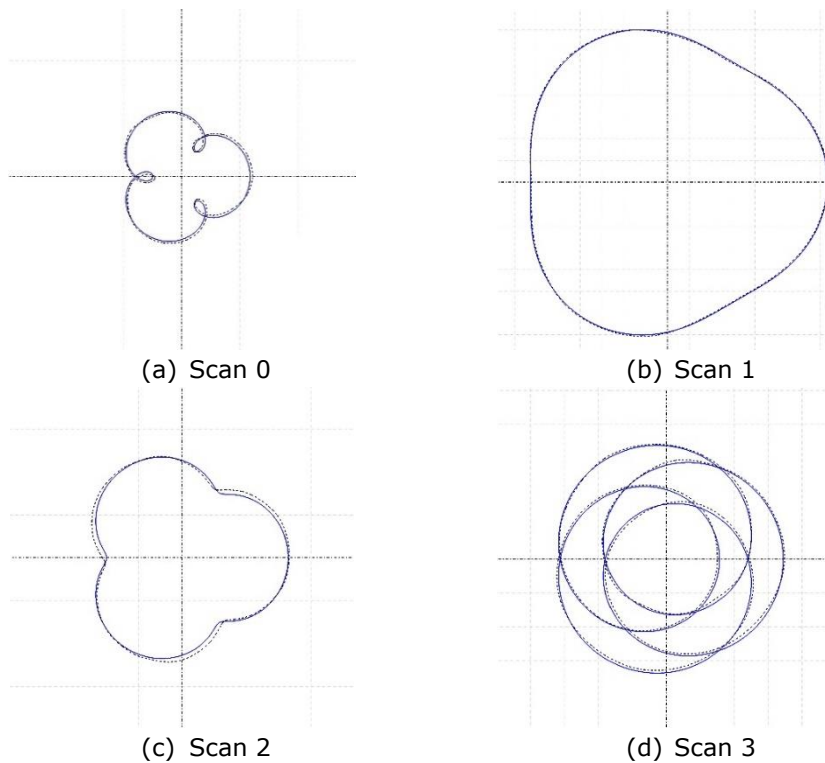


Figura 6.4 - Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = 4$, $k = 0.5$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.

Raportul vitezelor unghiulare	M=4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza maximă simulate y_{max}	11,769	73,282	24,683	34,473
Valoarea medie a razei câmpului vizual: $\overline{y_{max}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} y_{max}^e$	11,959	73,704	24,947	34,451
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\overline{y_{max}^e} - y_{max}^e)^2}$	0,077	0,154	0,071	0,554
Eroare relativă: $\varepsilon\% = \frac{(\overline{y_{max}^e} - y_{max}) \cdot 100}{y_{max}}$	-3,277	0,590	1,068	-0,064

Tabelul 6.4 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.4

Raportul vitezelor unghiulare	M=4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza minimă simulate y_{min}	4,953	62,742	17,420	15,776
Valoarea medie a razei petei oarbe: $\overline{y_{min}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^{\mu} y_{min}^e$	4,791	62,520	17,774	15,227
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\overline{y_{min}^e} - y_{min}^e)^2}$	0,203	0,171	0,048	0,103
Eroare relativă: $\varepsilon\% = (\overline{y_{min}^e} - y_{min}) \cdot 100/y_{min}$	1,617	-0,354	2,034	-3,478

Tabelul 6.5 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.4

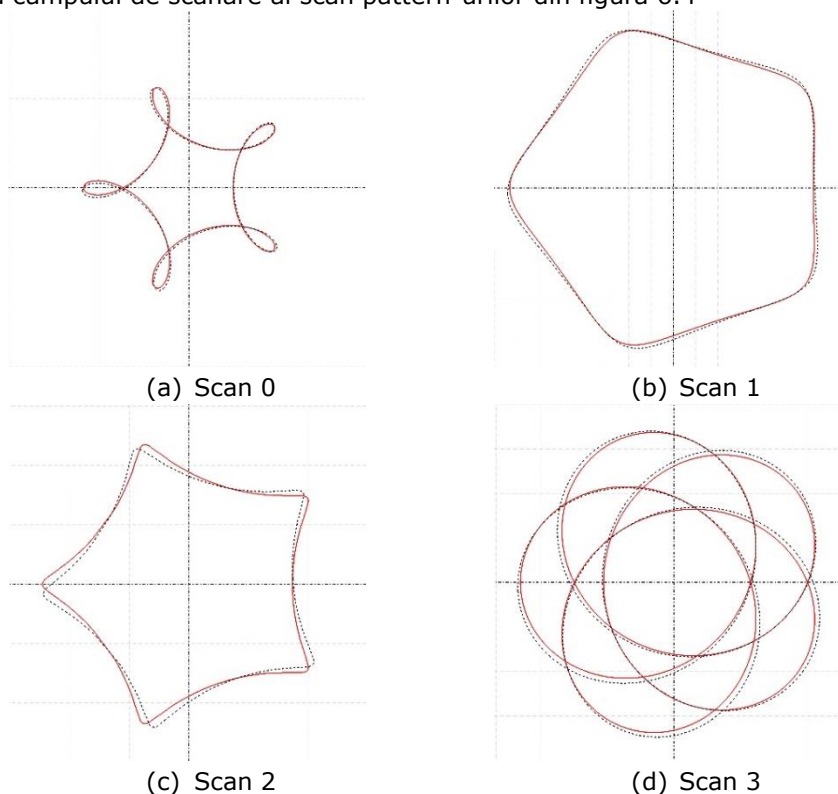


Figura 6.5 - Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = -4$, $k = 0.5$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.

Raportul vitezelor unghiulare	M=-4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza maximă simulate y_{max}	11,769	73,282	24,683	34,473
Valoarea medie a razei câmpului vizual: $\overline{y_{max}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^{\mu} y_{max}^e$	11,905	74,064	24,555	35,145
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\overline{y_{max}^e} - y_{max}^e)^2}$	0,080	0,133	0,201	0,110
Eroare relativă: $\varepsilon\% = (\overline{y_{max}^e} - y_{max}) \cdot 100/y_{max}$	1,156	1,080	-0,539	1,949

Tabelul 6.6 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.5

Raportul vitezelor unghiulare	M=-4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza minimă simulate y_{min}	4,953	62,742	17,420	15,776
Valoarea medie a razei petei oarbe: $\overline{y_{min}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^{\mu} y_{min}^e$	5,045	63,454	17,491	16,097
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\overline{y_{min}^e} - y_{min}^e)^2}$	0,074	0,144	0,148	0,112
Eroare relativă: $\varepsilon\% = (\overline{y_{min}^e} - y_{min}) \cdot 100/y_{min}$	1,861	1,135	0,406	2,032

Tabelul 6.7 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.5

b) În figura 6.6, respectiv în figura 6.7, pentru parametrul $k = 1$ au fost luate în considerare opt exemple, patru pentru fiecare din urmatoarele valori $|M| = 4$, câte unul pentru fiecare scan pattern obținut: principal (Scan 0), secundar (Scan 1, Scan 2 și Scan 3).

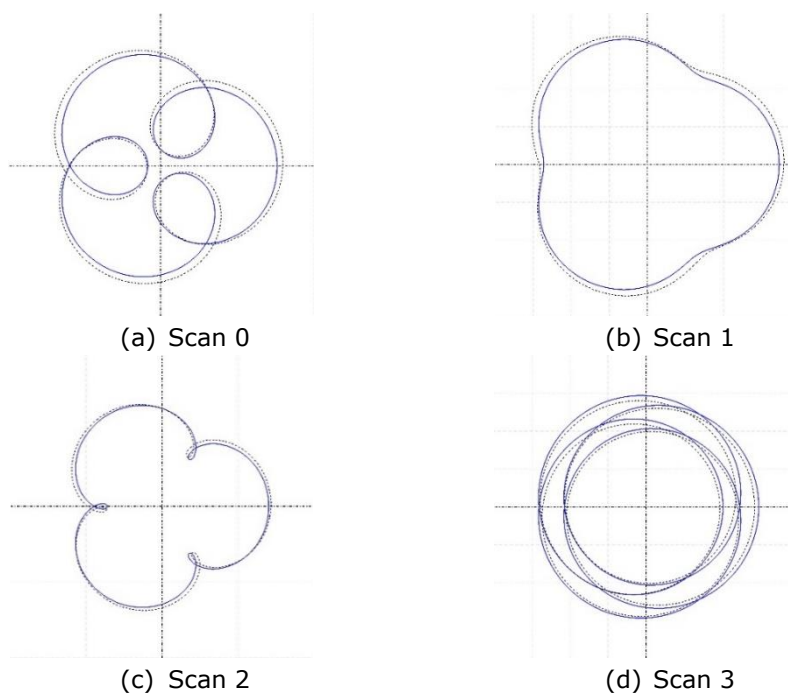


Figura 6.6 - Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = 4$, $k = 1$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.

Raportul vitezelor unghiulare	M=4			
	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Scan pattern				
Raza maximă simulată y_{max}	7,612	34,627	14,059	29,687
Valoarea medie a razei câmpului vizual: $\overline{y_{max}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^{\mu} y_{max}^e$	7,978	35,877	14,309	28,848
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (y_{max}^e - \overline{y_{max}^e})^2}$	0,006	0,082	0,022	0,213
Eroare relativă: $\varepsilon\% = \frac{(\overline{y_{max}^e} - y_{max}) \cdot 100}{y_{max}}$	4,813	3,580	1,781	-2,827

Tabelul 6.8 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.6

Raportul vitezelor unghiulare	M=4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza minimă simulată y_{min}	0,838	27,171	7,176	20,274
Valoarea medie a razei petei oarbe: $\overline{y_{min}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} y_{min}^e$	0,891	28,197	7,250	19,678
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\overline{y_{min}^e} - y_{min}^e)^2}$	0,009	0,033	0,101	0,245
Eroare relativă: $\varepsilon\% = (\overline{y_{min}^e} - y_{min}) \cdot 100/y_{min}$	6,325	3,776	1,036	-2,940

Tabelul 6.9 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.6

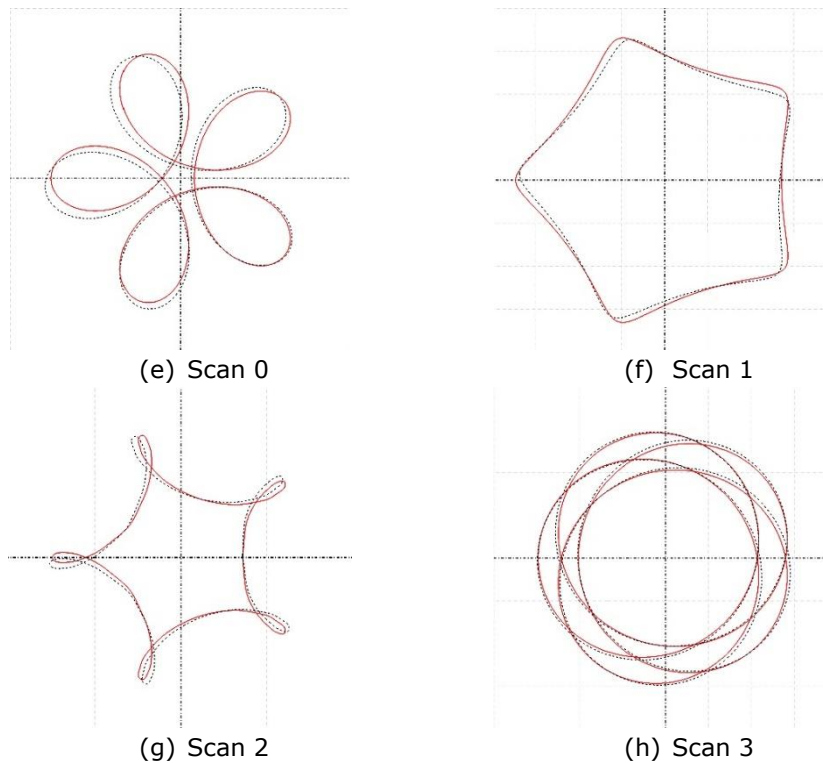


Figura 6.7 - Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = -4$, $k = 1$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.

Raportul vitezelor unghiulare	M=-4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza maximă simulate y_{max}	7,612	34,627	14,059	29,687
Valoarea medie a razei câmpului vizual: $\overline{y_{max}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} y_{max}^e$	7,759	33,935	15,172	29,845
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\overline{y_{max}^e} - y_{max}^e)^2}$	0,178	0,124	0,104	0,158
Eroare relativă: $\varepsilon\% = (\overline{y_{max}^e} - y_{max}) \cdot 100/y_{max}$	1,931	-2,028	7,914	0,534

Tabelul 6.10 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.7

Raportul vitezelor unghiulare	M=-4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza minimă simulate y_{min}	0,838	27,171	7,176	20,274
Valoarea medie a razei petei oarbe: $\overline{y_{min}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} y_{min}^e$	0,854	26,642	7,230	20,494
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\overline{y_{min}^e} - y_{min}^e)^2}$	0,178	0,125	0,074	0,097
Eroare relativă: $\varepsilon\% = (\overline{y_{min}^e} - y_{min}) \cdot 100/y_{min}$	1,957	-1,948	0,755	1,086

Tabelul 6.11 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului vizual al scan pattern-urilor din figura 6.9

c) În figura 6.8, respectiv în figura 6.9, pentru parametrul $k = 2$ au fost luate în considerare opt exemple, patru pentru fiecare din următoarele valori $|M| = 4$, câte unul pentru fiecare scan pattern obținut: principal (Scan 0), secundar (Scan 1, Scan 2 și Scan 3).

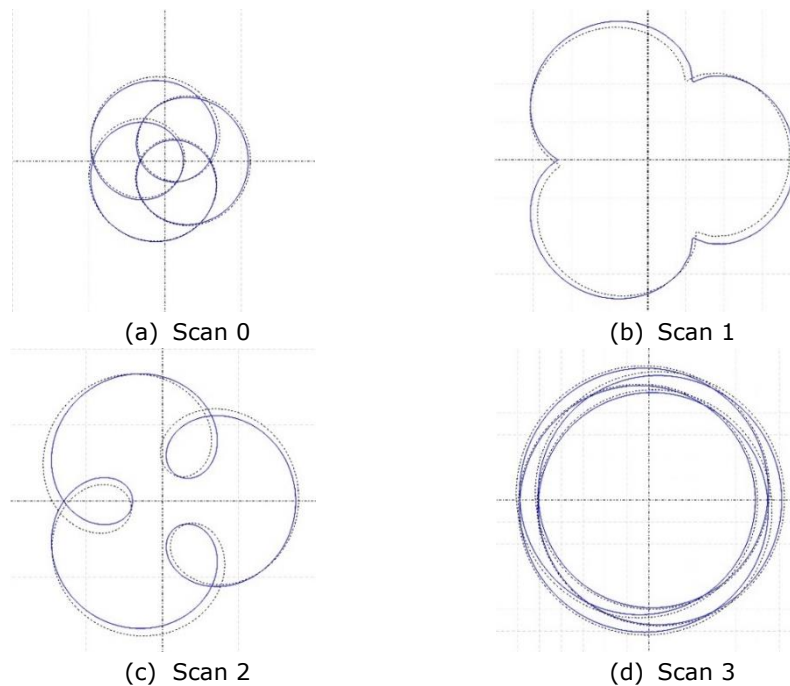


Figura 6.8 - Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = 4$, $k = 2$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.

Raportul vitezelor unghiulare	M=4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza maximă simulată y_{max}	10,934	38,532	17,525	60,994
Valoarea medie a razei câmpului vizual: $\overline{y_{max}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} y_{max}^e$	11,155	37,300	18,036	62,211
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\overline{y_{max}^e} - y_{max}^e)^2}$	0,163	0,115	0,143	0,100
Eroare relativă: $\epsilon\% = \frac{(\overline{y_{max}^e} - y_{max}) \cdot 100}{y_{max}}$	2,018	-3,196	2,914	1,995

Tabelul 6.12 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.8

Raportul vitezelor unghiulare	M=4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza minimă simulată y_{min}	2,439	23,705	3,882	48,879
Valoarea medie a razei petei oarbe: $\overline{y_{min}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} y_{min}^e$	2,483	22,992	4,011	49,890
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (\overline{y_{min}^e} - y_{min}^e)^2}$	0,155	0,087	0,155	0,076
Eroare relativă: $\varepsilon\% = (\overline{y_{min}^e} - y_{min}) \cdot 100/y_{min}$	1,818	-3,006	3,172	2,068

Tabelul 6.13 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.8

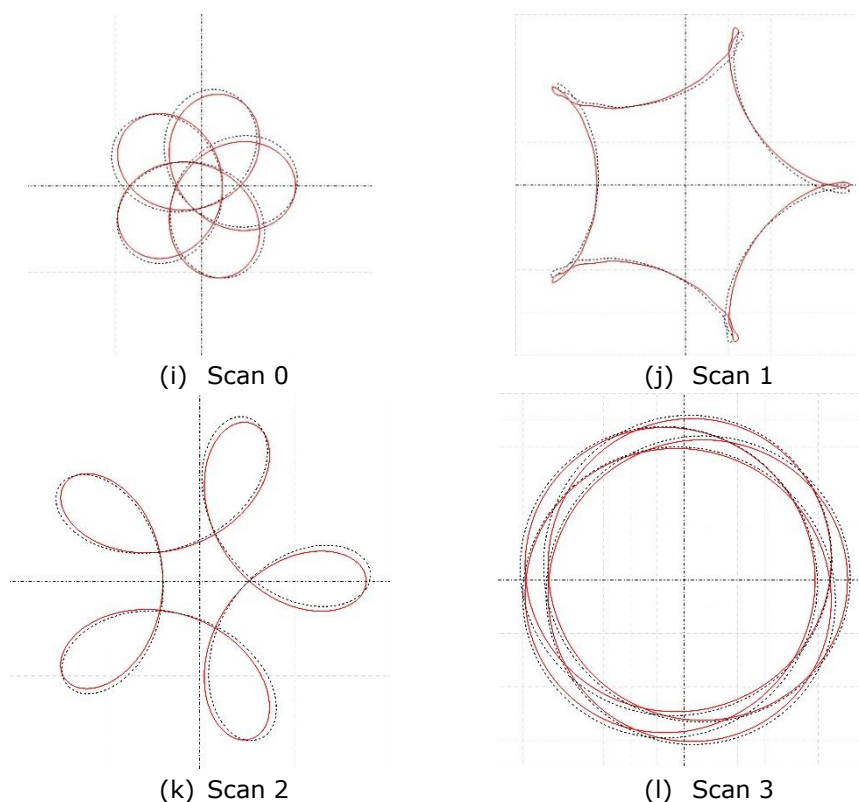


Figura 6.9 - Scan pattern-uri ale unei perechi de prisme Risley de rotație - studiu experimental, suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru $M > 0$) față de scan pattern-urile experimentale (în negru), determinate pentru $|M| = -4$, $k = 2$: (a) Scan 0, (b) Scan 1, (c) Scan 2, (d) Scan 3.

Raportul vitezelor unghiulare	M=-4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza maximă simulate y_{max}	10,934	38,532	17,525	60,994
Valoarea medie a razei câmpului vizual: $\overline{y_{max}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} y_{max}^e$	11,269	38,386	17,841	62,159
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (y_{max}^e - \overline{y_{max}^e})^2}$	0,113	0,180	0,092	0,191
Eroare relativă: $\varepsilon\% = (\overline{y_{max}^e} - y_{max}) \cdot 100/y_{max}$	3,066	-0,379	1,803	1,910

Tabelul 6.14 Analiza erorilor a razei maxime experimentale (y_{max}^e) versus simulată (y_{max}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.9

Raportul vitezelor unghiulare	M=-4			
Scan pattern	Scan 0	Scan 1	Scan 2	Scan 3
Raza minimă simulate y_{min}	2,439	23,705	3,882	48,879
Valoarea medie a razei petei oarbe: $\overline{y_{min}^e} = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} y_{min}^e$	2,534	23,619	3,975	49915
Abaterea standard a razei câmpului vizual: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (y_{min}^e - \overline{y_{min}^e})^2}$	0,097	0,110	0,096	0,214
Eroare relativă: $\varepsilon\% = (\overline{y_{min}^e} - y_{min}) \cdot 100/y_{min}$	3,895	-0,364	2,233	2,120

Tabelul 6.15 Analiza erorilor a razei minime experimentale (y_{min}^e) versus simulată (y_{min}) a câmpului de scanare al scan pattern-urilor din figura 6.9

Diferențele observate de dimensiune între scan pattern-urile experimentale și simulate sunt cauzate de dificultăți în alinierea componentelor configurației, precum și în ajustarea precisă a distanțelor e și L (între cele două prisme și de la a doua prismă la ecran), precum și în diferența față de indicele de refracție al prismei luate în considerare în simulări și cel real, pentru lungimea de undă laser utilizată. Chiar și în limitele de mai sus, situația erorilor relative legate de raza experimentală y_{max}^e al câmpului vizual și razei experimentale y_{min}^e a petei oarbe, se prezintă astfel:

(a) Cazul I – Pentru $M = 4$, $k = 0,5$, raza experimentală y_{max}^e al câmpului vizual variază între $-3,277$ și $1,068$, iar raza experimentală y_{min}^e a petei oarbe variază între $-3,478$ și $1,617$;

(b) Cazul II – Pentru $M = -4$, $k = 0,5$, raza experimentală y_{max}^e al câmpului vizual variază între $-0,539$ și $1,949$, iar raza experimentală y_{min}^e a petei oarbe variază între $0,406$ și $2,032$;

(c) Cazul III – Pentru $M = 4$, $k = 1$, raza experimentală y_{max}^e al câmpului vizual variază între $-2,827$ și $4,813$, iar raza experimentală y_{min}^e a petei oarbe variază între $-2,940$ și $1,617$;

(d) Cazul IV – Pentru $M = -4$, $k = 1$, raza experimentală y_{max}^e al câmpului vizual variază între $-2,028$ și $7,914$, iar raza experimentală y_{min}^e a petei oarbe variază între $-1,948$ și $1,957$.

(e) Cazul V – Pentru $M = 4$, $k = 2$, raza experimentală y_{max}^e al câmpului vizual variază între $-3,196$ și $2,914$, iar raza experimentală y_{min}^e a petei oarbe variază între $-3,006$ și $3,172$;

(f) Cazul VI – Pentru $M = -4$, $k = 2$, raza experimentală y_{max}^e al câmpului vizual variază între $-0,379$ și $3,066$, iar raza experimentală y_{min}^e a petei oarbe variază între $-0,364$ și $3,895$.

Bibliografie

- [1] Duma, V.-F.; Schitea, A. Laser scanners with rotational Risley prisms: Exact scan patterns. Proc. Rom. Acad. Ser. A 2018, 19, 53–60.
- [2] Dimb, A.-L.; Duma, V.-F. Experimental validations of simulated exact scan patterns of rotational Risley prisms scanners. Proc. SPIE 2020, 11354, 113541U.
- [3] Available online: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=147 (accessed on 25 July 2021).
- [4] Dimb, A.-L.; Duma, V.-F. Experimental validations of simulated exact scan patterns of rotational Risley prisms scanners. Proc. SPIE 2019, 11354, 113541U.
- [5] Dimb, A.-L.; Duma, V.-F. Simulations and experiments of laser scanning with a pair of rotational Risley prisms. Proc. SPIE 2022, 12170, 1217009.
- [6] Marshall, G.F. Risley Prism Scan Patterns. Proc. SPIE 1999, 3787, 74–86.

7. APLICAȚIILE TOMOGRAFIEI DE COERENȚĂ OPTICĂ ÎN EVALUAREA RUGOZITĂȚII SUPRAFETELOR MATERIALELOR METALICE

7.1. Noțiuni introductive

Forma și dimensiunile imperfecțiunilor pieselor prelucrate depind de operațiile de prelucrare, de forma sculei de tăiere, de ciclul de tăiere (în special de avansul de tăiere) și de modul în care se formează așchia. Aceste imperfecțiuni ale profilului sunt standardizate de ISO 11562-1996 și ISO 16610-21/1996 în profil primar, profil ondulat și profil de rugozitate. Profilele de suprafață ale pieselor prelucrate aduc dezavantaje, precum o diminuare a suprafeței de contact, o creștere a uzurii, o scădere a limitei de rezistență la oboseală etc.

Metodele de măsurare pentru profilele de rugozitate ale suprafeței sunt specificate în standarde. Astfel, standardul ISO4287/1998 oferă metode pentru determinarea evoluției profilului suprafeței prin utilizarea unor profilometre care înregistrează profilul pe mai mulți milimetri / o lungime a profilului de câțiva milimetri. ISO 4287 face parte din specificațiile geometrice ale produsului, care cuprinde, de asemenea, următoarele standarde: ISO 3274, ISO 4287, ISO 4288, ISO 11562 și ISO 16610-21 [41]. Aceste standarde scrie specifică caracteristicile de contact ale palaptorului, furnizează reguli și proceduri pentru certificarea suprafeței, specifică parametrii care definesc rugozitatea suprafeței și filtrele care urmează să fie utilizate etc. Standardul ISO 4768 definește parametrii de rugozitate în felul următor:

- a) parametrii câmpului vizual: R_a , R_q , R_{sk} , R_{ku} , R_p , R_v , R_z ;
- b) parametrii de amplitudine: R_t ;
- c) parametrii de caracteristică: R_c (vârf-vale), RS_m (spațiere).

Standardele care specifică determinarea rugozității suprafeței prin metode mecanice prevăd ca rugozitatea să fie determinată pe lungimi diferite în funcție de rugozitatea suprafeței surface ($R_z > 50 \mu\text{m}$) – 40 mm; R_z (10 - 50 μm) – 12.5 mm; R_z (0.5 - 10 μm) – 4 mm; R_z (0.1 - 0.5 μm) – 1.25 mm; R_z (< 0.1 μm) – 0.4 mm.

Aceste metode de măsurare pentru profilele de rugozitate ale suprafeței sunt specificate în standardele ISO 4287/1998.

Caracterizarea precisă a rugozității suprafeței la scară nanometrică este importantă în multe aplicații și există o serie de tehnici în acest scop. Cu toate acestea, diferitele tehnici de caracterizare sunt deseori optime pentru diferite aplicații sau etape ale unui proces, necesitând astfel ca valorile măsurate să fie comparabile între instrumente. Cu toate acestea, compararea valorilor obținute cu diferite instrumente nu este o sarcină simplă, deoarece proiectarea fiecărui instrument impune limitări diferite ale lățimii de bandă de măsurare. Acesta este un efect adesea trecut cu vederea atunci când se compară valorile rugozității. Prin urmare, pentru a efectua o comparație fiabilă a valorilor obținute cu diferite instrumente este necesar un studiu al preciziei și limitelor fiecărei metode.

Două aparate și metode utilizate adesea pentru măsurătorile rugozității sunt profilometrul și microscopia cu forță atomică (AFM) [1,2]. Ambele sunt metode

mecanice, în care un vârf ascuțit este urmărit de-a lungul suprafeței și profilul suprafeței este evaluat din mișcarea sa. AFM-urile au, în general, doar forțe de interacțiune slabe cu suprafața, în timp ce se știe că dispozitivele de profilare deteriorează suprafața din cauza forțelor excesive, ducând la valori incorecte și la abraziunea probei, care ar trebui să nu fie realizată. În comparație cu metodele mecanice, metodele optice (fără contact) sunt avantajoase datorită naturii lor neabrazive și a fezabilității de a scana suprafețe mari în timp scurt. Caracteristica non-abrazivă este deosebit de relevantă pentru suprafețele foarte netede cu rugozitate în intervalul nanometric.

Pentru măsurarea rugozității suprafeței sunt utilizate în prezent numeroase metode fără contact, precum: tomografia cu coerență optică [3,4,5,6]; interferometria cu scanare verticală cu sursă de lumină [7,8,9]; profilometrul optic confocal [10,11]; senzori confocali de-a lungul interferometriei cu lumină albă [12]; interferometria cu coerență scăzută [13]; BRDF [7,14]; împrăștierea luminii de pe suprafața rugoasă [15,16,17,18,19,20]; sistem adaptativ neuro-fuzzy [21]; interferometria cu lumină albă [22,23,24,25,26]; tehnica speckle laser [27,28,29,30,31,32,33]; interferometria holografică [34]; măsurarea refractanței sursei de lumină [35]; interferometrul cu impulsuri laser de femtosecunde [36]; biosenzori de rezonanță plasmonică de suprafață localizată [37]; spectre de reflexie terahertzi (38); măsurători spectrofotometrice [39,40]. Comparațiile între valorile rugozităților măsurate prin metode mecanice versus optice au început să fie făcute încă din 1962. „Ghidul procedurilor de măsurători optice” a fost editat în 1988 pentru a explica în termeni simpli câte măsurători optice de bază se pot face.

Au fost efectuate experimente pe sticlă, materiale compozite, materiale metalice (oțel, aluminiu, nichel, bronz, etc). Toate aceste materiale au fost prelucrate prin șlefuire, lustruire, frezare, sondare cu bandă etc. Metodele fără contact au fost utilizate pentru a determina trei parametri: înălțimea medie a rugozității (R_a); înălțimea medie pătrată a rugozității (R_q); înălțimea maximă a rugozității (R_z); vârful profilului maxim al profilului evaluat (R_p).

Rugozitatea suprafețelor măsurate a fost scăzută ($R_z < 3\mu\text{m}$). Lungimile suprafețelor analizate prin metode fără contact au fost situate în intervalul μm .

În studiul de față, măsurătorile au fost efectuate pe trei cale comerciale de rugozitate prin intermediul tomografiei de coerență optică (OCT). Parametrii de rugozitate ai acestor standarde au fost R_z cu valori nominale de 20, 40 și 80 μm și R_a cu valori nominale de 3,6, 9,8 și 18 μm .

Scopul este de a cerceta dacă valorile parametrilor R_z și R_a obținute prin intermediul tomografiei de coerență optică sunt compatibile cu valorile nominale ale caleur de rugozitate comercială.

Metoda fără contact utilizată în prezentul studiu are potențialul de a fi utilizată pentru a determina parametrii de rugozitate a suprafeței în piesele obișnuite din oțel frezate mecanic.

Tomografia de coerență optică / Optical Coherence Tomography (OCT) este o tehnologie de imagistică optică, neinvazivă, de înaltă rezoluție, bazată pe interferența produsă între semnalul reflectat dintr-un obiect în curs de investigare și un semnal de referință. Tomografia de coerență optică produce în timp real o imagine de secțiune transversală a obiectului, adică o imagine cu două dimensiuni.

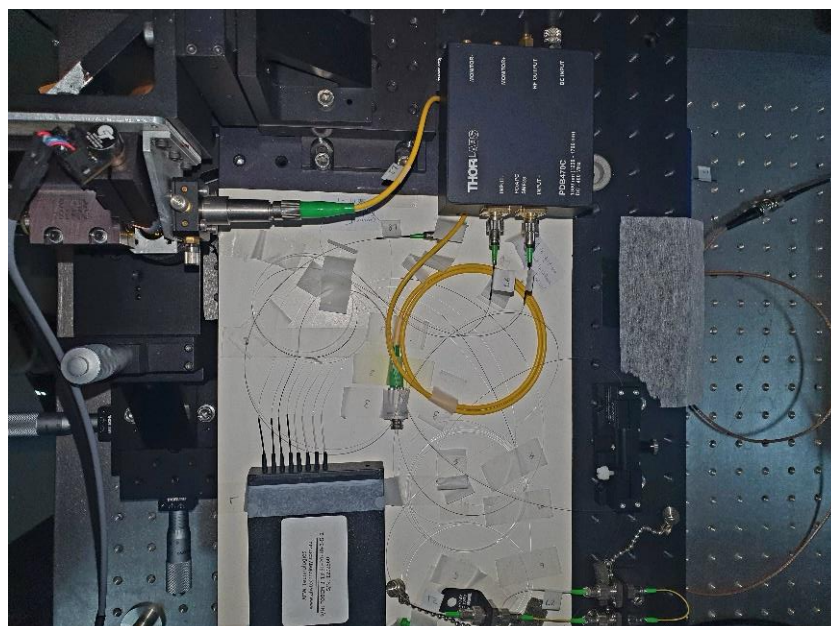
Bazele de funcționare ale tomografiei de coerență optică (OCT) au fost puse de Prof. James Fujimoto de la Massachusetts Institute of Technology (MIT) [42]. Principiul tomografiei cu coerență optică este construit pe baza unui interferometru Michelson, realizat dintr-o sursă de lumină, un sistem de scanare și un detector. Elementele enumerate anterior constituie un ansamblu care îndeplinesc funcțiile

importante ale echipamentului. Sursa emite un fascicol laser (undă electromagnetică), care se divide în alte două fascicule prin intermediul unui divizor de fascicule format dintr-o lamă semireflectoare. Unul dintre fascicule este trimis spre proba măsurată, iar celălalt spre oglinda de referință, în așa mod încât se vor suprapune în momentul traversării divizorului de fascicule, interferând. Prin această interferență apare un fascicol care este absorbit de către detector.

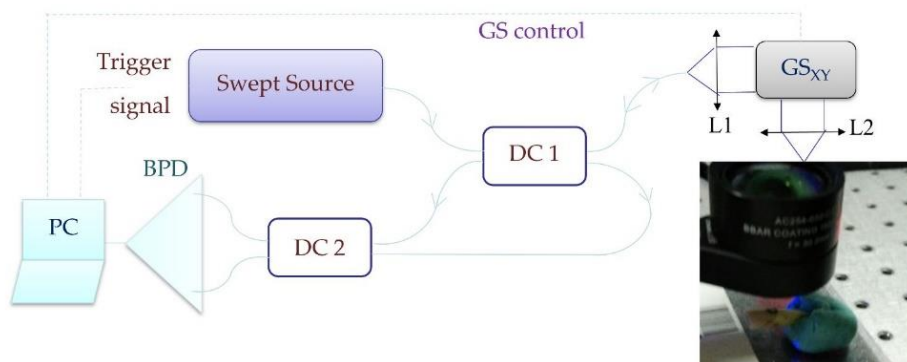
În primă fază, primele imagini realizate de OCT au fost făcute în domeniul temporal, „time-domain”. Aceste sisteme „time-domain” au capacitatea de a realiza cu aproximație 400 de scanări de tip A pe secundă. Pe de altă parte, tehnologia „spectral-domain”/în domeniul spectral (SD) produce aproximativ 20000-40000 scanări pe secundă, așadar este mult mai rapidă. Ea are mai multe avantaje și anume: îmbunătățirea acurateții și rezoluției, dar și diminuarea riscului de a produce imagini false sau artefacte prin faptul că se pot omite porțiuni de probă. Un alt avantaj al SD-OCT este că are o rezoluție mult mai bună față de cel TD-OCT, și anume 2 μm (posibil) față de 15 μm .

Cercetând studiile anterioare, au fost analizate o serie de tipuri de materiale (nemedicale) utilizând metoda tomografiei de coerență optică, inclusiv materiale plastice și compozite [43]. Analiza lor s-a axat pe structura internă, matricele și armarea, stresul superficial al picăturilor de rășină, grosimea stratului și defectele care apar în interiorul straturilor. În ceea ce privește materialele dentare, au fost analizate aspecte ca [43]: grosimea stratului, defectele interioare ale stratului, defectele între straturi și contracția straturilor. Pentru materialele electronice s-au efectuat analize privind grosimea stratului, defectele de strat și defectele care apar între straturi [44]. Grosimea straturilor și a defectelor între straturi au fost analizate și în sticlă [45,46]. Tomografia de coerență optică a fost de asemenea utilizată în picturi pentru a analiza structura straturilor de vopsea, grosimea straturilor, precum și schițele existente sub straturile de vopsea [46-48]. În studiul materialelor OCT-ul a fost utilizat pentru a analiza tipul rupturilor [49].

Pentru acest studiu s-a folosit sistemul de formare al imaginii SS-OCT din laboratorul de optomecatronică (Figura 7.1 a,b). Acest sistem este format din sursa optică (SO), care are o lungime de undă de 1310 nm, folosește o gamă spectrală de 106 nm și o frecvență de scanare de 100 kHz. Configurația de interferometru folosește două cuplaje direcționale cu un singur mod de cuplare CD1 și CD2, unde CD1 are raportul 20/80, iar CD2 este un separator echilibrat de 50/50. Receptorul de detecție al echilibrului este alimentat de DC2, 20% din puterea SS este lansată prin lentila L1 (distanța focală de 15 mm), care trimite fasciculul XYSH, urmată de o interfață optică făcută de o lentilă de scanare L2 (distanța focală de 50 mm). Puterea optică / fluxul reflectat de proba S este de 2,2 mW. La ieșirea din cuplajul CD1, 80% din puterea sursei optice este îndreptată spre brațul de referință cu oglinzi plane O1 și O2 amplasate în piesa de translație TS, reglând astfel diferența de drum optic/optical path difference (OPD). Fiind în interferometru, lentilele colinatoare L3 și L4 sunt similare cu L1. Receptorul echilibrat transmite semnalul la una dintre cele două intrări ale unui convertor cu intrare dublă. Punctele canalizate CS au fost manipulate printr-un program implementat în Labview 2013, pe 64 biti, instalate pe un PC echipat cu o unitate de procesare Intel Xenon, modelul E 5646.



a)



b)

Figura 7.1 – Sistemul SS-OCT: a) configurația sistemului SS-OCT din laboratorul de optomecatronică; b) schema de funcționare a sistemului SS-OCT.

7.2. Metodă experimentală

În studiul de față au fost utilizate trei cale comerciale de rugozitate. Aceste cale sunt fabricate din oțel și frezate mecanic. Valorile nominale ale parametrilor lor de rugozitate sunt Rz 20, 40 și 80 μm și Ra 3.6, 9.8, 18 μm .



Figura 7.2. Cale comerciale de rugozitate cu valorile nominale ale parametrilor de rugozitate Rz 20, 40 și 80 µm și Ra 3.6, 9.8, 18 µm

Parametrii utilizați pentru determinarea rugozității suprafeței sunt prezentați în tabelul 7.1.

Parametrul	Standard	Definiție
Ra	ISO 4287/1998	Abaterea medie aritmetică a profilului
Rq	ISO 4287/1998	Definiția rădăcină medie pătrată a profilului evaluat
Rsk	ISO 4287/1998	Deformarea profilului evaluat
Rku	ISO 4287/1998	Kurtoza profilului evaluat
Rp	ISO 4287/1998	Vârful profilului maxim al profilului evaluat
Rv	ISO 4287/1998	Adâncimea maximă a văii de profil a profilului evaluat
Rz	ISO 4287/1998	Înălțimea maximă a profilului evaluat
Rt	ISO 4287/1998	Înălțimea totală a profilului evaluat
Rc	ISO 4287/1998	Înălțimea medie a elementelor de profil ale profilului evaluat
RSm	ISO 4287/1998	Lățimea medie a elementelor de profil ale profilului evaluat

Tabel 7.1 - Parametrii de rugozitate

Abaterea medie aritmetică a profilului evaluat, notată Ra reprezintă media aritmetică ale ordonatelor $z(x)$, în limitele unei lungimi de rază. Acest parametru se definește cu următoarea relație :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - Z| \quad (7.1)$$

unde

n – numărul de puncte într-un interval de eşantioane

zi – valoarea înălțimii unui punct i

Z – media aritmetică a zi într-un interval de eşantioane

Abateră medie pătratică a profilului evaluat notată cu R_q este media pătratică a valorilor de pe axa ordonatelor $Z(x)$ în limitele unei lungimi de bază și se află cu relația:

$$R_q = \sqrt{\frac{l}{l_r} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (7.2)$$

Asimetria profilului evaluat R_{sk} reprezintă câtul dintre cubul valorilor ordonatelor $Z(x)$ și cubul R_q , într-un interval de eșantionare și se află cu relația:

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^3(x) dx \right] \quad (7.3)$$

Aplatizarea profilului evaluat R_{ku} reprezintă câtul dintre valorile ordonatelor $Z(x)$ la puterea a patra și iar putere a patra a R_q , într-un interval de eșantionare și se află cu relația:

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^4(x) dx \right] \quad (7.4)$$

Înălțimea maximă a profilului evaluat R_p (al vârfului) este cel mai înalt vârf de profil Z_p într-o lungime de eșantionare și se află cu relația:

$$R_p = \max_{1 \leq j \leq m} Z_{p_j} \quad (7.5)$$

Adâncimea maximă a profilului evaluat R_v (a văii) este cea mai mare adâncime a profilului vale într-o lungime de eșantionare și se află cu relația:

$$R_v = \max_{1 \leq j \leq m} Z_{v_j} \quad (7.6)$$

Înălțimea maximă a profilului evaluat notat cu R_z reprezintă însumarea dintre extremități și anume cea mai mare înălțime a profilului Z_p și cea mai mare vale a golurilor profilului Z_v și se află cu relația:

$$R_z = Z_p - Z_v \quad (7.7)$$

Înălțimea totală a profilului notată cu R_t reprezintă suma dintre cea mai mare înălțime a proeminențelor profilului Z_p și cea mai mare adâncime a golurilor profilului Z_t în limitele lungimii de valoare și se află cu relația:

$$R_t = R_p + R_v \quad (7.8)$$

Înălțimea medie a elementelor profilului, notată cu R_c este valoarea medie a înălțimilor elementelor profilului, z_i , în limitele lungimii de bază l și se află cu relația:

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Z_{t_j} \quad (7.9)$$

Valoarea medie a lățimii elementelor profilate ale profilului evaluat R_{S_m} este valoarea medie a elementului profilului lățimile X_s într-o lungime de eșantionare și se află cu relația :

$$R_{S_m} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m X_{S_j} \quad (7.10)$$

7.3. Metodă tomografiei de coerență optică

Cele trei cale comerciale de rugozitate au fost scanate cu ajutorul tomografiei de coerență optică (OCT) pentru a determina parametrii de rugozitate Ra și Rz.

Conform ISO 4288 și ISO 3274, măsurătorile pentru Rz 20 μm și Rz 40 μm trebuie făcute pe o lungime de 12,5 mm, în timp ce pentru Rz 80 μm pe o lungime de 40 mm

Pentru calele de rugozitate comercială de Rz 20 și Rz 40 μm s-au făcut 4 scanări consecutive, în timp ce pentru calele de rugozitate comercială de Rz 80 μm s-au făcut 13 scanări consecutive. Aria fiecărei suprafețe scanate a fost de 3,125 x 3,125 mm. Pe această suprafață au fost efectuate 1000 de B-scans/secțiuni optice, fiecare B-scan având 1000 de puncte.

7.4. Metode utilizate pentru determinarea parametrilor de rugozitate Rz și Ra, cu ajutorul B-scan-urilor

Pentru a determina valoarea parametrilor Rz și Ra, prelucrarea B-scan-urilor obținute prin OCT a fost efectuată folosind programele ImageJ, Matlab și Excel.

Pentru toate cele trei standarde comerciale de rugozitate au fost analizate următoarele B-scan-uri: 1, 250, 500, 750, 988. O ilustrare a acestor analize este data în figurile 7.3-7.6 pentru B-scan 250 din cale comercial de rugozitate cu valoarea nominală Rz 40 μm. După scanare, B-scan-ul a fost importat în programul Matlab prin intermediul căruia s-au determinat valorile coordonatelor x și y pentru fiecare dintre cele 1000 de puncte ale B-scan-ului. Coordonatele x și y obținute prin Matlab au fost transferate în programul Excel unde a fost reprezentat graficul $y=f(x)$.

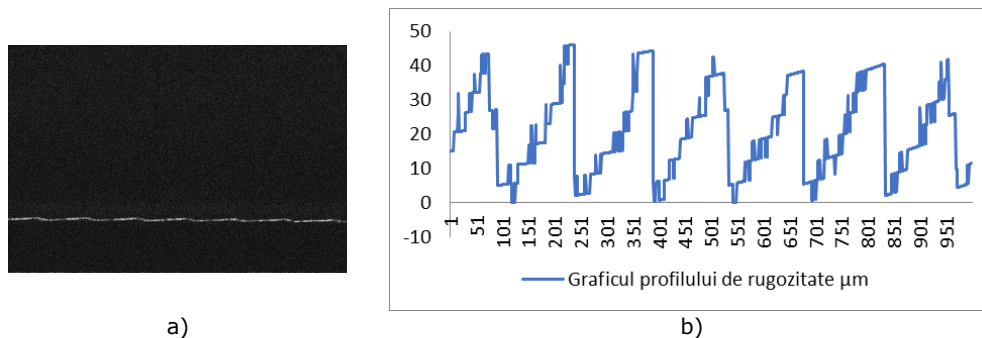
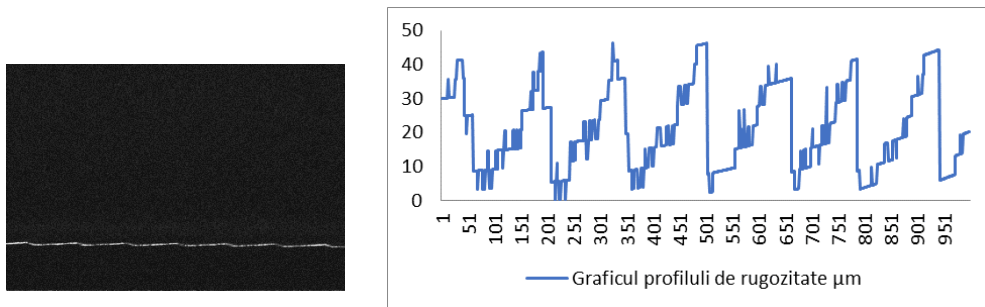
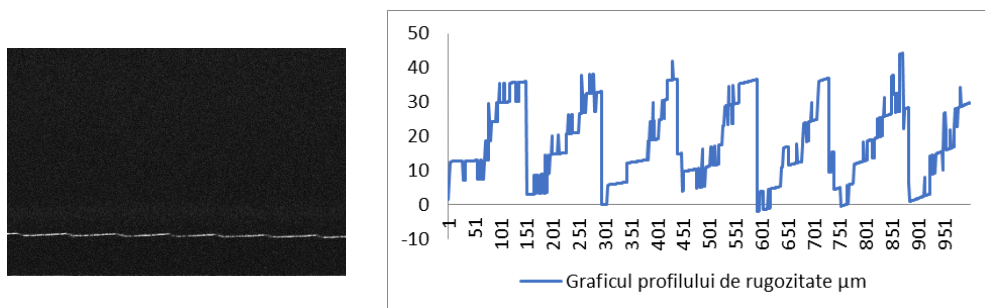


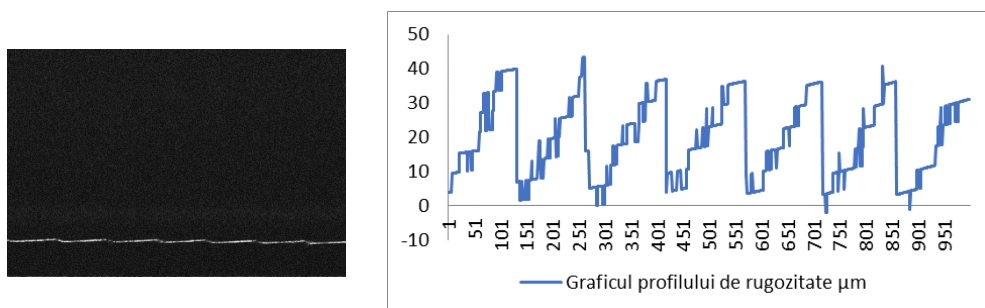
Figura 7.3 – a) B-scan 250.1 b) Graficul profilului de rugozitate obținut în Excel



a) b)
 Figura 7.4 – a) B-scan 250.2 b) Graficul profilului de rugozitate obținut în Excel



a) b)
 Figura 7.5 – a) B-scan 250.3 b) Graficul profilului de rugozitate obținut în Excel



a) b)
 Figura 7.3 – a) B-scan 250.4 b) Graficul profilului de rugozitate obținut în Excel

Conform ISO 4287/1998, graficul a fost împărțit în cinci lungimi egale. Deoarece nu au existat erori de măsurare, la începutul și la sfârșitul graficului, lungimea limită λ_c a fost considerată a fi zero. Atunci când măsurarea rugozității este determinată cu ajutorul profilometrului, apar erori la cele două capete ale distanței măsurate. Lungimile eliminate (lungimile de tăiere λ_c) depind de distanța măsurată. După eliminarea lor graficul se împarte în cinci lungimi egale.

Pentru fiecare dintre cele cinci lungimi ale graficului valorile parametrilor R_a și R_z calculate folosind formulele din subcapitolul 7.3 și s-a obținut o valoare medie a celor cinci determinări.

7.5. Determinarea Ra și Rz folosind diferite valori de prag ale sistemului OCT

Valorile parametrilor Ra și Rz au fost determinate pentru B-scan-ul cu numărul 250 folosind valori de prag de 180, 200, 220, 245. Au fost efectuate patru scanări pentru calele comerciale de rugozitate cu Rz de 20 μm și 40 μm și 13 pentru calele comerciale de rugozitate cu Rz 80 μm

Tabelele 7.2 – 7.5 prezintă valorile Rz și Ra pentru calele comerciale de rugozitate cu Rz de 20, 40 și 80 μm cu praguri de 180, 200, 220, respectiv 245.

Valoare prag	180		200		220		245	
Nr.	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
1	24,2	5,6	24,6	4,7	24,6	5,2	23,0	6,1
2	16,3	2,9	16,3	2,9	14,9	3,0	15,6	3,1
3	25,8	5,8	25,4	5,1	25,5	5,3	24,3	4,8
4	31,0	6,3	29,2	6,0	29,1	6,3	29,4	5,9
Media	24,3	5,1	23,9	4,7	23,5	4,9	23,0	4,9

Tabelul 7.2 Valorile parametrilor Ra și Rz pentru calea comercială de rugozitate cu valoare nominală Rz 20 μm obținute la diferite praguri ale sistemului OCT

Valorile Ra și Rz care sunt mai apropiate de cele ale calelor comerciale sunt valorile obținute la pragul 245.

Valoare prag	180		200		220		245	
No.	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
1	43,0	10,8	43,6	10,6	42,0	10,8	41,1	10,8
2	41,9	10,0	39,6	10,1	39,0	10,0	39,5	10,2
3	39,6	9,3	39,4	9,4	37,3	9,7	37,3	10,0
4	39,0	9,9	37,0	9,7	36,1	9,8	35,2	10,0
Media	40,8	10,0	39,8	10,0	38,6	10,0	38,2	10,2

Tabelul 7.3 Valorile parametrilor Ra și Rz pentru calea comercială de rugozitate cu valoare nominală Rz 40 μm obținute la diferite praguri ale sistemului OCT

Valorile Ra și Rz care sunt mai apropiate de cele ale calelor comerciale sunt valorile obținute la pragul 180.

Valoare prag No.	180		200		220		245	
	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
1	79,2	18,2	79,2	18,3	81,4	18,5	84,7	18,7
2	85,0	19,8	84,8	18,7	83,6	18,5	85,7	18,4
3	76,0	7,3	78,2	12,6	81,4	17,1	82,5	19,0
4	86,2	18,9	86,3	18,7	85,2	18,8	85,1	18,8
5	81,0	19,2	81,0	19,1	80,9	19,0	83,0	19,2
6	85,7	17,9	85,4	17,9	85,4	18,0	85,3	18,5
7	80,4	17,8	77,3	17,9	78,4	18,0	77,4	17,5
8	85,2	20,3	81,7	21,1	81,6	21,0	80,5	21,0
9	80,4	19,8	80,3	19,6	76,8	20,0	77,9	20,0
10	79,4	19,7	80,1	20,3	77,8	20,1	81,1	20,6
11	78,7	19,0	77,6	19,2	79,6	19,1	75,2	19,1
12	81,2	20,2	81,1	20,0	81,0	20,0	78,8	19,9
13	59,5	20,3	30,7	8,7	33,0	9,4	35,3	9,7
Media	81,5	18,1	81,0	18,6	81,1	19,0	81,4	19,2

Tabelul 7.4 Valorile parametrilor Ra și Rz pentru calea comercial de rugozitate cu valoare nominală Rz 80 μm obținute la diferite praguri ale sistemului OCT

Valorile Ra și Rz care sunt mai apropiate de cele ale cailor comerciale sunt valorile obținute la pragul 180.

7.6. Determinarea Rz și Ra pentru calele comerciale de rugozitate cu Rz 20 μm și Ra 3,6 μm folosind pragul 245

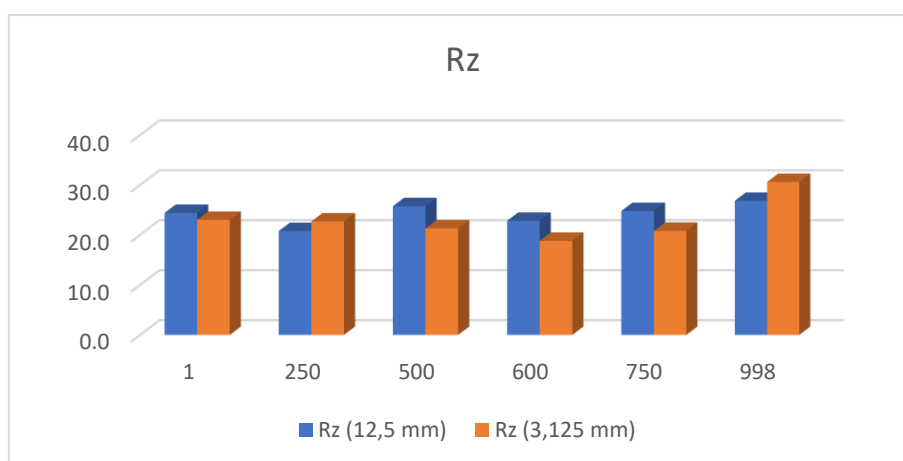
B-scan-urile nr. 1, 250, 500, 600, 750 și 998 au fost procesate folosind ImageJ, Matlab și Excel în conformitate cu metoda descrisă în secțiunea 8.4.

Patru scanări consecutive au fost efectuate pe calele comerciale de rugozitate cu ajutorul tomografiei de coerență optică. După fiecare scanare au fost analizate cele șase B-scan-uri.

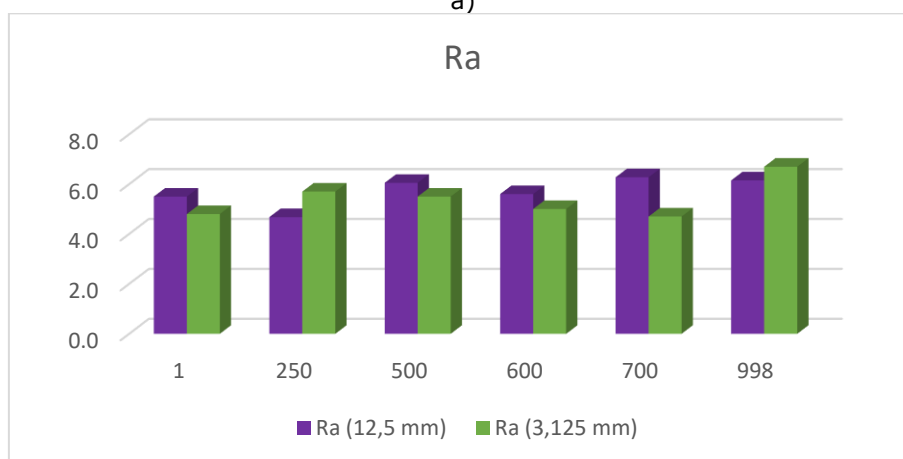
Tabelul 7.5 prezintă rezultatele acestor scanări (valorile parametrilor Rz și Ra) iar figura 7.6 prezintă graficele pentru Ra și Rz medii pentru cele patru scanări și valorile Rz și Ra pentru prima scanare (3.125 mm).

B-scan	1		250		500		600		750		998	
Nr	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
1	23,0	4,8	22,7	5,7	21,3	5,5	18,8	5,0	20,8	4,7	30,6	6,7
2	22,9	6,0	22,0	4,8	32,8	7,9	28,3	6,4	33,8	8,4	23,3	5,6
3	22,4	4,8	17,4	3,2	20,9	5,2	18,9	5,3	24,3	6,6	28,8	7,3
4	29,3	6,4	21,0	5,0	28,0	5,6	25,3	5,7	20,2	5,4	24,6	5,0
Media	24,4	5,5	20,8	4,7	25,8	6,1	22,8	5,6	24,8	6,3	26,8	6,2
Rz mediu = 24,2 μm						Ra mediu = 5,7 μm						

Tabelul 7.5 Valorile parametrilor Rz și Ra pentru cala comercială de rugozitate cu Rz de 20 μm și Ra de 3,6 μm



a)



b)

Figura 7.7. Grafice valorile parametrilor Rz și Ra pentru cala comercială de rugozitate cu Rz de 20 μm și Ra de 3,6 μm

Rz mediu variază între 20,7 μm și 26,8 μm . Ra mediu măsurat prin tomografia de coerență optică variază între 4,6 μm și 6,1 μm . Rz mediu pentru cele 6 scanări și 24,2 μm ; în timp ce Ra mediu a fost de 5,7 μm .

7.7. Determinarea Rz și Ra pentru calele comerciale de rugozitate cu Rz 40 μm și Ra 9,8 μm folosind pragul 180

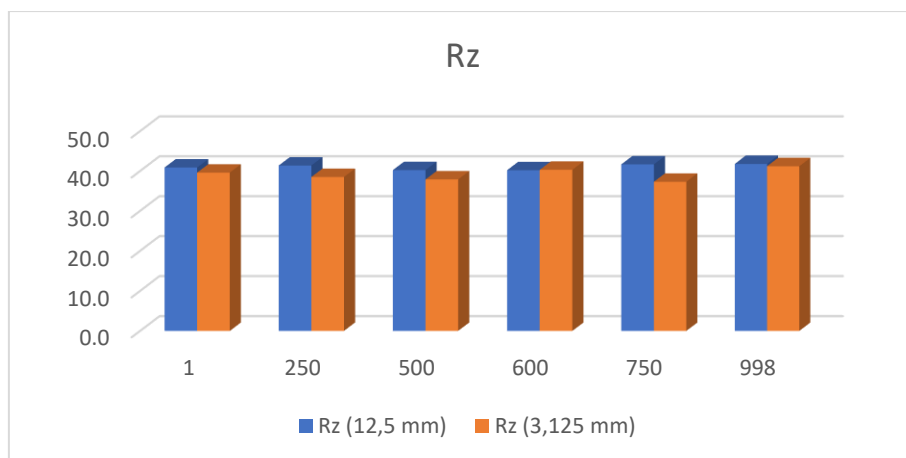
Au fost efectuate patru scanări consecutive pe calea de rugozitate comercială cu ajutorul tomografiei de coerență optică

B-scan-urile numărul 1, 250, 500, 600, 750 și 998 au fost procesate conform metodei descrise în secțiunea 7.4 pentru fiecare scanare

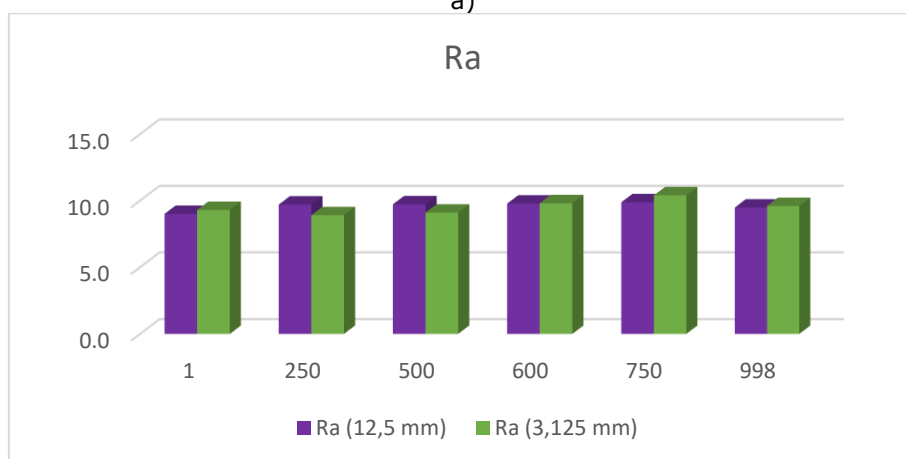
Tabelul 7.6 prezintă valorile Rz și Ra pentru cele 4 scanări, în timp ce figura 7.7 prezintă graficele pentru Rz și Ra medii pentru cele patru scanări și valorile și pentru prima scanare (3,125 mm).

B-scan	1		250		500		600		750		998	
Nr	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
1	39,6	9,3	38,5	8,9	37,9	9,1	40,3	9,8	37,3	10,4	41,2	9,6
2	39,0	5,9	43,5	10,3	39,2	9,5	38,6	10,1	46,6	10,6	40,2	10,0
3	43,0	10,8	41,0	10,3	42,7	10,4	41,0	10,0	40,3	9,2	41,8	9,7
4	41,9	10,0	42,5	9,3	41,1	9,9	40,9	9,2	42,5	9,3	43,9	8,6
Media	40,9	9,0	41,4	9,7	40,2	9,7	40,2	9,8	41,7	9,9	41,8	9,5
Rz mediu = 41,0 μm						Ra mediu = 9,6 μm						

Tabelul 7.6 Valorile parametrilor Rz și Ra pentru calea comercială de rugozitate cu Rz de 40 μm și Ra de 9,8 μm



a)



b)

Figura 7.8 Grafice valorile parametrilor Rz și Ra pentru calea comercială de rugozitate cu Rz de 40 μm și Ra de 9,8 μm

Rz mediu variază între 40,2 μm și 41,8 μm . Ra mediu măsurat prin tomografia de coerență optică variază între 9,0 μm și 9,7 μm . Rz mediu pentru cele 6 scanări și 41,0 μm , în timp ce Ra mediu a fost de 9,6 μm .

7.8. Determinarea Rz și Ra pentru calele comerciale de rugozitate cu Rz 80 μm și Ra 18 μm folosind pragul 180

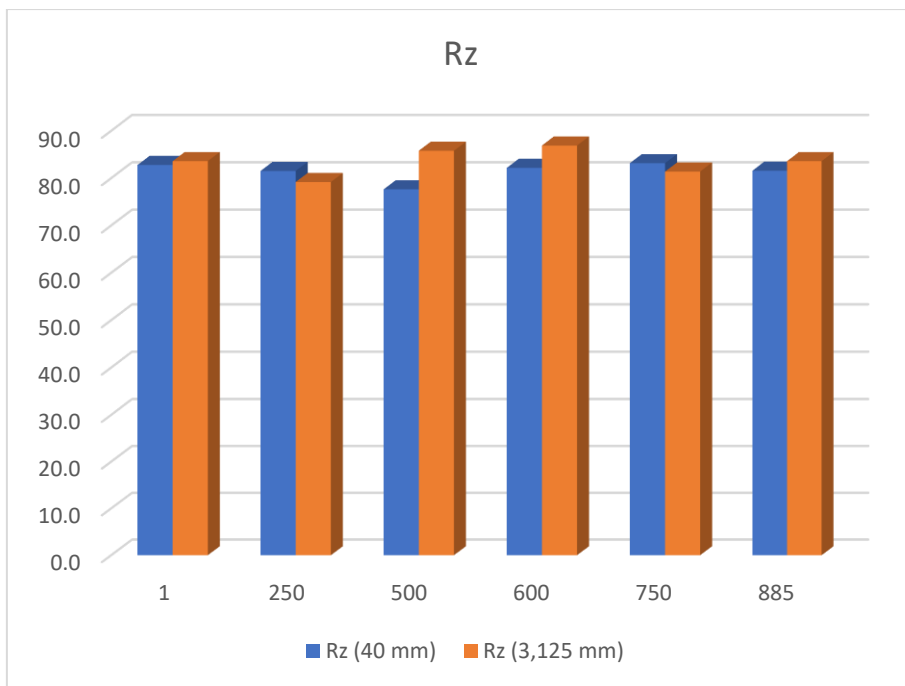
Lungimea scanată pentru calea de rugozitate comercială cu Rz de 80 μm trebuie să fie de 40 mm. Au fost efectuate 13 scanări cu o lungime totală de 40,625 mm. Deoarece ultima scanare a depășit lungimea calei de rugozitate comercială, a fost eliminată.

B-scan-urile cu numerele 1, 250, 500, 600, 750 și 850 au fost procesate folosind ImageJ, Matlab și Excel în conformitate cu metoda descrisă în secțiunea 8.4.

Tabelul 7.7 prezintă valorile Rz și Ra pentru cele 12 scanări, în timp ce figura 7.8 prezintă graficele pentru Rz și Rz medii privind cele 12 scanări și Rz și Rz pentru prima scanare (3,125 mm).

B-scan	1		250		500		600		750		998	
Nr	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra
1	83,6	19,1	79,2	18,2	85,8	18,9	86,9	19,1	81,4	19,1	83,6	19,3
2	86,9	18,7	85,0	19,8	86,9	18,1	89,1	19,6	89,1	18,9	81,0	18,5
3	74,6	9,4	76,0	7,3	81,4	18,3	84,7	18,7	79,2	17,8	79,9	18,4
4	81,8	18,5	86,2	18,9	79,6	18,4	80,9	19,0	86,0	19,6	86,2	19,8
5	87,0	18,7	81,0	19,2	15,5	3,0	83,1	19,1	83,9	19,0	85,3	19,4
6	85,3	19,4	85,7	17,9	83,0	18,6	78,6	19,2	88,5	19,0	84,0	19,7
7	85,0	19,0	80,4	17,8	89,5	19,7	87,0	18,7	85,1	18,9	82,7	19,7
8	85,0	19,0	85,2	20,3	82,0	19,2	81,9	20,3	83,4	19,8	81,2	18,5
9	80,1	20,6	80,4	19,8	80,9	19,6	80,9	20,5	80,8	20,3	81,9	20,2
10	81,2	19,5	79,4	19,7	80,8	20,3	76,5	20,7	82,1	20,0	80,6	21,1
11	81,5	19,5	78,7	19,0	82,5	21,2	78,6	20,0	80,2	20,7	68,4	18,1
12	81,5	19,3	81,2	20,2	84,0	20,4	78,0	19,9	78,3	21,0	84,2	20,1
Media	82,8	18,4	81,5	18,2	77,7	18,0	82,2	19,6	83,2	19,5	81,6	19,4
Rz mediu = 81,5 μm						Ra mediu = 18,8 μm						

Tabelul 7.7. Valorile parametrilor Rz și Ra pentru cala comercială de rugozitate cu Rz de 80 μm și Ra de 18 μm



a)



b)

Figura 7.9 Grafice valorile parametrilor Rz și Ra pentru cala comercială de rugozitate cu Rz de 80 μm și Ra de 18 μm

Rz mediu variază între 77,7 μm și 83,2 μm . Ra mediu măsurat prin tomografia de coerență optică variază între 18 μm și 19,5 μm . Rz mediu pentru cele 6 scanări 81,5 μm ; în timp ce Ra mediu a fost de 18,8 μm .

7.9. Discuția rezultatelor

1) Cală comercială de rugozitate cu Rz de 20 μm

În urma măsurătorilor, s-a obținut o valoare medie de 24,2 μm pentru Rz și 5,7 μm pentru Ra (pentru toate B-scan-urile și toate scanările).

Valoarea medie Rz măsurată cu ajutorul tomografiei de coerență optică este cu 21% mai mare decât valoarea Rz a calei de rugozitate comercială, în timp ce valoarea Ra este cu 58,34% mai mare decât valoarea Ra a calei de rugozitate comercială.

Dacă luăm în considerare B-scan-urile 1, 500, 998 efectuate pe cele patru scanări, valorile medii obținute sunt o medie Rz de 25,86 μm și o medie Ra de 5,7 μm .

Dacă luăm în considerare B-scan-urile 250, 750, 998 efectuate pe cele patru scanări, valorile medii obținute sunt o medie Rz de 25,5 μm și o medie Ra 5,73 μm .

Dacă luăm în considerare B-scan-urile 500, 750, 998 efectuate pe cele patru scanări, valorile medii obținute sunt un Rz mediu de 26 μm și un Ra mediu de 5,93 μm .

Rezultă că în cazurile în care măsurătorile sunt efectuate pe trei bscan-uri valorile lui Rz și Ra sunt apropiate de valorile obținute pe cele șase bscan-uri.

Dacă se ia în considerare prima scanare de 3,125 mm, există diferențe mari între valorile Rz și Ra măsurate cu ajutorul tomografiei de coerență optică și cele ale calelor de rugozitate comerciale. Pentru a obține valorile Rz și Ra mai apropiate de valorile standardului de rugozitate comercială, lungimea scanată trebuie să fie de 12,5 mm conform ISO 4288/1988.

2) Cală comercială de rugozitate cu Rz de 40 μm

În urma măsurătorilor, s-a obținut o valoare medie de 41 μm pentru Rz și 9,6 μm pentru Ra (pentru toate B-scan-urile și toate scanările).

Valoarea medie Rz măsurată cu ajutorul tomografiei de coerență optică este cu 2,5 % mai mare decât valoarea Rz al calei de rugozitate comercială, în timp ce valoarea Ra este cu 2,04 % mai mică decât valoarea Ra a calei de rugozitate comercială.

Dacă luăm în considerare B-scan-urile 1, 250, 998 efectuate pe cele patru scanări, valorile medii obținute sunt o medie Rz de 39,16 μm și o medie Ra de 9,23 μm .

Dacă luăm în considerare B-scan-urile 250, 500, 750, efectuate pe cele patru scanări, valorile medii obținute sunt o medie Rz de 40,16 μm și o medie Ra de 9,30 μm

Rezultă că în cazurile în care măsurătorile sunt efectuate pe trei B-scan-uri valorile lui Rz și Ra sunt apropiate de valorile obținute pe cele șase B-scan-uri.

Dacă se ia în considerare prima scanare de 3,125 mm, există diferențe mari între valorile Rz și Ra măsurate cu ajutorul tomografiei de coerență optică și cele ale calelor de rugozitate comerciale. Pentru a obține valorile Rz și Ra mai apropiate de

valorile standardului de rugozitate comercială, lungimea scanată trebuie să fie de 12,5 mm conform ISO 4288/1988.

3) Cală comercială de rugozitate Rz de 80 μm

În urma măsurătorilor, s-a obținut o valoare medie de 81,5 μm pentru Rz și 18,85 μm pentru Ra (pentru toate B-scan-urile și toate scanările).

Valoarea medie Rz măsurată cu ajutorul tomografiei de coerență optică este cu 1,88 % mai mare decât valoarea Rz a calei de rugozitate comercială, în timp ce valoarea Ra este cu 4,73 % mai mare decât valoarea Ra a calei de rugozitate comercială.

Dacă luăm în considerare B-scan-urile 1, 500, 850 efectuate pe cele patru scanări, valorile medii obținute sunt o medie Rz de 80,6 μm și o medie Ra de 18,53 μm.

Dacă luăm în considerare B-scan-urile 250, 600, 750 efectuate pe cele patru scanări, valorile medii obținute sunt o medie Rz de 82,2 μm și o medie Ra DE19 μm

Dacă luăm în considerare B-scan-urile 1, 250, 600 efectuate pe cele patru scanări, valorile medii obținute sunt un Rz mediu de 82,1 μm și un Ra mediu de 18,63 μm.

Rezultă că în cazurile în care măsurătorile sunt efectuate pe trei B-scan-uri valorile lui Rz și Ra sunt apropiate de valorile obținute pe cele șase B-scan-uri.

Dacă se ia în considerare prima scanare de 3,125 mm, există diferențe mari între valorile Rz și Ra măsurate cu ajutorul tomografiei de coerență optică și cele ale calelor de rugozitate comerciale. Pentru a obține valorile Rz și Ra mai apropiate de valorile standardului de rugozitate comercială, lungimea scanată trebuie să fie de 40 mm conform ISO 4288/1988.

7.10 Concluzie

Tabelul 7.8 prezintă diferențele dintre parametrii calei de rugozitate comercială și cei determinați cu tomografia de coerență optică.

Cala comercială de rugozitate	Rz _{inițial} (μm)	Rz _{OCT} (μm)	Diferență (%)	Ra _{inițial} (μm)	Ra _{OCT} (μm)	Diferență (%)
20	20	24,2	21,00	3,6	5,7	58,34
40	40	41,0	2,50	9,8	9,6	- 2,04
80	80	81,5	1,88	18	18,85	4,73

Tabelul 7.8. Tabel de sinteză cu parametrii de rugozitate pentru calele comerciale de rugozitate de 20, 40, 80

Se observă că valorile dintre cele două metode de determinare a rugozității sunt tot mai apropiate, odată ce parametrii cresc în valoare. Pentru calele comerciale de rugozitate de 40 și 80, valorile obținute cu tomografia de coerență optică sunt satisfăcătoare comparativ cu valorile obținute pentru calea de 20.

Aceste diferențe se datorează în principal faptului că vârful palpatorului nu pătrunde până în cel mai extrem punct al văi profilului de rugozitate, lucru care pentru tomografia de corență optică este posibil.

Determinarea rugozității cu măsurători optice prezintă mai multe avantaje, printre care: realizare non-contact (măsurătorile optice se realizează fără a fi nevoie ca senzorul sau echipamentul de măsurare să intre în contact direct cu suprafața analizată; aceasta previne posibilele deteriorări sau zgârieturi ale suprafețelor analizate), viteză și eficiență (tehnologia optică permite măsurători rapide și precise). Imaginile pot fi capturate în timp real, iar evaluarea rugozității poate fi realizată într-un timp relativ scurt), rezoluție înaltă (măsurătorile optice pot oferi rezoluții înalte, permițând detectarea și evaluarea detaliilor fine ale rugozității unei suprafețe), imagini 3D și analiză a profilului (măsurătorile optice pot oferi informații 3D despre suprafață, permițând analize complexe ale profilului rugozității, inclusiv măsurători de adâncime, înălțime și direcție a asperităților) și costuri reduse pe termen lung (chiar dacă echipamentele optice pot avea un cost inițial mai ridicat, pe termen lung, utilizarea lor poate fi mai rentabilă în comparație cu alte metode care necesită piese de schimb sau întreținere constantă).

Bibliografie

- [1] C. Y. Poon; B. Bhushan. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler, *Wear* 1995, 190, 76-88.
- [2] C. Ruppe; Duparré A. Roughness analysis of optical films and substrates by atomic force microscopy, *Thin Solid Films* 1996, 288, 8-13.
- [3] M. M. Amarala; M. P. Raele; J. P. Caly; Ricardo E. Samad; N. D. Vieira; A. Z. Freitas. Roughness measurement methodology according to DIN 4768 using optical coherence tomography (OCT), *Proc. SPIE7390*, 2009.
- [4] J. H.Wang; M. R.Wang. Handheld non-contact evaluation of fastener flushness and countersink surface profiles using optical coherence tomography, *Optics Communications* 2016, 371, 206-2012.
- [5] S. Lawman; H.D. Liang. High precision dynamic multi-interface profilometry with optical coherence tomography, *Applied Optics* 2011, 50, 6039-6048.
- [6] N. J. Suliali; P. Baricholo¹; P. H. Neethling, E. G. Rohwer. Development of a low-cost, 11 μm spectral domain optical coherence tomography surface profilometry prototype, *Proc.SPIE* 2017, 10329 103292Q-1.
- [7] W. Laopornpichayanuwat; J. Visessamit; M. Tianprateep. 3-D surface roughness profile of 316-stainless steel using vertical scanning interferometry with a superluminescent diode, *Measurement* 2012, 45, 2400-2406.
- [8] M. Li; C.Quan; C.J. Tay. Continuous wavelet transform for microcomponent profile measurement using vertical scanning interferometer, *Optics and Laser Technology* 2008, 40, 920-929.
- [9] M. Li; C.Quan; C.J. Tay. Continuous wavelet transform formicrocomponent profile measurement using vertical scanning interferometer,"*Optics and Laser Technology* 2008, 40, 920-929.
- [10] N. A Feidenhans; P.-E. Hansen; L. Pilný; M. H. Madsen; I. Bissacco; J. C. Petersen; R. Taboryski. Comparison of optical methods for surface roughness characterization, *Measurement Science and Technology* 2015, 26, 0957-0233.
- [11] G.Udupa; M Singaperumal; R. S. Sirohi; M. P. Kothiyal. Characterization of surface topography by confocal microscopy: I. Principles and the measurement system, *Measurement Science and Technology* 2000, 11, 305-314.

- [12] F. Mauch; W. Osten. Model-based approach for planning and evaluation of confocal measurements of rough surfaces, *Measurement Science and Technology* 2014, 25, 0957-0233.
- [13] R. Onodera; H. Wakaumi; Y. Ishii. Measurement technique for surface profiling in low coherence interferometry, *Optics Communications* 2005, (1-3), 52-57.
- [14] H. Yanga; T. Haista; M. Gronlea; W. Ostena. Simulated BRDF based on measured surface topography of metal, *Proc. SPIE* 2017, 10334.
- [15] S. Schröder; Duparré A; L. Coriand; A.Tünnermann; Penalver; J. E. Harvey. Modeling of light scattering in different regimes of surface roughness, *Optics Express* 2011, 19, 9820-35.
- [16] J. E. Harvey; S. Schröder; N. Choi; A. Duparré. Total integrated scatter from surfaces with arbitrary roughness, correlation widths, and incident angles, *Optical Engineering* 2012, 51, 013402.
- [17] T. V. Vorburger; E. Marx; T. R. Lettieri. Regimes of surface roughness measurable with light scattering, *Applied Optics* 1993, 32, 3401-340.
- [18] E. Marx; T. V. Vorburger. Direct and inverse problems for light scattered by rough surfaces, *Applied Optics* 1990, 25, 3613-3626.
- [19] L. Cao; T. V. Vorburger; A. G. Lieberman; T. R. Lettieri. Light-scattering measurement of the rms slopes of rough surfaces, *Applied Optics* 1991, 20, 3221-3227.
- [20] S. Schröder; A. Duparré; L. Coriand; A.Tünnermann; D. H. Penalver; J. E. Harvey. Modeling of light scattering in different regimes of surface roughness, *Optics Express* 2011, 19, 9820-9835.
- [21] G. Simunovic; I Svalina; K. Simunovic; T. Saric, S; Havrlisan; D. Vukelic. Surface roughness assessing based on digital image features, *Advances in Production Engineering and Management* 2016, 11, 93-104.
- [22] P. Pavliček. Height profile measurements by means of white light interferometry, *Proc. SPIE* 2003, 5259, 139-144.
- [23] P. Pavliček; J. Soubusta. Measurement of the influence of dispersion on white-light interferometry, *Applied Optics* 43, 2004, 40, 766-770.
- [24] M. Hering; K. Körner; B. Jähne. Correlated speckle noise in white-light interferometry: theoretical analysis of measurement uncertainty, *Applied Optics* 2009, 48, 525-538.
- [25] P. Lehmann. Vertical scanning white-light interference microscopy on curved microstructures, *Optics Letters* 35 2010, 11, 1768-1770.
- [26] W. Xie; P. Lehmann; J. Niehues. Lateral resolution and transfer characteristics of vertical scanning white-light interferometers, *Applied Optics* 51 2012, 11, 1795-1803.
- [27] R. A. Sprague. Surface Roughness Measurement Using White Light Speckle, *Applied Optics* 11 1972, 12, 2811-2816.
- [28] H. Fujii; Y. Shindo. Measurements of surface roughness properties by means of laser speckle techniques, *Optics Communications* 1967, 16, 68-72.
- [29] H. Fujii; J. W. Y. Lit. Surface roughness measurement using dichromatic speckle pattern: an experimental study, *Applied Optics* 1978, 17, 2690-2694.
- [30] N. A. Russo; E. Sicre. Real-time measurement of surface roughness through Young's fringes modulated speckle, *Applied Optics* 1992, 31, 4334-4336.
- [31] C. J. Tay; S. L. Toh; H. M. Shang; J. B. Zhang. Whole field measurement of surface roughness using laser speckle, *Journal of Materials Processing Technology* 1993, 38, 195-202.

- [32] C. J. Tay; S. L. Toh; H. M. Shang; J. B. Zhang. Whole field measurement of surface roughness using laser speckle, *Journal of Materials Processing Technology* 1993, 38, 195-202.
- [33] A.M. Hamed; H. El-Ghandoor; F. El-Diasty; M. Saady. Analysis of speckle images to assess surface roughness, *Optics & Laser Technology* 2004, 36, 249 – 253.
- [34] W. B. Ribbens. Surface Roughness Measurement by Two Wavelength Holographic Interferometry, *Applied Optics* 1974, 13, 1085-1088.
- [35] C. A. Depew; R. D. Weir. Surface Roughness Determination by the Measurement of Reflectance, *Applied Optics* 10,(4) 969-970 (1971).
- [36] Jeong Seok Oh; Seung-Woo Kim. Femtosecond laser pulses for surface-profile metrology, *Optics Letters* 2005, 30, 2650-2652.
- [37] K. M. Byun; S. J. Yoon; D.Kim. Effect of surface roughness on the extinction-based localized surface plasmon resonance biosensors, *Applied Optics* 2008, 47, 5886-5892.
- [38] A. Jagannathan; A.J. Gatesman; R. H. Giles. Characterization of roughness parameters of metallic surfaces using terahertz reflection spectra, *Optics Letters* 2009, 34, 1297-1299.
- [39] C. Guo, M; Kong,W; Gao; B. Li. Simultaneous determination of optical constant thickness, and surface roughness for thin film from spectrophotometric measurements, *Optics Letters* 2013, 38, 40-42.
- [40] P. J. Blau; R. L. Martin; L. Riester. A comparison of several surface finish measurements methods as applied to ground ceramic and metal surfaces, Oak Ridge National Laboratory - U.S. Department of Energy
- [41] ISO-4287/1998; 3274/1996; 4288/1996;11562/1996;16610-21/1996.
- [42] D. Huang; E. A. Swanson; C. P. Lin; J. S. Schuman; W. G. Stinson; W. Chang; M. R. Hee; T. Flotte; K. Gregory; C. A. Puliafito; J. G. Fujimoto. Optical coherence tomography, *Science* 1991, 254, 1178-1181.
- [43] Braza; A. K. S.; Bernardo B.C.; Brazc, R.; Gomesa, A.S. L. Evaluation of crack propagation in dental composites by optical coherence tomography, *Dental materials* 2009, 25, 74–79.
- [44] Kyotoku; B. B. C.; Gomes; A.S. L. Dental fiber-reinforced composite analysis using optical coherence tomography, *Optics Communications* 2007, 279, 403–407.
- [45] Queiroz de Melo Monteiro G.; Montesa M. A. J. R.; Gomes A. S. L.; Motac, C. B. O.; Sérgio, L.; Freitas, A. Z. Marginal analysis of resin composite restorative systems using optical coherence tomography, *Dental Materials* 2011,27, 213–223.
- [46] Jihoon, N.A.; Jae Ho B.; Seon Young R.Y.U.; Changsu L.; Byeong H. L.; Tomographic Imaging of Incipient Dental-Caries Using Optical Coherence Tomography and Comparison with Various Modalities, *OPTICAL REVIEW*, 2009, 16, 426–43.
- [47] Sinescu, C.; Negrutiu, M. L.; Todea, C.; Balabuc, C.; Rominu , L. R.; Bradu, A.; Hughes, M.; Podoleanu , A. G.; Quality assessment of dental treatments using en-face optical coherence tomography, *Journal of Biomedical Optics* 2009, 13, 054065.
- [48] Todea, C.; Balabuc, C.; Sinescu, C.; Filip,L.; Kerezsi, C.; Calniceanu, M.; Negrutiu,M.; Bradu, A.; Hughes, M.; Podoleanu, A. G. En face optical coherence tomography investigation of apical microleakage after laser-assisted endodontic treatment, *Lasers Medicine Science* 2010. 25, 629–639.
- [49] Hutiu Gh.; Duma V.-F.; Demian D.; Bradu A.; Podoleanu A. Gh. Surface imaging of metallic material fractures using optical coherence tomography, *Applied Optics* 2014, 53, 5912-5916.

8. CONCLUZII

Prismele Risley au o importanță semnificativă într-o varietate de domenii și aplicații datorită capacității lor de a genera scan pattern-uri precise și controlabile. Aspecte relevante privind importanța prismelor Risley:

1. Scanarea optică: Prin utilizarea prismelor Risley rotative în sistemele de scanare optică, se pot obține modele de scanare complexe și flexibile. Aceste scan pattern-uri pot fi utilizate într-o gamă largă de aplicații, cum ar fi sistemele de imagistică medicală, cartografierea laser, scanarea 3D, precum și în alte domenii de cercetare și dezvoltare care necesită o mișcare controlată a fasciculului de lumină.

2. Precizie, control și flexibilitate: Prin ajustarea parametrilor unui sistem cu prisme Risley rotative, este posibilă obținerea unui control precis asupra direcției și așezării fasciculului de lumină. Această precizie și control permit obținerea unor scan pattern-uri cu caracteristici specifice, cum ar fi dimensiunea, formă, simetrie, distribuția energiei și uniformitatea.

3. Eficiență și viteză: Utilizarea prismelor Risley în sistemele de scanare optică poate duce la creșterea eficienței și vitezei de scanare. Acestea pot realiza mișcări rapide și precise, permițând achiziționarea rapidă a datelor și reducerea timpului total de scanare.

4. Aplicații diverse: Prismele Risley sunt utilizate într-o gamă largă de aplicații, cum ar fi scanarea laser în teledetecție și cartografie, sistemele de imagistică medicală, sistemele de măsurători și inspecții optice, precum și în domeniul divertismentului și al artelor vizuale. Capacitatea lor de a genera scan pattern-uri complexe și controlabile le face indispensabile în aceste aplicații.

Cercetarea prezentată în teza de doctorat **CONTRIBUȚII LA STUDIUL SCANNERELOR LASER CU PRISME RISLEY PENTRU TOMOGRAFIA DE COERENȚĂ OPTICĂ, CU APLICAȚII ÎN MĂSURATORILE INDUSTRIALE** se focalizează pe două subiecte distincte.

Primul subiect a analizat scan pattern-urile generate cu un sistem de scanare cu două prisme Risley rotative, realizându-se pentru acesta trei studii diferite: un studiu multi-parametric al scan pattern-urilor, un studiu pentru simetria scan pattern-urilor și studiul scan pattern-urilor secundare, toate trei utilizând metoda grafică.

I. În urma studiului multi-parametric al scan pattern-urilor prismelor Risley rotative, am realizat o analiză independentă, în funcție de fiecare parametru al sistemului de scanare cu prisme Risley. Pe baza rezultatelor, am ajuns la următoarele concluzii:

1. Simulări și corelații analitice: Am efectuat simulări ale scan pattern-urilor cu ajutorul metodei grafice exacte, iar rezultatele obținute au fost corelate cu aspectele analitice abordate. Prin exemple, am demonstrat că teoria și simulările se validează reciproc, confirmând astfel acuratețea metodei noastre și aplicabilitatea sa în studiul scan pattern-urilor prismelor Risley.

2. Validare experimentală: Pe lângă simulări, am efectuat și o validare experimentală a rezultatelor obținute. Validarea experimentală a permis să confirmăm validitatea și aplicabilitatea metodei grafice într-un context real.

3. Analiza multi-parametrică a formelor și dimensiunilor scan pattern-urilor: Am realizat o analiză a formelor și dimensiunilor scan pattern-urilor prismelor Risley, atât în ceea ce privește aspectele exterioare, cât și cele interioare. Această analiză a permis identificarea regulilor de bază și a caracteristicilor geometrice esențiale pentru proiectarea optimă a scannerelor optomecanice cu prisme Risley, adaptate la cerințele specifice ale diferitelor aplicații.

II. Pe baza rezultatelor obținute, am ajuns la concluzia că parametrul M al lui Marshall, adică raportul vitezelor de rotație ale celor două prisme, este parametrul cheie care determină simetriile scan pattern-urilor. În timp ce alți parametri, precum unghiurile prismelor, raportul acestora, indicii de refracție și dimensiunile scannerului influențează dimensiunile modelelor, am constatat că acești parametri nu sunt relevanți în ceea ce privește simetria scan pattern-urilor.

În cadrul studiului, am introdus și definit o nouă noțiune, de *structuri de simetrie*, care permite generarea întregului scan pattern prin obținerea doar a unei părți a acestuia și replicarea acestei părți folosind simetria. Aceasta reprezintă o abordare inovatoare și convenabilă în proiectarea scannerelor cu prisme Risley, simplificând analiza și facilitând proiectarea acestor scanere.

Am ilustrat cazuri specifice și am examinat o gamă largă de parametri ai scannerului, inclusiv valorile fracționale ale lui M , pentru a realiza un studiu complet asupra subiectului. Aplicațiile scannerelor cu prisme Risley pot beneficia de abordarea grafică a metodei simetriei scan pattern-urilor, care aduce o mai mare eficiență în analiză și proiectare față de metodele analitice aproximative sau analitice (complexe) utilizate anterior.

III. În urma studiului multi-parametric al scan pattern-urilor prismelor Risley rotative, am realizat simulări grafice în vederea dezvoltării unor modele de scanare secundare ale acestor prisme. Am utilizat programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 pentru a dezvolta un sistem parametrizat, adaptat configurației alese și ecuațiilor prismelor de bază.

Am luat în considerare cazul a două prisme Risley rotative neidentice, cu unghiul maxim de deviere de 2° și 4° , corespunzător unor valori ale parametrului M de ± 4 . Pentru fiecare combinație de parametri, am prezentat simulări grafice și am generat graficele coordonatelor x și y ale punctului de incidență pe planul scanat. Unul dintre principalele avantaje ale acestor modele de scanare secundare ale prismelor Risley

Astfel, concluzionăm că studiul nostru a demonstrat potențialul și avantajele modelelor de scanare secundare ale prismelor Risley.

Al doilea subiect a presupus investigarea suprafețelor metalice cu tomografia de coerență optică (OCT) pentru analiza rugozității, iar rezultatele obținute sunt un argument pentru implementarea tomografiei de coerență optică, cu scanare laser, ca metodă de determinare a rugozității.

Am folosit trei cale comerciale de rugozitate, la care se cunosc parametrii inițiali Rz și Ra. În urma analizei acestor cale cu tomografia de coerență optică, am obținut parametrii noi cu această metodă și i-am comparat cu parametrii inițiali ai calelor. Parametrii pe care i-am determinat cu tomografia de coerență optică prezintă următoarele diferențe față de parametrii inițiali:

- Pentru cale de 20, Ra este mai mare cu 21%, iar Rz este mai mare cu 58,34 %;
- Pentru cale de 40, Ra este mai mare cu 2,5 %, iar Rz este mai mic cu 2,04%;
- Pentru cale de 80, Ra este mai mare cu 1,88%, iar Rz este mai mare cu 4,73%.

Se observă diferențe mari între cei doi parametrii în cazul calej comerciale de rugozitate de 20, iar pentru calele de 40 și 80 valorile între parametrii sunt apropiate.

ANEXA 1 – LISTA CU PUBLICAȚII

Am obținut până acum în cadrul programului de cercetare științifică următoarele rezultate:

a) 2 articole in reviste cotate ISI Web of Science (WOS):

1. A.-L. Dimb, V.-F. Duma*, Symmetries of Scan Patterns of Laser Scanners with Rotational Risley Prisms, *Symmetry* 15(2), 336 (2023); **IF 2.7/2022**; <https://doi.org/10.3390/sym15020336>; **Q2**, WOS:000941972600001.
2. V.-F. Duma*, A.-L. Dimb, Exact Scan Patterns of Rotational Risley Prisms Obtained with a Graphical Method: Multi-Parameter Analysis and Design, *Applied Sciences* 11(18), 8451 (2021); **IF 2.838**; <https://doi.org/10.3390/app11188451>; **Q2**, WOS:000699757500001 (în topul celor mai citate lucrări în 2021 în Secțiunea *Optics and Lasers* in *Appl. Sci.* <https://www.mdpi.com/journal/applsci/announcements/4342>).

b) 6 articole in volumele unor manifestări științifice indexate WOS:

1. A.-L. Dimb V.-F. Duma*, Experimental versus simulated secondary scan patterns produced by a pair of Risley prisms, Proc. SPIE, Vol. 12619, 126190E, B. Bodermann, K. Frenner, Eds., Modeling Aspects in Optical Metrology IX, Munich (2023); <https://doi.org/10.1117/12.2665027>; in curs de indexare WOS
2. A.-L. Dimb, V.-F. Duma*, Simulations of secondary scan patterns of laser scanners with rotational Risley prisms, Proc. SPIE, Vol. 12170, 121700A, V.-F. Duma, J.P. Rolland, A. Podoleanu, Eds., 1st Int. Conf. Advances in 3OM: Opto-Mechatronics, Opto-Mechanics and Optical Metrology, Timisoara (2022); <https://doi.org/10.1117/12.2603094>, WOS:000838058200009.
3. A.-L. Dimb, V.-F. Duma*, Simulations and experiments of laser scanning with a pair of rotational Risley prisms, Proc. SPIE, Vol. 12170, 1217009, V.-F. Duma, J.P. Rolland, A. Podoleanu, Eds., 1st Int. Conf. Advances in 3OM: Opto-Mechatronics, Opto-Mechanics and Optical Metrology, Timisoara (2022); <https://doi.org/10.1117/12.2602825>, WOS:000838058200008.
4. A.-L. Dimb, V.-F. Duma*, Experimental validations of simulated exact scan patterns of rotational Risley prisms scanners, Proc. SPIE, Vol. 11354, 113541U, Optical Sensing and Detection VI-SPIE Photonics Europe, Strasbourg (2021), <https://doi.org/10.1117/12.2542009>, WOS:000672621800041.
5. G. Hutiu, V.-F. Duma*, D. Dorin, A.-L. Dimb, R.-A. Erdelyi, A. Bradu, A. Podoleanu, Metallic fractures assessments: OCT versus SEM, Proc. SPIE, Vol. 11385, 1138507, J. Kovačičinová, Ed., Optics & Measurements Int. Conf., Liberec (2019), doi: <https://doi.org/10.1117/12.2542917>, WOS:000529302400006.

6. A.-L. Dimb, V.-F. Duma*, Graphical method to determine exact scan patterns generated with rotational Risley prisms, Proc. SPIE, Vol. 11385, 1138503, J. Kovačičinová, Ed., Optics & Measurements Int. Conf., Liberec (2019), doi: <https://doi.org/10.1117/12.2542546>, WOS:000529302400002.

Alte comunicări, la conferințe internaționale de prestigiu:

1. V.-F. Duma, A.-L. Dimb, A novel, graphical method to analyze optical scanners with Risley prisms, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIX (SPIE Optics + Photonics) [ISI], San Diego, CA, USA, Aug. 1–5, 2021 (Invited Paper)

2. V.-F. Duma, A.-L. Dimb, Laser scanners with rotational Risley prisms: A graphical method to determine and study exact scan patterns, 8th Int. Conf. on Antennas and Electromagnetic Systems (AES), Marrakesh, Morocco, May 24-27, 2022 (Invited Paper)

3. V.-F. Duma, A.-L. Dimb, Graphical method to obtain and analyze exact scan patterns of rotational Risley prisms, 25th Congress of the International Commission for Optics (<https://www.ico25.org/>), Dresden (Germany), Sept. 5-9, 2022 (Oral Presentation)

4. V.-F. Duma, A.-L. Dimb, Symmetry aspects of patterns produced by optical scanners with Risley prisms, 9th Int. Conf. on Antennas and Electromagnetic Systems (AES), Torremolinos (Spain), June 5-8, 2023 (Invited Paper)

5. V.-F. Duma, A.-L. Dimb, Theory, simulations, and experiments of laser scanning with rotational Risley prisms, 3rd Int. Advanced Conf. on Condensed Matter & Low Temperature Physics (CMLTP (ilt.kharkov.ua)) [ISI], Kharkiv (Ukraine), June 5-11, 2023 (Invited Presentation)

Membru în proiecte de cercetare:

1. PN-III-P4-ID-PCE2020-2600 - Risley prism laser scanning systems with applications in medical and industrial imaging using Coherent Optical Tomography (OCT) 15/01/2021 – 31/12/2023

2. POCU/993/6/13/153437 - Rețea de excelență în cercetare și inovare aplicativă pentru programele de studii doctorale și postdoctorale/InoHubDoc 01/11/2022 – 31/10/2023

3. PN-III-P2-2.1-PED-2019-4423 - Optical Coherence Tomography for Non-Destructive Testing in Industry 26/10/2020 – 25/10/2022

4. PN-III-P2-2.1-B-2016-0297 - Optomechatronic Choppers with rotational discs and shafts with windows for metrological, biomedical, and laser manufacturing applications 25/10/2016 – 30/09/2018

5. PN-II-PCCA-2011-3.2-1682 - Optical Coherence Tomography (OCT) systems with handheld and endoscope probes for real time investigations in material studies and for in vivo medical imaging 04/12/2015 – 31/07/2017

ANEXA 2 – ECUAȚIILE PRISMEI OPTICE

O prismă optică este un obiect geometric transparent, fabricate din sticlă sau din orice alt polimer transparent, cu două fețe plane neparalele, la intersecția cărora se formează un unghi diedru, numit unghiul prisme. Prin trecerea luminii printr-o prismă optică, aceasta poate fi separată în spectrul său de culori componente, în ceea ce este cunoscut sub numele de dispersie.

Prismele optice sunt folosite într-o varietate de aplicații, inclusiv în experimente științifice pentru a separa lumina în culorile sale componente și pentru a studia proprietățile spectrale ale materialelor și a substanțelor. Ele sunt de asemenea folosite în optică pentru a corecta erorile optice în lentilele obiectivelor foto și ale altor dispozitive optice.

Pentru punctul de intrare în prisma I_1 au loc relațiile:

$$n_0 \sin \varepsilon_1 = n \sin \varepsilon'_1$$

$$\varepsilon'_1 + \varepsilon_2 = \theta$$

Pentru punctul de ieșire din în prisma I_2 au loc relațiile:

$$n \sin \varepsilon_2 = n_0 \sin \varepsilon'_1$$

$$D = (\varepsilon_1 - \varepsilon'_1) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_2) = \varepsilon_1 + \varepsilon'_2 - \theta$$

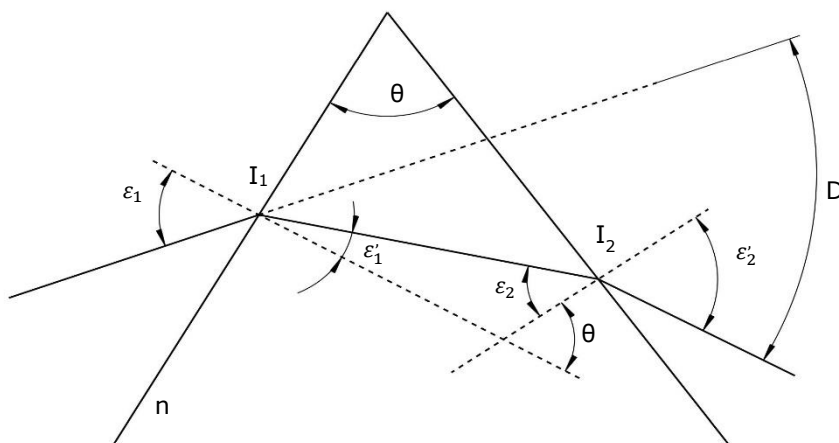


Figura A1 – Prisma optică. Notății: n , indice de refracție; θ , unghiul prisme. D reprezintă unghiul de deviere al prisme.

Acknowledgments

NOTĂ: Această teză de doctorat a beneficiat de suport financiar prin proiectul „Rețea de excelență în cercetare și inovare aplicativă pentru programele de studii doctorale și postdoctorale / InoHubDoc” prin contractul de finanțare nr. **POCU/993/6/13/153437**, proiect cofinanțat din Fondul Social European.

Studiile de cercetare prezentate în aceasta teză de doctorat au fost susținute de Autoritatea Națională pentru Cercetare Științifică și Inovare, prin:

1. **PN-III-P4-ID-PCE2020-2600** - Riskey prism laser scanning systems with applications in medical and industrial imaging using Coherent Optical Tomography (OCT) 15/01/2021 – 31/12/2023

2. **PN-III-P2-2.1-PED-2019-4423** - Optical Coherence Tomography for Non-Destructive Testing in Industry 26/10/2020 – 25/10/2022

3. **PN-III-P2-2.1-B-2016-0297** - Optomechatronic Choppers with rotational discs and shafts with windows for metrological, biomedical, and laser manufacturing applications 25/10/2016 – 30/09/2018

4. **PN-II-PCCA-2011-3.2-1682** - Optical Coherence Tomography (OCT) systems with handheld and endoscope probes for real time investigations in material studies and for in vivo medical imaging 04/12/2015 – 31/07/2017