

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

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat *INGINERIE MECANICĂ*

autor ing. DÎMB ALEXANDRU LUCIAN

conducător științific Prof.univ.dr.ing. *DUMA VIRGIL-FLORIN*

OCTOMBRIE 2023

Introducere

Scanerile laser uni-dimensionale (1D) și bi-dimensionale (2D) sunt unul dintre cele mai utilizate tipuri de modulatori optomecatronici. Acestea sunt folosite într-o gamă largă de aplicații, de la cele comerciale (de exemplu, pentru scanarea codurilor de bare) până la cele industriale (de la metrologia optică la fabricarea laser) și la cele de înaltă performanță, cum ar fi de imagistică biomedicală. Aproximativ patruzeci de configurații de scanere laser au fost dezvoltate începând cu anii '70, dar doar câteva dintre ele sunt utilizate în prezent:

(i) Scanere galvanometrice (GS) sau rezonante, cele din urmă fiind de obicei construite ca sisteme micro-electro-mecanice/*Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS). Față de alte scanere optice, GS au caracteristici bune din toate punctele de vedere: precizii de poziționare ridicate și câmpuri de vedere / fields-of-view (FOV) relativ mari, rezoluții bune, viteze ridicate de scanare și costuri rezonabile, în construcții compacte, relativ ușoare. Toate celelalte scanere au doar una sau două dintre aceste caracteristici mai bune decât GS-urile, în timp ce altele sunt mai slabe. Acest lucru face ca alte scanere, cum sunt și prismele Risley, să fie mai potrivite pentru aplicații de nișă, așa cum se studiază și în teză;

(ii) Oglinzi poligonale rotative (PM): pot avea viteze de rotație mari (uzual până la 54 krpm), prin urmare, ținând cont și de numărul lor de fațete (4-6 în imprimantele laser; până la 128 pentru dispozitivele performante), acestea au viteze de scanare mult mai mari decât GS. Cu toate acestea, PM au gabarit mai mare, sunt mai scumpe și sunt afectate de probleme mecanice datorită acestor viteze de rotație ridicate, inclusiv vibrații, zgomot și uzură mecanică;

(iii) Refractive - cu prisme Risley: viteza de scanare a acestora este, de asemenea, mai mare decât GS, dar modelele lor de scanare sunt complicate, neliniare și mai dificil de urmărit decât scanarea raster produsă cu GS cu două axe (Fig.1);

(iv) Holografice, acustice și electro-optice.

Prismele Risley [1-16] sunt utilizate într-o varietate de aplicații, inclusiv interferometrie, holografie, polarimetrie, atenuarea luminii, poziționarea unor ținte aeriene (de exemplu a sateliților), scanarea laser - de exemplu în imagistica biomedicală, pentru microscopia confocală/*confocal microscopy* (CM) sau pentru tomografia optică de coerență/*Optical Coherence Tomography* (OCT). Prismele Risley sunt o alternativă la GS, PM sau MEMS. Uneori, ele sunt de asemenea cuplate cu alte scanere, de exemplu GS, pentru a realiza nu numai scanarea 2D, dar și tri-dimensională (3D).

Scanerile laser cu prisme Risley constau, în cea mai comună configurație, dintr-o pereche de prisme rotative [2-5], dar există și soluții cu prisme în mișcare de oscilație sau

combinații cu elemente în rotație sau oscilație (după cum se prezintă în partea de stadiu actual a tezei). Pentru a minimaliza dispersia, se poate folosi o pereche de dublete, în timp ce pentru un grad suplimentar de libertate în generarea modelelor de scanare pot fi folosite scanere cu trei prisme. Diametrul prismelor variază de la zeci de cm (de exemplu pentru poziționarea sateliților) până la sub-milimetric (de exemplu pentru endoscoape).

Pentru a determina ecuațiile traiectelor de scanare/*scan patterns*, dispozitivele cu prisme Risley au fost studiate analitic în abordări aproximative [2], precum și cu soluții exacte, relativ complexe [3,4]. Problema inversă a fost abordată - pentru a obține poziția prismelor care produce un fascicul laser emergent într-o anumită direcție. O abordarea fundamentală a fost făcută de Marshall, care a propus în lucrarea sa doi parametri ai acestor dispozitive pentru a caracteriza traiectele de scanare [2]:

– raportul dintre vitezele unghiulare: $M = \frac{\omega_2}{\omega_1}$, unde: ω_1 – viteza de rotație a prisme 1; ω_2 – viteza de rotație a prisme 2

– raportul dintre unghiurile prismelor: $k = \frac{\theta_2}{\theta_1}$, unde: θ_1 – unghiul prisme 1; θ_2 – unghiul prisme 2.

Tomografia de coerență optică/*Optical Coherence Tomography (OCT)* este o tehnică de imagistică optică, neinvazivă, de înaltă rezoluție, care folosește principiul interferometriei pentru a realiza imagini cu rezoluție de nivel micrometric și cu adâncime de penetrare milimetrică [16,17]. În timp ce OCT a fost dezvoltat inițial pentru a investiga retina, în prezent este utilizat pentru o gamă de aplicații biomedicale, inclusiv dinți, piele și endoscopie.

Deși OCT a fost aplicat pentru prima dată la studii *in vitro*, acum este utilizat pentru investigații *in vivo*, deoarece provocarea este de a furniza imagini în timp real - cu capacitate de cadru video. Tehnologia OCT modernă a evoluat de la domeniul timpului/*Time Domain (TD) OCT* la domeniul spectral/*Spectral Domain (SD)*, care oferă o viteză de achiziție mai mare și o rezoluție mai bună, de până la 2 μm [18] față de 8-15 μm uzual în prezent (și 30 μm inițial). SD-OCT a fost dezvoltat de-a lungul a două direcții, fie pentru a interoga spectrul la ieșirea spre interferometrul OCT folosind o sursă de bandă largă, fie o sursă scanată în frecvență/*Swept Source (SS)* și un fotodetector. OCT s-a extins ca aplicații progresiv spre alte domenii, cum ar fi caracterizarea nedistructivă a materialelor [19], aplicații de conservarea artei și profilometrie.

Justificarea alegerii temei de cercetare

Motivația studiului este dată de necesitatea dezvoltării unor soluții de scanare laser mai rapide a probelor supuse unor tehnici de imagistică, așa cum sunt OCT și microscopia confocală (CM), în scopul realizării imagisticii în timp real și *in vivo* pentru probe biologice. Este necesară și compararea dintre modul de scanare uzual (tip 'raster scanning') în sistemele OCT și CM cu scanere galvanometrice (GS) - Fig.1(b), față de posibilitatea de scanare cu prisme Risley - Fig.1(a). În ceea ce privește alte dispozitive de scanare, prismele Risley au avantaje și dezavantaje specifice. În esență, ele oferă o scanare rapidă 2D într-o construcție mai compactă decât sistemele GS cu două axe sau sistemele PM plus GS [1]. De asemenea, atât dimensiunea lor axială cât și diametrul lor pot fi micșorate, putându-se realiza soluții micro-optice. În timp ce compactitatea lor poate fi comparată doar cu a sistemelor MEMS cu oglinzi oscilante [18], problemele lor sunt legate de soluțiile lor de conducere și de modelele complicate ale spotului laser pe care le generează și care trebuie urmărite pentru a realiza reconstrucția imaginii, de exemplu în CM. Astfel, în multe studii [2,3] s-au determinat numai modele (scan patterns) aproximative - folosind aproximarea unghiurilor mici ale prisme (adică abordându-se doar pene optice rotative). Pe de altă parte, soluțiile exacte sunt relativ complexe [4,5].

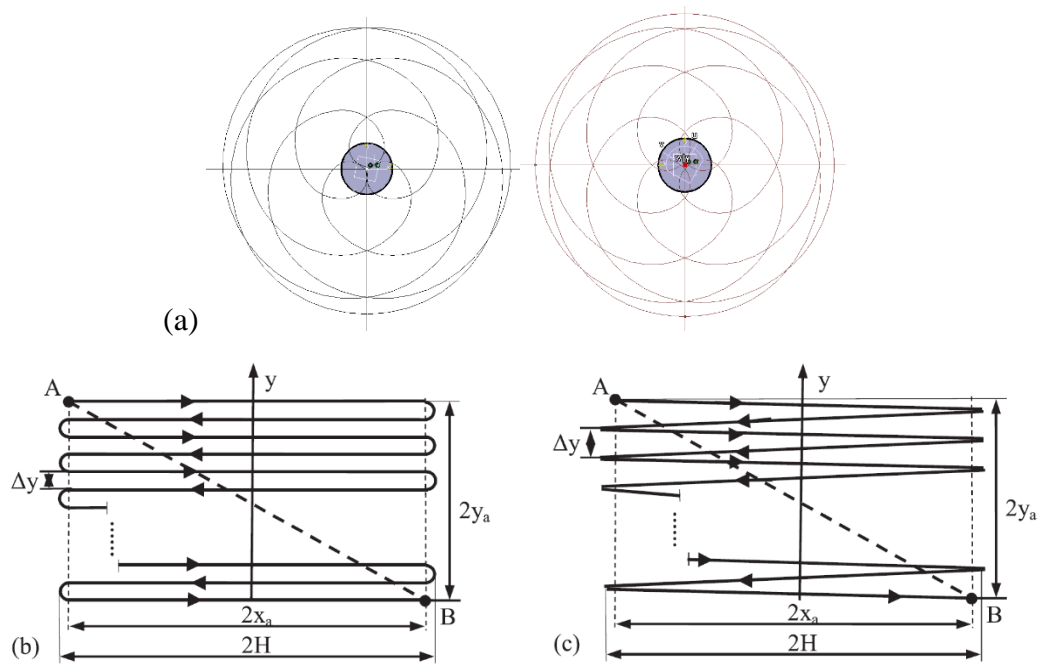


Fig.1. (a) Traiecte de scanare cu prisme Risley; (b,c) scanarea galvanometrică tip 'raster scanning' [20].

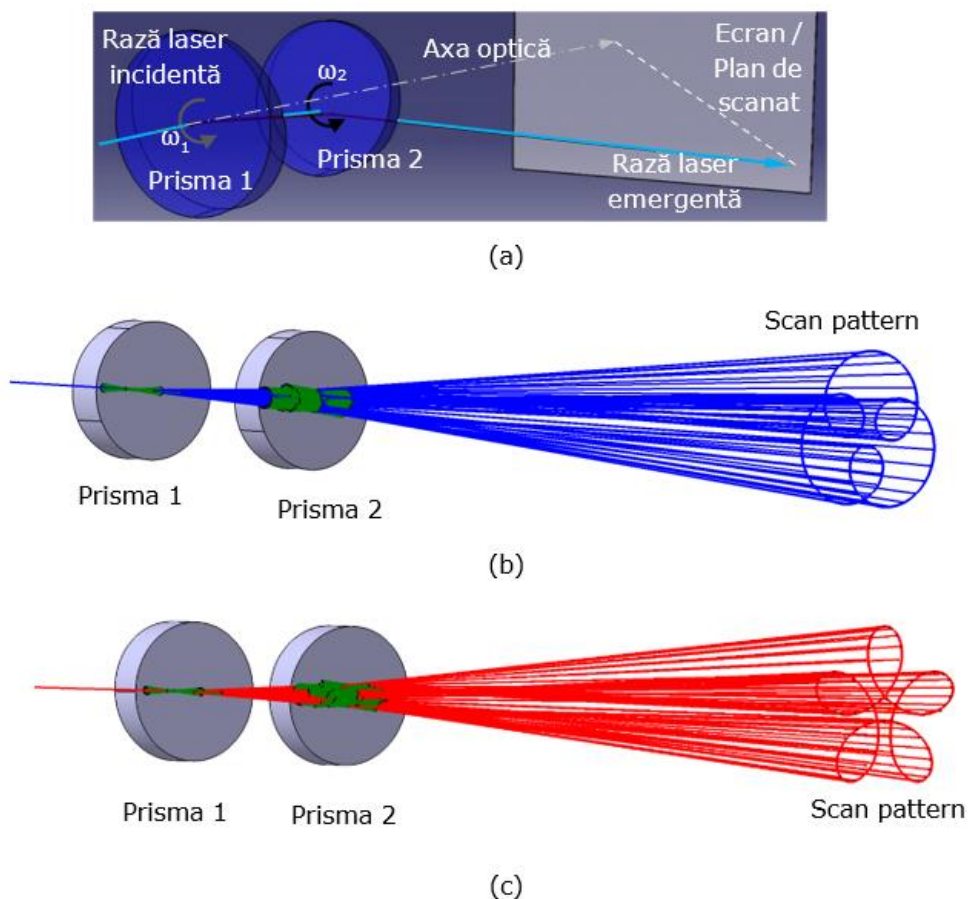


Fig. 2. (a) Pereche de prisme Risley rotative, modelate cu un program de proiectare mecanică disponibil comercial, CATIA V5R20. (b,c) Două fascicule de lumină generate cu CATIA V5R20 pentru simularea scanării cu o pereche de prisme Risley rotative. Scan pattern-urile obținute pentru prismele care se rotesc în aceeași direcție sunt prezentate în albastru; cele obținute pentru prismele care se rotesc în direcții opuse sunt prezentate în roșu.

Recent, prismele Risley au fost studiate printr-o nouă metodă, nu analitică, ca și în studiile anterioare, ci grafică, folosind un program 3D de proiectare mecanică, CATIA V5R20 (Dassault Systèmes, Paris, Franța) – Fig. 2. **Această abordare a fost propusă pentru prima oară de către coordonatorul științific, Prof. Duma, în [21].**

Structura 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, scanerele galvanometrice, **scanerele refractive – scanerele cu prisme Risley**), diversele modalități de scanare utilizate în această tehnologie (scanarea raster, scanarea în spirală, scanarea Lissajous, **scanarea cu prisme Risley**) și o prezentare a aplicațiilor acestor scanere laser în diverse domenii. 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*). 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 scanerele cu perechi de prisme de rotație/dublete, scanerele cu trei prisme de rotație, scanerele cu o pereche de prisme oscilante și combinații de prisme rotative și oscilante. De asemenea, se analizează stadiul actual al cercetării în acest domeniu, evidențiindu-se evoluțiile și descoperirile recente, punctându-se problema directă și cea inversă asociată cu scanerele Risley.

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

Capitolul prezintă o serie din rezultatele publicate în [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, 8451 (2021); **IF 2.838**; <https://doi.org/10.3390/app111884511>][22].

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 a implicat toți parametrii de construcție ai scannerului, 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 scanner laser cu o pereche de prisme Risley rotative (Fig.3). Pentru simularea acestor pattern-uri de scanare, am utilizat o metodă grafică exactă, exemplificată în Fig.4 și 5 [22], ușor de folosit, care a fost introdusă în studii anterioare [21]. 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 scannerelor optomecanice cu prisme Risley, adaptate diferitelor cerințe ale aplicațiilor.

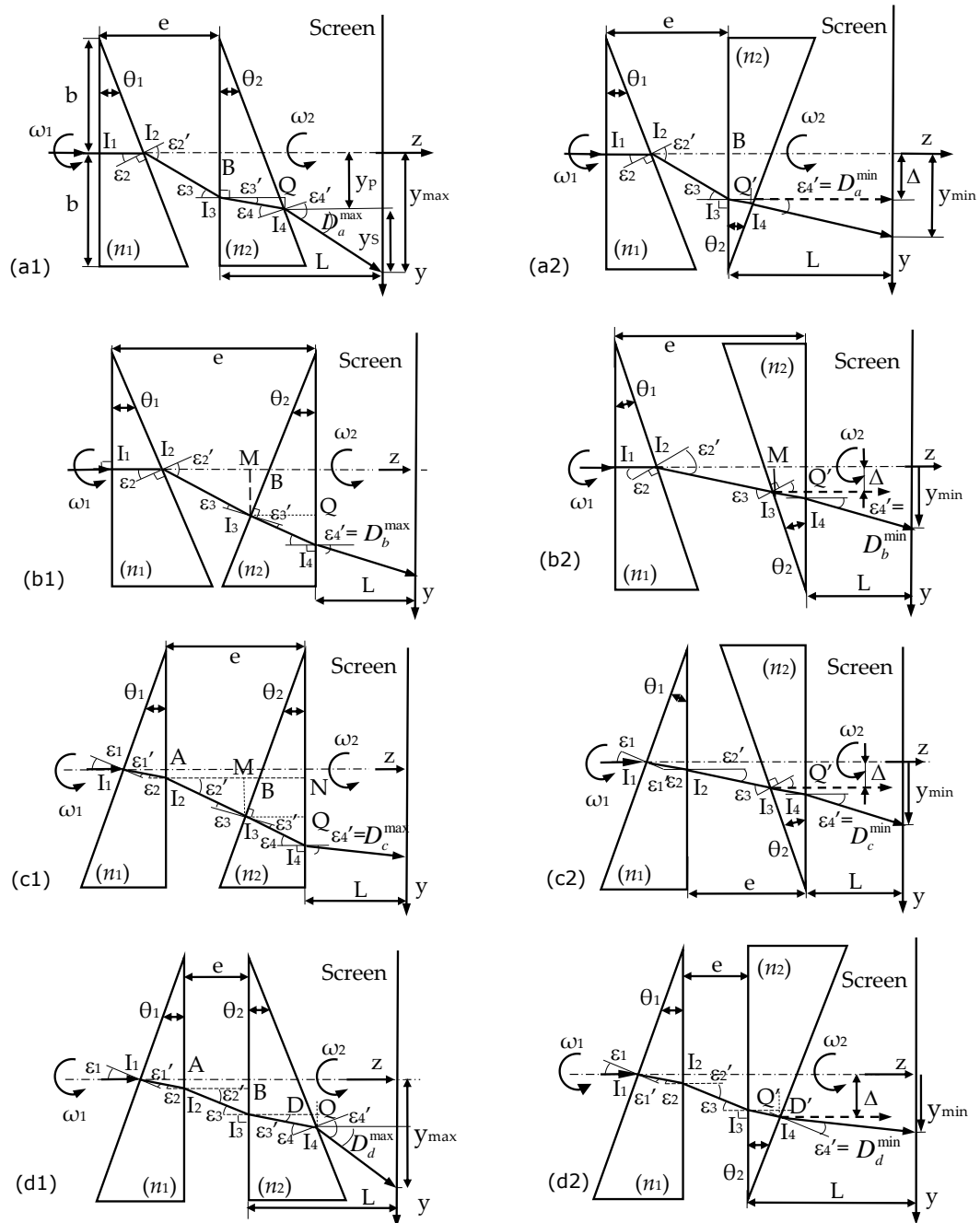


Fig.3. Cele patru configurații posibile ale unui scanner laser cu o pereche de prisme Risley rotative: (a) ab-ab; (b) ab-ba; (c) ba-ba; (d) ba-ab. Notății: „a” denotă dioptrul perpendicular pe axa optică și „b” dioptrul înclinat. Fiecare configurație este prezentată în două poziții caracteristice extreme ale dispozitivului, și anume cu un unghi relativ de rotație între cele două prisme $\varphi = 0$ (coloana 1) și $\varphi = \pi$ (rad) (coloana 2) [22].

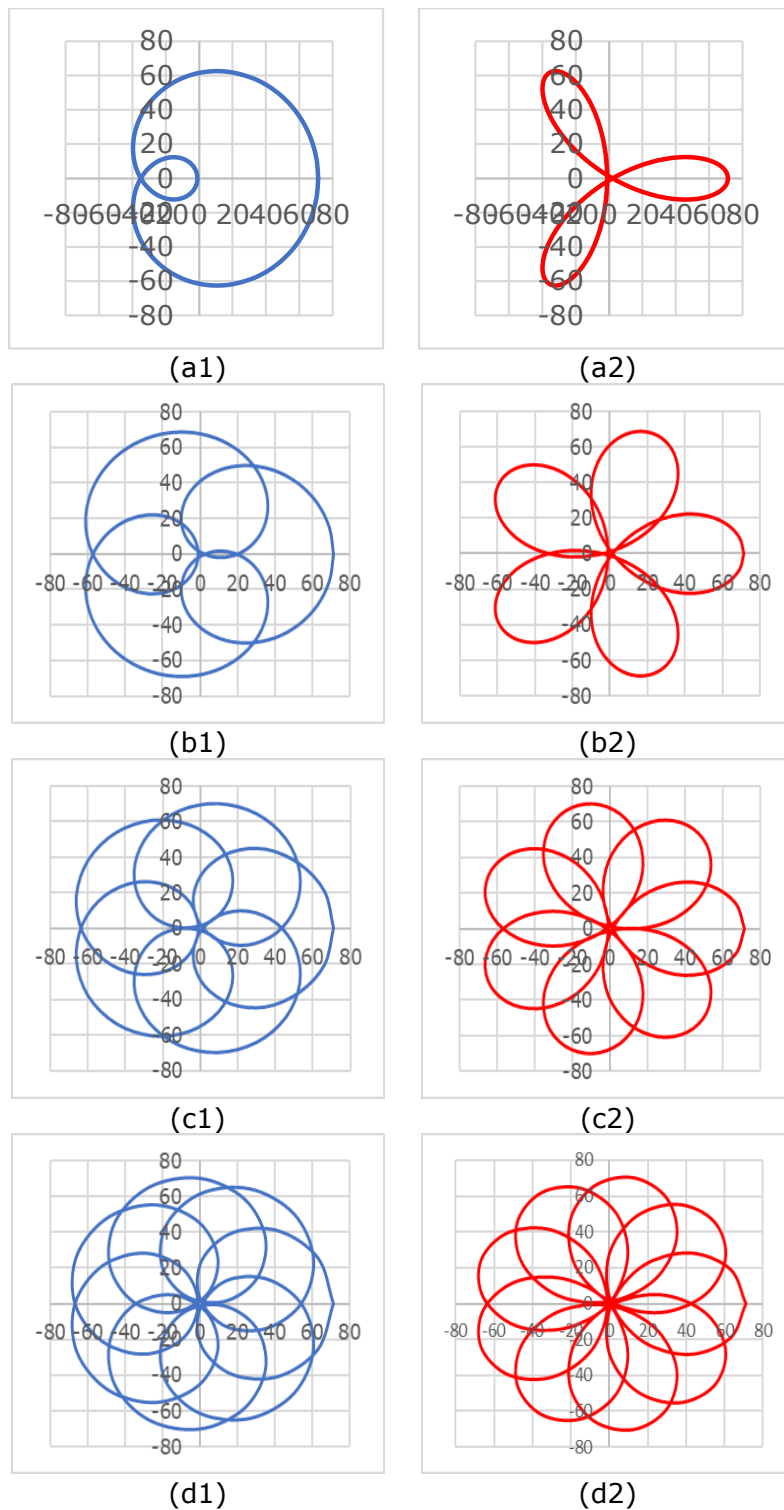


Fig.4. Studiul scan pattern-urilor produse de o pereche de prisme Risley rotative (adică, configurația ba-ab din Fig.3) pentru $L = 1$ m, $e = 25$ mm și pentru: (a) $|M| = 2$; (b) $|M| = 4$; (c) $|M| = 6$; (d) $|M| = 8$. (1) Coloana din stânga, $M > 0$; (2) coloana din dreapta, $M < 0$. Cazul $k = 1$ a fost luat în considerare pentru prisme identice cu un unghi de abatere individual $D = (n-1)\theta = 2^\circ$. Valorile de pe axe sunt în milimetri [22].

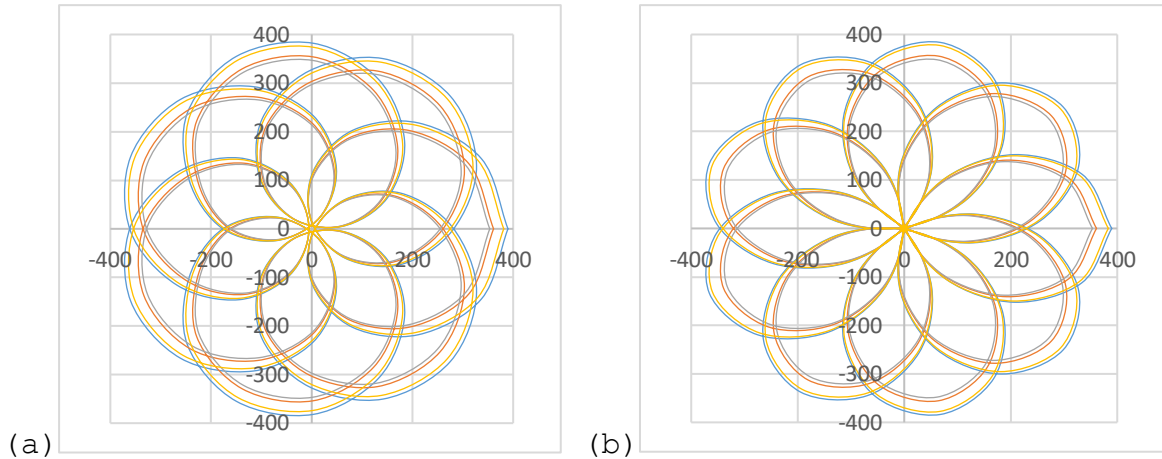


Fig.5. Comparație între scan pattern-urile celor patru configurații de scanner posibile cu o pereche de prisme Risley, pentru $|M| = 8$ și $k = 1$ (acesta din urmă obținut pentru $D1 = D2 = 10^\circ$). (a) Coloana din stânga, $M > 0$; (b) coloana din dreapta, $M < 0$. Valorile de pe axe sunt în milimetri [22].

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

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); **IF 2.7/2022**; <https://doi.org/10.3390/sym15020336>] [23]

În acest capitol am investigat, într-o analiză multi-parametrică (utilizând toate caracteristicile dispozitivului – vezi exemplul din Fig.6) simetriile pattern-urilor de scanare generate de o pereche de prisme Risley rotative (exemplu pentru $M = \pm 5$ în Fig.7 și 8), care reprezintă cel mai răspândit tip de scanner laser cu astfel de elemente refractive. Pentru această analiză am utilizat metoda grafică introdusă în studii anterioare [21] și dezvoltată în [22], capitolul 3.

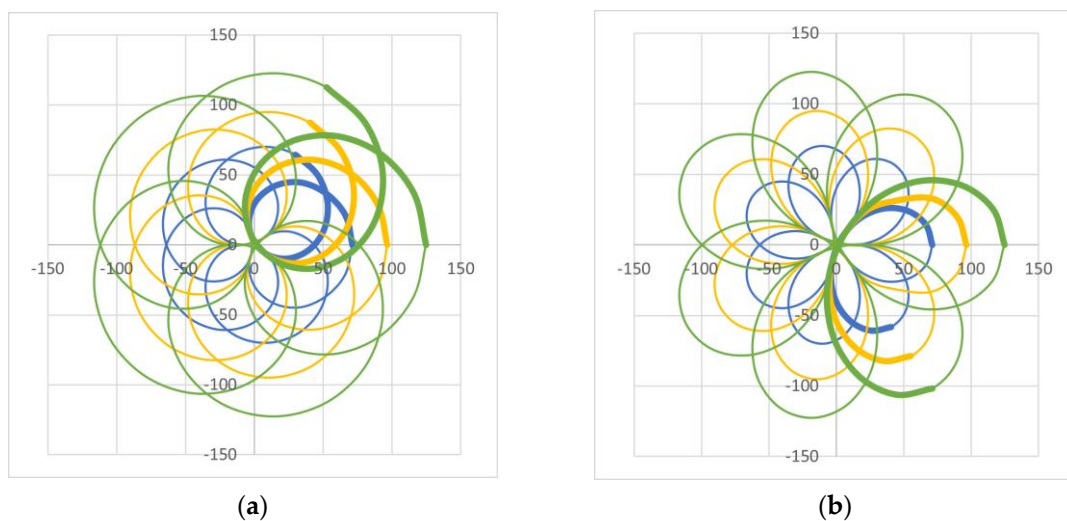


Fig.6. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru (a) $M = 6$ și (b) $M = -6$, pentru trei valori crescătoare succesive ale indicelui de refracție (egal) al celor două prisme: $n = 1,517$, $n' = 1,7$ și $n'' = 1,9$. Scan pattern-urile corespunzătoare cresc succesiv: albastru pentru n , portocaliu pentru n' și verde pentru n'' [23].

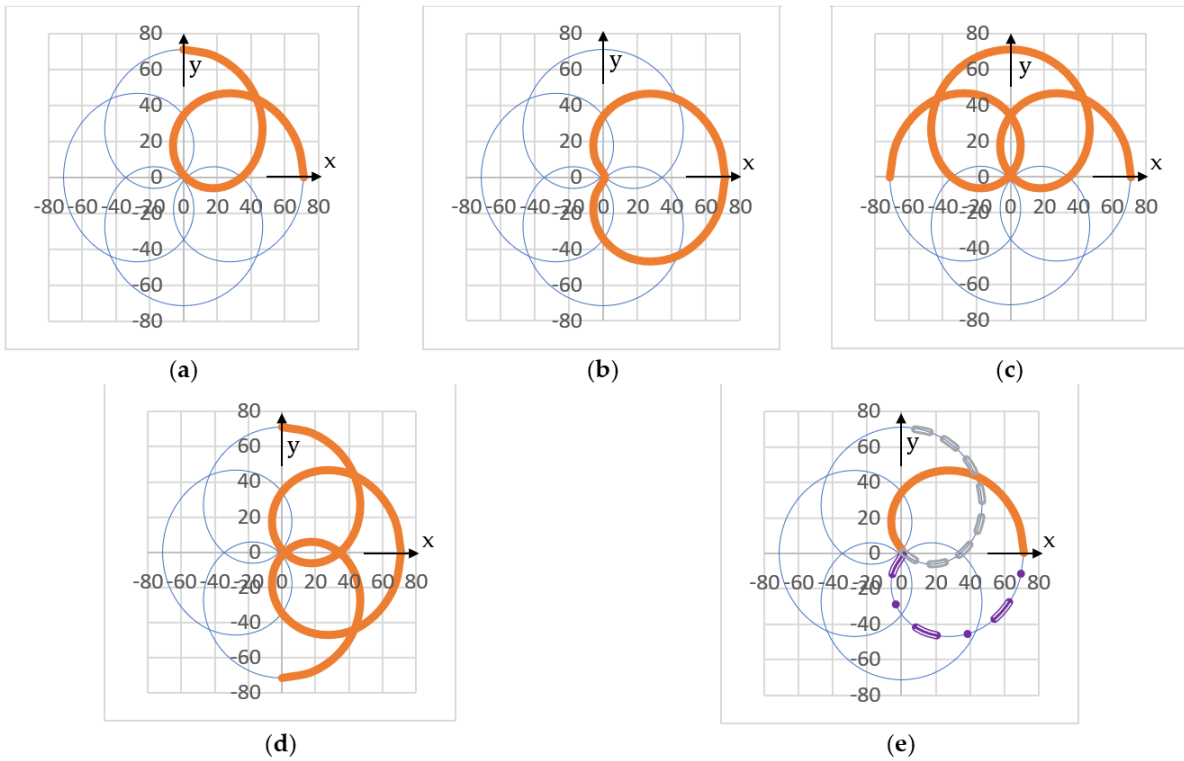


Fig.7. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = 5$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $\pi/2$; (b) de la $-\pi/4$ la $\pi/4$; (c) de la 0 la π ; (d) de la $-\pi/2$ la $\pi/2$; (e) de la 0 la $\pi/4$ [23].

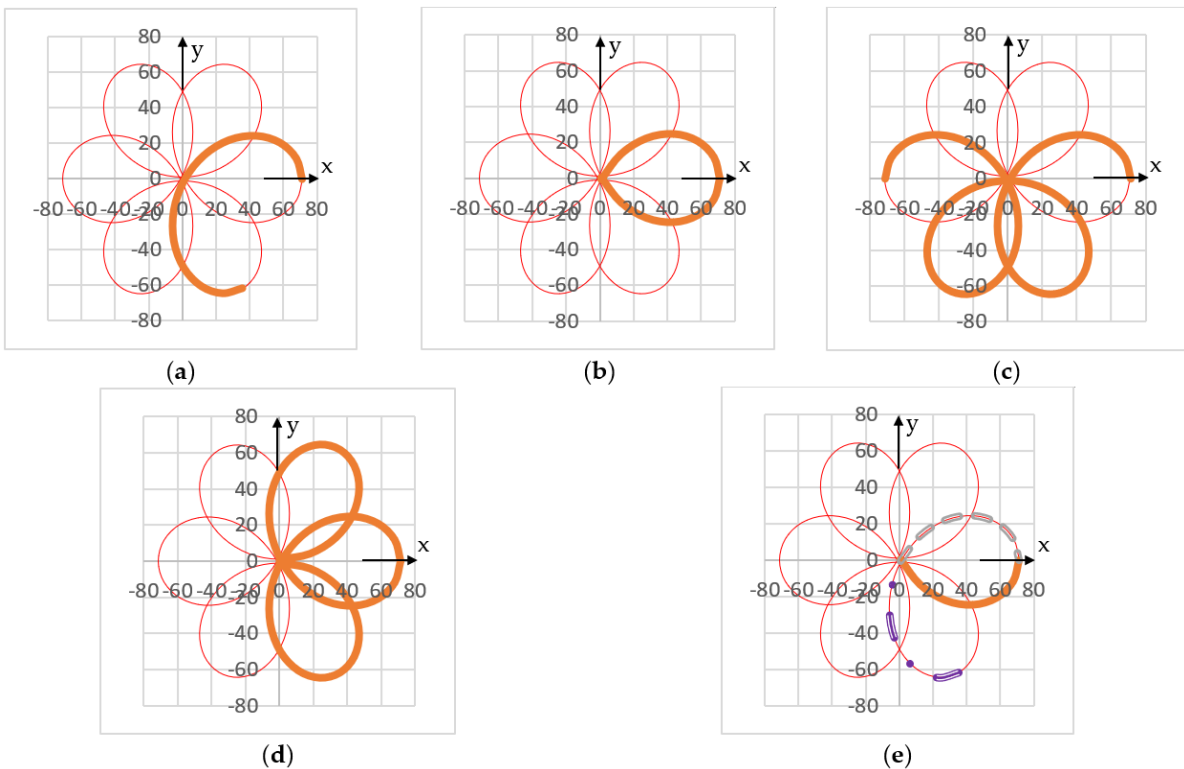


Fig.8. Simetrii în scan pattern-urile simulate pentru $M = -2$, evidențiind structurile de simetrie definite în subcapitolul 4.5, pentru unghiurile relative de rotație considerate: (a) de la 0 la $2\pi/3$; (b) de la $-\pi/3$ la $\pi/3$; (c) de la 0 la $\pi/3$ [23].

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 (Fig.6) 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 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-urile secundare (exemplu în Fig.9) obținute cu ajutorul prismelor Risley, folosind metoda grafică dezvoltată în 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 (exemplu Fig.10), 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, capitolul 4, respectiv capitolul 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 (exemplu - Fig.11 și Tabelul 1), și acestea se datorează atât nealinierei 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 $2'$.

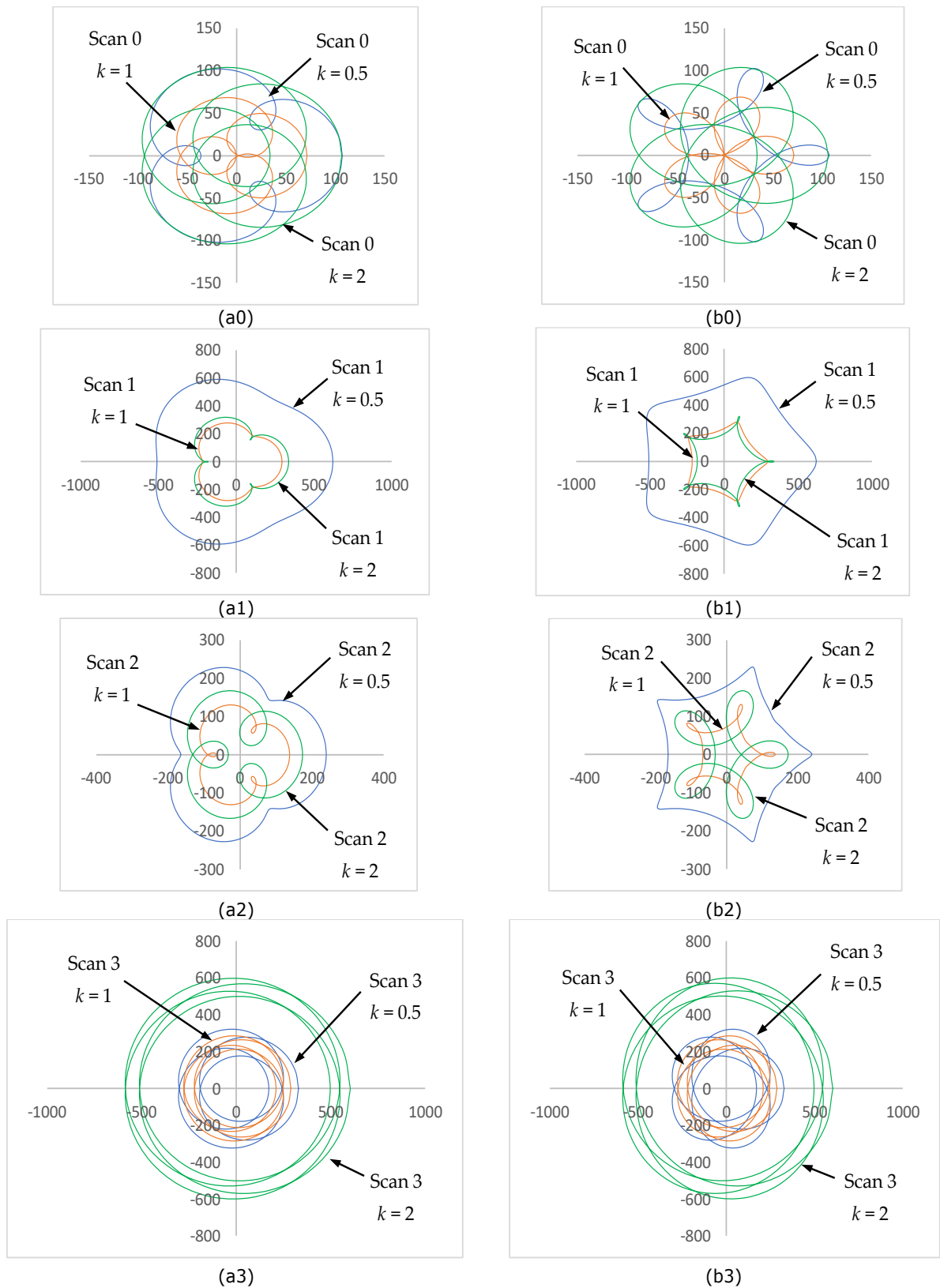


Fig.9. Scan patterns produse de o pereche de prisme Risley în configurația ab-ab, într-o comparație pentru $k = 0,5$ (albastru), $k = 1$ (portocaliu) și $k = 2$ (verde), cu (a) $M = 4$ și (b) $M = -4$: (0) Scan 0 (principal) și secundar, (1) Scan 1, (2), Scan 2 și (3) Scan 3.

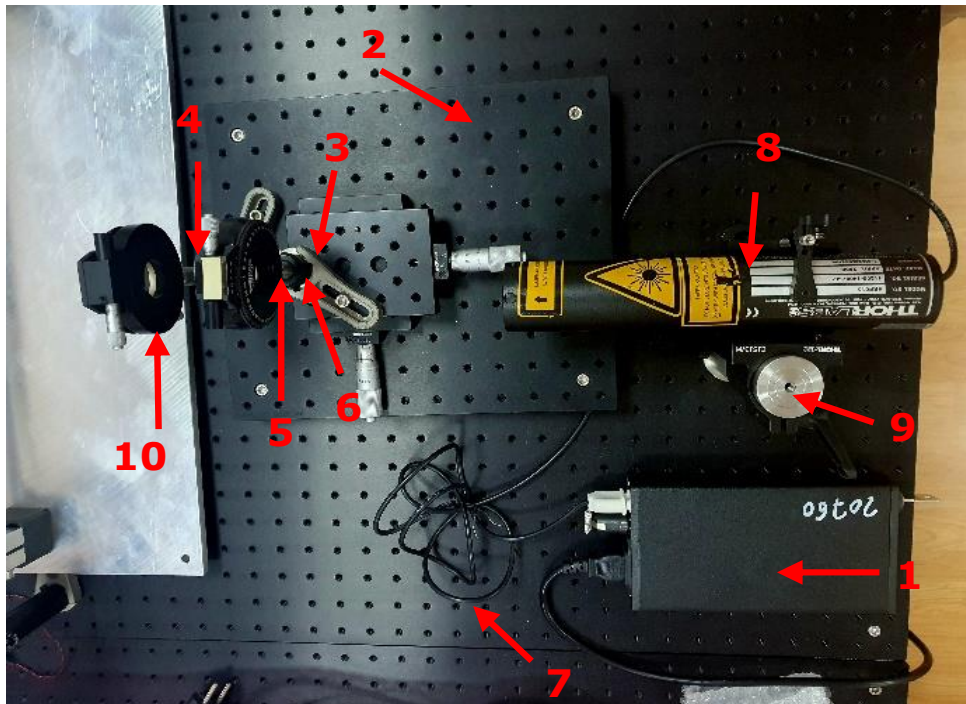


Fig.10. Prezentare cu indicarea componentelor a standului experimental din laboratorul de optomecatronică – pentru studiul experimental al scannerelor laser cu o pereche de prisme Risley (în una dintre cele 4 configurații posibile). Notații: 1. Sursă alimentare laser; 2. Placă suport; 3. Clame; 4. Prisma Risley 1 în suport rotativ; 5,6. Părți optomecanice; 7. Fire; 8. Laser He-Ne; 9. Suport 2”; 10. Prisma Risley 1 în suport rotativ.

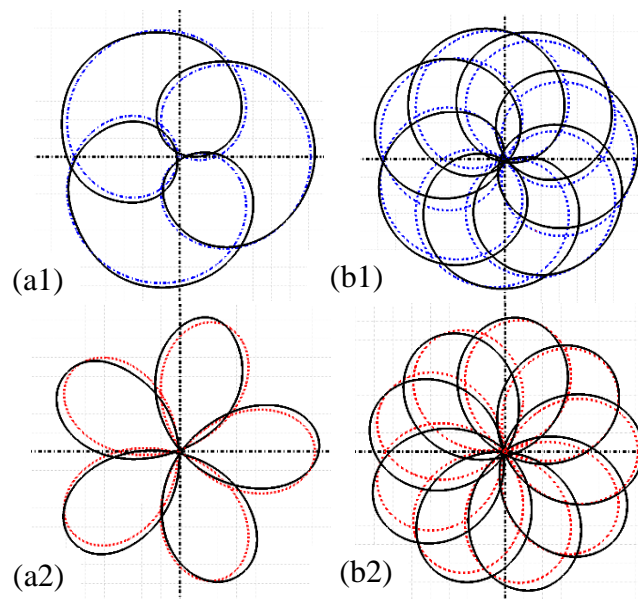


Fig.11. Scan pattern suprapus (dar ușor rotit unul față de celălalt), simulat (în albastru pentru (1) $M > 0$ și în roșu pentru (2) $M < 0$) față de cel experimental (în negru), determinate pentru (b) $|M| = 2$ și (c) $|M| = 6$ [22].

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: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} (R^e - \bar{R}^e)^2}$	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 1 - Raza simulată (R) versus experimentală (R^e) a câmpului vizual al scan pattern-urilor - așa cum a fost determinată în investigația prezentată în Fig.11 [22].

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

În acest capitol am efectuat măsurători de rugozitate pe trei cale comerciale de rugozitate folosind tehnologia de tomografie de coerență optică (OCT) (Fig.12), bazată pe scanarea laser punct-cu-punct (1000 puncte pentru un B-scan / secțiune optică) (Fig.13a). Aceste cale comerciale au valori nominale ale parametrilor de rugozitate R_z de 20, 40 și 80 μm și valori nominale ale parametrilor R_a de 3,6, 9,8 și 18 μm. Scopul principal al cercetării a fost de a determina dacă valorile parametrilor de rugozitate R_z și R_a 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 (Tabelul 2).

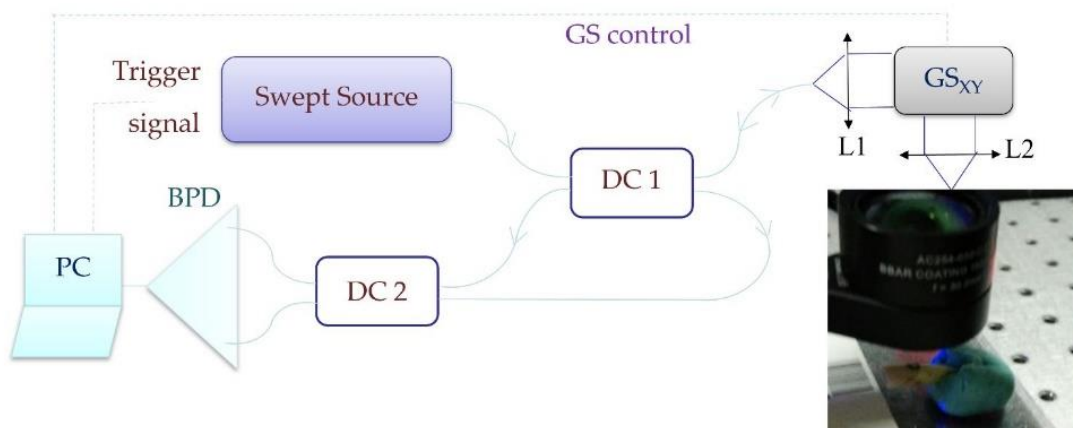


Fig.12. Sistemul OCT cu sursă laser scanată în frecvență, Swept Source (SS)-OCT - schema de funcționare a sistemului experimental din laborator (cu scanner laser galvanometric pentru scanarea laterală a probei investigate).

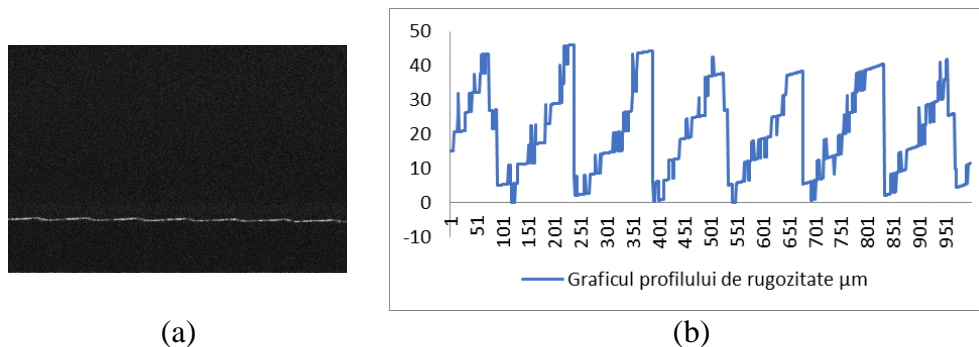


Fig.13. a) B-scan 250.1 b) Graficul profilului de rugozitate obținut în Excel.

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 2 - Tabel de sinteză cu parametrii de rugozitate pentru calele comerciale de rugozitate de 20, 40, 80 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.).

Cercetarea prezentată în teza de doctorat "**CONTRIBUȚII LA STUDIUL SCANNERELOR LASER CU PRISME RISLEY PENTRU TOMOGRAFIA DE COERENȚĂ OPTICĂ, CU APLICAȚII ÎN MĂSURATORILE INDUSTRIALE**" s-a concentrat pe două direcții distincte:

I. Studiul scan pattern-urilor produse cu o pereche de prismelor Risley rotative

S-a efectuat o analiză multi-parametrică a scan pattern-urilor generate de sistemele cu două prisme Risley rotative. S-a demonstrat că parametrul *M* al lui Marshall, raportul vitezelor de rotație ale celor două prisme, este factorul determinant în simetria scan pattern-urilor. S-a introdus conceptul de *structuri de simetrie* pentru generarea eficientă a acestor modele. Această cercetare a deschis calea pentru proiectarea optimă a scannerelor optomecanice cu prisme Risley pentru diferite aplicații.

Pe de altă parte s-au dezvoltat modele de scanare secundare ale prismelor Risley rotative utilizând programul de proiectare mecanică CATIA V5R20. Aceste modele au adus beneficii prin mărirea câmpului de scanare și factorului de umplere, având potențial de aplicare în domenii biomedicale, ingineresti, dar și artistice -printre altele.

II. Metoda optică de determinare a rugozității

Cercetarea a inclus analiza rugozității suprafețelor metalice cu ajutorul tomografiei de coerență optică (OCT), unde s-au folosit trei cale comerciale de rugozitate. Rezultatele au demonstrat că valorile parametrilor de rugozitate obținute prin OCT sunt comparabile cu

valorile nominale ale calelor de rugozitate, cu unele variații în funcție de parametrii specifici.

Această cercetare a deschis calea pentru utilizarea OCT în determinarea rugozității suprafețelor metalice, oferind multiple avantaje, cum ar fi măsurători de tip non-contact, viteză, eficiență, rezoluție înaltă și costuri reduse pe termen lung.

Direcții de cercetare viitoare

1. Analiza scan pattern-urilor generate cu alte configurații de sisteme de prisme Risley - Fig.14 (cu trei prisme, respectiv cu dublete de prisme – rotative sau oscilante) în funcție de principalii parametri care definesc sistemul de scanare cu prisme Risley: M (raportul vitezelor unghiulare), k (raportul dintre unghiurile prismelor), e (distanța dintre prisme), L (lungimea de la sistem la planul scanat), unghiurile și indicii de refracție ai prismelor;
2. Realizarea unei probe de mână cu scanere laser Risley pentru OCT (Optical Coherence Tomography / Tomografie Optică de Coerență);
3. Realizarea unui algoritm de realizare a imaginilor OCT cu prisme Risley, precum și aplicarea acestuia pentru diferite tipuri de probe metalice (de exemplu în studiul rugozității) sau nemetalice (incluzând materiale compozite, plastic, ceramică), dar și pentru probe biologice (în colaborare cu Universitatea de Medicină și Farmacie Victor Babeș Timișoara).

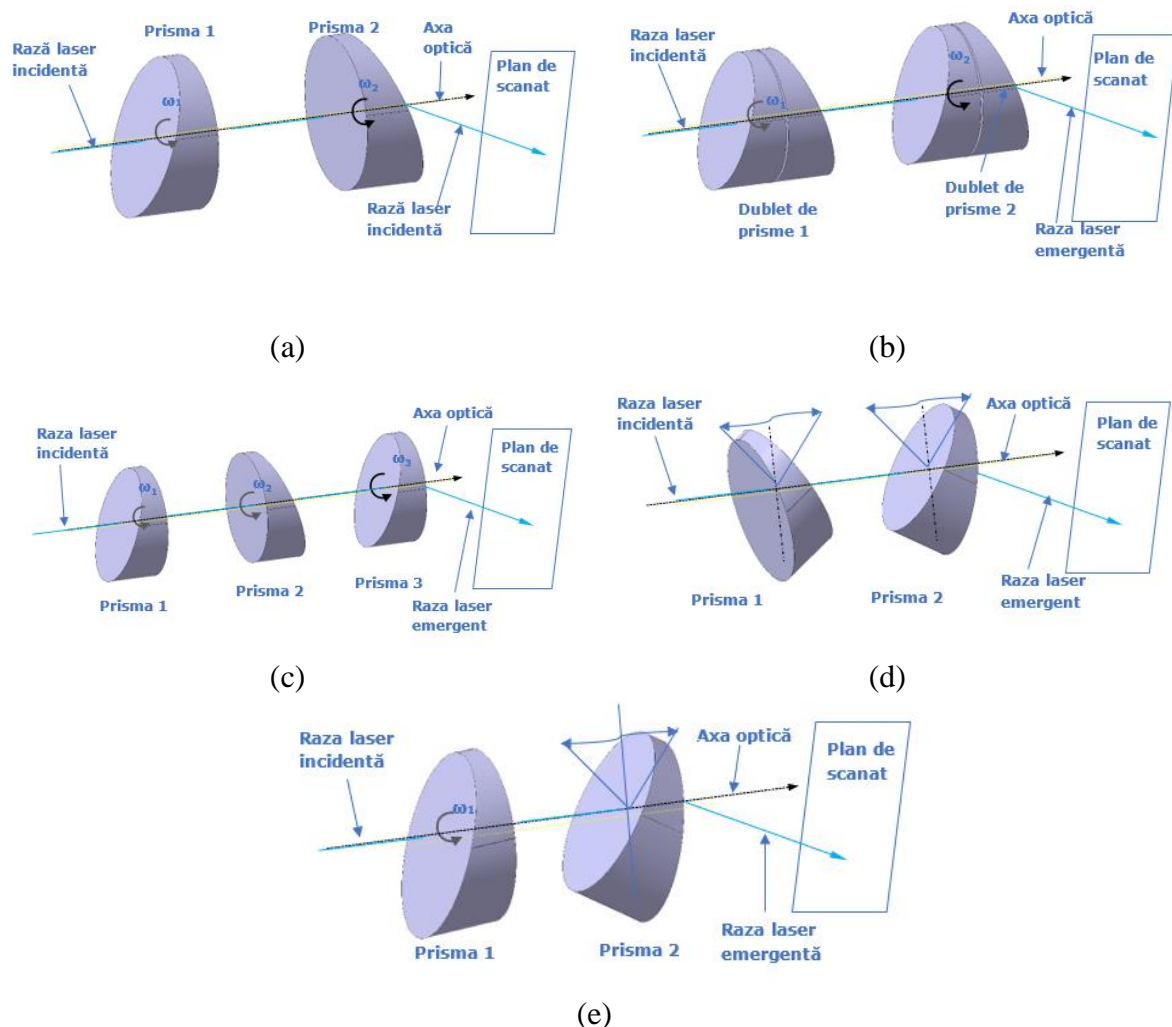


Fig.14. Tipuri de scanere cu prisme Risley: (a) cu o pereche de prisme de rotație; (b) cu o pereche de dublete de rotație; (c) cu trei prisme rotative; (d) cu o pereche de prisme oscilante; (e) scanner format dintr-o prismă rotativă și una oscilantă – schițe proprii realizate în programul de proiectare mecanică CATIA V5R20 (Dassault Systems, Paris, Franța).

Bibliografie

- [1] G.F. MARSHALL, G.E. STUTZ, Eds., Handbook of optical and laser scanning, CRC Press, London, 2011.
- [2] G.F. MARSHALL, Risley prisms scan patterns, Proc. SPIE 3787, 74–86, 1999.
- [3] Y. LI, Third-order theory of the Risley-prism-based beam steering system, Appl. Opt. 50, 679–686, 2011.
- [4] Y. YANG, Analytic solution of free space optical beam steering using Risley prisms, J. Light. Tech. 26, 3576–3583, 2008.
- [5] Y. LI, Closed form analytical inverse solutions for Risley-prism-based beam steering systems in different configurations, Appl. Opt. 50, 4302–4309, 2011.
- [6] Y. Ge, J. Liu, F. Xue, E. Guan, W. Yan, Y. Zhao, Effect of mechanical error on dual-wedge laser scanning system and error correction, Appl. Opt. 57, 6047-6054 (2018), ISSN 0003-6935.
- [7] A. LI, W. Yi, Q. ZUO, W. SUN, Performance characterization of scanning beam steered by tilting double prisms, Opt. Express 24, 23543–23556, 2016.
- [8] A. LI, X. LIU, W. SUN, Forward and inverse solutions for three-element Risley prism beam scanners, Opt. Express 25, 7677–7688, 2017.
- [9] X. LIU, A. LI, H. CHEN, J. SUN, Z. LU, Scale-adaptive three-dimensional imaging using Risley-prism-based coherent LiDAR, Opt. Letters 48, 2587-2590, 2023.
- [10] WANG, J., GE, Y., CHEN, Z.D. et al. Analytic solution for double optical metasurface beam scanners. Sci. Rep. 12, 5912 (2022).
- [11] X. LIU, A. LI, An integrated calibration technique for variable-boresight three-dimensional imaging system, Optics and Lasers in Engineering 153, 2022, 107005, ISSN 0143-8166.
- [12] X. LIU, A. LI, Multiview three-dimensional imaging using a Risley-prism-based spatially adaptive virtual camera field, Appl. Opt. 61, 3619-3629 (2022). .
- [13] SHAN, H.; ZHANG, H.; MA, X.; CAO, K.; JI, C.; TAO, Z.; HAN, J.; WANG, S.; ZHAO, S.; QI, J.; et al. A Fitting Method of Inverting Ozone Concentration Profile Using Ultraviolet Differential Charge-Coupled Device Imaging Lidar. Photonics 2023, 10, 808. .
- [14] A. LI, X. LIU, J. SUN, Z. LU, Risley-prism-based multi-beam scanning LiDAR for high-resolution three-dimensional imaging, Optics and Lasers in Engineering 150, 106836, 2022, ISSN 0143-8166.
- [15] ERB W., Rhodonea Curves as Sampling Trajectories for Spectral Interpolation on the Unit Disk. Constr. Approx. (2020).
- [16] 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 254, 1178-1181, 1991.
- [17] W. DREXLER, M. LIU, A. KUMAR, T. KAMALI, A. UNTERHUBER, R.A. LEITGEB, Optical coherence tomography today: speed, contrast, and multimodality, J. Biomed. Opt. 19, 071412, 2014.
- [18] A. COGLIATI et al., V.-F. DUMA, J.P. ROLLAND, MEMS-based handheld scanning probe with pre-shaped input signals for distortion-free images in Gabor-Domain Optical Coherence Microscopy, Opt. Express 24, 13365–13374, 2016.
- [19] GH. HUTIU, V.-F. DUMA, D. DEMIAN, A. BRADU, A. GH. PODOLEANU, Assessment of ductile, brittle, and fatigue fractures of metals using optical coherence tomography, Metals 8(2), 117, 2018.
- [20] V.-F. DUMA, Laser scanners with oscillatory elements: Design and optimization of 1D and 2D scanning functions, Appl Math Modelling 67, 456-476, 2019.
- [21] V.-F. DUMA and A. SCHITEA, Laser scanners with rotational Risley prisms: Exact scan patterns, Proceedings of the Romanian Academy, Series A 19(1), 53-60, 2018.
- [22] *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, 8451 (2021); IF 2.838.*
- [23] *A.-L. Dimb and V.-F. Duma*, Symmetries of Scan Patterns of Laser Scanners with Rotational Risley Prisms, Symmetry 2023, 15(2), 336; IF 2.7.*