



Inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

Cercetări privind măsurarea precisă a poziției unui fir prin metode optoelectronice

Student-doctorand:
Adrian Mocan

Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Ioan CIASCAI

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

Președinte: Prof. Dr. Ing. **Dorin Petreuş** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;
Conducător științific: Prof. Dr. Ing. **Ioan Ciascai** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Referenți:

- Prof. Dr. Ing. **Aurel-Stefan Gontean** - Universitatea Politehnica Timișoara;
- Prof. Dr. Ing. **Petre-Lucian Ogruțan** - Universitatea Transilvania din Brașov;
- Prof. Dr. Ing. **Dan Pitică** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca .

- Cluj-Napoca -
2021

Cuprins

Cuprins	2
Contextul, Motivația și Obiectivele Tezei.....	3
Structura Tezei.....	4
INTRODUCERE	4
STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII	4
CONTRIBUȚIA PERSONALĂ.....	6
Obiective	6
Metodologie generală.....	6
Studiul erorilor de măsură.....	7
Compensarea erorilor de măsură	8
Simularea erorilor de măsură.....	10
Implementarea practică și măsurători.....	14
Discuții generale	17
Concluzii finale	17
Contribuțiile Tezei	18
Lista de Publicații.....	19
Cuprinsul integral al tezei.....	20
Referințe	22

Contextul, Motivația și Obiectivele Tezei

Monitorizarea integrității structurale a barajelor este o activitate de importanță vitală. O bună monitorizare a barajelor previne cedarea acestora, fapt care poate provoca mari pierderi materiale și de vieți omenești.

În perioada actuală, în domeniul construcțiilor hidrotehnice, accentul s-a mutat de la construcția barajelor la monitorizarea lor. Această schimbare de accent se datorează faptului că potențialul hidroenergetic existent a fost amenajat aproape în totalitate, cât și datorită faptului că barajele existente încep să aibă o vechime de peste 50 de ani, vechime după care necesitatea monitorizării devine mai mare.

Pentru a facilita o monitorizare mai bună a barajelor, această teză își propune ca obiectiv îmbunătățirea metodelor de măsurare a deplasării relative. Deplasarea relativă este un indicator important pentru monitorizarea barajelor, care arată cum se deplasează anumite componente ale unui baraj, față de alte componente ale barajului. În mod concret, deplasarea relativă se determină cu instalații pendulare, la care se măsoară poziția firului de la pendul, în plan orizontal.

Ca obiective concrete, teza își propune să aducă îmbunătățiri la reducerea costului de producere a aparatului de măsurare a poziției firului, cât și îmbunătățiri la precizia de măsurare a poziției firului. Pentru precizia de măsurare a firului, obiectivul este obținerea unei precizii mai bune de 100 μ m, pentru ambele axe de măsură.

Structura Tezei

Teza este structurată în trei părți principale: INTRODUCERE, STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII și CONTRIBUȚIA PERSONALĂ. Structura detaliată a tezei se poate vedea în capitolul „Cuprinsul integral al tezei”.

INTRODUCERE

În partea de INTRODUCERE este descrisă problematica monitorizării integrității structurale a barajelor.

Monitorizarea barajelor se efectuează folosind o multitudine de aparate, cu care se măsoară mărimi interne ale barajelor, precum și factori de mediu. O mărime importantă pentru monitorizarea integrității structurale a barajelor este deplasarea relativă. Aceasta măsoară cum se deplasează unele părți ale barajului față de alte părți. Pentru a măsura deplasarea relativă se folosesc instalații pendulare.

O instalație pendulară este formată din o greutate de câteva kilograme, suspendată de un fir de oțel cu diametrul în jur de 1mm și cu o lungime de câteva zeci de metri. Greutatea este amplasată într-un rezervor cu lichid care are rolul de a amortiza oscilațiile pendulului. În mod tipic, firul de oțel este suspendat de partea superioară a barajului. În apropiere de capătul unde este suspendată greutatea, se măsoară deplasarea firului în plan orizontal față de structura barajului. Această deplasare indică cât de mult se deplasează în plan orizontal partea superioară a barajului față de partea inferioară.

STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII

În această parte se trece în revistă stadiul actual al cunoștințelor științifice în domeniul măsurării poziției firului de la pendul pentru a determina deplasarea relativă în cadrul barajelor (**capitolul 1**).

La început sunt descrise două tipuri de erori frecvent întâlnite în practica măsurătorilor, care pot afecta rezultatele măsurătorilor. O sursă majoră de erori este dată de curenții de aer orizontali care circulă peste firul pendulului (**subcapitolul 1.1**). Se arată cum un curent de aer cu viteză de doar 5km/h care circulă peste un fir cu diametru de 1mm peste o lungime expusă de 2m (la capătul mobil al pendulului), din lungimea totală a firului de 50m, la capătul cărui atârână o greutate de 20kg va devia cu 1mm. Această deviație produsă de mărimi realiste este cu un ordin de mărime mai mare decât eroarea de măsură impusă de precizia stabilită în obiectiv. O altă sursă majoră de erori descrisă își produce efectele după punerea în funcțiune a instalației pendulare. Această eroare este produsă din cauză că firul de oțel care este folosit la instalația pendulară este de obicei stocat în magazii sub formă de colac (**subcapitolul 1.2**). În momentul în care firul este întins pentru a se realiza pendulul, el nu va fi întins perfect, ci va avea o formă elicoidală din cauza stocării lui sub formă de colac. Se arată că un fir de oțel cu diametrul de 1mm (cu modul lui Young de $2 \cdot 10^{11}$ Pa) păstrat sub formă de colac cu raza de 15cm mai mult timp, va produce o spirală cu raza de 0.3mm, adică erori de 6 ori mai mari decât erorile de măsură impuse de precizia stabilită în obiectivul de cercetare.

Acest tip de eroare dispare treptat, în timp de câteva luni, timp în care firul de oțel este întins sub efectul greutateii suspendate de la instalația pendulară. Deși această eroare dispare, efectul ei este important pentru că eroarea apare tocmai la punerea în funcțiune a instalației pendulare, când de obicei se realizează măsurători de referință. Pentru a combate această eroare, firul de la pendul se poate supune la o procedură de întindere, anterior folosirii lui la instalația pendulară pentru măsurători.

Pentru măsurarea deplasării relative, în mod tradițional se folosesc instrumente de măsură la care citirea se face de către un operator uman (**subcapitolul 1.3**). Unul din aparate este coordiscopul (**subcapitolul 1.3.1**), la care un operator uman ajustează un șurub micrometric pentru fiecare axă, astfel încât firul să fie vizat printr-un instrument optic. Alt tip de instrument folosit este coordimetrul (**subcapitolul 1.3.2**). Acesta folosește două tije care intră în contact cu firul pentru a afișa direct poziția firului, fără ca operatorul să mai ajusteze șurubele micrometrice. Acest aparat are dezavantajul că tijele folosite acționează cu o anumită forță asupra firului la care se măsoară poziția și astfel se pot introduce erori la măsurătoare, în special când firul este foarte lung, greutatea suspendată este mai mică sau dacă se folosesc mai multe coordimetre pe același fir.

O evoluție mai recentă, apărută odată cu dezvoltarea electronicii este măsurarea automată (**subcapitolul 1.4**) a poziției firului și transmiterea ei la distanță. Prin citirea automată a poziției firului datele pot fi culese mai des, la un cost mai scăzut. Acest fapt permite aplicarea unor tehnici superioare de analiză a datelor.

Pentru măsurarea automată a poziției firului se folosesc mai multe principii de măsură, fiecare cu avantaje și dezavantaje specifice.

Măsurarea automată prin contact cu firul pendulului (**subcapitolul 1.4.1**) folosește același principiu ca la coordimetru, doar că în locul citirii directe a poziției tijelor se folosesc diferiți senzori de poziție.

Măsurarea automată prin senzor inductiv (**subcapitolul 1.4.2**) folosește un material paramagnetic fixat pe firul pendulului, care este plasat în câmpul magnetic a două bobine care îl încadrează. Poziția firului se obține pe baza diferenței dintre inductanțele bobinelor, care este determinată prin cuplarea pe rând a bobinelor într-un circuit oscilant și măsurarea frecvenței acestuia. O variantă a acestui principiu determină doar poziția de echilibru între cele două bobine, când se obține aceeași frecvență. Pentru măsurarea poziției, ansamblul de bobine este deplasat până când se obține poziția de echilibru. Acest principiu de măsură se aplică pentru fiecare axă în parte.

Măsurarea automată prin senzor capacitiv (**subcapitolul 1.4.3**) folosește un cilindru metalic fixat pe fir, care are rolul de armătură în doi condensatori formați cu plăci care încadrează cilindru. Determinarea poziției se face prin aflarea diferenței între capacitățile celor doi condensatori astfel formați. Există mai multe tehnici prin care se pot măsura capacitățile celor doi condensatori.

Măsurarea automată prin senzor optic (**subcapitolul 1.4.4**) se poate face prin mai multe metode: „Măsurarea prin citirea distanței cu laser”, „Măsurarea prin sistem opto-mecanic”, „Măsurarea prin analiza umbrei de la o sursă de lumină” și „Măsurarea prin analiza umbrei de la surse multiple de lumină”.

Măsurarea prin citirea distanței cu laser (**subcapitolul 1.4.4.1**) folosește un cilindru fixat pe firul pendulului și două sau trei sisteme de citit distanță cu laser, care măsoară distanță până la cilindru. După corecțiile introduse de geometria cilindrului se poate determina poziția firului.

Măsurarea prin sistem opto-mecanic (**subcapitolul 1.4.4.2**) face în mod esențial o automatizare a coordiscopului, unde operația de vizare este înlocuită de o barieră optică, iar operația de ajustare a șurubului micrometric se face automat de către un microcontroler.

Măsurarea prin analiza umbrei de la o singură sursă de lumină (**subcapitolul 1.4.4.3**) se face prin determinarea umbrei firului pe un senzor optic liniar. Această metodă se aplică pe fiecare axa de măsură.

Măsurarea prin analiza umbrei de la surse multiple de lumină (**subcapitolul 1.4.4.4**) se face tot prin determinarea umbrei firului pe un senzor liniar, dar aici se folosesc pe rând mai multe surse de lumină, astfel încât prin analiza poziției a cel puțin două umbre se poate determina poziția firului. Acest principiu de măsură folosește un singur sistem optic pentru ambele axe de măsură .

CONTRIBUȚIA PERSONALĂ

În această parte sunt descrise cercetările efectuate pe parcursul programului doctoral, pentru a atinge obiectivele tezei. Înainte de a descrie cercetările, sunt enunțate obiectivele cercetărilor (**capitolul 2**), precum și metodologia generală a cercetărilor (**capitolul 3**). În continuare sunt descrise în patru capitole (4, 5, 6 și 7) cercetările desfășurate pentru atingerea următoarelor scopuri: „Studiul erorilor de măsură”, „Compensarea erorilor de măsură”, „Simularea erorilor de măsură” și „Implementarea practică urmată de măsurători”. Fiecare cercetare este structurată în șase subcapitole: Introducere, Obiectiv/Ipoteza de lucru, Material și metodă, Rezultate, Discuții și opțional Concluzii.

Obiective

În acest capitol (**capitolul 2**) se enunță obiectivele cercetărilor și anume îmbunătățirea performanțelor aparatelor de măsură pentru deplasarea relativă a barajelor. În mod special se vizează un cost de producție cât mai scăzut cu care să se asigure o precizie de măsură mai bună decât 100μm, pe ambele axe de măsură.

Metodologie generală

Ca metodologie generală (**capitolul 3**) se alege pentru instrumentul de măsură principiul de măsurare prin analiza umbrelor de la surse multiple de lumină. Această alegere se datorează în primul rând faptului că acest principiu folosește un singur ansamblu optic pentru a măsura poziția firului pe ambele axe de măsură, determinând astfel un cost de producție mai scăzut.

Se definesc câțiva termeni specifici lucrării, care să faciliteze înțelegerea clară a exprimării. Astfel, termenul de „citire” definește procesul de citire a poziției umbrei firului, proiectate de către un LED pe senzorul optic liniar. Principiul de funcționare este descris pe scurt în acest capitol și poate fi observat în Figura 1.

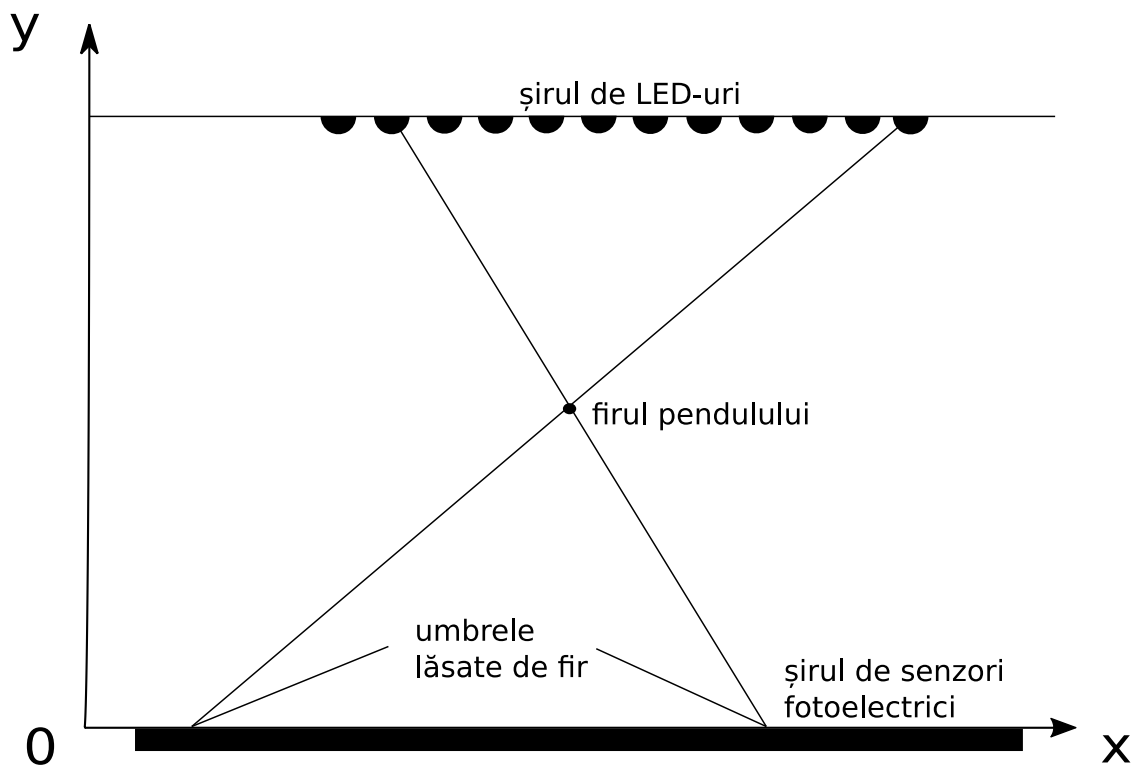


Figura 1: Principiul de funcționare al instrumentului de măsură

Se poate observa în Figura 1 că poziția firului este determinată de intersecția a două drepte, fiecare din ele dată de poziția unui LED și a umbrei proiectată de el pe senzorul optic.

Studiul erorilor de măsură

În această cercetare (**capitolul 4**) sunt investigate erorile de măsură ale unui instrument de măsură, ce implementează principiul analizei umbrelor de la surse de lumină multiple, unde sunt considerate ca surse de erori doar erorile inerente principiului de funcționare. În acest fel se investighează care sunt limitele teoretice de măsurare ale acestui tip de instrument.

Se emite ipoteza că folosind o citire suplimentară, cu un LED ales astfel încât să proiecteze o umbră cât mai perpendicular pe senzorul optic, se va îmbunătăți precizia de măsurare pentru axa X.

Poziția firului se determină scriind relații de asemănare în triunghiurile pe care le formează razele de lumină care proiectează umbrele. Erorile de măsură s-au determinat prin calculul derivatelor parțiale în raport cu mărimile care afectează măsurătoarea. Pentru a simplifica calculele, s-a introdus o mărime adimensională, r , determinată de distanțele între LED-uri și distanțele între umbre. Astfel, eroarea lui r este determinată atât de erorile de poziționare ale LED-urilor cât și de erorile de determinare a poziției umbrelor. Poziția pe axa Y depinde direct de r , astfel încât și eroarea poziției pe axa Y depinde în esență de eroarea lui r . Pentru axa X, mărimile considerate pentru a calcula erorile au fost în plus față de r , poziția LED-ului și a umbrei de la a treia citire, cât și eroarea de aliniere a originilor pentru măsurarea poziției pe axa X pentru LED-uri și pentru umbre. Această eroare de aliniere nu afectează poziția

pentru axa Y, deoarece în expresia poziției pe axa Y intră doar diferența între pozițiile LED-urilor și între pozițiile umbrelor.

Din evaluarea expresiei erorilor lui r (care este un factor atât pentru erorile de pe axa X cât și pentru erorile de pe axa Y), se constată că pentru a le minimiza este necesar ca distanța între LED-uri și între umbre să fie cât mai mare. De aici rezultă algoritmul de găsimă a celor două LED-uri cu care se fac primele două citiri, pentru o poziție dată a firului: Se începe cu LED-urile de la margine și se avansează înspre centru până când se obține o umbră pe sensorul optic pentru fiecare LED.

Pentru axa X se analizează erorile pentru a vedea cum sunt influențate de a treia citire. Se constată prin evaluarea expresiei erorilor, că folosind a treia citire, influența erorilor lui r scade foarte mult în expresia eroilor poziției pe axa X. Întrucât erorile lui r au o influență semnificativă în expresia erorilor poziției pe axa X, se ajunge la concluzia că ipoteza conform căreia o citire suplimentară micșorează erorile pe axa X se confirmă. Confirmarea acestei ipoteze generează o metodă de îmbunătățire a preciziei pe axa X, care este valoroasă în contextul acestor cercetări, deoarece reduce erorile de măsură a poziției pe axa X fără costuri de suplimentare la producția instrumentului de măsură.

Având expresia erorilor poziției pentru ambele axe de măsură se face o evaluare numerică a erorilor pentru diferite poziții ale firului din domeniul de măsură, folosind algoritmul de găsimă a LED-urilor care asigură eroarea minimă pentru poziția firului. Pentru a găsi o valoare la eroarea de poziționare a LED-urilor, s-au efectuat măsurători experimentale la o bandă de LED-uri uzuală.

Erorile de măsurare a poziției pentru fiecare poziție a firului sunt exprimate grafic în funcție de poziția firului, folosind o scară de culori pentru a marca magnitudinea erorilor. Din analiza erorilor se constată că factorul dominant este eroarea de poziționare a LED-urilor. Pentru a vedea efectele unei poziționări mai exacte a LED-urilor s-a redus eroarea de poziționare a LED-urilor la nivelul erorii de determinare a poziției umbrelor. După exprimarea grafică a erorilor în acest caz, se poate vedea o reducere a erorilor de măsurare a poziției atât ca valoare cât și ca distribuție în domeniul de măsură. Această reducere confirmă faptul că într-adevăr eroarea de poziționare a LED-urilor este factorul dominant în măsurarea poziției.

Concluzia studiului asupra erorilor de măsură este că chiar și numai erorile inerente principiului de măsură (erorile de poziționare a LED-urilor și erorile de citire a poziției umbrelor) sunt destul de mari ca să determine în final erori de măsurare a poziției firului care depășesc obiectivul cercetărilor, pentru anumite zone din domeniul de măsură. Erorile de măsură cele mai mari sunt pe axa Y.

Compensarea erorilor de măsură

În această cercetare (**capitolul 5**), se caută tehnici de a minimiza eroarea de poziționare a LED-urilor, deoarece aceste erori sunt dominante, după cum s-a concluzionat la studiul erorilor.

Prin calculul erorilor de poziționare pentru tehnologia de montare a componentelor THT, s-a găsit că la această tehnologie de plantare a LED-urilor pe cablajul imprimat, erorile de poziționare vor fi prea mari pentru nevoia de poziționare precisă a LED-urilor. Aceste erori mari provin din cauza toleranței la dimensiunile terminalelor LED-urilor, cât și din cauză că tehnologia impune o rezervă de spațiu între terminal și marginile găurilor.

La tehnologia de montare SMT sunt prea mulți factori necunoscuți pentru a putea calcula precizia de poziționare a LED-urilor pe cablajul imprimat. Din această cauză s-au căutat date

despre precizia de poziționare oferite de producătorii de cablaje echipate cu componente. Precizia de poziționare a componentelor oferită de mai mulți producători este suficient de bună pentru cerințele instrumentului așa că s-a încercat folosirea mai multor tipuri de benzi de LED-uri. Măsurătorile practice arată că eroarea de poziționare a LED-urilor în tehnologie SMD este de 12 ori mai mare decât cea oferită de producători. O explicație a acestei diferențe între erori este atribuită faptului că producătorii nu precizează pentru ce tip de componente oferă această precizie. Se presupune că această precizie mare oferită de producătorii de cablaje echipate se referă la circuite integrate care se poziționează cu repere fiduciale. În final s-a concluzionat cu măsurătorile practice, că nici tehnologia de montare SMT nu asigură o precizie de poziționare a LED-urilor suficientă, pentru nevoia de poziționare precisă a LED-urilor la instrumentul de măsură.

Ca urmare a faptului că tehnologiile existente de montare a LED-urilor pe cablajul imprimat nu asigură o precizie suficientă poziționării, s-a căutat altă cale pentru a mări precizia de poziționare a LED-urilor. Cercetarea în continuare pentru a mări precizia de poziționare la LED-uri se bazează pe faptul că instalația de testare a instrumentului este capabilă să poziționeze un fir simulat în domeniul de măsură cu o precizie de 5 μ m. Folosind poziția firului ca referință și poziția umbrei/umbrelor proiectate de un LED, se poate determina poziția LED-urilor cu o precizie mai bună decât precizia de poziționare a lor pe un cablaj imprimat. Aceste poziții ale LED-urilor determinate prin calcul, care oferă o precizie superioară, urmează să se stocheze într-o memorie nevolatilă și să fie folosite în calculele de determinare a poziției firului.

Pentru găsirea poziției LED-urilor prin calcul, în funcție de poziția firului simulat și a umbrelor, au fost elaborate trei metode care oferă diferite avantaje, în funcție de complexitatea fiecăreia.

Metoda de calibrare cu o singură citire (**subcapitolul 5.3.1**) este cea mai simplă metodă și determină pentru LED doar poziția pe axa X. Poziția umbrei împreună cu poziția firului simulat determină o dreaptă care modelează fasciculul luminos. Prin intersecția acestei drepte cu dreapta care reprezintă șirul de LED-uri se obține poziția LED-ului pe axa X.

Metoda de calibrare cu două citiri (**subcapitolul 5.3.2**) folosește umbrele de la firul simulat, poziționat în două poziții diferite. Cele două poziții diferite, împreună cu umbrele corespunzătoare determină două drepte ce modelează fasciculele luminoase. Punctul de intersecție al celor două drepte va determina poziția LED-ului, atât pe axa X, cât și pe axa Y.

Metoda de calibrare cu patru citiri (**subcapitolul 5.3.3**) vine să rezolve o problemă practică. În practică, pentru metodele cu una și două citiri, sistemul de coordonate al instrumentului de măsură trebuie aliniat cu sistemul de coordonate al instalației de testare cu o precizie suficient de bună pentru a nu afecta precizia de poziționare a LED-urilor care este calculată. Metoda de calibrare cu patru citiri folosește poziționarea firului simulat în patru poziții care formează colțurile unui dreptunghi. Această configurație permite calcularea poziției unui LED atât pe axa X cât și pe axa Y, fără a fi necesare operații de adunare sau scădere a pozițiilor în sisteme de coordonate diferite. Din această cauză, această metodă permite eliminarea unei alinieri precise între originile celor două sisteme de coordonate.

În timpul elaborării acestor metode s-a constatat prezența unei alte surse de erori în instrumentul de măsură. Această sursă de erori a fost identificată ca fiind refracția fasciculului luminos la interfața între aer și capsulele LED-urilor, respectiv capsula sensorului optic. Pentru a compensa erorile de refracție (**subcapitolul 5.3.4**) s-a calculat cât de mare este deviația fasciculului luminos de la poziția ideală, atât pentru poziția LED-urilor cât și pentru poziția umbrelor. Cunoscând aceste deviații se pot compensa erorile introduse de refracția fasciculului luminos prin scăderea deviației calculate din poziția umbrei și din poziția LED-ului. Erorile date

de refracție au fost exprimate ca erori de poziționare a LED-urilor, respectiv a umbrelor și au fost reprezentate grafic, în funcție de unghiul de incidență. Se observă din grafic că pentru un unghi de incidență de 40 de grade, eroarea de măsurare a poziției umbrelor atinge valori de 250 μ m. O concluzie desprinsă din studiul erorilor de la capitolul 4 a fost că pentru a obține erori de măsură mici, trebuie folosite distanțe cât mai mari între LED-uri și între umbre, deci unghiuri de incidență cât mai mari. Aceste unghiuri de incidență mari impun folosirea compensării erorilor de refracție.

Metoda de calibrare globală (**subcapitolul 5.3.5**) a fost dezvoltată pentru a compensa erorile de poziționare a LED-urilor, erorile de refracție, precum și alte tipuri de erori într-o singură operație. Ideea centrală este de a folosi instalația de testare pentru a face citiri cu toate LED-urile pentru puncte de referință poziționate într-o grilă, care se întinde peste tot domeniul de măsură. Aceste date culese urmează să fie stocate într-o memorie nevolatilă, astfel încât să poată fi folosite pentru corectarea erorilor care apar la măsurători.

Cea mai simplă abordare la această problemă a fost calcularea diferenței între valoarea poziției măsurată pur geometric și poziția de referință pentru fiecare punct din grilă. Pentru o poziție oarecare se poate face o interpolare a acestei diferențe la poziția respectivă și valoarea acestei diferențe să fie folosită la corecția poziției calculate. S-a constatat că în cazul acestui instrument, metoda de interpolare în grilă poate fi afectată de faptul că pentru puncte diferite se folosesc LED-uri diferite, astfel că în funcția care trebuie interpolată apar discontinuități care afectează rezultatele interpolării.

Pentru a putea corecta erorile de măsură fără influența trecerii de la un LED la altul, s-a elaborat un algoritm nou de corecție a erorilor de măsură folosind datele de calibrare globală. În esență, algoritmul încearcă să identifice punctele de referință care încadrează punctul de măsură și să folosească pozițiile umbrelor proiectate de la același LED la citirile din punctele de referință. Algoritmul folosește o interpolare locală a citirilor, cu pozițiile umbrelor de referință produse de la același LED, astfel încât se elimină problema discontinuităților introduse la trecerea de la un LED la altul. În cazul limită când nu s-au putut identifica patru puncte de referință cu măsurători valide de la același LED, algoritmul folosește pentru poziție o valoare calculată pe baza citirilor unui singur punct de referință și a citirilor actuale. Datorită faptului că metoda de corecție a erorilor bazată pe calibrarea globală adresează mai multe tipuri de erori, această metodă de corecție a erorilor a fost aleasă pentru a fi folosită la implementarea instrumentului de măsură.

Simularea erorilor de măsură

În această cercetare (**capitolul 6**), s-a studiat prin simulare valorile și distribuția erorilor de măsură produse de cele mai importante surse de erori: poziționarea LED-urilor, refracția produsă la capsula LED-urilor, refracția produsă la capsula senzorului optic și erorile de cuantizare de la citirea senzorului optic. De asemenea, s-a studiat prin simulare performanțele de corecție a erorilor pentru metoda de corecție cu calibrare globală.

Principiul de simulare pornește de la o poziție a firului oarecare, considerată poziția adevărată. Pentru această poziție se determină LED-urile folosite și apoi geometric umbrele corespunzătoare. La valorile determinate pentru pozițiile LED-urilor și pentru pozițiile umbrelor se adaugă erorile care apar la determinarea acestor valori. Poziția măsurată a firului se obține prin intersecția dreptelor care unesc poziția LED-urilor cu umbrele corespunzătoare, atunci când pozițiile sunt afectate de erori. Diferența între poziția determinată a firului și poziția adevărată a firului este considerată a fi eroarea de poziționare a firului obținută prin simulare.

Din cauză că la simularea corecției erorilor este un algoritm întreg, nu doar o simplă formulă, s-a folosit un program creat special pentru simulare. Pentru vizualizarea rezultatelor s-a creat un program care prezintă grafic erorile de măsură prin reprezentarea cromatică a magnitudinii erorilor în funcție de poziția firului în domeniul de măsură.

Folosind un sistem de reprezentare grafică asemănător cu reprezentarea grafică a erorilor din capitolul 4 este posibilă o comparare vizuală a erorilor de măsură obținute prin cele două metode diferite (calcul folosind derivate parțiale și simulare numerică), pentru cazul când se consideră doar erorile de poziționare a LED-urilor și cele de cuantizare la citirea senzorului optic. Compararea vizuală a celor două metode de calcul a erorilor relevă o corelație între distribuțiile erorilor, validând corectitudinea rezultatelor cercetărilor.

Reprezentarea erorilor cumulate din toate sursele de erori, care se poate observa în Figura 2 și în Figura 3, relevă faptul că cel puțin pentru axa Y magnitudinea erorilor este prea mare (în tot domeniul de măsură), pentru a se putea face măsurători cu precizia $100\mu\text{m}$ (stabilită în obiectivul de cercetare), fără a se folosi o metodă de corecție a erorilor. În figurile care prezintă magnitudinea erorilor în domeniul de măsură, valoarea erorilor este indicată în mod cromatic. Cu albastru închis sunt reprezentate erorile de $30\mu\text{m}$ sau mai mici și cu roșu cele de $200\mu\text{m}$ sau mai mari. Erorile cu valori între aceste două limite sunt reprezentate cu culoarea care are o lungime de undă corespunzătoare în mod proporțional.

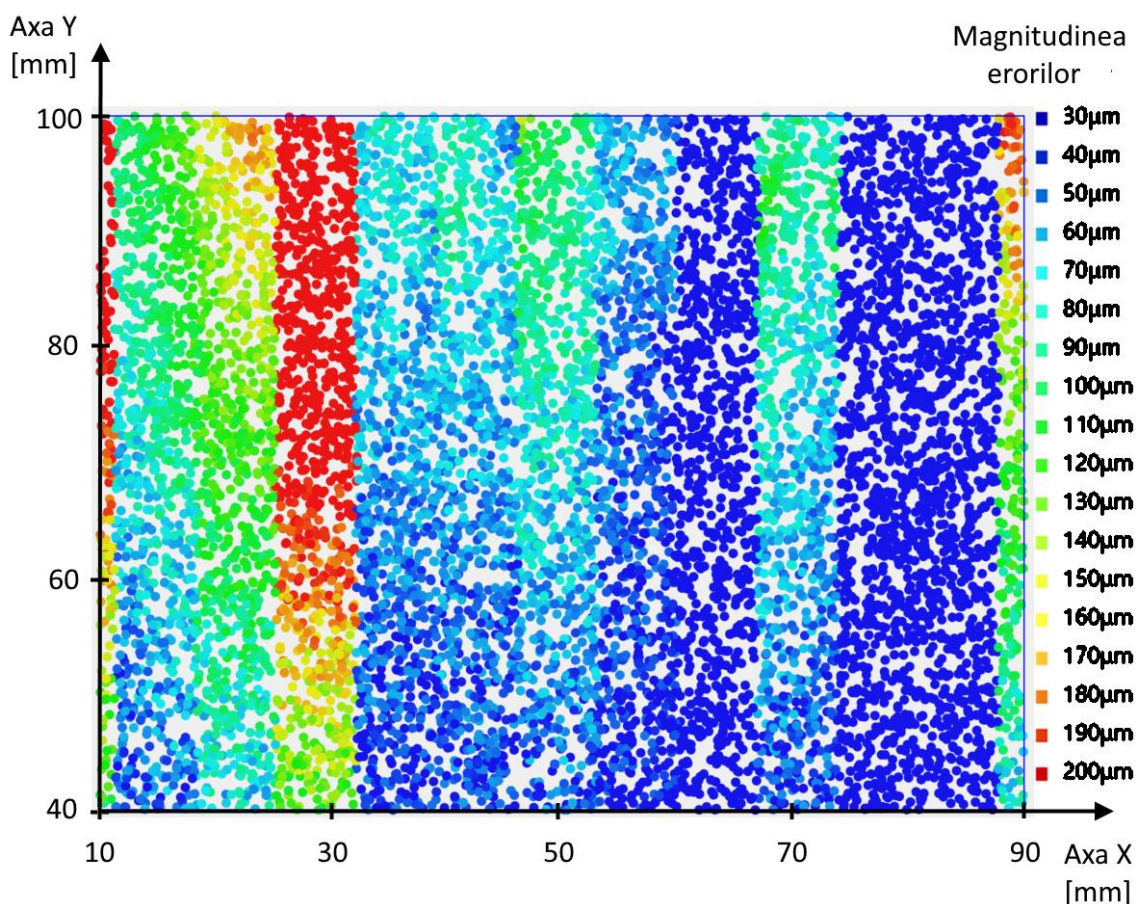


Figura 2: Distribuția erorilor din toate sursele combinate, pentru axa X

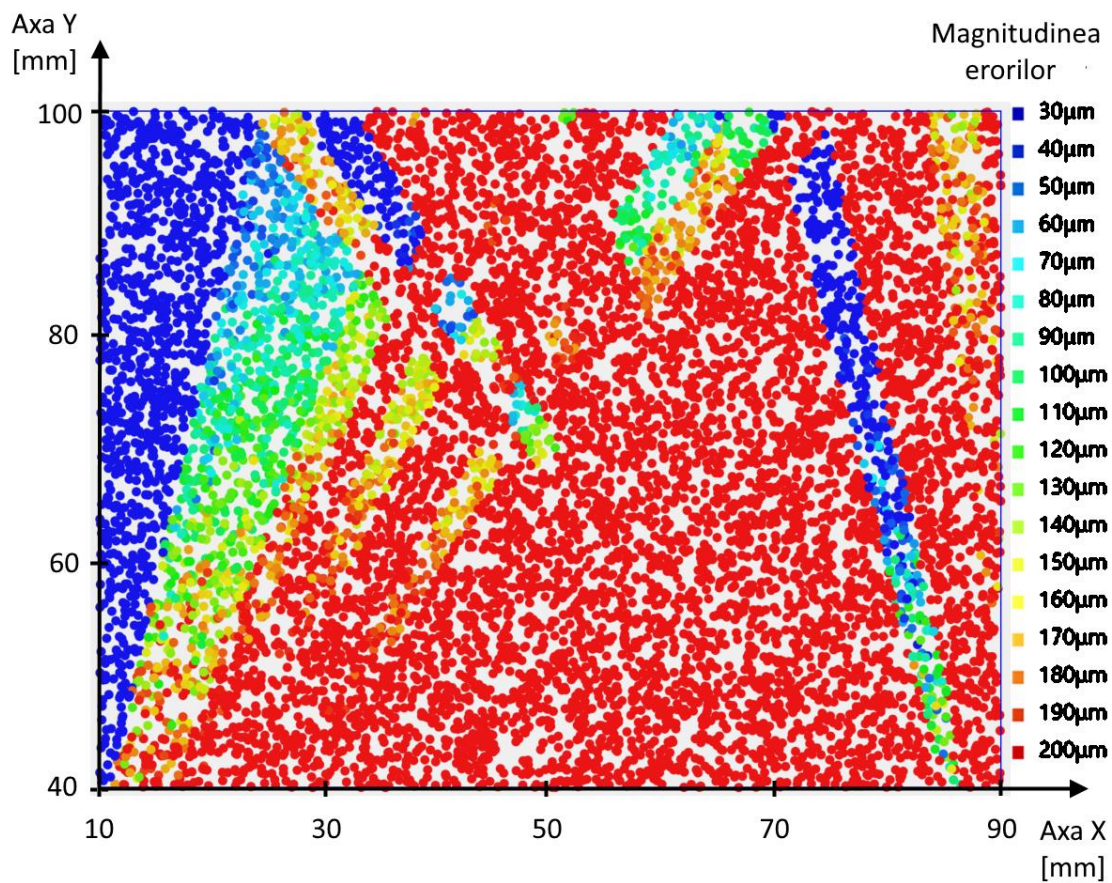


Figura 3: Distribuția erorilor din toate sursele combinate, pentru axa Y

După ce s-a aplicat metoda de corecție a erorilor cu calibrare globală la erorile de măsură cu toate sursele de erori cumulate, s-a putut constata o reducere semnificativă a erorilor, până la un nivel care este suficient de bun pentru a obține un instrument cu precizie de măsură mai bună de 100µm, așa cum este specificat în obiectivul cercetărilor. Reprezentarea grafică a erorilor de măsură obținute după ce a fost aplicat algoritmul de corecție a erorilor poate fi observată în Figura 4 și în Figura 5.

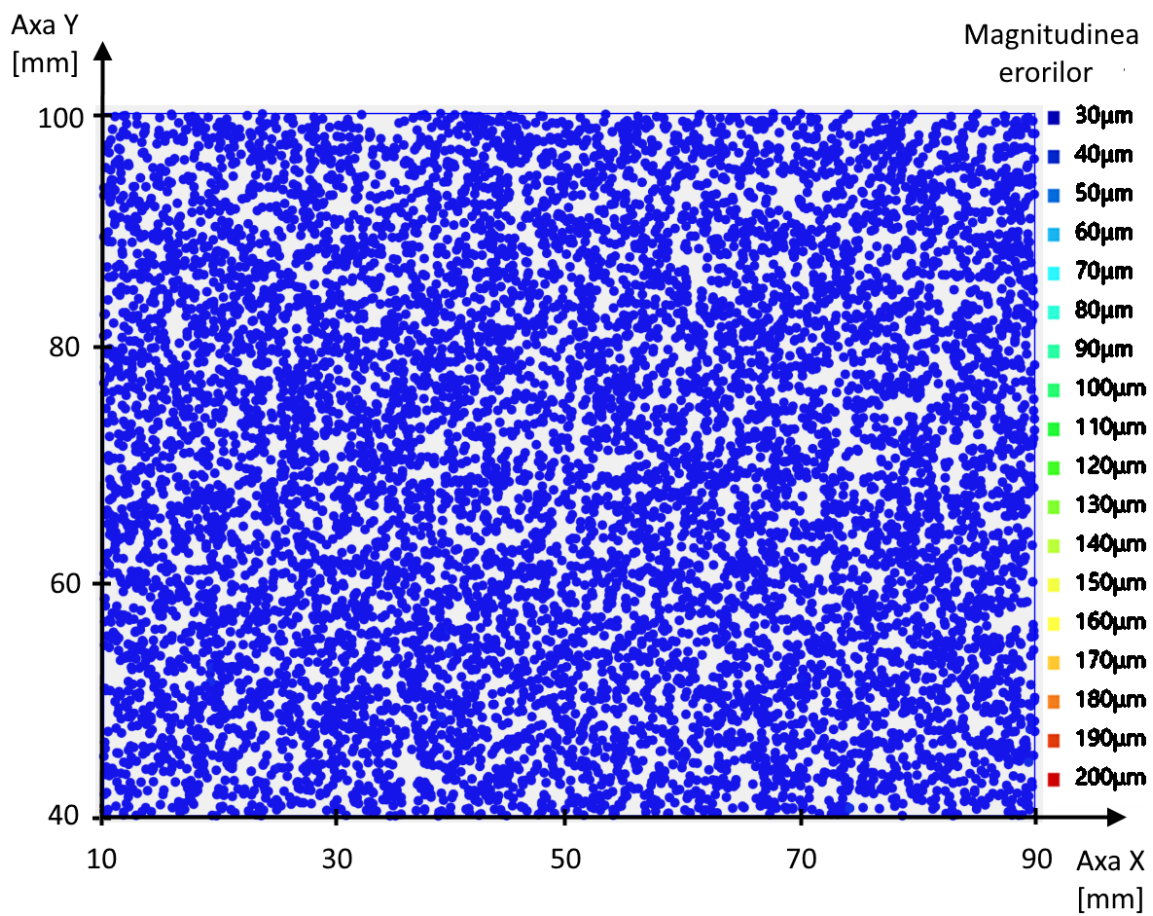


Figura 4: Distribuția erorilor compensate pentru axa X

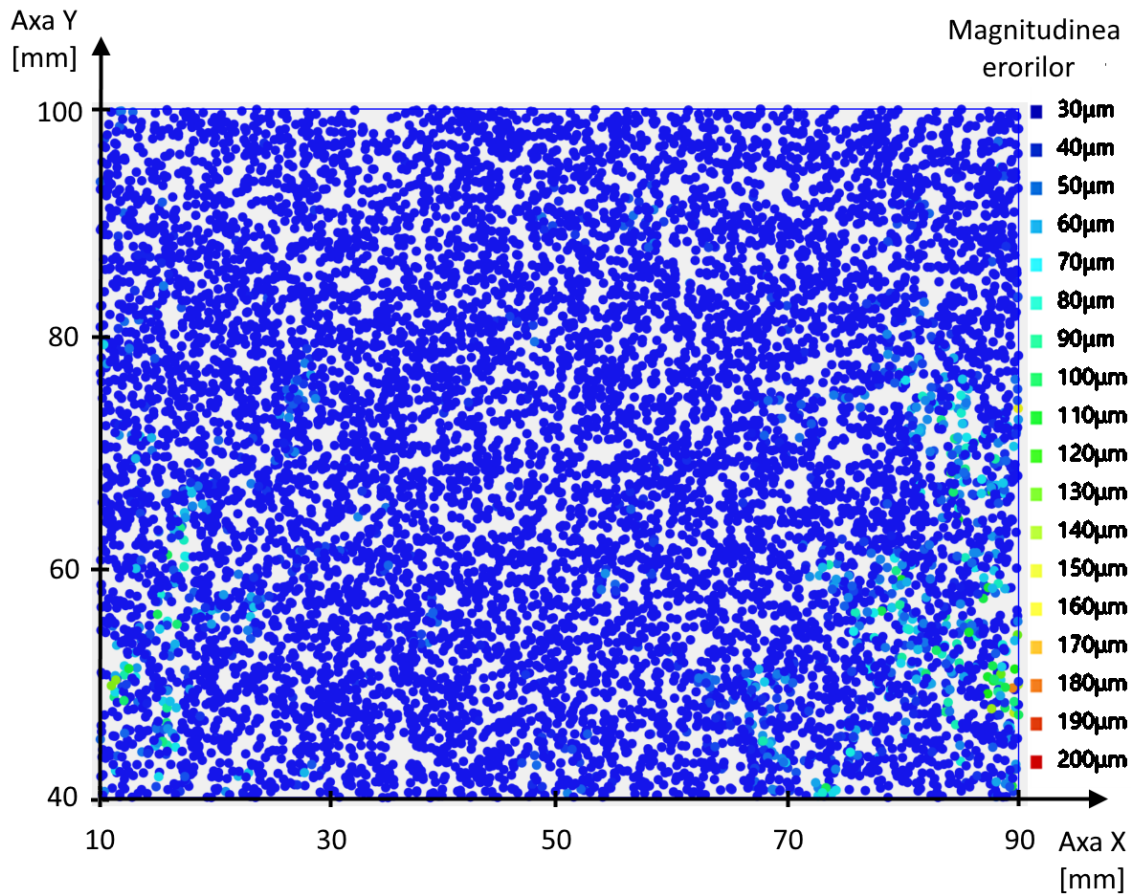


Figura 5: Distribuția erorilor compensate, pentru axa Y

Implementarea practică și măsurători

În această cercetare (**capitolul 7**), s-au găsit metodele de a implementa practic un model experimental pentru instrumentul de măsură. Cu ajutorul acestui model experimental s-au efectuat măsurători pentru evaluarea preciziei de măsură a modelului experimental. În Figura 6 se poate vedea realizarea practică a modelului experimental.

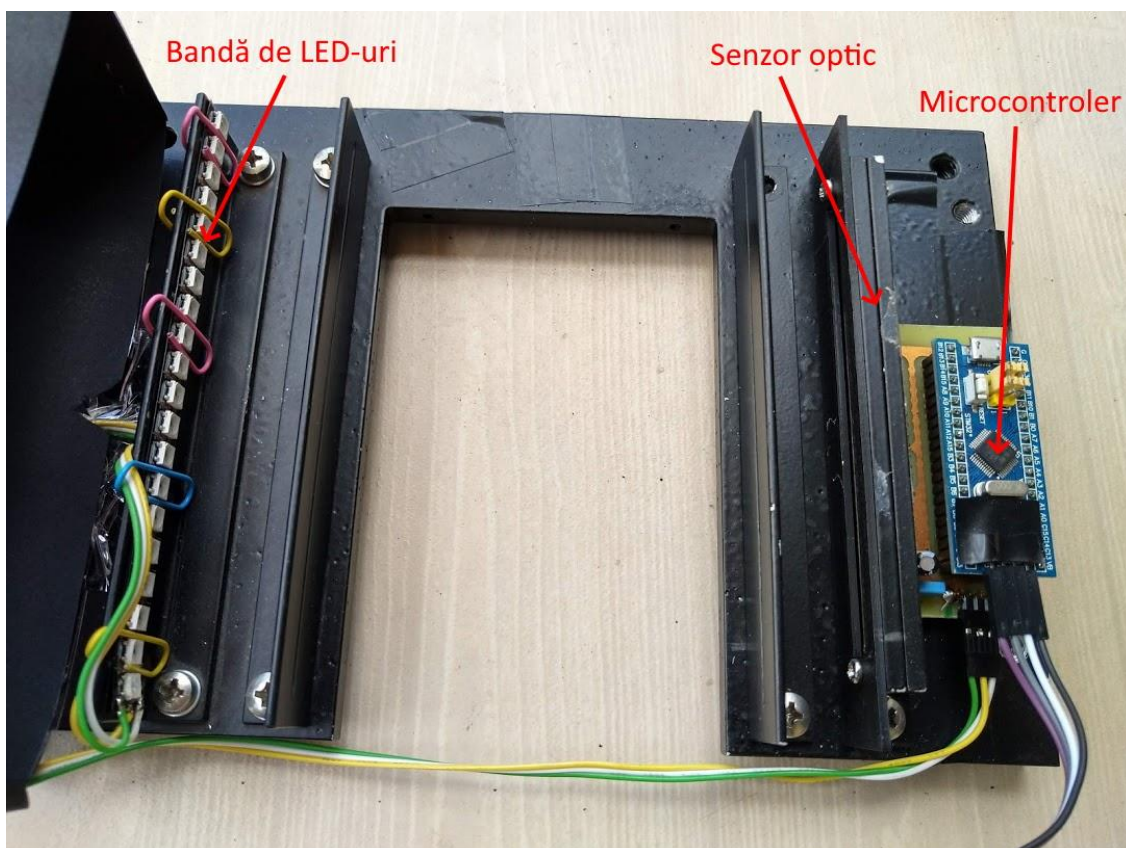


Figura 6: Vedere de ansamblu a modelului experimental

În **subcapitolul 7.3.1** s-au descris componentele alese pentru implementarea părții electronice a instrumentului de măsură, precum și rațiunile care au determinat alegerea lor. Microcontrolerul ales este de tipul STM32F103C8, senzorul optic ales este de tipul TSL1412S, iar banda de LED-uri conține LED-uri de tip WS2812B.

Programul microcontrolerului (**subcapitolul 7.3.2**) coordonează activitatea de măsurare a poziției firului. Pentru comanda LED-urilor s-a folosit interfața SPI împreună cu o tabelă de căutarea cu date precalculate, pentru a realiza o comandă cât mai eficientă. Pentru citirea senzorului s-a folosit un convertor ADC cu transmisia datelor prin DMA. Pentru a comanda toate fazele necesare la citirea senzorului optic s-a implementat o mașină de stare. Mașina de stare generează semnalul de control pentru ADC cu secvența necesară citirii senzorului optic.

Datele preluate de la senzorul optic sunt folosite pentru a determina poziția umbrei pe senzorul optic. Pentru aceasta se aplică prima dată un filtru de mediere pentru curățarea de zgomot a semnalului optic. Apoi se găsește un prag dinamic de determinare a zonei de întuneric, prin aplicarea unui alt filtru de mediere, cu o fereastră mai mare, din care se ia apoi o fracțiune. Pragul dinamic este necesar pentru cazurile în care se folosește un LED situat la marginea benzii de LED-uri. În acest caz luminozitatea pe senzorul optic este mai pronunțată în partea dinspre LED și scade în cealaltă parte. Poziția umbrei a fost considerată la mijlocul zonei unde semnalul luminos scade sub pragul de întuneric.

În subcapitolul de Măsurători (**subcapitolul 7.3.3**) este descrisă instalația de testare folosită la calibrare, precum și programul care realizează automat calibrarea aparatului. Instalația de testare este construită asemenea unei mașini cu comandă numerică, care poate să poziționeze în plan orizontal un fir simulat cu o precizie de $5\mu\text{m}$. Această poziționare se face prin comanda motoarelor pas-cu-pas, folosind regimul de micro-pășire.

În urma calibrării aparatului se obține un sistem de coordonate „virtuale” (generat de datele de calibrare) la care sunt raportate măsurătorile aparatului.

După calibrarea modelului experimental, datele de calibrare au fost stocate și folosite apoi la corecția erorilor de măsură, folosind metoda de corecție cu calibrare globală.

Pentru evaluarea performanțelor de măsurare a modelului experimental, s-au efectuat măsurători ale poziției firului, pentru mai multe poziționări aleatorii ale firului simulat. Prin analiza statistică a 175 de măsurători, s-a ajuns la următoarele rezultate:

- Deviația standard la erorile absolute pe axa X este: $42\mu\text{m}$
- Deviația standard la erorile absolute pe axa Y este: $77\mu\text{m}$

În urma acestor rezultate, se poate declara precizia de măsură a modelului experimental cu o încredere de 68%, ca fiind $\pm 40\mu\text{m}$ pe axa X și $\pm 80\mu\text{m}$ pe axa Y.

O reprezentare grafică a erorilor de măsură obținute la măsurătorile experimentale cu modelul experimental este prezentată în Figura 7 și Figura 8.

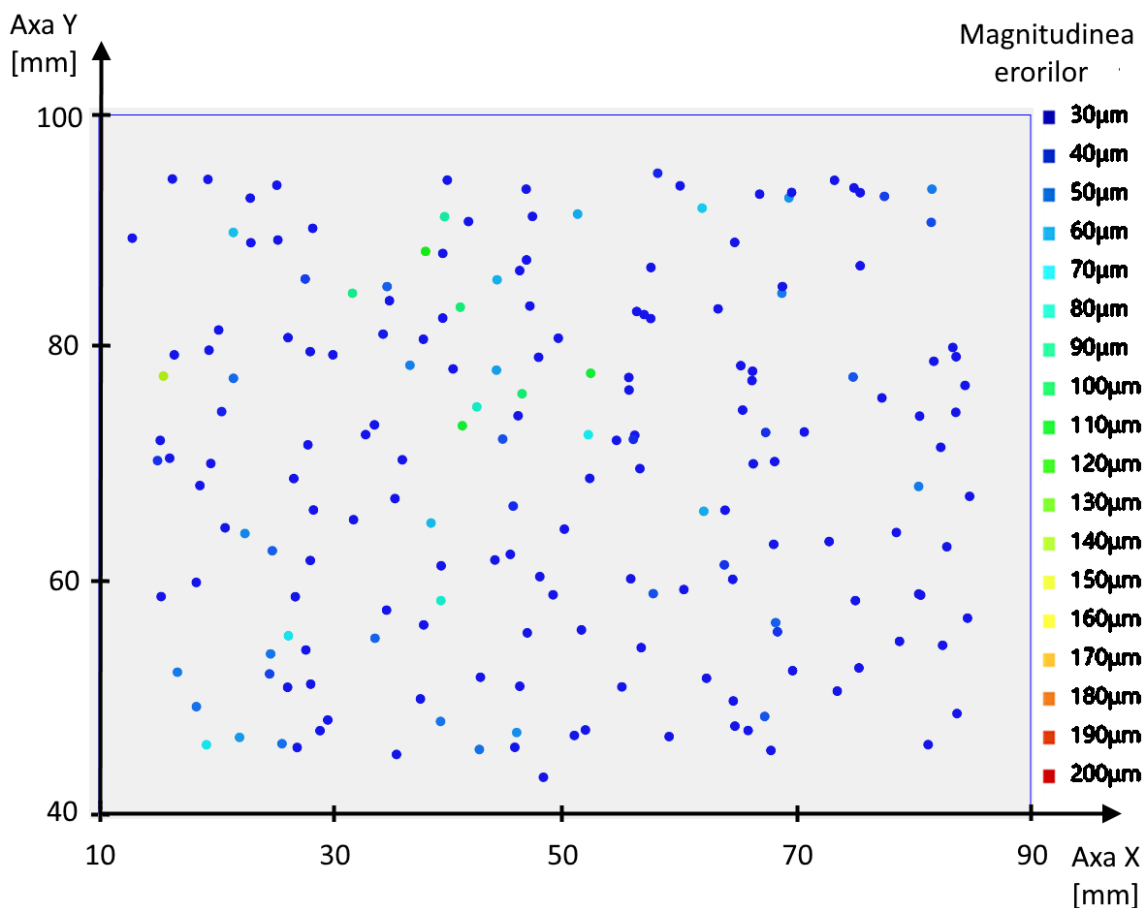


Figura 7: Erorile la măsurătorile pentru axa X

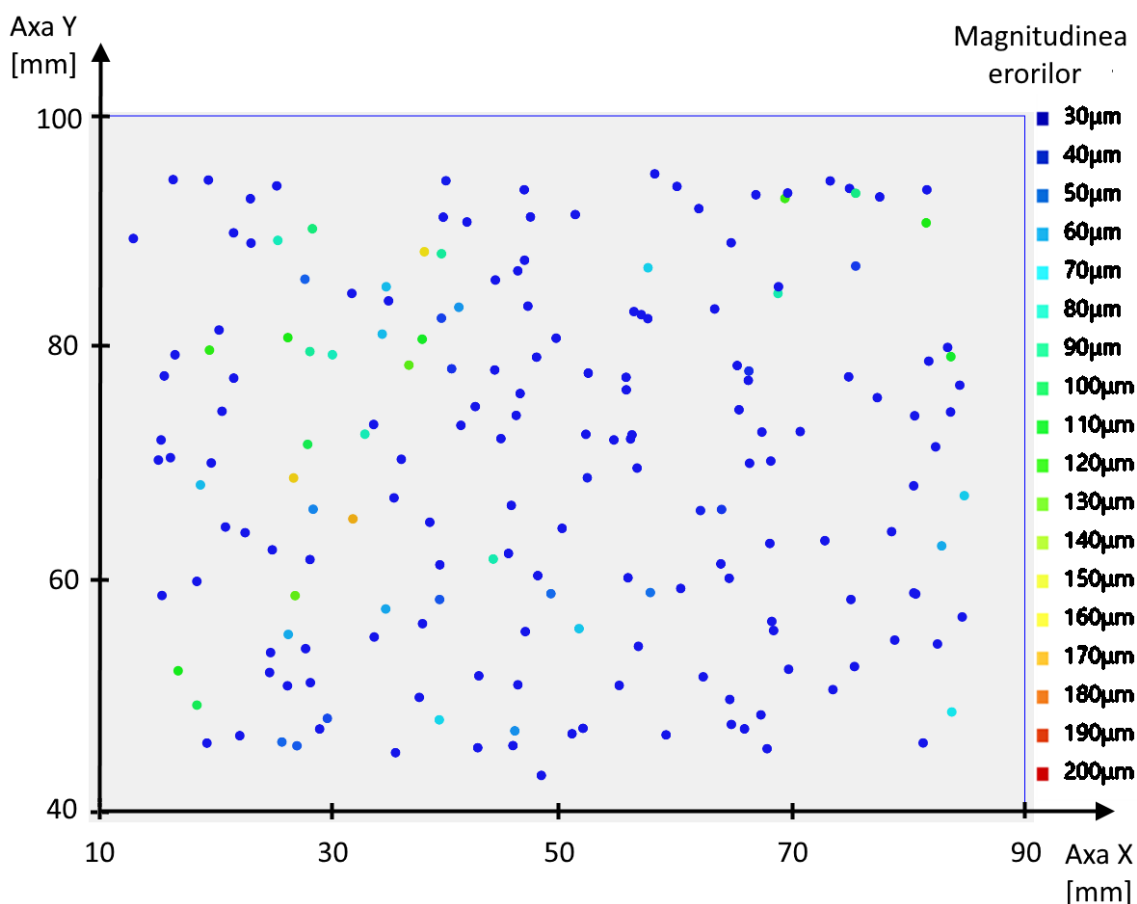


Figura 8: Erorile la măsurătorile pentru axa Y

Discuții generale

În această parte a tezei se prezintă considerații legate de rezultatele obținute și cum pot fi acestea îmbunătățite.

Un alt aspect trecut în vedere (**subcapitolul 8.1**) este procedura de instalare în baraj a instrumentului de măsură. Pentru a putea garanta precizia măsurătorilor, la instalarea în baraj trebuie respectate anumite cerințe de aliniere în plan orizontal și cu axa radială și tangențială a barajului. Pentru a putea realiza măsurători în paralel cu alt instrument existent este necesară derularea unei proceduri de etalonare la instalarea în baraj.

La final se trec în revistă direcții de cercetare viitoare (**subcapitolul 8.2**) care sunt posibile din acest stadiu al cercetărilor.

Concluzii finale

În această parte se prezintă validarea cercetărilor și atingerea obiectivelor tezei. Se consideră că obiectivul de precizie stabilit a fost atins prin erorile de măsurare obținute (de 40µm pentru axa X și 80µm pentru axa Y), care sunt mai mici decât 100µm. Obiectivul de reducere a costurilor de producție se consideră atins prin estimarea unui cost de producție de patru ori mai mic decât la instrumentele existente pe piață.

Contribuțiile Tezei

Cele mai importante elemente inovative găsite în cadrul cercetărilor sunt urătoarele:

- Calcularea erorilor minime care apar la un instrument de măsură, ce funcționează pe principiul analizei umbrelor de la surse multiple de lumină.
- Găsirea unei metode de a îmbunătăți precizia instrumentului de măsură pe axa X, prin introducerea unei citiri suplimentare.
- Găsirea unor metode de a mări precizia instrumentului prin calibrarea poziției LED-urilor.
- Găsirea unei metode de a elimina erorile de refracție care apar la trecerea razei de lumină din capsula LED-ului în aer iar apoi din aer în capsula senzorului optic.
- Găsirea unei metode de a efectua o calibrare globală a instrumentului, la care nu apar discontinuități datorate trecerii de la un LED la altul.
- Simularea mai multor tipuri de erori de măsură care apar într-un instrument, ce funcționează pe principiul analizei umbrelor de la surse multiple de lumină
- Simularea reducerii erorilor de măsură prin metoda de compensare a erorilor cu calibrare globală.
- Implementarea unui model experimental al unui instrument de măsură ce funcționează pe principiul analizei umbrelor de la surse multiple de lumină. Modelul experimental implementează o procedură de corectare a erorilor, bazată pe metoda de calibrare globală.
- Realizarea unui program care ghidează automat poziționările și citirile necesare pentru a realiza procedura de calibrare
- Efectuarea de măsurători cu modelul experimental și determinarea preciziei de măsurare a modelului, prin analiza statistică a rezultatelor măsurătorilor.

Lista de Publicații

- [1] A. Mocan and I. Ciascai, “A model for measuring the position of a pendulum using opto-electronic method,” *Acta Tech. Napocensis - Ser. Appl. Math. Mech. Eng.*, vol. 61, no. 4, pp. 603–608, Dec. 2018. Indexat Web of Science: 000453442200011.
- [2] A. Mocan and I. Ciascai, “Analysis of positioning errors for LED,” in *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 2019, pp. 127–130. <https://doi.org/10.1109/SIITME47687.2019.8990720>, Indexat IEEE Xplore și Web of Science: 000564733700026.
- [3] I. Ciascai and A. Mocan, “Calibration procedure for pendulum position measurement,” *ACTA Tech. NAPOCENSIS - Ser. Appl. Math. Mech. Eng.*, vol. 63, no. 1, pp. 21–26, 2020. Indexat Web of Science: 000528235300003.
- [4] I. Ciascai and A. Mocan, “A practical implementation for an instrument to measure displacement of pendulum wire,” in *2020 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, 2020, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ISETC50328.2020.9301046>, Indexat IEEE Xplore și Web of Science: 000612681000030.
- [5] A. Mocan, I. Ciascai, and A. Ciascai, “Simulations of Measurement Errors for a Pendulum Reader,” in *44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2021, <https://doi.org/10.1109/ISSE51996.2021.9467634>, Indexat în IEEE Xplore.

Cuprinsul integral al tezei

ABREVIERI	9
INTRODUCERE	11
STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII	15
1. Instalații pendulare.....	16
1.1. Eroarea dată de un curent de aer orizontal	18
1.2. Eroarea dată de forma de spirală a firului.....	20
1.3. Măsurarea manuală a poziției firului.....	22
1.3.1. Măsurarea manuală prin sistem optic	22
1.3.2. Măsurarea manuală prin sistem mecanic.....	23
1.4. Măsurarea automată a poziției firului.....	23
1.4.1. Măsurarea automată prin contact cu firul pendulului	23
1.4.2. Măsurarea automată prin senzor inductiv.....	24
1.4.3. Măsurarea automată prin senzor capacitiv	25
1.4.4. Măsurarea automată prin senzor optic.....	26
CONTRIBUȚIA PERSONALĂ.....	29
2. Obiective.....	30
3. Metodologie generală.....	31
4. Studiul erorilor de măsură.....	34
4.1. Introducere	34
4.2. Obiectiv	34
4.3. Material și Metodă	35
4.4. Rezultate	48
4.5. Discuții.....	49
4.6. Concluzii.....	49
5. Compensarea erorilor de măsură.....	51
5.1. Introducere	51
5.2. Ipoteza de lucru	51
5.3. Material și metodă	51
5.3.1. Metoda de calibrare cu o singură citire.....	54
5.3.2. Metoda de calibrare cu două citiri.....	56
5.3.3. Metoda de calibrare cu patru citiri.....	57
5.3.4. Studiul erorilor de refracție	60
5.3.5. Metoda de calibrare globală.....	66
5.4. Rezultate	76
5.5. Discuții.....	77
6. Simularea erorilor de măsură.....	78
6.1. Introducere	78
6.2. Obiective	78
6.3. Material și metodă	79
6.4. Rezultate	85
6.4.1. Simularea erorilor produse de rezoluția senzorului optic	85
6.4.2. Simularea erorilor generate de refracția din senzorul optic	86

6.4.3. Simularea erorilor generate de refracția din LED-uri	88
6.4.4. Simularea erorilor generate de poziționarea LED-urilor	90
6.4.5. Simularea erorilor globale generate de cele patru surse	96
6.4.6. Simularea metodei de corecție a erorilor prin calibrare globală	98
6.5. Discuții.....	100
6.6. Concluzii.....	101
7. Implementarea practică și măsurători.....	102
7.1. Introducere	102
7.2. Obiective	103
7.3. Material și metodă	103
7.3.1. Alegerea componentelor.....	103
7.3.2. Programul microcontrolerului	106
7.3.3. Măsurători	120
7.4. Rezultate	128
7.5. Discuții.....	132
7.6. Concluzii.....	133
8. Discuții generale	134
8.1. Instalarea în baraj	135
8.2. Direcții de cercetare ulterioare.....	137
9. Concluzii finale.....	139
9.1. Concluzii generale.....	139
9.2. Originalitatea și contribuțiile inovative ale tezei.....	140
REFERINȚE.....	142
LISTA FIGURILOR.....	150
LISTA TABELELOR	152
ANEXE.....	154
10. Măsurători efectuate cu calibrare prin grilă de 5mm	154
11. Arhitectura sistemului hardware	160
12. Arhitectura sistemului software	161
12.1. Diagrama de componente	161
12.2. Diagrama de clase pentru componenta Hardware	162
12.3. Diagramele de clase pentru componenta Measurement.....	163
13. Curriculum vitae.....	165
LISTĂ DE PUBLICAȚII	168

Referințe

- [1] E. Duflo and R. Pande, "Dams," *Q. J. Econ.*, vol. 122, no. 2, pp. 601–646, May 2007, doi: 10.1162/qjec.122.2.601.
- [2] I.-A. Moldovan *et al.*, "The Rating of Large Romanian Dams into Seismic Risk Classes," *Resilient Soc.*, p. 121, 2017.
- [3] W. Ge *et al.*, "A method for fast evaluation of potential consequences of dam breach," *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 11, p. 2224, Nov. 2019, doi: 10.3390/w11112224.
- [4] C. A. Brown and W. J. Graham, "Assessing the threat to life from dam failure," *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, vol. 24, no. 6, pp. 1303–1309, Dec. 1988, doi: 10.1111/j.1752-1688.1988.tb03051.x.
- [5] *Safety of Existing Dams: Evaluation and Improvement - National Research Council, Division on Engineering and Physical Sciences, Commission on Engineering and Technical Systems, Water Science and Technology Board, Committee on the Safety of Existing Dams -*. National Academy Press, 1983. ISBN: 0-309-03387-X
- [6] A. Popovici, R. Sarghiuta, I. Toma, and T. Moldoveanu, "Reevaluation of the seismic safety of a large arch dam commissioned thirty years ago," 1996, Accessed: Jun. 16, 2021. [Online]. Available: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_1706.PDF
- [7] C. Cragg, P. Hassan, and P. Toth, "A structured approach to assessing dam instrumentation and performance monitoring requirements," in *The Canadian Dam Association conference 2010: partnering for a safer future, Niagara Falls, ON (Canada, 2010*, pp. 1–13.
- [8] P. Bukenya, P. Moyo, H. Beushausen, and C. Oosthuizen, "Health monitoring of concrete dams: a literature review," *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 4, no. 4, pp. 235–244, Oct. 2014, doi: 10.1007/s13349-014-0079-2.
- [9] M. Wieland and B. H. Fan, "The activities of the International Commission on Large Dams (ICOLD) in the earthquake safety of large dams," Aug. 2004. Accessed: Jun. 16, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/268374291>
- [10] A. Popovici, "Ghid privind echiparea construcțiilor hidrotehnice de retenție cu aparatură de măsură și control," București, 2010.
- [11] A. Abdulamit, D. Stematiu, and D. Gaftoi, "AN ALTERNATIVE METHOD TO EVALUATE THE HEALTH STATUS FOR CONCRETE DAMS.," *Environ. Eng. Manag. J.*, vol. 15, no. 6, pp. 1297–1407, Jun. 2016, Accessed: Jun. 17, 2021. [Online]. Available: tinyurl.com/3xxka2rf
- [12] C. H. Loh, C. H. Chen, and T. Y. Hsu, "Application of advanced statistical methods for extracting long-term trends in static monitoring data from an arch dam," *Struct. Heal. Monit.*, vol. 10, no. 6, pp. 587–601, Nov. 2011, doi: 10.1177/1475921710395807.
- [13] W. D. Zhao, "Statistical Analysis of Monitoring Data for Daniel Johnson Dam," McGill University Libraries, 2003. [Online]. Available: <https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-QMM-80156&op=pdf&app=Library>
- [14] Task Committee to Revise Guidelines for Dam, *Monitoring Dam Performance: Instrumentation and Measurements*. American Society of Civil Engineers, 2018. ISBN: 9780784414828
- [15] G. Luzi, M. Crosetto, and O. Monserrat, "Advanced Techniques for Dam Monitoring," 2010. Accessed: Jun. 16, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/261180415>
- [16] L. Viman, S. Pop, and I. Ciascai, *Sisteme de achiziție de date: măsurarea traductoarelor cu coardă vibrantă și rezistive din construcțiile hidrotehnice*. Cluj-Napoca: Mediamira, 2015. ISBN: 978-973-713-322-8

- [17] S. Pop, V. Bande, D. Pitica, and I. Ciascai, "Dynamic measurement circuit for the resistive transducers," in *2012 IEEE 18th International Symposium for Design and Technology of Electronics Packages, SIITME 2012 - Conference Proceedings*, 2012, pp. 259–262. doi: 10.1109/SIITME.2012.6384387.
- [18] D. M. Ștefănescu, *Handbook of Force Transducers: Principles and Components*. Springer, 2011. ISBN: 978-3642182952
- [19] A. I. Moiescu, "Evaluation of the safe operation of hydrotechnical construction, through acquisition system, transmission and processing significant parameters," in *14th SGEM GeoConference on Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems*, Jun. 2014, vol. 1. doi: 10.5593/sgem2014/b31/s12.035.
- [20] A. Tavares, D. E. Castro, and M. J. Henriques, "Monitoring Planimetric Displacements in Concrete Dams," May 2008. [Online]: <https://tinyurl.com/ffxb25jw>
- [21] V. Bande and S. S. Pop, "Triaxial Vibrating - Wire Transducer Implementation and Measurements," in *SIITME 2019 - 2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, Proceedings*, Oct. 2019, pp. 122–126. doi: 10.1109/SIITME47687.2019.8990716.
- [22] J. Dunncliff, *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance | Wiley*. Wiley, 1993. ISBN: 978-0-471-00546-9
- [23] J. G. Webster and H. Eren, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Two-Volume Set*. CRC press, 2018. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315217109>.
- [24] G. Falkovich, *Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, 2018. ISBN: 9781107129566
- [25] C. S. Subramanian, H. Gurram, and P. L. Kanherkar, "A CFD and Experimental Study of Thin Flexible Wire in a Cross Flow," 2016, p. 134.
- [26] L. Viman, M. Dabacan, I. Ciascai, and S. Pop, "Embedded Microcontroller System for Reading Inductive Telependulum," in *2007 30th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, May 2007, pp. 425–428. doi: 10.1109/ISSE.2007.4432893.
- [27] "LEA_IT_PND4001001 Optical Coordinometer." Accessed: May 03, 2020. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/6jrr4sr6>
- [28] A. Gil, L. A. Arguedas, and M. G. De Membrillera, "A proposal to optimize maintenance of dam monitoring systems," 2012.
- [29] I. Ciascai, L. Viman, and S. Pop, *Măsurarea electrică a traductoarelor din construcțiile hidrotehnice*. Casa cărții de știință, 2006. ISBN: 973-686-981-4
- [30] American Society of Civil Engineers Task Committee on Instrumentation and Monitoring Dam Performance, *Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance*. ASCE, Reston, VA, 2000. ISBN: 0-7844-0531-X
- [31] "LEA_IT_PND3101000 Electromagnetic Telependulum." [Online]: <https://tinyurl.com/yd6hjbcc>
- [32] "Telependul capacitiv tip WPS-2AP." Accessed: May 06, 2020. [Online]. Available: http://www.automation.ro/pdf/fisa_prez_telependul_fogale.pdf
- [33] I. Ciascai, *Senzori*, 1st ed. Cluj-Napoca: U.T.PRESS, 2018. ISBN: 978-606-737-335-6
- [34] "Telependul tip TP 101-S." Accessed: May 06, 2020. [Online]. Available: http://www.automation.ro/pdf/fisa_prez_TP101_S.pdf
- [35] "Sistem optoelectronic de masurare a deplasării barajelor-telependul optic model TP202." Accessed: May 06, 2020. [Online]. Available: http://www.automation.ro/pdf/fisa_prez_pendulCCD.pdf
- [36] Huggenberger, "TELELOT VDD2/3," datasheet V4, Feb. 2019. [Online]: <https://tinyurl.com/nrsjddx7>
- [37] I. Ciascai, *Sisteme electronice dedicate cu microcontrolere AVR RISC*. Cluj-Napoca: Editura Casa Cărții de Știință, 2002. ISBN: 973-686-237-2

- [38] F. Tavernier and M. Steyaert, *High-Speed Optical Receivers with Integrated Photodiode in Nanoscale CMOS*. Springer New York, 2011. ISBN: 9781441999252
- [39] S. Pop, I. Ciascai, and D. Pitica, "Statistical analysis of experimental data obtained from the optical pendulum," in *2010 IEEE 16th International Symposium for Design and Technology of Electronics Packages, SIITME 2010*, Sep. 2010, pp. 207–210. doi: 10.1109/SIITME.2010.5653515.
- [40] J. Peatross and W. Michael, *Physics of Light and Optics*, 2015th ed. Lulu, 2015. ISBN: 9781312929272
- [41] WorldSemi, "Intelligent control LED integrated light source," WS2812B datasheet V5, Mar. 2019. Accessed: May 09, 2020. [Online]. Available: <http://www.worldsemi.com/DownloadFile/108>
- [42] L. E. Frenzel, *Handbook of Serial Communications Interfaces: A Comprehensive Compendium of Serial Digital Input/Output (I/O) Standards*. Elsevier Science, 2015. ISBN: 9780128006719
- [43] L. De Grandis, *Theory and Use of Color*. Abrams, 1986. ISBN: 9780810923171
- [44] TAOS, "1536 × 1 Linear Sensor Array With Hold," TSL1412S datasheet TAOS045F, Apr. 2007. Accessed: Jul. 18, 2018. [Online]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/203049/TAOS/TSL1412S.html>
- [45] I. Ciascai and L. Ciascai, "Acquire images with a sensor and a microcontroller," *EDN*, no. EDN | SEPTEMBER 23, 2010, p. 48, 2010.
- [46] J. R. (John R. Taylor, *An introduction to error analysis : the study of uncertainties in physical measurements*. University Science Books, 1997. ISBN: 093570275X
- [47] L. Wasserman, *All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference*. Springer New York, 2013. ISBN: 9780387217369
- [48] D. G. Zill and M. R. Cullen, *Advanced Engineering Mathematics;*, no. v. 1. Jones and Bartlett Publishers, 2006. ISBN: 9780763745912
- [49] S. M. Ross, *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. Elsevier Science, 2009. ISBN: 9780080919379
- [50] A. Mocan and I. Ciascai, "Analysis of positioning errors for LED," in *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Oct. 2019, pp. 127–130. doi: 10.1109/SIITME47687.2019.8990720.
- [51] M. N. Khan, *Understanding LED Illumination*. CRC Press, 2013. ISBN: 9781466507739
- [52] R. Khandpur, *Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, and Assembly: Design, Fabrication, and Assembly*. Mcgraw-hill, 2005. ISBN: 9780071464208
- [53] P. D. Rufe, *Fundamentals of Manufacturing, Second Edition*. Society of Manufacturing Engineers, 2002. ISBN: 9780872635241
- [54] L. J. Zheng *et al.*, "Experimental Study of Micro-holes Position Accuracy on Drilling Flexible Printed Circuit Board," in *Global Conference on Sustainable Manufacturing*, 2013, pp. 268–272. ISBN: 9783798326095
- [55] Foryard Optoelectronics, "FYL-5013PURD1C PRODUCT SPECIFICATION," datasheet A. [Online]. Available: http://www.foryard.com/x-en/p-download/d-Part/u-f/m-1/n-f_FYL-5013PURD1C/y-179
- [56] "IPC-2222 Sectional Design Standard for Rigid Organic Printed Boards," 1998. Accessed: Aug. 03, 2019. [Online]. Available: <http://www.ipc.org/toc/ipc-2222.pdf>
- [57] R. STRAUSS, *SMT Soldering Handbook*. Elsevier Science, 1998. ISBN: 9780080480978
- [58] C. T. Robertson, *Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004. ISBN: 9780130674814
- [59] A. E. Schwaneke, W. L. Falke, and U. S. B. of Mines, *Surface Tension and Density of Liquid Tin*. U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, 1970. [Online]. Available:

<https://books.google.ro/books?id=KgGoD682BQgC>

- [60] R. Prasad, *Surface Mount Technology: Principles and Practice*. Springer US, 2013. ISBN: 9781461540847
- [61] T. L. Landers, *Electronics Manufacturing Processes*. Prentice Hall, 1994. ISBN: 9780131764705
- [62] S. Pop, I. Ciascai, V. Bande, and D. Pitica, "Modeling the light of LED's for position detection with an optical sensor," in *33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2010*, May 2010, pp. 374–377. doi: 10.1109/ISSE.2010.5547321.
- [63] B. D. Guenther, *Modern optics*. Wiley, 1990. ISBN: 0471605387
- [64] J. P. Dakin and R. Brown, *Handbook of Optoelectronics: Concepts, Devices, and Techniques (Volume One)*. CRC Press, 2017. ISBN: 9781482241792
- [65] B. Crowell, *Optics. Light and Matter*, 2003. ISBN: 0970467052
- [66] R. Larson, R. P. Hostetler, and B. H. Edwards, *Trigonometry: A Graphing Approach*. D.C. Heath, 1995. ISBN: 9780669282962
- [67] B. Riegler and R. Thomaier, "Index matching silicone for optoelectronic applications," in *New Developments in Optomechanics*, Sep. 2007, vol. 6665, p. 666508. doi: 10.1117/12.735950.
- [68] I. Ciascai and A. Mocan, "Calibration procedure for pendulum position measurement," *Acta Tech. Napocensis - Ser. Appl. Math. Mech. Eng.*, vol. 63, no. 1, pp. 21–26, 2020, [Online]. Available: <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/1286>
- [69] D. Kirk and O. for Higher Education (Firm), *Graphics Gems III (IBM Version)*. Morgan Kaufmann, 2012. ISBN: 978-0-12-409673-8
- [70] A. Mocan and I. Ciascai, "A model for measuring the position of a pendulum using optoelectronic method," *Acta Tech. Napocensis - Ser. Appl. Math. Mech. Eng.*, vol. 61, no. 4, pp. 603–608, Dec. 2018, Accessed: Feb. 16, 2019. [Online]. Available: <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/1101>
- [71] Jon Skeet, *C# in Depth*, 3rd ed. 2017. ISBN: 9781548844738
- [72] J. Greene and A. Stellman, *Head First C#: A Learner's Guide to Real-World Programming with C#, XAML, and .NET*. " O'Reilly Media, Inc.," 2013. ISBN: 9781449358884
- [73] H. Buckley, *WPF for IT Students*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. ISBN: 9781533040282
- [74] C. Sells and I. Griffiths, *Programming Windows presentation foundation*, 2nd ed. " O'Reilly Media, Inc.," 2007. ISBN: 978-0-596-51037-4
- [75] A. Thorn, *DirectX 9 User Interfaces: Design and Implementation*. Wordware Pub., 2004. ISBN: 9781556222498
- [76] C. Sells, *Windows Forms Programming in C#*. Addison-Wesley, 2004. ISBN: 9780321116208
- [77] F. Yuan, *Windows Graphics Programming: Win32 GDI and DirectDraw*. Prentice Hall PTR, 2001. ISBN: 9780130869852
- [78] M. J. Price, *C# 8.0 and .Net Core 3.0*, 4th ed. Packt Publishing, 2019. ISBN: 978-1788478120
- [79] S. Gamse, M. J. Henriques, and M. Oberguggenberger, "Assessment of long term pendulum and geodetic observations on a concrete arch dam," in *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring*, 2016, pp. 1–8. Accessed: May 14, 2021. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/ep22h89s>
- [80] A. Mocan, I. Ciascai, and A. Ciascai, "Simulations of Measurement Errors for a Pendulum Reader," May 2021. doi: <https://doi.org/10.1109/ISSE51996.2021.9467634>.
- [81] STMicroelectronics, "Medium-density performance line ARM-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 communication interfaces,"

- STM32F103x8, STM32F103xB datasheet 13587; Rev 17, Aug. 2015. Accessed: Jun. 12, 2020. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>
- [82] D. Norris, *Programming with STM32 : getting started with the Nucleo Board and C/C++*. 2018. ISBN: 9781260031317 1260031314
- [83] "Software development tools STM32 and STM8 microcontrollers," Jan. 2021. Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/3ykcyv4z>
- [84] B. W. Kernighan, *C Programming Language (2E)*. Prentice Hall, 2005. ISBN: 9780131193710
- [85] B. Stroustrup, *The C++ Programming Language*. Addison-Wesley, 2000. ISBN: 9780201700732
- [86] S. Klabnik and C. Nichols, *The Rust Programming Language*. No Starch Press, 2019. ISBN: 9781718500457
- [87] K. Nacke, *Learn LLVM 12: A beginner's guide to learning LLVM compiler tools and core libraries with C++*. Packt Publishing, 2021. ISBN: 9781839210037
- [88] W. von Hagen, *The Definitive Guide to GCC*. Apress, 2011. ISBN: 9781430202196
- [89] R. Clark, "Arduino STM32 NeoPixels (WS2812B) using SPI DMA," 2017. <https://www.rogerclark.net/arduino-stm32-neopixels-ws2812b-using-spi-dma/> (accessed Jun. 13, 2020).
- [90] W. Gay, *Beginning STM32*. Apress, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3624-6>.
- [91] E. White, *Making Embedded Systems: Design Patterns for Great Software*. 2011. ISBN: 9781449320584
- [92] R. Oshana, Ed., *DSP for Embedded and Real-Time Systems*. Newnes, 2012. doi: 10.1016/C2010-0-67143-4.
- [93] P. Acarnley, *Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice*. Institution of Engineering and Technology, 2002. ISBN: 9780852964170
- [94] D. S. Nyce, *Position Sensors*. Wiley, 2016. ISBN: 9781119069355
- [95] I. Griffiths, *Programming C# 8.0: build cloud, web, and desktop applications*. O'Reilly Media, Inc., 2020. ISBN: 978-1492056812
- [96] "Asynchronous programming in C# | Microsoft Docs." <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/programming-guide/concepts/async/> (accessed Jul. 07, 2020).
- [97] J. E. Gentle, *Random Number Generation and Monte Carlo Methods*, 2nd ed. Springer, 2005. ISBN: 0387001786
- [98] D. Pilone and N. Pitman, *UML 2.0 in a Nutshell*. O'Reilly, 2005. ISBN: 9780596007959
- [99] R. S. Polimeni, F. J. Fabozzi, A. H. Adelberg, and J. A. Burke, *Product Costing: Concepts and Applications*. McGraw-Hill Higher Education, 1999. ISBN: 9780072390841
- [100] G. K. Mislick and D. A. Nussbaum, *Cost Estimation: Methods and Tools*. Wiley, 2015. ISBN: 9781118536131
- [101] "Coordiscop pentru masurare penduli-2 bucati," 2015. <https://www.licitatie-publica.ro/licitatii/coordiscop-pentru-masurare-penduli-2-bucati?uuid=49f2769a-7461-11e5-ae8-002655ffd6c8> (accessed Jun. 26, 2021).
- [102] "DWL9000XY 2-Axis Ultra Precision Inclinometer," User manual, 2021. Accessed: Jun. 06, 2021. [Online]. Available: www.digipas.com
- [103] P. J. Hoffman, *Precision Machining Technology*. Delmar Cengage Learning, 2012. ISBN: 9781111308063
- [104] G. Strang, *Introduction to Linear Algebra*. Wellesley-Cambridge Press, 1993. ISBN: 9780961408824
- [105] D. Hestenes, *New Foundations for Classical Mechanics*. Dordrecht: Kluwer Academic

Publishers, 1999. ISBN: 0-7923-5514-8

- [106] I. Prasojo, A. Maseleno, O. tanane, and N. Shahu, "The Design of Earthquake Detector Using Pendulum Swing Based on ATMEGA328," *J. Robot. Control*, vol. 2, no. 3, pp. 209–211, May 2021, doi: 10.18196/jrc.2380.
- [107] D. Regalado et al., *Gray Hat Hacking The Ethical Hacker's Handbook*, 5th ed. McGraw-Hill, 2018. ISBN: 9781260108422