



UNIVERSITATEA POLITEHNICA  
DIN BUCUREȘTI

Școala Doctorală de Inginerie Mecanică și  
Mecatronică



## TEZA DE DOCTORAT - REZUMAT

Cercetări teoretice și experimentale privind comportarea dinamica a  
sistemelor medicale bazate pe laseri

Prof. Coordonator:  
Prof. Dr. Ing. Mihai AVRAM

Doctorand:  
Drd. Ing. Emil Ionuț NIȚĂ

BUCUREȘTI, 2025

# Cuprins

<b>Obiectivele tezei</b>	<b>1</b>
<b>1. Analiza problemei</b>	<b>3</b>
1.1. Dispozitive chirurgicale laser	4
1.1.1. Bisturiu laser pentru stomatologie - Wiser 3	6
1.1.2. Bisturiu laser pentru electrocricurgie – Limax	7
1.1.3. Bisturiu laser cu CO2 pentru chirurgie – Beacon	8
1.1.4. Sistemul LS-1005 de la LightScalpel	9
1.2. Dispozitive mobile de amortizare a vibrațiilor	10
1.2.1. Exoschelet pentru amortizarea tremorului - Integrated Wearable Robot	11
1.2.2. Exoschelet pentru amortizarea tremorului – WOTAS	12
1.2.3. Manusă cu amortizare activa a tremorului - Wearable Tremor Suppression Glove	13
1.2.4. Dispozitiv tip tacâm cu autostabilizare – Liftware	14
1.3. Analiza dispozitivelor din domeniul microchirurgiei	15
1.3.1. Brat robotic hibrid - Steady hand	16
1.3.2. Sistem de microchirurgie cu amortizare activa a tremorului – Micron	17
1.3.3. Scanner laser actionat magnetic - Magnetic Laser Scanner	18
1.3.4. Dispozitiv terminal de deviație a fasciculului laser	19
1.3.5. Dispozitiv mecatronic pentru detecția și compensarea tremorului	20
1.3.6. Sistem laser cu amortizare a tremorului utilizând unde acustice	21
1.3.7. Dispozitiv “inteligent” de compensare a tremorului mâinii pentru OCT	22
1.3.8. Platformă cu 3 grade de libertate utilizând articulații compliante	24
1.4. Analiza sistemelor existente	25
<b>2. Analiza tremorului și metode de compensare</b>	<b>28</b>
2.1. Analiză detaliată a tremorului mâinii	28
2.1.1. Descrierea standului experimental de analiza a tremorului mâinii	28
2.1.2. Descrierea procedurii de testare	31
2.1.3. Etapa 1 de testare	33
2.1.4. Etapa 2 de testare	39
2.1.5. Concluzii	45
2.2. Metode de compensare a tremorului	46
2.2.1. Metoda de compensare pasivă a vibrațiilor	47
2.2.2. Metode de compensare activă	48
2.2.2.1. Metode mecanice de compensare a tremorului	48
2.2.2.2. Metode optice de compensare a tremorului	52
2.2.2.2.1. Cazuri de compensare optică a tremorului cu lentile convergente, fără rotația mâinii	52
2.2.2.2.2. Cazuri de compensare optică a tremorului cu lentile convergente, cu rotația mâinii	57
2.2.3. Exemplu de calcul pentru compensarea tremorului pe cele 5 axe utilizând trei translații	60
2.3. Dezvoltare și modele experimentale	63
2.4. Concluzii	65
<b>3. Analiza teoretică a mecanismului de poziționare</b>	<b>68</b>
3.1. Proiectarea mecanismului compliant de amplificare	72
3.2. Modelarea 3D a dispozitivului de amplificare	74
3.3. Ecuațiile cinematice ale mecanismului de amplificare	78
3.4. Simularea modelului matematic al mecanismului de amplificare	82
3.5. Analiza cu element finit a amplificatorului mecanic	88
3.6. Influența parametrilor constructivi ai articulației cilindrice compliante	93
3.7. Concluzii	95
<b>4. Analiza experimentală a dispozitivului de poziționare</b>	<b>97</b>
4.1. Debitarea și verificarea metrologică	98
4.2. Analiza statică a amplificatorului mecanic cu metoda corelării digitale a imaginilor	99

4.3.	Validarea analizei teoretice cu testarea experimentală	100
4.4.	Analiza transmisibilității mecanismului de amplificare mecanică	106
4.4.1.	Performanțele standului de test	107
4.4.2.	Testarea transmisibilității vibrațiilor între baza și brațul superior ale amplificatorului	108
4.5.	Analiza actuatorilor piezoelectricei	110
4.5.1.	Analiza caracteristicii tensiune deplasare	111
4.5.2.	Analiza modală a actuatorilor piezoelectricei	115
4.6.	Analiza ansamblului actuator piezoelectric – mecanism de amplificare	116
4.6.1.	Analiza tensiune deplasare a subansamblului	117
4.6.2.	Analiza transmisibilității subansamblului	119
4.6.3.	Analiza răspunsului în frecvență a subansamblului mecanic	121
4.7.	Concluzii	122
<b>5.</b>	<b>Realizarea prototipului de bisturiu laser cu amortizare activa a tremorului mâinii</b>	<b>124</b>
5.1.	Descrierea ansamblului final	124
5.2.	Proiectarea articulației centrale	126
5.3.	Proiectarea articulației sferice	128
5.4.	Analiza modală a prototipului	132
5.5.	Concluzii	133
<b>6.</b>	<b>Analiza performanțelor sistemului de poziționare laser</b>	<b>134</b>
6.1.	Validarea procesării de imagine	135
6.2.	Caracteristica tensiune deplasare a bisturiului laser	140
6.3.	Performanțele de compensare, pentru o axă, a bisturiului laser	142
6.4.	Concluzii	143
<b>7.</b>	<b>Strategia de compensare a tremorului mâinii pentru prototipul dezvoltat</b>	<b>145</b>
7.1.	Compensarea vibrației de translație, pe o singură axă	145
7.2.	Compensarea vibrației de translație, pe două axe	146
7.3.	Compensarea vibrației de translație, pe trei axe	147
7.4.	Compensarea vibrației de rotație într-un singur plan	148
7.5.	Compensarea vibrației compuse dintr-o translație și o rotație în plan	149
7.6.	Compensarea vibrației compuse din două translații și o rotație în plan	150
7.7.	Compensarea vibrației compuse din trei translații și două rotații în spațiu	151
7.8.	Analiza limitelor pentru parametrii de intrare	153
7.9.	Concluzii	155
<b>8.</b>	<b>Determinarea parametrilor funcției de reglare pentru o singură axă</b>	<b>156</b>
8.1.	Descrierea standului experimental	157
8.2.	Analiza rezultatelor	162
	<b>Concluzii și dezvoltări ulterioare</b>	<b>172</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>176</b>
	<b>Anexa 1</b> – Rezultate experimentale analiza tremor	
	<b>Anexa 2</b> – Program MATLAB pentru standul experimental de analiza a tremorului	
	<b>Anexa 3</b> – Raportul de testare al materialului utilizat pentru amplificatorul mecanic	
	<b>Anexa 4</b> – Rezultatele experimentale pentru testele de transmisibilitate	
	<b>Anexa 5</b> – Rezultatele experimentale pentru răspunsul în frecvență	
	<b>Anexa 6</b> – Program LabVIEW utilizat pentru analiza semnalelor de amortizare	
	<b>Anexa 7</b> – Program MATLAB de prelucrare a datelor	

## Rezumatul tezei

Datorită avansului tehnologic în domeniul electronicii din ultimul deceniu, ce deschide posibilitatea utilizării miliardelor de tranzistori într-un singur circuit integrat [1,2] a apărut o dezvoltare exponențială a microsistemelor de calcul, procesoarelor și microcontrolerelor. Având un sistem de calcul performant, cu posibilități de miniaturizare și proiectare personalizată, domeniile ce au la bază circuitele integrate (*IC-Integrated Circuit*) au avut și ele un progres consistent în ultimii ani. De exemplu, industria laserilor dezvoltă în prezent sisteme de generare a fasciculului laser cu puteri de ordinul petawaților [3], cu aplicații în fizica nucleară, pe baza unei metode ”*de generare a impulsurilor optice ultra-scurte de intensitate mare*”, propuse de Gérard Mourou și Donna Strickland în anul 2018[4].

Un alt beneficiu major adus de evoluția electronicii și accesibil publicului larg este reprezentat de dispozitivele de monitorizare medicale, precum brățările și ceasurile inteligente, ce conțin senzori miniaturali și algoritmi de calcul specializați pentru măsurarea nivelului de stres, saturației de oxigen în sânge, bătailor inimii și nu în ultimul rând calitatea somnului. Inovația continuă și la nivelul sistemelor medicale specializate, precum roboții teleoperați pentru intervenții chirurgicale complexe [5–7] dar și la nivelul dispozitivelor medicale operate manual, care beneficiază acum de sisteme de asistență și mecanisme de amortizare activă a vibrațiilor[8–10].

Lucrarea își propune combinația între cele două domenii, domeniul laserilor și domeniul medical, tratând analiza și proiectarea unui dispozitiv laser, operat manual, cu aplicații în primul rând în microchirurgie. Sistemul are rolul de a exploata la maxim caracteristicile esențiale ale laserilor cu aplicație în domeniul medical: chirurgie fără contact, spot focal de dimensiuni de ordinul zecilor de microni, putere mare în impuls și rata de repetiție mare. Dispozitivul laser va beneficia de un sistem de compensare a vibrațiilor pentru a se asigura un act chirurgical perfect, de mare precizie și ultra stabil.

Sistemele actuale microchirurgicale se bazează pe capacitatea medicului chirurg de a realiza deplasări de mare finețe și cu un nivel foarte redus de vibrație la punctul final. Acest deziderat impune personal foarte competent și limitează durata de muncă, limitează tipurile de proceduri microchirurgicale și limitează calitatea celor efectuate. Prin urmare, reducerea eficienței a mișcării

involuntare sau nedorite în microchirurgie (a tremorului<sup>1</sup> mâinii chirurgului), nu numai că ar îmbunătăți acuratețea procedurilor existente, dar ar putea deschide calea către noi tipuri de proceduri. Mai mult de atât, realizarea unui dispozitiv mobil de operare ar mari flexibilitatea chirurgului, crescând posibilitatea de a opera în medii dezavantajate economic sau cu resurse umane specializate reduse.

Microchirurgia vitreoretinală a fost motorul central al aplicațiilor chirurgicale ce utilizează fascicul laser deoarece este printre cele mai exigente specialități în ceea ce privește manipularea de precizie și impune, până în prezent, utilizarea unor sisteme de poziționare robotizate. Trecerea de la operarea asistată de sisteme mecatronice la operare manuală impune anumite limitări asupra preciziei de lucru, din cauza construcției anatomice a corpului uman. Aceste limitări sunt reprezentate, în mare parte, de așa numitul tremor fiziologic, *care reprezintă mișcarea involuntară, oscilatorie și ritmică rezultată în urma contracțiilor mușchilor agoniști și antagoniști, antrenată de un semnal provenit de la sistemul nervos*[11,12]. Prin utilizarea unui sistem senzorial de măsurare a unui astfel de semnal, se pot utiliza diverse mecanisme de amortizare activă care să suprimă acțiunea tremorului ce afectează actul chirurgical, crescând astfel precizia de lucru. Pentru determinarea optimă a structurii mecanice, dar și a modului de acționare, este necesară analiza soluțiilor de poziționare existente, cu posibilitate de miniaturizare.

Ca urmare, obiectivele lucrării de doctorat sunt următoarele:

- analiza problemei (tremorul fiziologic),
- analiza metodelor de compensare ale tremorului,
- analiza sistemelor mecanice utilizate în compensarea vibrațiilor,
- analiza metodelor de acționare și modelarea matematică,
- proiectarea unui prototip la scară macro
- analiza posibilităților de miniaturizare

Lucrarea urmărește analiza teoretică și experimentală a dezvoltării unui dispozitiv demonstrativ de utilizat pentru amortizarea activă a tremorului mâinii. Dispozitivul optomecatronic este gândit pentru aplicații medicale, unde tremorul mâinii are un impact major chiar și pentru amplitudini mici. Pentru a concepe un astfel de dispozitiv s-a realizat în Capitolul 1 o analiză atentă a literaturii existente de sisteme de compensare a vibrațiilor dar și a dispozitivelor

---

<sup>1</sup> Mișcare ușoară, involuntară, rapidă, repetată a corpului sau a unei părți a acestuia

deja existente pe piață. Conform studiilor menționate în lucrările [6-16], s-au identificat orientativ parametrii dinamici care descriu mișcarea oscilatorie a mâinii, adică tremorul, precum și parametrii de intrare necesari pentru sistemul de compensare a vibrațiilor. Având în vedere domeniul medical în care dispozitivul propus trebuie utilizat, cercetarea se concentrează asupra compensării vibrațiilor cu amplitudine micrometrică (aproximativ 150  $\mu\text{m}$  vârf la vârf) într-o bandă de frecvențe între 5 și 15 Hz.

În urma analizei lucrărilor existente, s-au conturat două direcții principale de cercetare:

1. Alegerea senzorilor potriviți și implementarea prelucrării digitale a semnalelor obținute, pentru determinarea direcției, sensului și amplitudinii oscilațiilor.
2. Realizarea unui sistem de micro-poziționare capabil să efectueze deplasări minime de 300  $\mu\text{m}$  ( $\pm 150 \mu\text{m}$ , dublul amplitudinii tremorului) și să ofere un răspuns dinamic excelent în banda de frecvență specifică tremorului.

Capitolul 2 debutează prin prezentarea unei metode experimentale noi de măsură pentru tremorul mâinii care să confirme literatura de specialitate analizată în primul capitol. Deși persoanele analizate nu sunt medici chirurghi specializați, rezultatele confirmă banda de frecvențe anterior menționată și s-a impus amplitudinea vibrației de translație la 150  $\mu\text{m}$  vf- vf și un unghi maxim de rotație al mâinii de 0.3°. După analiză experimentală a tremorului, capitolul 2 tratează posibile scenarii de compensare pentru diferite tipuri de dispozitive ce pot fi dezvoltate.

Scenariile de compensare prezentate în Capitolul 2 iau în calcul diferite configurații și diferite geometrii pentru dispozitivul optomecatronic. Realizarea experimentală prin imprimare 3D a acestor dispozitive a fost un factor cheie în continuarea cercetării și au contribuit la o înțelegere bună a fenomenului.

În capitolul 3 se stabilește structura dispozitivului de compensare, respectiv geometria acestuia, și se optează pentru dezvoltarea unui sistem demonstrativ, care să exemplifice cât mai bine fenomenul fizic, premergător pentru un sistem mult mai compact dar bazat pe aceleași caracteristici funcționale. S-a optat pentru realizarea unui sistem la scară macro, care să aibă un mecanism de amplificare compliant, proiectat și dezvoltat special pentru aplicația în cauză.

Analiza teoretică, atât prin modelul matematic realizat analitic dar și prin metode mai performante, cum ar fi analiza cu element finit, confirmă că principiul de compensare abordat este fezabil și permite trecerea în faza de analiză experimentală a sistemului. Mai mult de atât,

verificarea comparativă între metodele de analiză teoretice confirmă metodele abordate în lucrare, eroarea dintre modelele teoretice fiind sub 3%.

Capitolul 4 tratează analiza experimentală a subansamblurilor mecanice ale dispozitivului, din punct de vedere structural, static și dinamic. Capitolul debutează cu realizarea practică a amplificatoarelor mecanice și analiza acestora. Rezultatele experimentale obținute prin tehnici de testare inovative (realizarea hărților de deplasare a amplificatorului mecanic prin metoda DIC – *Digital Image Correlation* cu sistemul ARAMIS de la ZEISS combinată cu mașina de încărcare) dar și prin intermediul unor standuri clasice de analiză modală confirmă corelarea cu analiza teoretică realizată în capitolul anterior.

Analiza statică și dinamică a transmisibilității vibrațiilor indică o eroare de 8%, respectiv de 3.2%, confirmând că structura de comandă a fost proiectată corect și poate fi utilizată pentru a montajul final și pentru a demonstra principiul de compensare. Analiza răspunsului în frecvență a arătat că frecvențele de rezonanță ale mecanismului, respectiv ale subansamblului, nu interferează cu domeniul operațional critic pentru aplicația finală. S-a confirmat faptul că mecanismul și actuatorii piezoelectrice pot fi integrați cu succes în dispozitivul laser de poziționare, asigurând atât precizia, cât și stabilitatea necesare pentru dezvoltarea prototipului de bisturiului laser cu amortizare activă a tremorului mâinii.

Capitolul 5 prezintă ansamblul final și analiza teoretică a articulațiilor ce îmbină piesele mobile ale dispozitivului. Articulația centrală a fost proiectată să minimizeze diametrul bisturiului laser, să permită rotații ale diodei laser cu un unghi impus de minim  $0.2^\circ$  și să aibă un tub interior prin care pot fi trecute firele de alimentare și de comandă ale viitorului laser.

Articulațiile sferice (firele metalice) au impus testări experimentale suplimentare datorită limitărilor de calcul. Acest lucru a presupus determinarea experimentală ale pozițiilor finale pentru punctele de contact dintre actuatorul piezoelectric și cele două brațe ale amplificatorului mecanic (brațul inferior și brațul mijlociu). Utilizând aceste puncte drept puncte de intrare în analiza cu element finit s-a putut dimensiona înălțimea firului metalic care joacă rolul de articulație sferică și s-a putut realiza ansamblul final.

Verificarea ipotezei de compensare a unor vibrații cunoscute, induse în baza sistemului, este prezentată în Capitolul 6. Pentru această analiză s-a realizat un stand experimental special, dedicat pentru această aplicație. Partea cea mai complexă este reprezentată de postprocesarea imaginilor care capturează deplasarea spotului laser și analiza acestei deplasări în diverse etape.

Calibrarea sistemului joacă un rol important pentru validarea măsurătorilor, reprezentând primul pas în verificarea ipotezei de compensare. Ridicarea caracteristicii tensiunea deplasare ne indică unghiul maxim de inclinare obținut iar analiza strategiei de compensare manuală confirmă o reducere a efectului pe care îl au vibrațiile la nivelul spotului laser cu aproximativ 70%.

După ce ipoteza de reducere a vibrațiilor a fost confirmată, Capitolul 7 tratează strategia de compensare pentru structura dezvoltată și determină analitic relațiile de compensare dintre amplitudinea vibrației de translație și de rotație și unghiurile de rotație ale platformei mobile.

Ținând cont de aceste relații de compensare și de geometria sistemului, se poate realiza o versiunea ulterioară a dispozitivului, miniaturizată, ușurând procesul de dezvoltare. Sistemul de ecuații trebuie integrat în algoritmul final de compensare la care trebuie adăugate și relațiile determinate experimental în Capitolul 8.

În Capitolul 8 se efectuează analiza experimentată a transmisibilității vibrațiilor pentru un singur amplificator și metoda de compensare pentru banda de frecvențe impusă. Acest test are rolul de a determina efectiv frecvența semnalului de compensare, amplitudinea acestuia dar și defazajul față de semnalul de intrare. Standul este automatizat pe baza unui program special dezvoltat în LabVIEW iar postprocesarea datelor achiziționate a fost realizată în MATLAB.

Toate aceste teste confirmă, atât la nivel de subsistem cât și la nivel de sistem, ca acest concept propus la începutul cercetării este realizabil și poate fi implementat pe viitor în dispozitive specializate din domeniul microchirurgiei. Această abordare ar aduce îmbunătățiri semnificative actului chirurgical dar ar putea deschide și calea către noi proceduri care sunt realizate exclusiv robotizate în acest moment.

Continuarea cercetării în cadrul unor lucrări viitoare ar trebui să se concentreze pe miniaturizarea sistemului și dezvoltarea unui algoritm de control pe trei axe. Eliminarea sistemului de amplificare și introducerea unor actuatori mult mai compacți, dar care să poată dezvolta aceeași cursă este esențială pentru încadrarea în gabarit care să fie cât mai aproape de bisturiile laser actuale. Plecând de la cercetările efectuate în această lucrare, atât teoretice, la nivel de model matematic, cât și la nivel experimental, se poate accelera semnificativ dezvoltarea unui astfel de dispozitiv optomecatronic pentru domeniul medical.



## Bibliografie

1. Porter, J. Apple Says New Arm-Based M1 Chip Offers the ‘Longest Battery Life Ever in a Mac’ Available online: <https://www.theverge.com/2020/11/10/21558095/apple-silicon-m1-chip-arm-macs-soc-charge-power-efficiency-mobile-processor> (accessed on 14 May 2025).
2. Frumusanu, A. Huawei Announces Mate 40 Series: Powered by 15.3bn Transistors 5nm Kirin 9000 Available online: <https://www.anandtech.com/show/16156/huawei-announces-mate-40-series> (accessed on 14 May 2025).
3. World’s Most Powerful Laser Developed by Thales and ELI-NP Achieves Record Power Level of 10 PW | Thales Group Available online: <https://www.thalesgroup.com/en/group/journalist/press-release/worlds-most-powerful-laser-developed-thales-and-eli-np-achieves> (accessed on 14 May 2025).
4. The Nobel Prize in Physics 2018 Available online: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/> (accessed on 14 May 2025).
5. Lanfranco, A.R.; Castellanos, A.E.; Desai, J.P.; Meyers, W.C. Robotic Surgery: A Current Perspective. *Ann. Surg.* **2004**, *239*, 14–21, doi:10.1097/01.sla.0000103020.19595.7d.
6. Rusch, M.; Hoffmann, G.; Wieker, H.; Bürger, M.; Kapahnke, S.; Berndt, R.; Rusch, R. Evaluation of the MMI Symani® Robotic Microsurgical System for Coronary-Bypass Anastomoses in a Cadaveric Porcine Model. *J. Robot. Surg.* **2024**, *18*, 168, doi:10.1007/s11701-024-01921-x.
7. Probst, P. A Review of the Role of Robotics in Surgery: To DaVinci and Beyond! *Mo. Med.* **2023**, *120*, 389–396.
8. MacLachlan, R.A.; Becker, B.C.; Tabares, J.C.; Podnar, G.W.; Lobes, L.A.; Riviere, C.N. Micron: An Actively Stabilized Handheld Tool for Microsurgery. *IEEE Trans. Robot.* **2012**, *28*, 195–212, doi:10.1109/TRO.2011.2169634.
9. Yang, S.; MacLachlan, R.A.; Riviere, C.N. Manipulator Design and Operation of a Six-Degree-of-Freedom Handheld Tremor-Canceling Microsurgical Instrument. *IEEEASME Trans. Mechatron.* **2015**, *20*, 761–772, doi:10.1109/TMECH.2014.2320858.
10. Becker, B.C.; MacLachlan, R.A.; Lobes, L.A.; Riviere, C.N. Semiautomated Intraocular Laser Surgery Using Handheld Instruments. *Lasers Surg. Med.* **2010**, *42*, 264–273, doi:10.1002/lsm.20897.
11. Anouti, A.; Koller, W.C. Tremor Disorders. Diagnosis and Management. *West. J. Med.* **1995**, *162*, 510–513.
12. Everything You Need to Know About Tremors Available online: <https://www.healthline.com/health/tremor> (accessed on 10 July 2021).
13. Tremorul esențial, o boală progresivă cu prognostic bun, la o diagnosticare corectă și un tratament adecvat - Viața Medicală Available online: <https://www.viata-medicala.ro/ars-medici/tremorul-esential-o-boala-progresiva-cu-prognostic-bun-la-o-diagnosticare-corecta-si-un-tratament-adecvat-14640> (accessed on 14 May 2025).
14. Ang, W.T.; Pradeep, P.K.; Riviere, C.N. Active Tremor Compensation in Microsurgery. In Proceedings of the The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society; IEEE: San Francisco, CA, USA, 2004; Vol. 3, pp. 2738–2741.
15. Sandoval, R.; MacLachlan, R.A.; Oh, M.Y.; Riviere, C.N. Positioning Accuracy of Neurosurgeons. In Proceedings of the 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society; IEEE: Lyon, France, August 2007; pp. 206–209.

16. Song, C.; Gehlbach, P.L.; Kang, J.U. Active Tremor Cancellation by a “Smart” Handheld Vitreoretinal Microsurgical Tool Using Swept Source Optical Coherence Tomography. *Opt. Express* **2012**, *20*, 23414, doi:10.1364/OE.20.023414.
17. Khalkhal, E.; Rezaei-Tavirani, M.; Zali, M.R.; Akbari, Z. The Evaluation of Laser Application in Surgery: A Review Article. *J. Lasers Med. Sci.* **2019**, *10*, S104–S111.
18. Brochure\_wiser\_3. Available online: [https://www.doctor-smile.com/wp-content/uploads/2024/03/1.-Brochure\\_Wiser-3\\_EN.pdf](https://www.doctor-smile.com/wp-content/uploads/2024/03/1.-Brochure_Wiser-3_EN.pdf) (accessed on 14 May 2025)
19. Nd:YAG Laser Limax® 120 Available online: <https://www.klsmartin.com/en/products/surgical-laser-systems/diode-pumped-ndyag-laser/limax-120/> (accessed on 14 May 2025).
20. Advanced CO2 Laser Systems » OmniGuide Surgical. *OmniGuide*. Available online: <https://www.omni-guide.com/technology/co2/> (accessed on 14 May 2025)
21. Instrumentation for Advanced Energy CO2 Lasers » OmniGuide Surgical. *OmniGuide*. Available online: <https://www.omni-guide.com/technology/co2/instrumentation/> (accessed on 14 May 2025)
22. LS-1005 - Surgical / Dental CO2 Laser System. *LightScalpel*. Available online: <https://www.lightscalpel.com/products/co2-lasers/ls-1005-soft-tissue-dental-surgical-laser/> (accessed on 14 May 2025)
23. Huen, D.; Liu, J.; Lo, B. An Integrated Wearable Robot for Tremor Suppression with Context Aware Sensing. In Proceedings of the 2016 IEEE 13th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN); June 2016; pp. 312–317.
24. Rocon, E.; Belda-Lois, J.M.; Ruiz, A.F.; Manto, M.; Moreno, J.C.; Pons, J.L. Design and Validation of a Rehabilitation Robotic Exoskeleton for Tremor Assessment and Suppression. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* **2007**, *15*, 367–378, doi:10.1109/TNSRE.2007.903917.
25. Zhou, Y.; Jenkins, M.E.; Naish, M.D.; Trejos, A.L. Development of a Wearable Tremor Suppression Glove. In Proceedings of the 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob); August 2018; pp. 640–645.
26. Liftware - Eat with Confidence Available online: <https://www.liftware.com/> (accessed on 10 July 2021).
27. Ondo, W.; Hashem, V.; LeWitt, P.A.; Pahwa, R.; Shih, L.; Tarsy, D.; Zesiewicz, T.; Elble, R. Comparison of the Fahn-Tolosa-Marin Clinical Rating Scale and the Essential Tremor Rating Assessment Scale. *Mov. Disord. Clin. Pract.* **2018**, *5*, 60–65, doi:10.1002/mdc3.12560.
28. Taylor, R.; Jensen, P.; Whitcomb, L.; Barnes, A.; Kumar, R.; Stoianovici, D.; Gupta, P.; Wang, Z. A Steady-Hand Robotic System for Microsurgical Augmentation. 11.
29. Alamdar, A.; Usevitch, D.E.; Wu, J.; Taylor, R.H.; Gehlbach, P.; Iordachita, I. Steady-Hand Eye Robot 3.0: Optimization and Benchtop Evaluation for Subretinal Injection. *IEEE Trans. Med. Robot. Bionics* **2024**, *6*, 135–145, doi:10.1109/tmr.2023.3336975.
30. Acemoglu, A.; Deshpande, N.; Mattos, L.S. Towards a Magnetically-Actuated Laser Scanner for Endoscopic Microsurgeries. *J. Med. Robot. Res.* **2018**, *03*, 1840004, doi:10.1142/S2424905X18400044.
31. Renevier, R.; Tamadazte, B.; Rabenorosoa, K.; Tavernier, L.; Andreff, N. Endoscopic Laser Surgery: Design, Modeling, and Control. *IEEEASME Trans. Mechatron.* **2017**, *22*, 99–106, doi:10.1109/TMECH.2016.2595625.

32. Kamble, H.C.; Ahuja, B.B.; Masurkar, K.; Kulkarni, E. Mechatronics Device for Tremor Sensing and Cancellation for Accuracy Enhancement in Microsurgeries. In Proceedings of the 2014 International Conference on Advances in Engineering Technology Research (ICAETR - 2014); August 2014; pp. 1–4.
33. Model 356B11 | PCB Piezotronics Available online: <https://www.pcb.com/products?m=356b11> (accessed on 14 May 2025).
34. Cernat, R.; Matei, C.E.; Olteanu, L.; Riviere, C.N.; Dumitraş, D.C. Acousto-Optic Laser Beam Deflection for Compensation of Hand Tremor.; Dumitraş, D.C., Dinescu, M., Konov, V.I., Eds.; March 16 2007; pp. 66061M-66061M – 5.
35. U-Xuan Tan; Win Tun Latt; Cheng Yap Shee; Wei Tech Ang Design and Development of a Low-Cost Flexure-Based Hand-Held Mechanism for Micromanipulation. In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation; IEEE: Kobe, May 2009; pp. 4350–4355.
36. Riviere, C.N.; Rader, R.S.; Thakor, N.V. Adaptive Canceling of Physiological Tremor for Improved Precision in Microsurgery. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **1998**, *45*.
37. Yang, S.; MacLachlan, R.A.; Martel, J.N.; Lobes, L.A.; Riviere, C.N. Comparative Evaluation of Handheld Robot-Aided Intraocular Laser Surgery. *IEEE Trans. Robot. Publ. IEEE Robot. Autom. Soc.* **2016**, *32*, 246–251, doi:10.1109/TRO.2015.2504929.
38. Iordachita, I.I.; de Smet, M.D.; Naus, G.; Mitsuishi, M.; Riviere, C.N. Robotic Assistance for Intraocular Microsurgery: Challenges and Perspectives. *Proc. IEEE Inst. Electr. Electron. Eng.* **2022**, *110*, 893–908, doi:10.1109/JPROC.2022.3169466.
39. Thamm, O.C.; Eschborn, J.; Schäfer, R.C.; Schmidt, J. Advances in Modern Microsurgery. *J. Clin. Med.* **2024**, *13*, 5284, doi:10.3390/jcm13175284.
40. A Wearable System for Attenuating Essential Tremor Based on Peripheral Nerve Stimulation. *IEEE J. Transl. Eng. Health Med.* **2020**, *8*, 2000111, doi:10.1109/JTEHM.2020.2985058.
41. Lora-Millan, J.S.; Delgado-Oleas, G.; Benito-León, J.; Rocon, E. A Review on Wearable Technologies for Tremor Suppression. *Front. Neurol.* **2021**, *12*, 700600, doi:10.3389/fneur.2021.700600.
42. Nita, E.I.; Coanda, P.; Comeaga, D.C. Laser Surgical Devices with Optical Solution for Damping Physiological Tremor. In Proceedings of the Advances in 3OM: Opto-Mechatronics, Opto-Mechanics, and Optical Metrology; Rolland, J.P., Duma, V.-F., Podoleanu, A.G.H., Eds.; SPIE: Timisoara, Romania, May 6 2022; p. 52.
43. Comeaga, C.D.; Nita, E.I.; Gramescu, B. Tremor Orientation and Compensation System in Laser Medical Equipment - Part I. In Proceedings of the 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE); IEEE: Bucharest, Romania, March 25 2021; pp. 1–6.
44. Comeaga, C.D.; Nita, E.I.; Coanda, P. Tremor Orientation and Compensation System in Laser Medical Equipment - Part II. In Proceedings of the 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE); IEEE: Bucharest, Romania, March 25 2021; pp. 1–6.
45. Niță, E.; Comeaga, D.; Apostol, D.; Duma, V.-F. Development of a Laser Surgical Device with Vibration Compensation: Mechanical Design and Validation of Its Compliant Mechanism. *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 3686, doi:10.3390/app15073686.

46. P-007 – P-056 PICA Stack Piezo Actuators Available online: <https://www.physikinstrumente.com/en/products/piezoelectric-transducers-actuators/p-007-p-056-pica-stack-piezo-actuators-102600> (accessed on 14 May 2025).
47. Amplified Piezoelectric Actuators – up to 2mm (2000 $\mu$ m) Travel Available online: <https://www.pi-usa.us/en/products/piezo-actuators-stacks-benders-tubes/amplified-piezo-actuators> (accessed on 4 July 2025).
48. Liu, C.; Bi, Z.; Ran, J.; Gu, J.; Wang, X.; Zhang, C. Modelling and Verification of Fatigue Damage for Compliant Mechanisms. *Robotica* **2019**, *37*, 1–17, doi:10.1017/S0263574718000838.
49. Lobontiu, N. *Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges*; CRC Press: Boca Raton, 2003; ISBN 978-0-8493-1367-7.
50. Lobontiu, N.; Gress, T.; Munteanu, M.Gh.; Ilic, B. Stiffness Design of Circular-Axis Hinge, Self-Similar Mechanism With Large Out-of-Plane Motion. *J. Mech. Des.* **2019**, *141*, 092302, doi:10.1115/1.4042792.
51. Ashino, R.; Nagase, M.; Vaillancourt, R. Behind and beyond the Matlab ODE Suite. *Comput. Math. Appl.* **2000**, *40*, 491–512, doi:10.1016/S0898-1221(00)00175-9.
52. Image Processing Toolbox Available online: <https://www.mathworks.com/products/image-processing.html> (accessed on 14 May 2025).
53. García-de-Villa, S.; Jiménez-Martín, A.; García-Domínguez, J.J. Novel IMU-Based Adaptive Estimator of the Center of Rotation of Joints for Movement Analysis. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **2021**, *70*, 1–11, doi:10.1109/TIM.2021.3073688.
54. ICM-42688-P. *TDK Inven*. Available online: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/icm-42688-p/> (accessed on 14 May 2025)