



HAL
open science

Robotique et chirurgie laser

Brahim Tamadazte

► **To cite this version:**

Brahim Tamadazte. Robotique et chirurgie laser. Techniques de l'Ingénieur, 2024, 10.51257/a-v1-s7790 . hal-04679620

HAL Id: hal-04679620

<https://hal.science/hal-04679620v1>

Submitted on 28 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Robotique et chirurgie laser

Robotics, and laser surgery

par Brahim TAMADAZTE

Directeur de Recherche CNRS

Affiliation : Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR),
CNRS UMR7222, Sorbonne Université, Inserm U1150, Paris, France

Résumé : La chirurgie laser est une technique qui utilise un faisceau de lumière cohérente et intense pour couper, vaporiser ou cauteriser les tissus biologiques au lieu et place du bistouri traditionnel.

Ces dernières années, un intérêt est né pour la combinaison des avantages de la robotique et d'un laser pendant la procédure. Le guidage d'un laser sur le tissu cible peut alors être réalisé grâce au système robotique et aux lois de commande associées. Les lasers chirurgicaux robotisés permettent la combinaison de la précision et le contrôle de la chirurgie robotisée avec la précision et l'exactitude d'un laser.

Cet article donne un aperçu historique de la chirurgie laser, les dernières avancées en chirurgie laser robotisée, ainsi que les verrous scientifiques et technologiques qui restent à lever.

Mots-clés : Lasers, Robotique, Chirurgie

Abstract : Laser surgery is a technique that uses a beam of intense, coherent light to cut, vaporize or cauterize biological tissue, instead of the traditional scalpel.

In recent years, interest has grown in combining the advantages of robotics and a laser during the surgical procedure. The guidance of a laser on the target tissue can then be achieved thanks to the robotic system and associated control laws. Robotic surgical lasers combine the precision and control of robotic surgery with the precision and accuracy of a laser.

This article provides an overview of the history of laser surgery, the latest advances in robotic laser surgery, and the scientific and technological obstacles still to be overcome.

Keywords : Lasers, Robotics, Surgery

Table des matières

1	Introduction	3
2	Physique, caractéristiques et utilisation des lasers	3
2.1	Technologies laser	4
2.2	Interactions laser-tissu	6
2.3	Caractéristique d'un laser et sa pénétration	7
2.4	Lasers et chirurgies	10
2.5	Avantages du laser en chirurgie	13
2.6	Inconvénients du laser en chirurgie	14
3	Lasers et Robots	16
3.1	Besoins	16
3.2	Analyse de l'état de l'art	18
3.3	Discussions	21
4	Contrôle d'un faisceau laser : cas d'étude	22
4.1	Conception mécatronique	22
4.2	Miroirs miniatures actionnés	23
4.3	Contrôle par retour visuel	26
4.4	Asservissement visuel dans le cas de la chirurgie laser	26
4.5	Suivi de chemin 2D	27
4.5.1	Courbes de résection	27
4.5.2	Contrôleur	29
4.5.3	Résultats du suivi de chemin 2D	30
4.6	Suivi de chemin 3D	32
4.6.1	Contrôleur 3D	32
4.6.2	Résultats du suivi de chemin 3D	32
5	Discussion et conclusion	34
6	Glossaire	36
7	Sigles, notations et symboles	36

1 Introduction

La chirurgie au laser peut être définie comme l'utilisation d'un faisceau de lumière cohérente et intense (à haute énergie) pour couper, carboniser, vaporiser ou coaguler des tissus biologiques mous ou durs, au lieu de l'utilisation conventionnelle d'un instrument mécanique tel qu'un scalpel. Il convient de noter que la longueur d'onde, la puissance du laser et la durée de l'impulsion laser peuvent être sélectionnées ou ajustées en fonction de la tâche à accomplir, car ces paramètres produisent des effets différents sur les tissus biologiques. La chirurgie au laser est généralement pratiquée en salle d'opération, qu'il s'agisse d'une clinique ou d'un hôpital. Le parcours du patient jusqu'à la salle d'opération est similaire à celui d'une chirurgie conventionnelle, y compris le recours éventuel à l'administration d'un sédatif ou d'un anesthésique.

L'utilisation d'un laser en chirurgie présente plusieurs avantages, notamment l'absence quasi systématique de saignements, ce qui permet une cicatrisation plus esthétique, une procédure moins invasive avec moins de douleurs, et surtout une précision accrue dans les gestes chirurgicaux [52]. Il convient de noter qu'une grande partie des procédures chirurgicales réalisées au laser peut être effectuée en ambulatoire ou nécessite seulement un court séjour à l'hôpital. Certains travaux comparatifs ont également mis en avant que la chirurgie laser est généralement moins coûteuse que la chirurgie conventionnelle [29]. Cela est notamment dû au fait que de plus en plus de procédures au laser sont réalisées en ambulatoire.

Les premières investigations pour l'utilisation du laser dans les applications médicales remontent aux années 1960, et les premières procédures chirurgicales ont été réalisées dans les années 1970 [18]. L'ophtalmologie, et plus précisément la chirurgie réfractive (correction de la myopie), a été la première application du laser chirurgical. Cependant, l'utilisation du laser en chirurgie ophtalmique de nos jours diffère de celle des débuts, qui se limitait à remplacer le bistouri pour une procédure de kératotomie radiaire dans le but de réduire les traumatismes post-opératoires. Une technique appelée LASIK [90], mise au point par l'ophtalmologue espagnol résidant en Colombie, *José I. Barraquer*, permet de réaliser un remodelage de la cornée en profondeur grâce à un laser afin de modifier la courbure cornéenne. Ce remodelage de la forme de la cornée permet de corriger un grand nombre d'aberrations optiques. Depuis, d'autres techniques laser pour la chirurgie réfractive ont été développées, comme le laser EXCIMER (laser à excimères, appelé aussi laser à exciplexe), qui occupe aujourd'hui une place importante en chirurgie réfractive.

Le succès de l'utilisation du laser en chirurgie ophtalmique a ouvert la voie à de nombreuses autres applications médicales, notamment en dermatologie, en oto-rhino-laryngologie (ORL), en urologie, en gynécologie, en neurochirurgie, en orthopédie, et bien d'autres domaines encore.

2 Physique, caractéristiques et utilisation des lasers

Comme il a été mentionné dans l'introduction, un laser est un faisceau de lumière cohérente et à haute énergie (Figure 1). La capacité à émettre une forte énergie font des laser une technologie « révolutionnaire » dans plusieurs domaines qui vont de l'industrie (électronique, informatique, etc.) à la médecine (diagnostic, chirurgie, etc.). En médecine, par exemple, le laser peut réaliser plusieurs tâches qui peuvent être de l'ablation, de la vaporisation, de la coagulation ou encore de la biostimulation des tissus biologiques. Le Tableau 1 donne un aperçu du mode de fonctionnement d'un laser de chirurgie et les applications cliniques visées.

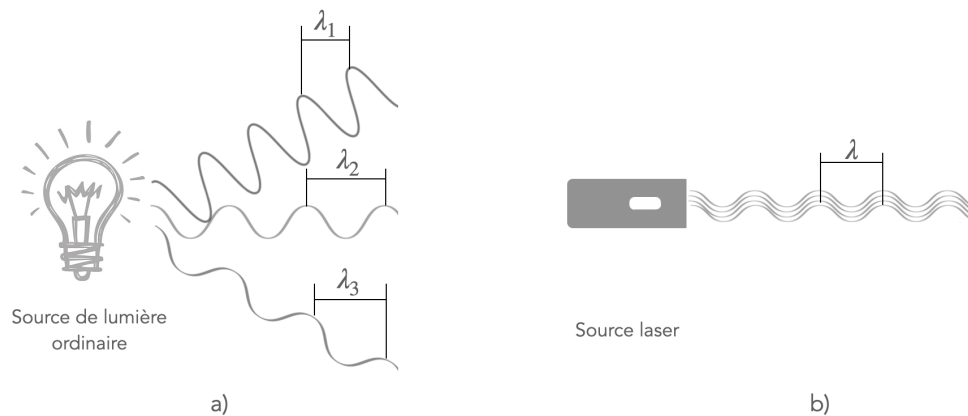


Figure 1 – Comparaison entre la lumière ordinaire et la lumière monochromatique et cohérente (a) ampoule : lumière incohérente émettant différentes longueurs d’onde (b) laser : lumière cohérente et émettant la même longueur d’onde.

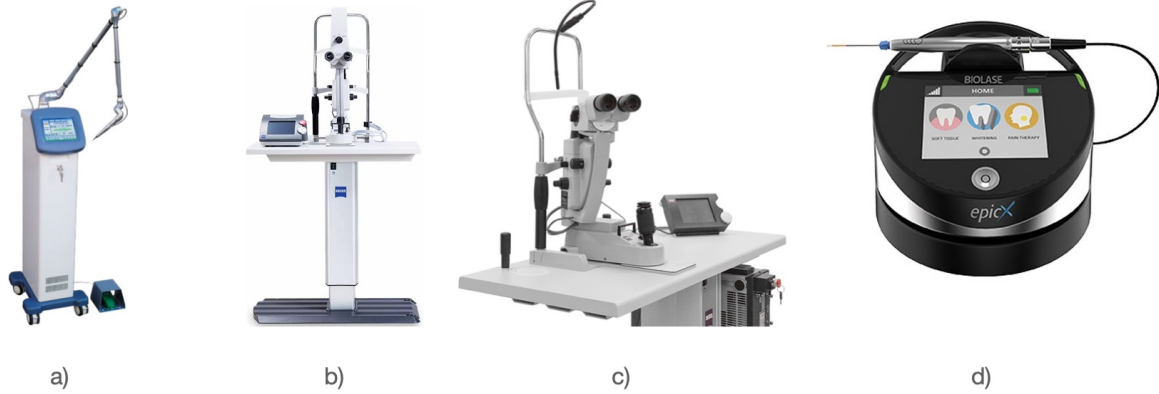
Mode d’emploi	Discipline médicale
Cautérisation	Ophtalmologie
Ablation	Cardio-vasculaire, Gynécologie, Urologie, Gastro-entérologie, Dentaire, Ophtalmologie, Dermatologie
Vaporisation	Orthopédie, Neurochirurgie, Cardio-vasculaire, Gynécologie, Urologie, Gastroentérologie, Dentaire, Dermatologie
Coagulation	Neurochirurgie, Cardio-vasculaire, Gynécologie, Urologie, Gastro-entérologie, Dentaire, Ophtalmologie, Dermatologie
Biostimulation	Dermatologie
Interaction photochimique	Neurochirurgie, Cardio-vasculaire, Urologie, Gastro-entérologie, Dentaire, Ophtalmologie, Dermatologie

Tableau 1 – Exemples de modes de fonctionnement du laser et les applications médicales correspondantes.

2.1 Technologies laser

En général, deux paramètres peuvent déterminer l’efficacité d’un laser en tant qu’outil chirurgical : la longueur d’onde et les caractéristiques puissance-temps. La longueur d’onde de l’émission laser et les caractéristiques d’absorption spectrale du tissu déterminent le taux du faisceau laser incident qui sera absorbé par le tissu biologique. En effet, plus le tissu est capable d’absorber une longueur d’onde spécifique, plus le laser est efficace en tant qu’outil chirurgical, notamment pour les tâches d’incision. Diverses technologies laser coexistent, parmi les plus répandues, on peut mentionner :

- **Lasers CO₂** : Le laser à Dioxyde de Carbone est l’un des premiers lasers à gaz à avoir été mis au point et reste l’un des types de laser les plus utiles. Les lasers à CO₂ sont les lasers à ondes continues et présentent une puissance supérieure à la plupart des technologies laser disponibles sur le marché. Le fonctionnement d’un laser CO₂ peut se résumer comme suit : des ondes électromagnétiques (de l’ordre du MHz) sont dirigées vers un mélange de plusieurs gaz (CO₂, azote, hélium). Ainsi, les molécules de CO₂ sont excitées produisant un fort degré d’énergie stockée dans les molécules de CO₂ sous forme de vibration ou rotation. Enfin, lorsqu’un photon d’une certaine longueur d’onde rentre en contact avec les molécules déjà excitées, il libère l’énergie stockée



CO2 - Medicaexpo Group

VISULAS YAG III Zeiss

Argon laser Zeiss

Laser diode Biolase

Figure 2 – Quelques exemples de systèmes lasers utilisés en chirurgie : a) laser CO₂ de chez Medicaexpo™ (source : www.medicaexpo.com), b) laser Nd :YAG de chez Zeiss™ (source : www.medilexonline.com), c) Argon de chez Zeiss™ (source : fr.bimedis.com) et d) laser diode de chez Monteris Medical™ (source : www.medicaexpo.fr).

sous forme de plusieurs photons formant un faisceau laser dont la longueur d'onde est de 10600 nm. Plusieurs familles de laser CO₂ existent sur le marché offrant de nombreuses applications dans l'industrie et en chirurgie. Par exemple, en chirurgie, les lasers CO₂ sont utilisés en dermatologie (resurfaçage de la peau), en ORL (chirurgie des cordes vocales), en dentisterie, en gynécologie..., cela grâce à une très bonne capacité d'absorption des tissus mous de la lumière émise à cette longueur d'onde.

Un exemple d'un système laser de type CO₂ commercialisé par Medicaexpo Group™ est montré sur la Figure 2(a).

- **Nd :YAG** : Lasers dits au Néodyme : Yttrium - Aluminium - Grenat (Nd : YAG), couramment appelés lasers YAG. Cette technologie est largement utilisée en qualité de photo-coagulateur grâce à sa capacité à coaguler le sang et à contrôler les hémorragies. Sa longueur d'onde, proche infrarouge, est de $\lambda = 1064 \text{ nm}$ qui est d'environ 1/10 de celle du laser CO₂ et peut opérer dans les deux modes continu et pulsé. Cette longueur d'onde est connue pour être favorablement absorbée par les composants pigmentés tels que la mélanine, l'hémoglobine et les protéines. Les lasers YAG offrent une pénétration dans les tissus biologiques de l'ordre de 14 mm. Ces lasers ont également une autre longueur d'onde secondaire de 1032 nm peu utilisée dans la pratique. Au-delà des applications médicales de ce type de lasers (ophtalmologie, dermatologie, oncologie, etc.), son utilisation est également répandue dans les applications industrielles (gravure, découpe, etc.) ou dans la création de spectacles de lumières pour le grand public. Un système laser de type Nd : YAG commercialisé par Zeiss™ est illustré sur la Figure 2(b).

- **Lasers Argon** : Contrairement aux lasers CO₂, les technologies à Argon utilisent des gaz ionisés par décharge électrique pour fonctionner. Cependant, leur rendement est moins intéressant car une grande partie de l'énergie d'entrée est dissipée sous forme de chaleur, nécessitant un système de refroidissement. La longueur d'onde du faisceau produit se situe principalement dans le domaine du visible, entre 488 nm et 514,5 nm, et peut être transmise par des fibres optiques. Les lasers de technologie Argon produisent des puissances supérieures à 20 W. Ils permettent seulement des pénétrations superficielles par rapport aux technologies YAG et présentent d'excellentes propriétés

sur les questions de sécurité, de durabilité, de stérilisation et de biocompatibilité. La question des interfaces humain-robot doit être traitée pour rendre les procédures moins complexes et accessibles à un personnel médical sans une très grande expertise. Ces progrès permettraient, sans doute, à terme de rendre les procédures de chirurgie laser plus autonomes, y compris dans le cas de la microchirurgie.

6 Glossaire

Distal : désigne une partie d'un instrument chirurgical ou de robot située proche de son extrémité (partie active).

Proximal : l'inverse de distal ; il désigne la partie d'un instrument ou d'un robot située proche de sa base.

Invasive : se dit de toute procédure chirurgicale nécessitant une ouverture plus ou moins importante du corps humain pour accéder à l'organe à traiter.

Mini-invasive : se réfère à une procédure chirurgicale réalisée à l'aide de petites incisions de quelques millimètres de diamètre comme la coelioscopie. **Non-Invasive** : décrit une procédure chirurgicale qui ne nécessite pas de réaliser des incisions dans le corps humain pour atteindre l'organe à traiter. Par exemple, les instruments sont introduits par les voies naturelles.

Endoluminal : désigne une procédure chirurgicale réalisée à l'intérieur des structures tubulaires creuses du corps, à l'exemple des vaisseaux sanguins.

Degré de liberté (ddl) : désigne le nombre de mouvements indépendants (translations et rotations) qu'un système robotique peut effectuer dans ou autour d'une direction spécifique.

Effecteur d'un robot : il s'agit du dispositif ou outil situé à l'extrémité d'un robot (par exemple, d'un bras robotique) qui permet de réaliser les tâches désirées (saisie, découpe, etc.).

Robotique déformable : sous-domaine de la robotique qui utilise des matériaux souples ou flexibles dans la conception du robot, en se passant des traditionnelles liaisons rigides utilisées dans les autres domaines de la robotique.

Géométrie épipolaire : il s'agit d'un concept de la vision par ordinateur qui établit la relation géométrique entre deux vues de caméras de la même scène 3D, concept largement utilisé en reconstruction 3D.

Actionneur piézoélectrique : dispositif dont le matériau de conception (quartz, céramique, etc.) a la particularité de convertir une énergie électrique en déformation (mouvement) mécanique.

Salle blanche : désigne un environnement contrôlé (pression, température, contamination, etc.) utilisé dans certaines procédures de fabrication (médicaments, électronique, etc.).

Modélisation cinématique : désigne l'étude du mouvement d'un robot incluant les positions, les vitesses mais sans tenir compte des forces qui causent le mouvement.

Asservissement : désigne une méthode de contrôle d'un système (robot) qui implique des corrections continues de sa position ou de son orientation pour atteindre la cible (consigne).

7 Sigles, notations et symboles

Sources bibliographiques

- [1] A. Acemoglu, D. Pucci, and L. S. Mattos. Design and control of a magnetic laser scanner for endoscopic microsurgeries. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 24(2) :527–537, 2019.
- [2] M. Adelman, L. Tsai, E. Tangchitnob, and B. Kahn. Laser technology and applications in gynaecology. *Journal of Obstetrics and Gynaecology*, 33(3) :225–231, 2013.

Notations et symboles	Descriptions
λ	Longueur d'onde un laser
τ	Durée d'impulsion
d_s	Taille du spot laser
E_i	Energie d'impulsion
D_e	Densité énergétique
P_w	Puissance moyenne du laser
\mathbf{p}	Point 2D exprimé dans l'image
$(x, y)^\top$	Coordonnées d'un point 2D dans l'image
Γ	Courbe quelconque
\mathcal{R}_x	Repère attaché à un point x
$(x)^\top$	Transposée du vecteur x
$\underline{\mathbf{v}}$	Vitesse d'avancée d'un spot laser
v	Amplitude de la vitesse linéaire d'un spot laser
$\mathbf{h}_p(s)$	Projection orthogonale d'un point \mathbf{p} sur Γ
${}^0\underline{\mathbf{z}}$	Direction d'un faisceau laser
k	Itération
ω	Vitesse angulaire
s	Abscisse curviligne
$C(s)$	Courbure calculée à l'abscisse curviligne s
\mathbb{R}	Ensemble des nombres réels
\dot{x}	Dérivée temporelle de x
$\tan(x)$	Tangente de l'angle x
$\frac{\partial x_1}{\partial x_2}$	Dérivée partielle de x_1 par rapport à la variable x_2
$ x $	Valeur absolue de x
γ_1 et γ_2	Gains positifs de commande
$x_1 \times x_2$	Produit vectoriel entre x_1 et x_2
$x_1 \cdot x_2$	Produit scalaire entre x_1 et x_2
\mathbf{K}	Modèle cinématique
\mathbf{K}_{inv}	Modèle cinématique inverse
\mathbf{q}	Ensemble de positions articulaires
$\dot{\mathbf{q}}$	Ensemble de vitesses articulaires
e_θ	Erreur d'orientation
e_d	Erreur de translation
f	Fréquence (Hz)
\mathbf{x}_s	Vecteur tangent du repère de <i>Frenet</i>
\mathbf{y}_s	Vecteur normal du repère de <i>Frenet</i>
x_h et y_h	Coordonnées de la projection du laser sur le chemin dans le repère \mathcal{R}_0
u_1	Vitesse linéaire du laser dans le plan
u_2	Vitesse de rotation du laser dans le plan
θ	Orientation du laser par rapport au repère \mathcal{R}_0
θ_s	Orientation du repère \mathcal{R}_s par rapport au repère \mathcal{R}_0
θ_e	Orientation du laser par rapport au repère \mathcal{R}_s
d	Distance entre le laser et le chemin

- [3] A. Aloy and M. Grasl. Endoscopy of larynx and trachea with rigid laryngo-tracheoscopes under superimposed high-frequency jet ventilation (shfjv). In *Endoscopy*. IntechOpen, 2013.
- [4] T. S. Alster and T. B. West. Treatment of scars : a review. *Annals of plastic surgery*, 39(4) :418–432, 1997.

- [5] N. Andreff, S. Dembélé, B. Tamadazte, and Z.-e. Hussnain. Epipolar geometry for vision-guided laser surgery. In *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, volume 2, pages 471–476. SCITEPRESS, 2013.
- [6] N. Andreff and B. Tamadazte. Laser steering using virtual trifocal visual servoing. *The International Journal of Robotics Research*, 35(6) :672–694, 2016.
- [7] N. Andreff, B. Tamadazte, S. Dembélé, and Z. E. Hussnain. Preliminary variation on multiview geometry for vision-guided laser surgery. In *Workshop on Multi-View Geometry in Robotics, MVIGRO'2013.*, pages 1–10, 2013.
- [8] F. Arai, K. Yoshikawa, T. Sakami, and T. Fukuda. Synchronized laser micromanipulation of multiple targets along each trajectory by single laser. *Applied Phy. Let.*, 85 :4301–4303, 2004.
- [9] M. S. Benninger. Microdissection or microspot co2 laser for limited vocal fold benign lesions : a prospective randomized trial. *The Laryngoscope*, 110(S92) :1–1, 2000.
- [10] S. A. Bothner, P. A. York, P. C. Song, and R. J. Wood. A compact laser-steering end-effector for transoral robotic surgery. In *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 7091–7096. IEEE, 2019.
- [11] M. N. BOUSHAKI, M. T. CHIKHAOUI, K. RABENOROSOA, C. LIU, N. ANDREFF, and P. POIGNET. Conception, modélisation et commande des robots à tubes concentriques : vers des applications médicales. *Techniques de l'ingénieur Robotique*, base documentaire : TIP661WEB.(ref. article : s7767), 2016. fre.
- [12] J. Burgner-Kahrs, D. C. Rucker, and H. Choset. Continuum robots for medical applications : A survey. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(6) :1261–1280, 2015.
- [13] G. CARON and E. M. MOUADDIB. Vision pour la robotique. *Techniques de l'ingénieur Robotique*, base documentaire : TIP661WEB(ref. article : s7797), 2022.
- [14] L. Carroll and T. R. Humphreys. Laser-tissue interactions. *Clinics in dermatology*, 24(1) :2–7, 2006.
- [15] K. F. Chan, G. J. Vassar, T. J. Pfefer, J. M. Teichman, R. D. Glickman, S. T. Weintraub, and A. J. Welch. Holmium : Yag laser lithotripsy : a dominant photothermal ablative mechanism with chemical decomposition of urinary calculi. *Lasers in Surgery and Medicine : The Official Journal of the American Society for Laser Medicine and Surgery*, 25(1) :22–37, 1999.
- [16] S. L. Charreyron, E. Gabbi, Q. Boehler, M. Becker, and B. J. Nelson. A magnetically steered endolaser probe for automated panretinal photocoagulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2) :xvii–xxiii, 2018.
- [17] F. Chaumette and S. Hutchinson. Visual servo control, part 1 : Basic approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(1) :82–90, 2006.
- [18] D. Choy. History of lasers in medicine. *The Thoracic and cardiovascular surgeon*, 36(S 2) :114–117, 1988.
- [19] D. Choy, P. W. Ascher, H. Ranu, S. Saddekni, D. Alkaitis, W. Liebler, J. Hughes, S. Diwan, and P. Altman. Percutaneous laser disc decompression. a new therapeutic modality. *Spine*, 17(8) :949–956, 1992.
- [20] D. S. Choy. Percutaneous laser disc decompression : a 17-year experience. *Photomedicine and laser surgery*, 22(5) :407–410, 2004.
- [21] S. H. Chung and E. Mazur. Surgical applications of femtosecond lasers. *Journal of biophotonics*, 2(10) :557–572, 2009.

- [22] E. COEVOET. Cinématique inverse de robots souples dans leur environnement. *Techniques de l'ingénieur Robotique*, base documentaire : TIP661WEB.(ref. article : s7851), 2021. fre.
- [23] A. Costello, W. Bowsher, D. Bolton, K. Braslis, and J. Burt. Laser ablation of the prostate in patients with benign prostatic hypertrophy. *British journal of urology*, 69(6) :603–608, 1992.
- [24] H. Cui, Z. Xiao, J. Dong, Y. Chen, and Z. Hou, G. Zhao. Towards fast femtosecond laser micromachining of glass, effect of deposited energy. In *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*, pages 2091–2094, 2013.
- [25] J. P. da Silva, M. A. da Silva, A. P. F. Almeida, I. L. Junior, and A. P. Matos. Laser therapy in the tissue repair process : a literature review. *Photomedicine and laser surgery*, 28(1) :17–21, 2010.
- [26] T. da Veiga, J. H. Chandler, P. Lloyd, G. Pittiglio, N. J. Wilkinson, A. K. Hoshiar, R. A. Harris, and P. Valdastrì. Challenges of continuum robots in clinical context : a review. *Progress in Biomedical Engineering*, 2(3) :032003, 2020.
- [27] N. Deshpande, J. Ortiz, D. G. Caldwell, and L. S. Mattos. Enhanced computer-assisted laser microsurgeries with a “virtual microscope” based surgical system. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4194–4199. IEEE, 2014.
- [28] Ł. Dołowy, W. Krajewski, J. Dembowski, R. Zdrojowy, and A. Kołodziej. The role of lasers in modern urology. *Central European journal of urology*, 68(2) :175, 2015.
- [29] M. Dombrée, R. Crott, G. Lawson, P. Janne, A. Castiaux, and B. Krug. Cost comparison of open approach, transoral laser microsurgery and transoral robotic surgery for partial and total laryngectomies. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 271 :2825–2834, 2014.
- [30] K. Dörschel and G. Müller. The role of laser in cardiac surgery. *The Thoracic and cardiovascular surgeon*, 47(S 3) :385–387, 1999.
- [31] L.-A. Dufлот, R. Reisenhofer, B. Tamadazte, N. Andreff, and A. Krupa. Wavelet and shearlet-based image representations for visual servoing. *The International Journal of Robotics Research*, 38(4) :422–450, 2019.
- [32] P. E. Dupont, B. J. Nelson, M. Goldfarb, B. Hannaford, A. Menciassi, M. K. O'Malley, N. Simaan, P. Valdastrì, and G.-Z. Yang. A decade retrospective of medical robotics research from 2010 to 2020. *Science robotics*, 6(60) :eabi8017, 2021.
- [33] H. E. Eckel, S. Berendes, M. Damm, J. P. Klussmann, and K. Wassermann. Suspension laryngoscopy for endotracheal stenting. *The Laryngoscope*, 113(1) :11–15, 2003.
- [34] G. Fang, M. C. Chow, J. D. Ho, Z. He, K. Wang, T. Ng, J. K. Tsoi, P.-L. Chan, H.-C. Chang, D. T.-M. Chan, et al. Soft robotic manipulator for intraoperative mri-guided transoral laser microsurgery. *Science Robotics*, 6(57) :eabg5575, 2021.
- [35] O. Ferhanoglu, M. Yildirim, K. Subramanian, and A. Ben-Yakar. A 5-mm piezo-scanning fiber device for high speed ultrafast laser microsurgery. *Biomedical optics express*, 5(7) :2023–2036, 2014.
- [36] O. Frazier, R. J. March, and K. A. Horvath. Transmyocardial revascularization with a carbon dioxide laser in patients with end-stage coronary artery disease. *New England Journal of Medicine*, 341(14) :1021–1028, 1999.
- [37] M. Fridenfalk and G. Bolmsjo. Design and validation of a universal 6d seam-tracking system in robotic welding using arc sensing. *Advanced Robotics*, 18 :1–21, 2004.

- [38] P. L. Friedman. Catheter cryoablation of cardiac arrhythmias. *Current Opinion in Cardiology*, 20(1) :48–54, 2005.
- [39] C. Girerd, T. Lihoreau, K. Rabenorosoa, B. Tamadazte, M. Benassarou, L. Tavernier, L. Pazart, E. Haffen, N. Andreff, and P. Renaud. In vivo inspection of the olfactory epithelium : Feasibility of robotized optical biopsy. *Annals of Biomedical Engineering*, 46 :1951–1961, 2018.
- [40] R. E. Goldman, A. Bajo, L. S. MacLachlan, R. Pickens, S. D. Herrell, and N. Simaan. Design and performance evaluation of a minimally invasive telerobotic platform for transurethral surveillance and intervention. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 60(4) :918–925, 2012.
- [41] J. Granna, A. Nabavi, and J. Burgner-Kahrs. Toward computer-assisted planning for interstitial laser ablation of malignant brain tumors using a tubular continuum robot. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention- MICCAI 2017 : 20th International Conference, Quebec City, QC, Canada, September 11-13, 2017, Proceedings, Part II 20*, pages 557–565. Springer, 2017.
- [42] K. Harada, Z. Bo, S. Enosawa, T. Chiba, and M. G. Fujie. Bending laser manipulator for intrauterine surgery and viscoelastic model of fetal rat tissue. In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 611–616. IEEE, 2007.
- [43] R. Hartley and A. Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2nd edition edition, 2006.
- [44] R. J. Hendrick, S. D. Herrell, and R. J. Webster. A multi-arm hand-held robotic system for transurethral laser prostate surgery. In *2014 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, pages 2850–2855. IEEE, 2014.
- [45] R. J. Hendrick, C. R. Mitchell, S. D. Herrell, and R. J. Webster III. Hand-held transendoscopic robotic manipulators : A transurethral laser prostate surgery case study. *The International journal of robotics research*, 34(13) :1559–1572, 2015.
- [46] Y. Huang, Y. Xiao, P. Wang, and M. Li. A seam-tracking laser welding platform with 3d and 2d visual information fusion vision sensor system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67 :415–426, 2012.
- [47] S. Huh, D. Shim, and H. Kim. Integrated navigation system using camera and gimbaled laser scanner for indoor and outdoor autonomous flight of uavs. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3158–3163, Nov. 2013.
- [48] H. Iijima, S. Satoh, and S. Tsukahara. Nd : Yag laser photodisruption for preretinal hemorrhage due to retinal macroaneurysm. *Retina*, 18(5) :430–434, 1998.
- [49] G. J. Jako. Laryngoscope for microscopic observation, surgery, and photography : the development of an instrument. *Archives of Otolaryngology*, 91(2) :196–199, 1970.
- [50] S. Kamp, T. Knoll, M. M. Osman, K. U. Köhrmann, M. S. Michel, and P. Alken. Low-power holmium : Yag laser urethrotomy for treatment of urethral strictures : functional outcome and quality of life. *Journal of endourology*, 20(1) :38–41, 2006.
- [51] N. Kapany, N. Peppers, H. Zweng, M. Flocks, et al. Retinal photocoagulation by lasers. *Nature*, 199(4889) :146–149, 1963.
- [52] E. Khalkhal, M. Rezaei-Tavirani, M. R. Zali, and Z. Akbari. The evaluation of laser application in surgery : a review article. *Journal of lasers in medical sciences*, 10(Suppl 1) :S104, 2019.
- [53] S. Kim, C. Laschi, and B. Trimmer. Soft robotics : a bioinspired evolution in robotics. *Trends in biotechnology*, 31(5) :287–294, 2013.

- [54] Y. Kim, G. A. Parada, S. Liu, and X. Zhao. Ferromagnetic soft continuum robots. *Science Robotics*, 4(33) :eaax7329, 2019.
- [55] Y. P. Krespi, G. Har-El, T. M. Levine, R. H. Ossoff, C. F. Wurster, and J. W. Paulsen. Laser lingual tonsillectomy. *The Laryngoscope*, 99(2) :131–135, 1989.
- [56] D. Kundrat, A. Schoob, T. Piskon, R. Grässlin, P. J. Schuler, T. K. Hoffmann, L. A. Kahrs, and T. Ortmaier. Toward assistive technologies for focus adjustment in teleoperated robotic non-contact laser surgery. *IEEE Transactions on medical robotics and bionics*, 1(3) :145–157, 2019.
- [57] G. M. Lamuraglia, R. R. Anderson, J. A. Parrish, D. Zhang, and M. R. Prince. Selective laser ablation of venous thrombus : Implications for a new approach in the treatment of pulmonary embolus. *Lasers in surgery and medicine*, 8(5) :486–493, 1988.
- [58] K. Lau, M. Stavrakas, M. Yardley, and J. Ray. Lasers in cholesteatoma surgery : a systematic review. *Ear, Nose & Throat Journal*, 100(1_suppl) :94S–99S, 2021.
- [59] H. C. Lee, N. E. Pacheco, L. Fichera, and S. Russo. When the end effector is a laser : A review of robotics in laser surgery. *Advanced Intelligent Systems*, 4(10) :2200130, 2022.
- [60] S. Leong, H. Kubba, and P. White. A review of outcomes following inferior turbinate reduction surgery in children for chronic nasal obstruction. *International journal of pediatric otorhinolaryngology*, 74(1) :1–6, 2010.
- [61] S. A. Lescano. *Design, fabrication and control of a microrobot for laser phonomicrosurgery*. Theses, Université de Franche-Comté, June 2015.
- [62] Y. Li, Y. Liu, K. Yamazaki, M. Bai, and Y. Chen. Development of a soft robot based photodynamic therapy for pancreatic cancer. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 26(6) :2977–2985, 2021.
- [63] A. Liu, R. L. Moy, and D. M. Ozog. Current methods employed in the prevention and minimization of surgical scars. *Dermatologic surgery*, 37(12) :1740–1746, 2011.
- [64] I. M. Lukavenko, V. V. Andryushchenko, and O. Yazykov. The laser-induced coagulation method of biological tissues. In *Nanomaterials in Biomedical Application and Biosensors (NAP-2019)*, pages 121–127. Springer, 2020.
- [65] A. Marcinkevičius, S. Juodkazis, M. Watanabe, M. Miwa, S. Matsuo, H. Misawa, and J. Nishii. Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica. *Optics letters*, 26(5) :277–279, 2001.
- [66] L. Mattos, N. Deshpande, G. Barresi, L. Guastini, and G. Peretti. A novel computerized surgeon-machine interface for robot-assisted laser phonomicrosurgery. *The Laryngoscope*, In Press :xx, 2014.
- [67] L. S. Mattos, A. Acemoglu, A. Galdes, A. Laborai, A. Schoob, B. Tamadazte, B. Davies, B. Wacogne, C. Pieralli, C. Barbalata, et al. μ ralp and beyond : Micro-technologies and systems for robot-assisted endoscopic laser microsurgery. *Frontiers in Robotics and AI*, 8 :664655, 2021.
- [68] A. McKenzie. Physics of thermal processes in laser-tissue interaction. *Physics in Medicine & Biology*, 35(9) :1175, 1990.
- [69] R. Metson. Holmium : Yag laser endoscopic sinus surgery ; a randomized, controlled study. *The Laryngoscope*, 106(S77) :1–18, 1996.
- [70] C. S. Miller and R. G. Triplett. Minimizing risk of infection using a carbon dioxide laser. *Special Care in Dentistry*, 11(4) :155–157, 1991.
- [71] H. Mo, R. Wei, B. Ouyang, L. Xing, Y. Shan, Y. Liu, and D. Sun. Control of a flexible continuum manipulator for laser beam steering. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2) :1074–1081, 2021.

- [72] P. Morin and C. Samson. Motion control of wheeled mobile robots. *Springer handbook of robotics*, 1 :799–826, 2008.
- [73] J. Moshonov, D. Ørstavik, S. Yamauchi, M. Pettiette, and M. Trope. Nd : Yag laser irradiation in root canal disinfection. *Dental Traumatology*, 11(5) :220–224, 1995.
- [74] Y. Nahmias and D. Oddel. Analysis of radiation forces in laser trapping and laser-guided direct writing applications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38(2) :131–141, Feb 2002.
- [75] D. V. A. Nguyen, C. Girerd, Q. Boyer, P. Rougeot, O. Lehmann, L. Tavernier, J. Szewczyk, and K. Rabenorosoa. A hybrid concentric tube robot for cholesteatoma laser surgery. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(1) :462–469, 2021.
- [76] M. H. Niemz et al. *Laser-tissue interactions*, volume 322. Springer, 2007.
- [77] M. Oeff, B. Hug, and G. Müller. Transcatheter laser photocoagulation for treatment of cardiac arrhythmias. *Lasers in Medical Science*, 6 :355–361, 1991.
- [78] M. Okada, M. Yoshida, Y. Tsuji, and H. Horii. Clinical application of laser treatment for cardiovascular surgery. *Laser therapy*, 20(3) :217–232, 2011.
- [79] I. Onisor, R. Pecie, I. Chaskelis, and I. Krejci. Cutting and coagulation during intraoral soft tissue surgery using er : Yag laser. *Eur J Paediatr Dent*, 14(2) :140–145, 2013.
- [80] K. O'Brien, Z. R. Boyer, B. G. Mart, C. T. Broliar, T. L. Carroll, and L. Fichera. Towards flexible steerable instruments for office-based laryngeal surgery. In *Frontiers in Biomedical Devices*, volume 41037, page V001T06A017. American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [81] A. R. Padalhin. Lasers and robots : recent developments in transoral laser and transoral robotic surgery. *Medical Lasers; Engineering, Basic Research, and Clinical Application*, 9(2) :103–109, 2020.
- [82] S. Patel, M. Rajadhyaksha, S. Kirov, Y. Li, and R. Toledo-Crow. Endoscopic laser scalpel for head and neck cancer surgery. In *Photonic Therapeutics and Diagnostics VIII*, volume 8207, pages 341–351. SPIE, 2012.
- [83] Q. Peng, A. Juzeniene, J. Chen, L. O. Svaasand, T. Warloe, K.-E. Giercksky, and J. Moan. Lasers in medicine. *Reports on Progress in Physics*, 71(5) :056701, 2008.
- [84] B. S. Peters, P. R. Armijo, C. Krause, S. A. Choudhury, and D. Oleynikov. Review of emerging surgical robotic technology. *Surgical endoscopy*, 32 :1636–1655, 2018.
- [85] B. Petrak, K. Konthasinghe, S. Perez, and A. Muller. Feedback-controlled laser fabrication of micromirror substrates. *Review of Scient. Inst*, 82 :123112–123112–6, 2011.
- [86] C. Phillips, T. Hillard, S. Salvatore, P. Toozs-Hobson, and L. Cardozo. Lasers in gynaecology. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*, 251 :146–155, 2020.
- [87] J. D. Pitcher, J. T. Wilson, T.-C. Tsao, S. D. Schwartz, and J.-P. Hubschman. Robotic eye surgery : past, present, and future. *J Comput Sci Syst Biol*, 3(1) :137, 2012.
- [88] D. Y. Pushkar and K. B. Kolontarev. Lasers in laparoscopic and robotic surgery : is there a need for them. *Current Opinion in Urology*, 32(2) :199–203, 2022.
- [89] S. Rajesh and Y. Bellouard. Towards fast femtosecond laser micromachining of glass, effect of deposited energy. In *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS)*, pages 1–2, May 2010.
- [90] D. Z. Reinstein, T. J. Archer, and M. Gobbe. The history of lasik. *Journal of Refractive Surgery*, 28(4) :291–298, 2012.

- [91] R. Renevier, B. Tamadazte, K. Rabenoroso, L. Tavernier, and N. Andreff. Endoscopic laser surgery : Design, modeling, and control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(1) :99–106, 2016.
- [92] M. E. Rivera, I. Frank, B. R. Viers, L. J. Rangel, and A. E. Krambeck. Holmium laser enucleation of the prostate and perioperative diagnosis of prostate cancer : an outcomes analysis. *Journal of endourology*, 28(6) :699–703, 2014.
- [93] T. Rokkas. Argon plasma coagulation in gastroenterology. *Diagnostic and Therapeutic Procedures in Gastroenterology : An Illustrated Guide*, pages 155–163, 2018.
- [94] M. Rubinstein and W. B. Armstrong. Transoral laser microsurgery for laryngeal cancer : a primer and review of laser dosimetry. *Lasers in medical science*, 26 :113–124, 2011.
- [95] D. Rus and M. T. Tolley. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553) :467–475, 2015.
- [96] S. Russo, P. Dario, and A. Menciassi. A novel robotic platform for laser-assisted transurethral surgery of the prostate. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(2) :489–500, 2014.
- [97] A. Schoob, M.-H. Laves, L. A. Kahrs, and T. Ortmaier. Soft tissue motion tracking with application to tablet-based incision planning in laser surgery. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 11 :2325–2337, 2016.
- [98] M.-V. Senat, J. Deprest, M. Boulvain, A. Paupe, N. Winer, and Y. Ville. Endoscopic laser surgery versus serial amnioreduction for severe twin-to-twin transfusion syndrome. *New England Journal of Medicine*, 351(2) :136–144, 2004.
- [99] J.-A. Seon, B. Tamadazte, and N. Andreff. Decoupling path following and velocity profile in vision-guided laser steering. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(2) :280–289, 2015.
- [100] T. Sibillano, A. Ancona, V. Berardi, and P. Lugarà. A real-time spectroscopic sensor for monitoring laser welding processes. *Sensors*, 9 :3376–3385, 2009.
- [101] J.-H. So, J. Szewczyk, and B. Tamadazte. Automatic laser steering for middle ear surgery. In *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 394–400. IEEE, 2022.
- [102] R. Steiner. Laser-tissue interactions. In *Laser and IPL technology in dermatology and aesthetic medicine*, pages 23–36. Springer, 2010.
- [103] W. Steiner, P. Ambrosch, and U. Braun. *Endoscopic laser surgery of the upper aerodigestive tract : with special emphasis on cancer surgery*, volume 1. Thieme Stuttgart, 2000.
- [104] B. Tamadazte. Contributions à l’asservissement visuel et à l’imagerie en médecine. *arXiv preprint arXiv :2208.10284*, 2022.
- [105] B. Tamadazte and N. Andreff. Weakly calibrated stereoscopic visual servoing for laser steering : Application to phonomicrosurgery. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 743–748. IEEE, 2014.
- [106] B. Tamadazte, N. L.-F. Piat, and S. Dembélé. Robotic micromanipulation and microassembly using monoview and multiscale visual servoing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(2) :277–287, 2010.
- [107] B. Tamadazte, N. L.-F. Piat, and E. Marchand. A direct visual servoing scheme for automatic nanopositioning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 17(4) :728–736, 2011.

- [108] B. Tamadazte, R. Renevier, J.-A. Séon, A. V. Kudryavtsev, and N. Andreff. Laser beam steering along three-dimensional paths. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(3) :1148–1158, 2018.
- [109] L. Tavernier, N. Andreff, T. Ortmaier, G. Peretti, and L. Mattos. Micro-technologies and systems for robot-assisted laser phonomicrosurgery (μ ralp). *Robotics and Digital Guidance in ENT–H&N Surgery : Rapport SFORL 2017*, pages 142–153, 2017.
- [110] R. H. Taylor, A. Menciassi, G. Fichtinger, P. Fiorini, and P. Dario. Medical robotics and computer-integrated surgery. *Springer handbook of robotics*, pages 1657–1684, 2016.
- [111] J. Troccaz. *Medical robotics*. John Wiley & Sons, 2013.
- [112] I. Tuncer, C. Özçakır-Tomruk, K. Şencift, and S. Çöloğlu. Comparison of conventional surgery and co2 laser on intraoral soft tissue pathologies and evaluation of the collateral thermal damage. *Photomedicine and laser surgery*, 28(1) :75–79, 2010.
- [113] T. Upile, C. Fisher, W. Jerjes, M. El Maaytah, A. Searle, D. Archer, L. Michaels, P. Rhys-Evans, C. Hopper, D. Howard, et al. The uncertainty of the surgical margin in the treatment of head and neck cancer. *Oral oncology*, 43(4) :321–326, 2007.
- [114] N. Yamanaka, H. Yamashita, K. Masamune, T. Chiba, and T. Dohi. An endoscope with 2 dofs steering of coaxial nd : Yag laser beam for fetal surgery. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 15(6) :898–905, 2010.
- [115] H. Yamashita, K. Matsumiya, K. Masamune, H. Liao, T. Chiba, and T. Dohi. Miniature bending manipulator for fetoscopic intrauterine laser therapy to treat twin-to-twin transfusion syndrome. *Surgical endoscopy*, 22 :430–435, 2008.
- [116] S. Yang, L. A. Lobes Jr, J. N. Martel, and C. N. Riviere. Handheld-automated microsurgical instrumentation for intraocular laser surgery. *Lasers in surgery and medicine*, 47(8) :658–668, 2015.
- [117] P. A. York, R. Peña, D. Kent, and R. J. Wood. Microrobotic laser steering for minimally invasive surgery. *Science Robotics*, 6(50) :eabd5476, 2021.
- [118] M. Zhao, T. J. O. Vrieling, A. A. Kogkas, M. S. Runciman, D. S. Elson, and G. P. Mylonas. Laryngotors : A novel cable-driven parallel robotic system for transoral laser phonosurgery. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2) :1516–1523, 2020.