

# 微创介入中智能化光学辅助技术与激光消融治疗的研究进展

梁利斌<sup>1\*</sup>, 李亮<sup>2</sup>, 高婷婷<sup>3</sup>, 王广志<sup>3</sup>, 丁辉<sup>3</sup>, 万明习<sup>1</sup>, 张镇西<sup>4</sup>

<sup>1</sup>西安交通大学生命科学与技术学院生物医学工程系生物医学信息工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;

<sup>2</sup>南京医科大学生物医学工程与信息学院, 江苏 南京 211100;

<sup>3</sup>清华大学医学院生物医学工程系, 北京 100084;

<sup>4</sup>西安交通大学生命科学与技术学院生物医学信息工程教育部重点实验室生物医学光子学与传感研究所, 陕西 西安 710049

**摘要** 微创介入治疗近年来发展迅速, 具有重要临床价值。然而, 微创条件下手术视野与操作范围受限, 手术结果高度依赖医生经验。为解决这一问题, 临床关注的焦点是如何实现手术信息的可视化、手术定量信息的获取和治疗范围的精准控制。光学辅助与激光消融技术在解决该问题上发挥了重要作用。增强现实技术提供新的可视化方式, 光学追踪与传感为术中提供多维的定量信息, 而激光消融则提供了精准治疗的途径。同时, 光学技术与计算机视觉、人工智能、材料科学等多学科结合, 推动微创介入朝着智能化、精准化、个性化的方向发展。聚焦于微创介入中的光学辅助与激光消融技术, 主要从增强现实、光学追踪与感知、激光消融三方面, 对相关研究进展进行综述。

**关键词** 医用光学; 增强现实; 光学追踪与感知; 激光消融; 微创介入

中图分类号 R318.51

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230473

## 1 引言

伴随着现代医疗技术的发展, 微创与精准治疗越来越受到医生与患者的青睐, 其重要性在临床中日益凸显。微创介入治疗无需大的手术切口, 利用腔镜、针状设备或导丝, 经皮穿刺或经自然腔道(血管、气管等)到达病灶, 结合物理切除、热损伤、放射等手段进行治疗<sup>[1]</sup>。以经皮消融为例, 通过针状设备, 经皮肤穿刺至病灶部位, 释放能量, 在组织局部制造高温或低温, 杀死病变组织, 达到治疗目的<sup>[2]</sup>。类似的微创介入还包括各类穿刺手术、心脏介入手术、骨科椎弓根钉置入、腔镜手术等。总体而言, 此类微创介入技术具有创伤小、出血少、术后恢复快的优点, 且近年来发展迅速, 可应用于多种疾病的治疗, 在临床中具有非常重要的地位。

不同于传统开放式手术, 微创介入手术切口小, 且在手术过程中需尽可能减少对患者正常组织的损伤, 因此视野或操作空间会受限。为保证手术效果, 基于医学影像的术前规划与术中引导非常必要。目前, 临床广泛使用的图像引导方式包括: 计算机断层成像(CT)、核磁共振成像(MRI)、超声成像、X射线透视成

像等。但上述引导方式在手术信息可视化与手术信息感知方面均存在不足: 首先, 图像引导过程所依赖的二维屏幕缺少立体视觉, 不易观察复杂三维解剖结构; 其次, 操作者视线需在屏幕与手术位置反复切换, 存在手眼协调的问题; 再者, 上述图像引导难以实时、连续、精准地追踪或感知患者病灶与手术工具的相对位置。因此, 手术效果非常依赖医生的经验和空间想象力, 存在治疗不精确的风险, 可能导致相关并发症。此外, 现有的微创介入手术, 受限于手术治疗形式(机械切除、基于热量或放射等形式), 或因缺少术中治疗状态监测, 在治疗范围的精准控制方面仍面临挑战。

近年来, 光学技术迅速发展并广泛应用于生物医学的诊断与治疗<sup>[3-4]</sup>。在微创介入领域, 光学辅助与激光消融技术尤为重要, 对于提升手术精准度与安全性有重要意义。在光学辅助手术方面, 增强现实(AR)技术可以将手术场景与虚拟影像融合呈现给医生, 提供新的术中信息可视化方案; 光学追踪与感知技术可以提供定量的空间信息, 用于定位病灶组织或手术工具, 为精准的手术操作奠定基础; 在激光消融方面, 激光能量集中且空间指向性好, 可通过细长光纤灵活地将激光传递至病灶, 并配合术中 MRI 温度监测, 实现更加

收稿日期: 2023-02-01; 修回日期: 2023-03-23; 录用日期: 2023-04-13; 网络首发日期: 2023-04-20

基金项目: 中国博士后科学基金(2022M712548)、浙江省自然科学基金(LQ23F010022)、中央高校基本科研业务费专项资金(xzy012022036)、南京医科大学科技发展基金项目(NMUB20210021)

通信作者: \*lianglibin@xjtu.edu.cn

精准的治疗效果。与此同时,人工智能领域快速发展且与光学技术融合,推动微创介入向着智能化、精准化、个性化方向发展,对于临床疾病治疗意义重大。

本文重点关注人工智能发展背景下,光学辅助与

激光消融技术在微创介入手术中的研究进展,分如图 1 所示的 AR 辅助技术、光学追踪与感知技术和激光消融治疗三个方向。本文将针对这三个方向进行综述,并讨论其发展趋势、应用前景以及挑战。

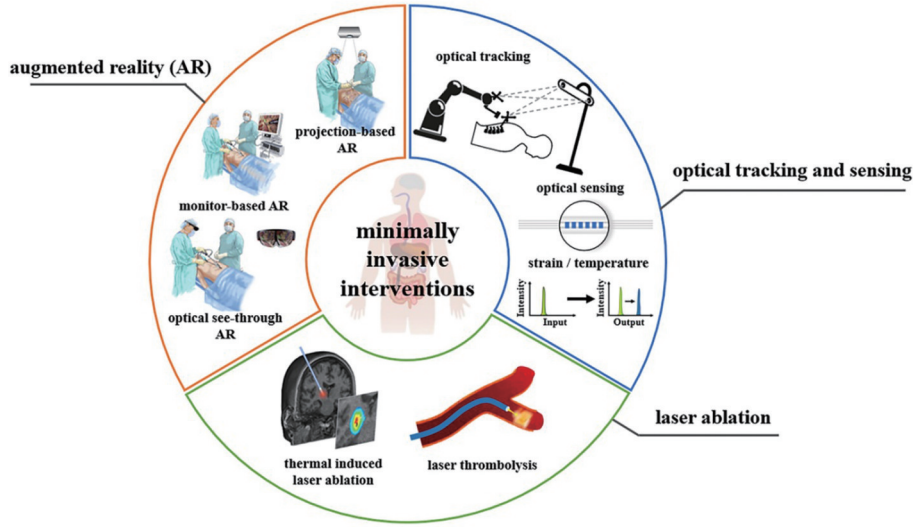


图 1 影像引导微创介入手术中的智能化光学辅助与激光消融概况

Fig. 1 Overview of intelligent optic-assisted techniques and laser ablation in image guided minimally invasive intervention

## 2 微创介入中的 AR 辅助技术

传统二维显示器是影像引导微创介入手术信息呈现的主要方式。从信息角度讲,二维显示器呈现的视觉信息有限,缺少深度信息;且虚拟影像信息与真实手术场景往往空间不匹配。应用于影像浏览、术前规划等场景不利于观察者理解复杂三维结构;应用于影像引导场景易导致手眼不协调。近年来 AR 技术快速发展,为上述问题提供了新的解决方案:通过光学手段及图像算法,AR 可将虚拟信息与现实场景进行匹配并且融合显示<sup>[5]</sup>,进而提升医生操作的准确度与自信度。常见的 AR 方式包括三大类:基于显示器的 AR、基于投影的 AR 以及基于光学透视的 AR,如图 2 所示。从

构成要素看,典型的 AR 方案均包括追踪、配准以及显示三方面关键技术<sup>[6]</sup>。其中,追踪技术用于获取病灶和显示设备等的位置与方向、获取观察者视角等,常见技术包括光学追踪、电磁追踪等;配准技术用于实现虚拟影像信息与实际场景的匹配,包括刚性与形变配准;显示技术则用于以光学手段呈现融合信息。目前 AR 技术在微创介入中已有诸多探索,分别应用于不同类别的手术<sup>[6]</sup>以及手术的不同环节(包括术前规划、术中图像引导等<sup>[7]</sup>)。本节简要综述 AR 辅助在微创介入中的研究进展。

### 2.1 基于显示器的 AR

显示器是影像引导手术中呈现影像信息的常用设备。基于显示器的 AR 可以融合显示实际手术场景与

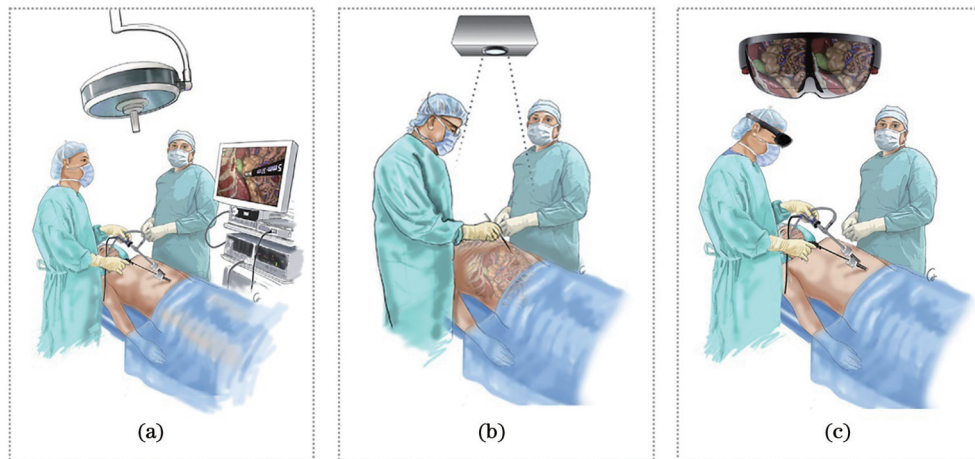


图 2 三种典型的 AR 类型<sup>[8]</sup>。(a) 基于显示器的 AR; (b) 基于投影的 AR; (c) 基于光学透视的 AR

Fig. 2 Three typical types of AR<sup>[8]</sup>. (a) Monitor-based AR; (b) projection-based AR; (c) optical see-through AR

虚拟医学影像,给医生提供更丰富的视觉信息。具体技术原理是采用相机记录手术场景的光学信息,并在计算机中将实际影像与虚拟影像进行融合,最后进行透明度以及色彩调节,通过显示器输出融合的光学信息。利用类似原理,也可以通过智能手机、平板电脑或是头戴设备实现增强现实。其中,头戴设备会遮挡操作者视线,且无法呈现相机视角外的景象,有潜在手术风险,故应用相对较少。

基于显示器的AR早期应用于神经外科手术<sup>[9]</sup>,可将颅内脑结构、血管以及肿瘤等以半透明的方式显示在屏幕上,为医生操作提供丰富的组织信息。伴随着移动设备的发展,后续相关研究开始结合手机、平板电脑等来获得更灵活的AR体验<sup>[10]</sup>。此外,基于显示器的AR也常应用于骨科领域<sup>[11]</sup>。典型研究如:Sutherland等<sup>[12]</sup>开发的AR系统可将脊椎三维影像与

人体图像叠加显示,产生透视效果,用于辅助脊柱穿刺的训练;Auloge等<sup>[13]</sup>在椎体成型手术中,将手术导航系统与AR结合,通过在C形臂上安装相机并在患者体表贴多个标记点,实现虚拟影像与实际场景的配准和融合显示,进而引导医生进行手术。

近年来,许多基于显示器的AR应用于腔镜手术,其中腹腔镜最为典型<sup>[14]</sup>。Hallet等<sup>[15]</sup>将术前重建的解剖模型叠加到手术视野,医生可看到器官表面以下的血管、肿瘤等组织,方便手术的进行,其原理如图3(a)所示。Thompson等<sup>[16]</sup>构建了类似的AR系统用于引导手术,该系统还可显示肝脏的轮廓,辅助医生了解当前的配准精度。除引导手术外,基于显示器的AR也可用于术前规划,例如Coelho等<sup>[17]</sup>在胎儿镜手术中,利用平板电脑将患者虚拟模型与实际影像融合显示,方便医生规划手术。

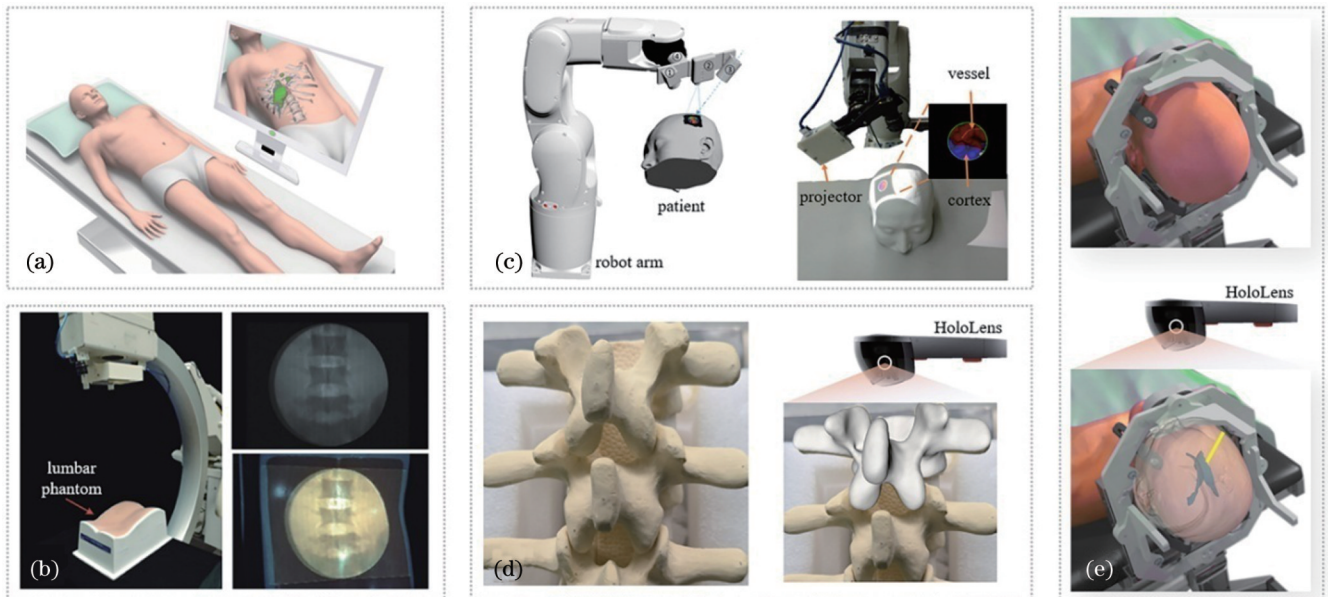


图3 AR辅助微创介入的临床研究示例。(a)基于显示器的AR引导胸腹腔镜手术示意<sup>[15]</sup>; (b)C形臂X射线机的原位投影增强系统以及投影增强示意<sup>[19]</sup>; (c)机器人-投影仪-相机系统及其投影AR功能<sup>[21]</sup>; (d)HoloLens引导下的椎弓根骨钉植入实验示意; (e)HoloLens引导下的脑室外引流示意

Fig. 3 Examples of clinical studies on AR assisted minimally invasive intervention. (a) Trans-thoracic minimally invasive surgery guided by monitor-based AR<sup>[15]</sup>; (b) *in-situ* projection-based AR system for mobile C-arm<sup>[19]</sup>; (c) projection-based AR system which contains robot, projector and camera<sup>[21]</sup>; (d) phantom study of the pedicle screw navigation using Microsoft HoloLens; (e) external ventricular drain insertion guided by HoloLens

## 2.2 基于投影的AR

基于投影的AR,原理是通过设计光路将虚拟影像直接投射至实际场景的物体表面,达到视觉增强的效果。具体实现如下:获取虚拟影像的三维模型;将虚拟影像与实际场景配准;最后,获取被投影的物体表面,并根据投影角度与观察角度,计算出正确的投影图像。

投影AR的典型应用是增强显示静脉<sup>[18]</sup>,其原理为发射红外光到皮肤,由于皮肤与血管对红外光的吸收和散射存在差异,故而可以算得血管的位置,然后以可见光的形式沿原入射光路投影至皮肤表面,达到增

强显示的效果。此类原位投影技术需通过光路设计,保证相机入射光路与投影仪的出射光路一致。利用类似原理,作者所在课题组构建了C形臂X射线机的原位投影增强系统,通过设计将投影仪与X射线机的出射光路重合,进而可以将X射线透视所成的图像直接原位投影到患者的体表<sup>[19]</sup>,如图3(b)所示。

由于投影设备自身不具备空间位置感知能力,投影图像与实际场景的配准往往依赖空间定位设备,如光学追踪、相机、机器人等。Wu等<sup>[20]</sup>在神经外科导航中引入投影增强现实,利用预先标定的相机-投影仪系统,并借助光学追踪设备,实现投影图像与患者体表的

配准,可将脑部肿瘤等信息投射到患者头表。作者所在课题组在立体定向脑电极植入的研究中引入投影增强现实,构建了机器人-相机-投影仪系统;借助结构光完成虚拟图像与患者头皮的配准,随后机器人可带动投影仪,从多角度投射脑相关的结构,医生从特定视角观察即可获得颅内信息,有助于手术安全进行,如图 3(c)所示<sup>[21]</sup>。此外,Wen等<sup>[22]</sup>及Gao等<sup>[23]</sup>也利用类似的技术开发了投影 AR 系统,用于引导微创手术。Gavaghan等<sup>[24]</sup>则构建了便携式投影增强系统,结合手术导航,对投影仪进行标定和配准,可以将脏器内部虚

拟影像沿投影仪视角准确投射到脏器表面,且投影方向可以灵活改变。

### 2.3 基于光学透视的 AR

基于光学透视的 AR 设备通常包括图像源器件和显示光学系统。传统的显示光学系统关键部件为半透半反镜,图像源器件将虚拟影像投射到镜子上,投射光路经反射与入射的实际场景光路叠加,实现虚拟与现实融合的效果,如图 4(a)所示。近些年,以 HoloLens 为代表的头戴式光学透视 AR 设备在教育、工业、医疗等多个领域引起广泛关注<sup>[25]</sup>,也是目前多领域研究的热点。

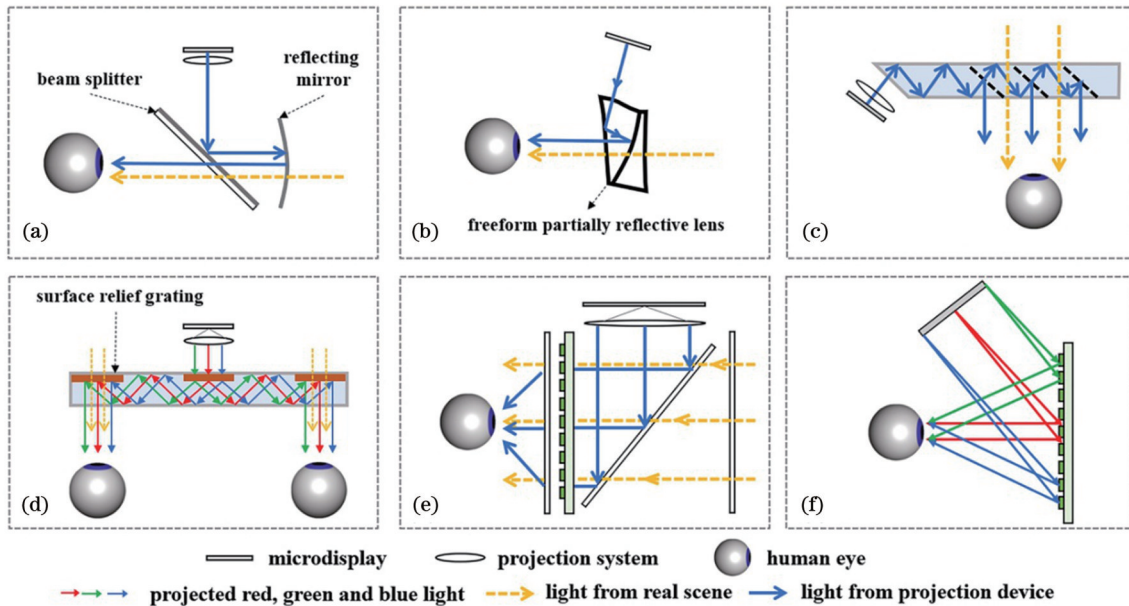


图 4 基于光学透视 AR 的光学系统的常见方案。(a) Birdbath 光学方案;(b)自由曲面棱镜方案;(c)几何光波导方案;(d)衍射光波导方案中的表面浮雕光栅方案;(e)超透镜方案;(f)超表面方案

Fig. 4 Solutions for optical system of optical see-through AR. (a) Birdbath optics; (b) freeform prism; (c) geometric optical waveguide; (d) diffractive optical waveguide solution: surface relief grating; (e) metalens; (f) metasurface reflector

头戴式光学透视 AR 目前有多种解决方案,根据系统的光学特性,可分为三类:基于宏观光学、微观光学以及纳米光学的技术方案(见图 4)<sup>[26-28]</sup>。其中宏观光学方案基于斯涅耳反射和折射定律,包括传统光学、自由曲面棱镜和几何光波导等;微观光学方案基于衍射光波导,包括表面浮雕光栅、全息光栅等;纳米光学方案则是基于广义折反射定律,包括超透镜与超表面元器件等。综合考虑设备的体积、视野、光效率、成本、工艺和成像质量等因素,目前市面上流行的头戴式光学透视 AR 多数采用几何光波导和衍射光波导,比如 HoloLens 1, Magic leap 2 等。基于纳米光学的超表面、超透镜技术目前尚处于发展阶段<sup>[27]</sup>。

在医学领域中,光学透视 AR 被广泛应用于数据显示、引导手术、手术训练等领域<sup>[29]</sup>。有诸多针对骨科,尤其是脊椎疾病治疗的 AR 应用研究<sup>[30-34]</sup>。典型研究例如:Liebmann等<sup>[35]</sup>研究 HoloLens 引导下的椎弓根骨钉植入,通过标志点的配准,HoloLens 可以将术前分割获得的虚拟椎体叠加到术中视野显示,如图 3(d)

所示。Dennler等<sup>[36]</sup>利用手动配准的方式,将虚拟椎体旋转、平移直至与实际视野中的体模对齐,然后在 AR 引导下进行钻孔操作。在神经外科手术中,Li等<sup>[37]</sup>利用光学透视 AR,将术前分割的脑结构与真实病人头部融合,用于引导脑室外引流,如图 3(e)所示。在血管手术中,研究表明光学透视 AR 能更好地呈现血管的三维结构,便于医生理解<sup>[38]</sup>。除手术引导外,光学透视 AR 还可应用于手术训练,提升操作者的手术技能<sup>[39]</sup>。Unberath等<sup>[40]</sup>则将光学透视 AR 应用于骨科 C 形臂的重复定位中,通过 AR 设备自带的深度相机重建 C 形臂 3D 模型并将其显示在视野中,供医生重置 C 形臂时参考,可减少透视的次数。除利用商业 AR 设备外,部分研究组自制光学透视 AR 设备。Liao等<sup>[41]</sup>利用半透半反镜并结合立体视觉技术,实现真三维影像与术中实际场景的融合显示。此后相关技术也被用于牙科<sup>[42]</sup>和膝关节手术<sup>[43]</sup>,且系统分辨率和可视范围在逐渐提升<sup>[44]</sup>。

近年来,光学透视 AR 在手术辅助方面的应用备

受关注,“智能化”成为重要的发展趋势,尤其在影像配准和虚拟影像的特征获取等方面。其中一些典型的研究包括: Brunet 等<sup>[45]</sup>提出了一种基于神经网络的形变配准方法,应用于肝脏手术的增强现实,可以快速、精准地实现术前影像和术中影像的配准; Doughty 等<sup>[46]</sup>利用深度网络直接从照片中估计手术工具的姿态,并在 HoloLens 的视野内呈现;此外,该团队还利用深度网络进行操作图像的语义理解<sup>[47]</sup>。人工智能使得增强现实能适应更复杂的任务和环境,越来越多的研究开始探索人工智能在增强现实中的应用。

#### 2.4 微创介入中 AR 辅助技术发展的前景与趋势

AR 辅助技术为微创介入提供了新的信息可视化方式。三种典型 AR 在实际使用中各有优缺点: 基于显示器的 AR 优势在于多个操作者可共享同一视野,便于术中信息交流;但显示器呈现的视野取决于相机,可能存在分辨率不足或几何形变的问题。基于投影的 AR 优势在于虚拟影像直接投射到真实物体表面,医生可直接在手术视野中获得虚拟影像信息,避免了术中手眼不协调的问题;但若投影深部三维信息,则容易产生视差(即从不同位置和角度观察,结果会不同),造成引导误差。基于光学透视的 AR 同样也可提供直观的虚实融合影像,解决术中手眼不协调的问题;但头戴式设备可能造成佩戴不适或眩晕等问题。总体而言,头戴式的光学透视 AR 是目前发展的趋势和热点。但针对 AR 辅助微创介入,目前大多数研究仍处于实验室阶段,临床应用并不广泛<sup>[48]</sup>。这不仅与设备性能不足、渲染分辨率不佳以及存在配准误差等有关<sup>[34]</sup>,也与光学透视 AR 本身的感知限制有关<sup>[49]</sup>。

现阶段,AR 辅助微创介入仍然存在诸多技术挑战,未来的发展将重点从配准算法、感知与交互技术、显示技术、结合生物自发光等方面展开。“智能化”将是重要的发展方向,以深度学习为代表的人工智能技术将发挥重要的作用,使得增强现实中的配准和交互更加智能、准确与高效。具体而言:首先,增强现实中无标志点的配准有重要的实用价值,尤其是针对基于面数据的形变配准<sup>[14]</sup>。目前,结构光<sup>[50]</sup>、深度相机<sup>[51]</sup>等新的光学设备为术中表面获取提供了便利,在此基础上,基于深度学习、物理模拟的形变配准算法展现出潜力<sup>[45,52]</sup>,使得配准更加便捷、准确和实时。其次,与 AR 设备的交互是其临床推广需要面对的重要问题,现阶段的发展趋势是结合多元信息的感知以及人工智能技术。新技术应用将使得增强现实在交互方面更加智能,能够理解人的操作,降低操作者的使用负担。此外,在显示技术方面,前沿研究重点关注新型光学显示系统的设计<sup>[27]</sup>,一方面减小设备体积、重量,另一方面通过改善可视范围和分辨率提升显示性能;裸眼立体视觉显示也是目前研究的热点方向之一<sup>[53]</sup>。最后,结合生物自发光的增强现实也是近年研究关注的重点之一。以荧光成像<sup>[54-55]</sup>为例,生物自发光可为肿

瘤切除提供精准引导。如何在 AR 中结合生物自发光提升手术引导的准确性,是增强现实应用于微创介入的前沿问题之一。

### 3 微创介入中的光学追踪与感知技术

微创手术中患者病灶多位于体内深部,治疗过程则完全在皮下进行,医生难以直接观察,因此需对解剖结构与手术器械进行定位追踪和感知。光具备的直线传播、反射、折射等物理特性可为上述问题提供不可替代的解决方案:光学追踪技术通常用于刚性组织和手术器械的位置测量和追踪;而光纤布拉格光栅(FBG)则可用于柔性针等手术器械的形变测量,同时也可用于感知微创介入中器械与组织的作用状态,如受力状态、温度状态等;此外,光学成像技术以及结构光学 3D 表面重建的技术可用于柔性组织的形态感知。本节将重点关注光学技术在微创介入手术中的定位追踪与感知研究,分别从基于光学的定位追踪、基于光纤布拉格光栅的作用状态感知和基于光学的组织形态感知三方面进行综述。

#### 3.1 基于光学的定位追踪

光学追踪设备是影像引导微创介入手术的关键设备,也是手术导航、机器人的核心部件。其基本原理是利用两条以上相交的光线,确定空间中的唯一点坐标;再通过对 3 个以上目标空间点坐标进行测量计算,唯一确定被测刚体的位置和姿态<sup>[56-57]</sup>,如图 5(a)所示。光学追踪系统一般由双(多)目相机、追踪标记以及控制器 3 个基本单元组成。其中双(多)目相机负责从多个角度感知目标信息;追踪标记固定在被追踪对象上,负责为相机提供鲁棒的追踪特征;控制器负责处理相机获取的信息并解算出目标空间位置。目前,光学追踪设备已经应用于各类微创介入手术中<sup>[58]</sup>。根据病灶组织和手术器械刚度特点,光学追踪系统也发挥着不同的作用。在神经外科手术中,颅脑近似刚体且刚性固定,光学追踪设备仅需用于手术器械的空间追踪<sup>[59-60]</sup>;在骨科微创手术中,骨组织为刚性浮动固定,光学追踪系统既需要追踪手术器械位姿,又需要实时确定目标骨组织的空间位置和姿态<sup>[61-63]</sup>。在肝脏和肺部的介入手术中,病灶组织属于典型的非刚体结构,光学追踪系统通常仅能进行介入器械的追踪,而组织的位置形态信息通常由动态的超声或者 CT 获得<sup>[64]</sup>。

工具标定和空间配准是光学追踪系统应用于微创介入必须要解决的问题。光学追踪系统只能给出特定光学标记的空间位置和姿态,而临床医生则关心手术器械作用点相对于病灶的位置。因此,必须通过工具标定确定手术器械上的追踪标记和器械实际作用点的位姿关系矩阵;同时需要空间配准,确定追踪系统坐标系与患者影像坐标系的转换关系。工具标定和空间配准的精度直接决定手术的精度。工具标定可在术前进

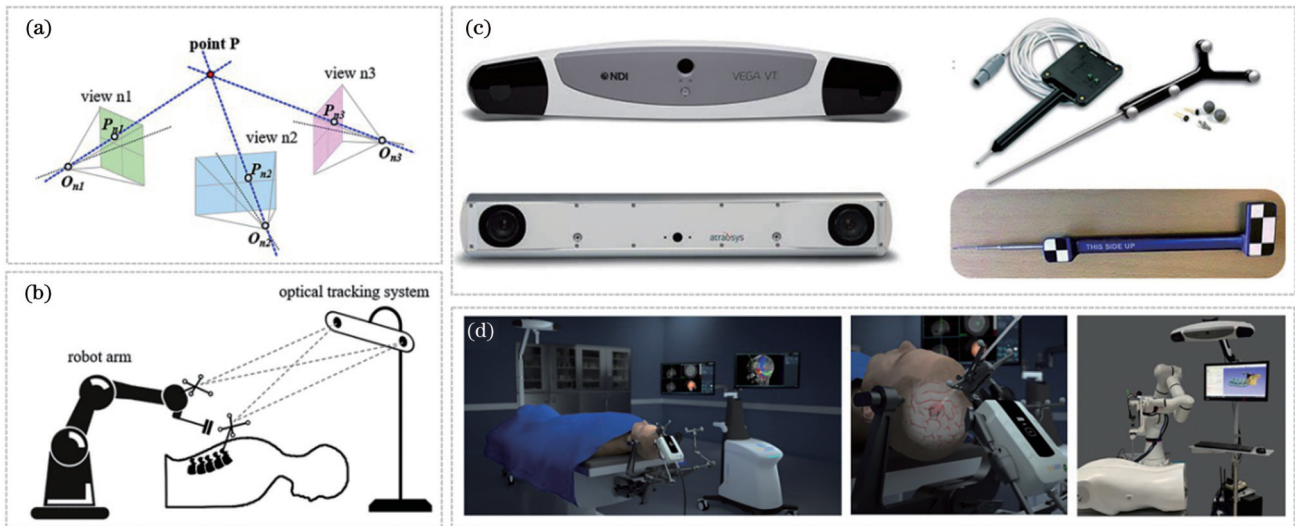


图5 光学追踪原理与应用示意。(a)光学追踪系统原理;(b)光学追踪系统在脊柱手术机器人中的应用;(c)常见的光学追踪系统与追踪标记;(d)光学追踪在微创介入手术中的应用示意

Fig. 5 Principle and applications of optical tracking. (a) Principle of optical tracking system (OTS); (b) application of OTS in robot-assisted spine surgery; (c) common OTS and tracking markers; (d) application of OTS in minimally invasive intervention

行,因此总能通过精细操作以及多次重复获得良好的标定精度<sup>[65-66]</sup>。然而空间配准只能在术中进行,如何在保证精度的前提下,尽可能方便快捷地完成配准过程是临床和工程研究一直关心的问题。Gerber等<sup>[67]</sup>提出利用标记探针识别解剖点的方法进行配准,该方法可以获得0.1 mm的配准精度,但是需要在保证恒力的情况下依次触碰标记点。在机器人辅助的骨科手术中,通常会令患者和机械臂同时扫描成像,以确定二者间的相对位置关系<sup>[61,68]</sup>;但该过程要求机械臂和患者解剖结构同时处于成像视野中,受成像视野范围限制,临床需要较长时间的调整才能完成操作。此外,还可以通过同时扫描追踪标记与患者组织完成配准,此类方法在骨科介入<sup>[69-70]</sup>、肝脏介入等领域均有使用。总体而言,虽然已有各种配准方法,但空间配准仍是微创介入手术中最为耗时的步骤之一。目前已有前沿研究利用深度学习等智能算法实现高效配准<sup>[71]</sup>,这也是未来研究人员将持续关注的重要方向。

遮挡是光学追踪系统面临的主要挑战<sup>[72]</sup>。一方面,手术环境较为复杂,手术操作中人体或仪器设备很容易阻挡追踪系统和标记间的光线;另一方面,受视角、工作范围等限制,也经常会发生追踪目标超出追踪系统视野限制的情况。此类事件一旦发生就会导致光学追踪系统失效。提升系统的冗余性是研究者常采用的一种应对方案。有研究通过增加追踪相机的数量来解决该问题,确保至少同时有两个相机可追踪到目标<sup>[73-76]</sup>。还有通过信息融合的方式解决光学追踪系统的遮挡问题,比如将光学追踪系统与电磁追踪系统<sup>[77]</sup>或惯性传感系统的信息融合<sup>[78]</sup>。另一类解决方案是赋予光学追踪系统主动调整视野的能力,如通过机器人的感知决策来及时调整追踪视角,确保手术目标在视

野空间内,避免遮挡<sup>[79-80]</sup>。作者所在课题组也对遮挡问题进行了多方面探索,提出了光学与惯性传感器组合定位的手术导航方法<sup>[81]</sup>、机器人多视角视觉感知<sup>[82]</sup>、具备主动视觉功能和优化视角布置的eye-in-body机器人视觉系统布置方案等<sup>[79]</sup>。虽然无遮挡影响的电磁追踪系统很早就被推出<sup>[83]</sup>,但由于光学追踪系统有精准方便的优势,在影像引导的微创介入手术中尚无法被替代。无论是提升系统的冗余性还是主动视角调整,其中都面临着很多信息感知、融合、决策、计算的问题,智能化的视觉追踪仍有很大研究空间。

随着微创介入手术的日益普及,在保证手术精度和安全性的前提下,临床对影像引导系统也有了更高的智能性的需求。这要求光学追踪系统不仅能精准地获得位姿,还能感知更多的手术场景信息。NDI公司最新的Polaris Vega® VT光学追踪系统不仅可以追踪空间位姿,还可以进行实时视频捕捉(参见<https://www.ndigital.com/optical-measurement-technology/polaris-vega/>)。欧洲的FusionTrack追踪系统也同时具备了位姿追踪和视频成像功能(参见<https://www.atracsys-measurement.com/wp-content/documents/fTk250-datasheet.pdf>)。但是如何有效地理解所获得的视觉环境信息,如何使其更好地提升微创手术的智能性,仍是需要探讨的问题<sup>[84]</sup>。Mascagni等<sup>[85]</sup>的研究指出了机器学习等人工智能技术在智能手术操作中的用途。2020年Haque等<sup>[86]</sup>就医疗场景下环境感知和环境智能相关问题进行了系统的综述。作者所在课题组近期也在神经外科微创介入手术中探索了针对手术关键目标的识别、分割<sup>[87]</sup>和姿态估计方法<sup>[88]</sup>。

### 3.2 基于光纤布拉格光栅的作用状态感知

光学追踪设备仅能表征刚性组织与刚性器械空间

的位置关系,对于软组织、细长柔性的手术工具则难以发挥作用,也无法获取工具与组织间作用产生的应力、形变、温升等物理参数。广义来看,FBG 是一种可将不同能量表征参数(如电、热、机械能等)与光波长相关联的光纤传感器,如图 6(a)所示。FBG 具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰、易于分布式布置的优点,可以实现形变、应力、温度、振动等各类信号的测量。随着柔性器械在微创介入中应用的深入,FBG 逐渐成为微创医疗传感领域关注的热点<sup>[89]</sup>。

如图 6(b)所示,FBG 在纤芯内部有周期性分布的光栅,对入射光的波长具有选择作用。当宽带光源进入光纤中时,只有特定波长的光信号会反射,在反射谱上呈现波峰。当等距的光纤光栅受外力、温度等能量作用时,光栅间距会发生改变,从而引起反射波峰的偏移<sup>[89-90]</sup>。通过对偏移量的分析可以确定光栅部位的物理信息变化。单个光栅可以测量单点的应变、温度变化,在同一光纤上刻入多个不同间距的光栅则可以根据反射波长的差异解耦出不同位置的传感信息。多个 FBG 按一定规律同时布置,则可以实现空间信息传感。在微创介入领域,FBG 在器械-组织间的力传感、组织温度传感、器械形变传感等方面均有巨大的应用潜力。

针尖受组织力作用发生形变,偏移原设定轨迹是影响微创介入精度的主要因素之一。2010 年 Park 等<sup>[91]</sup>将 3 个 FBG 传感器嵌入活检针,每条光纤具有 2 个光栅检测点,实现对活检针受力和弯曲的同时测量,进而可以实时跟踪针的轨迹,减少治疗误差,如图 6(c)所示。斜尖针在组织中穿行会受到侧向力作用偏离直线路径,针对该问题 Kim 等<sup>[92]</sup>基于 FBG 建立

了针尖运动传感模型,可以实时生成针尖变形轮廓,帮助操作者更好地规划路径。Zhang 等<sup>[93]</sup>基于 FBG 设计并优化柔性针的形态感知方案,同时结合新的局部曲率模型,提升了形态感知精度。FBG 可实现体内柔性器械的位置感知,但也应该看到,该方法给出的是针尖的相对形变,其在影像空间中的全局位置仍需要结合光学或电磁追踪系统对工具参考点的位置进行追踪才能获得。

在热消融手术中,监测并控制目标组织的温度至关重要。FBG 传感器可用于测温,且体积小,电磁兼容性能优良,因此 FBG 在微创介入的温度测量中备受关注。Chen 等<sup>[94]</sup>设计了一种用于肿瘤消融的温度探针,可实时检测消融过程中的温度。2022 年, Sametova 等<sup>[95]</sup>基于多个 FBG 光纤传感器实现了消融过程中血管周边热图的构建。Bianchi 等<sup>[96]</sup>利用飞秒刻写技术优化 FBG 光栅,在金纳米棒介导的光热治疗中,实现了肿瘤内部的温度监测。

光栅受力后可产生应变,对应布拉格波长发生改变,由此 FBG 可检测应力信息。由于 FBG 光纤直径很小,检测灵敏度极高,非常适合精细手术中的微力测量。例如,He 等<sup>[97]</sup>将 FBG 传感器与眼科手术钳集成,实现视网膜微创手术器械微操作力的感知。此外,通过多个 FBG 光纤集成还可以实现介入过程多维力感知,典型的如 Du 等<sup>[98]</sup>提出的基于 FBG 的显微内窥镜手术力感知系统,其中涉及到的多维力传感设计如图 6(d)所示;Li 等<sup>[99]</sup>设计了基于 FBG 的紧凑型的三轴力传感器,设计原理如图 6(e)所示;Gao 等<sup>[100]</sup>设计了基于螺旋 FBG 传感器的共焦激光内窥镜接触检测系统。

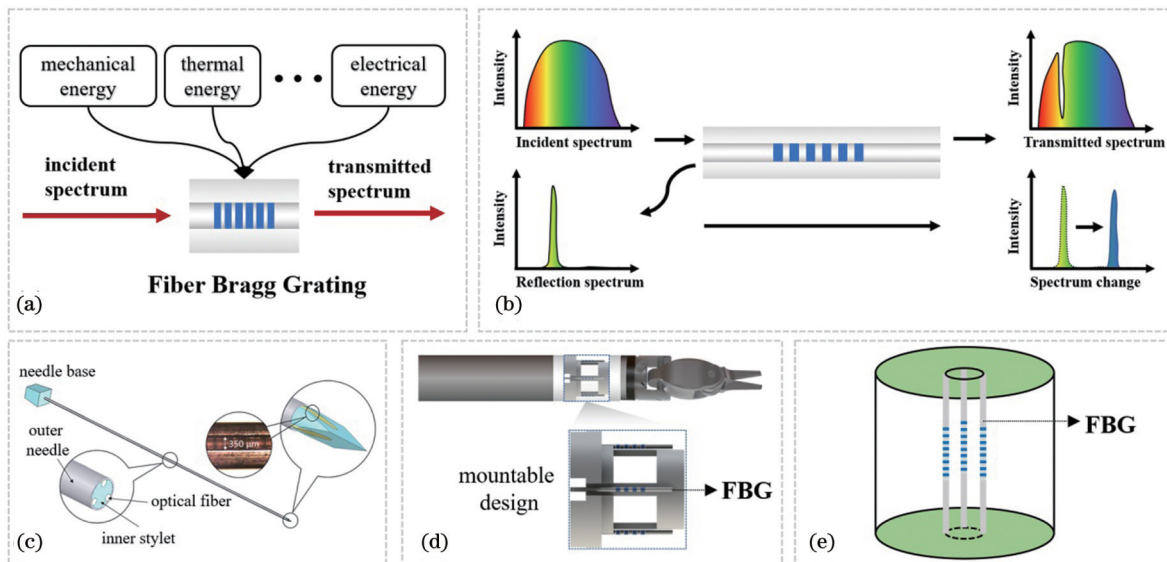


图 6 FBG 的原理与应用示意。(a)FBG 作为传感器的广义原理示意;(b)FBG 测量应力或温度的基本原理<sup>[89]</sup>;(c)FBG 传感器在感知柔性针形变中的应用<sup>[91]</sup>;(d),(e)FBG 传感器在微创介入器械中多维力感知设计原理示意图<sup>[98-99]</sup>

Fig. 6 Principle and applications of FBG. (a) Generalized principle of FBG as sensor; (b) principle of measuring strain or temperature using FBG<sup>[89]</sup>; (c) application of FBG-based shape sensing for flexible needles<sup>[91]</sup>; (d), (e) multi-dimensional force sensing design of FBG sensors in minimally invasive surgical instruments<sup>[98-99]</sup>

### 3.3 基于光学的组织形态感知技术

微创介入手术中,柔性组织除产生位移外,还可能产生不规则形变。精确定手术对象的实时形态对手术安全有重要意义。基于光学的组织形态的感知可分为两类:一类是基于光学的 3D 表面形态测量技术,另一类是光学成像技术,如光学相干断层成像(OCT),光声成像(PAT)以及共聚焦成像等。

基于光学的 3D 表面形态测量是一种无接触的技术,具有较高形态测量精度,并可避免对柔性组织产生力学形变干扰。常见的被动测量方法包括立体视觉、单眼形态恢复以及即时定位和地图构建(SLAM);主动测量方法则包括基于结构光和飞行时间(ToF)的 3D 重建<sup>[101]</sup>。由于表面测量技术仅能获取表面信息,因此需要与配准算法结合,才能获取组织表面下的信息。作为一种组织信息感知手段,3D 表面重建技术被广泛应用于腹腔镜手术中,用来重建软组织表面<sup>[102]</sup>。此外,作者所在课题组提出了基于结构光的神经外科微创介入配准方法<sup>[21]</sup>,通过结构光感知患者头部形态信息(如图 7 所示),实现物理空间与影像空间的配准,

进而可以获知术前 MRI 影像提供的脑组织信息;该技术已经在商用神经外科机器人中得到了临床验证(参见 <http://www.sinovationmed.com/>)。另一方面,光学成像技术,如 OCT、PAT 以及共聚焦成像等,也可用于组织形态的感知。相比于表面测量方法,光学成像技术可以获取组织表层之下的图像信息。不同光学成像方式的成像深度有所差异,其中 PAT 成像深度可以达到厘米级,OCT 为毫米级,共聚焦成像介于微米与毫米级之间<sup>[103-104]</sup>。因此,应用于定位组织形态与手术工具,PAT 有一定优势,比如引导微创介入中针状类手术工具的置入。相比之下,OCT 与共聚焦成像限于成像深度,仅适合组织浅表的手术操作引导。此外,光学成像有较高分辨率,可以用于一些精细手术操作的引导(如 OCT 引导眼部微创手术<sup>[105]</sup>);同时高分辨率的光学图像能提供组织形态之外的信息感知,可用于组织类型的判断或是在手术中辅助确定肿瘤的边缘<sup>[105-106]</sup>。将光学成像集成到微型探头,经自然腔道到达体内深处,进一步拓展了光学成像在手术引导中的信息感知应用范围。



图 7 基于结构光的患者头皮形态感知

Fig. 7 Scalp shape sensing based on structured light

总体来说,基于光学的物体表面重建技术已经较为成熟,但是精细表面重建往往比较耗时,不易达到微创介入手术实时形态感知的要求。以深度学习为代表的人工智能算法正在成为 3D 表面重建发展的新趋势<sup>[107]</sup>。相比传统算法,智能重建在表面质量以及重建速度方面均有较大提升。此外,人工智能在计算机视觉领域的飞速发展,也为表面信息的理解奠定了基础。光学成像技术则进一步拓展了组织信息感知的范围,除组织形态外,高分辨率的光学图像还可以提供组织微观特征、组织类别等多维度的信息来引导手术。

### 3.4 微创介入中光学追踪与感知发展的前景与趋势

面对微创介入手术中的组织、器械的位姿追踪和形态测量等问题,光学技术已给出了很多高效、临床可行的方案。凭借高精度空间定位能力、形态感知能力以及作用状态感知能力(力、形变、温度等),光学技术正在被研究者快速地引入微创介入导航和微创介入机

器人等领域。与此同时,人工智能技术的快速发展也为光学辅助技术中的难题提供了新的解决方案。

光学追踪系统的发展将重点围绕光线遮挡问题与空间配准问题,“智能化”将是研究的趋势。一方面,光学定位技术将与人工智能结合,同时融合多元信息(如电磁追踪、主动视觉等),来避免临床应用存在的光线遮挡,增强追踪系统对复杂环境的适应度。另一方面,基于深度学习的配准技术也将进一步提升配准的精度和效率,降低临床医生的使用负担。

随着增强现实、手术机器人、智能诊疗技术的发展,微创介入手术信息需求将会更加多元化,不再局限于空间位置和姿态的坐标信息。术中感知组织的多维度信息也是手术导航研究的重点,感知、处理和解读术中组织信息将为治疗的精准性提供重要支持。

FBG 在柔性器械变形感知、组织温度感知、微创介入器械作用力感知方面展现出极强的应用潜力,是



现阶段微创介入手术信息感知的重要研究领域。外界能量作用引起的光纤单向应变是FBG工作的基础,前沿的研究更加关注如何设计合适的FBG阵列方案,将一维的应变信息有效组合为多维受力与器械形变。同时,FBG在工作中往往受到力、温度等多重的能量相互作用,造成信息耦合(典型的如温度变化影响力学测量、应力变化影响温度测量),进一步优化设计传感方案、阵列刻写方式,准确解耦出目标信息,是提升感知准确性的重要方向。此外,调制解调器的小型化也是FBG应用于临床的重要发展方向<sup>[108]</sup>。

基于光学的表面重建以及光学成像技术也是组织多维信息感知的重要手段。进一步的发展将与人工智能密切结合。基于深度学习的表面重建算法将提升重建的精度与速度。虽然表面形态感知难以获取组织内部信息,但是通过配准算法与术前的CT、超声、核磁等影像数据结合,可以实现组织三维形态的感知。智能算法也将应用于表面数据的识别与理解,尤其是临床获取的稀疏、无序、有噪声的表面数据。光学成像技术是重要的组织多维信息来源,临床的应用将产生大量有价值的影像数据,在此基础上,智能分割、识别等技术有巨大的探索空间。

## 4 微创介入中的激光消融技术

前文主要关注利用光的信息属性来提供手术可视化与信息感知。除信息属性外,光还具备能量属性,可应用于疾病的治疗。激光消融是非常典型的激光治疗形式:首先,激光能量集中,有较好的空间指向性,可用于局部组织的烧蚀;其次,相比于传统的消融,激光可以通过细长光纤灵活地到达病灶部位;第三,激光消融的光纤电磁兼容,可以与MRI温度监测结合,实现更加准确的治疗。目前激光消融在临床中应用广泛,可用于眼科、皮肤病、肿瘤、血栓治疗等<sup>[109]</sup>。本文重点关注激光消融在微创介入领域中的应用,主要是肿瘤治疗(尤其是脑部肿瘤)和血栓溶栓。接下来,本节将首先综述激光消融治疗的基本原理,随后介绍其在微创介入治疗中的应用研究,最后总结其发展趋势。

### 4.1 激光消融的基本原理

激光消融与传统组织热消融(射频消融、微波消融等)原理相似,通过将细长光纤经皮或经自然腔道置入到病灶,随后将激光经光纤传导作用于组织,组织升温使得蛋白质变性、组织凝结,进而达到治疗目的<sup>[110]</sup>。

常见的激光消融设备主要由激光器和光传导介质组成。激光器产生固定波长的激光,目前常见的有两种:Nd:YAG(掺钕铝石榴石)连续激光器(中心波长为1064 nm)和二极管激光器(波长800~980 nm)<sup>[111]</sup>。光传导介质为0.2~0.8 mm的细长光纤,材质常为石英或蓝宝石,可大幅度降低激光传输过程中的能量损失,进而可将激光传递到深部组织。早期的研究将裸露光纤直接作用于组织,容易导致局部过热使组织碳

化,降低了光在组织中的穿透能力。经改进,现有的激光消融设备中,光纤外部均加有透明导管,用于降低光密度,防止过热;同时引入了冷却机制,在透明导管中通过恒定流体或冷却气体对光纤进行降温,进一步降低了过热的风险,如图8(a)所示。

激光作用于组织主要有五种效应:光化作用、热相互作用、光蚀除、等离子体诱导蚀除、光致破裂<sup>[109]</sup>。从能量密度的角度来看,不同作用的能量密度范围大约都是1~1000 J/cm<sup>2</sup>,而从功率密度来看,不同作用之间的功率密度数量级差异则较大。连续波或曝光时间大于1 s的脉冲对应于光化作用;曝光时间从1 min到1 μs对应热相互作用;曝光时间从1 μs到1 ns对应光蚀除;曝光时间小于1 ns对应等离子体诱导蚀除和光致破裂。具体的作用原理和特性可参见文献<sup>[109]</sup>。

上述几种效应中较典型的是热相互作用。激光作用于组织可发生吸收、反射与散射,吸收的部分转化为热能。组织对激光吸收和散射的效率与激光波长密切相关,与此同时激光的波长也影响激光穿透生物组织的深度。在实际使用中,Nd:YAG激光器产生的激光在1000~1100 nm波长范围(近红外波长范围)时,可以达到较高程度的组织穿透,适用于具有高血流灌注的软组织消融,如高度血管化的脑组织等;二极管激光器与Nd:YAG相似,但是设备更加小巧和便携<sup>[112]</sup>。此类以光热效应为主的激光器多为连续型,一般功率在30 W以下,治疗时间范围为几分钟到20 min<sup>[113]</sup>,可适用于多种疾病,比如甲状腺结节、肝肿瘤、脑肿瘤等。连续激光的光热效应易形成热量累积,也会损伤正常组织。相比之下,激光器产生脉冲激光时(峰值功率可高达100 W),可以一定程度上抑制光热消融积累,同时也可引发光化学、光机械等多种效应,使得病变组织迅速消融,此类激光器在治疗血管疾病上有独特优势,可用于血栓溶栓治疗等<sup>[114-115]</sup>。

### 4.2 激光消融在肿瘤治疗中的应用

激光消融始于20世纪80年代末,但其临床应用却颇受限制<sup>[116]</sup>,主要原因是当时缺少相应的精确控制与监测手段。近年来,伴随着光学技术及医学影像技术的快速发展,激光消融技术在临床中的应用越来越广泛。尤其是MRI引导下的激光消融,在肿瘤精准治疗领域有独特的优势,MRI不仅可以在术前提供清晰的结构影像,还可以在术中提供实时的温度监测,如图8(b)所示,大大降低了手术的风险<sup>[117]</sup>。

激光消融的典型应用是神经外科领域。早在1983年,Bown<sup>[118]</sup>首次利用激光(Nd:YAG)在体外脑组织进行了消融实验。随后Sugiyama等<sup>[119]</sup>在临床上利用激光消融治疗脑肿瘤,验证了其安全性。现阶段,激光消融可应用于多种脑部疾病治疗,尤其是神经胶质瘤。Banerjee等<sup>[120]</sup>回顾了应用于神经肿瘤的激光消融研究,结果表明针对复发的神经胶质瘤,激光消融较

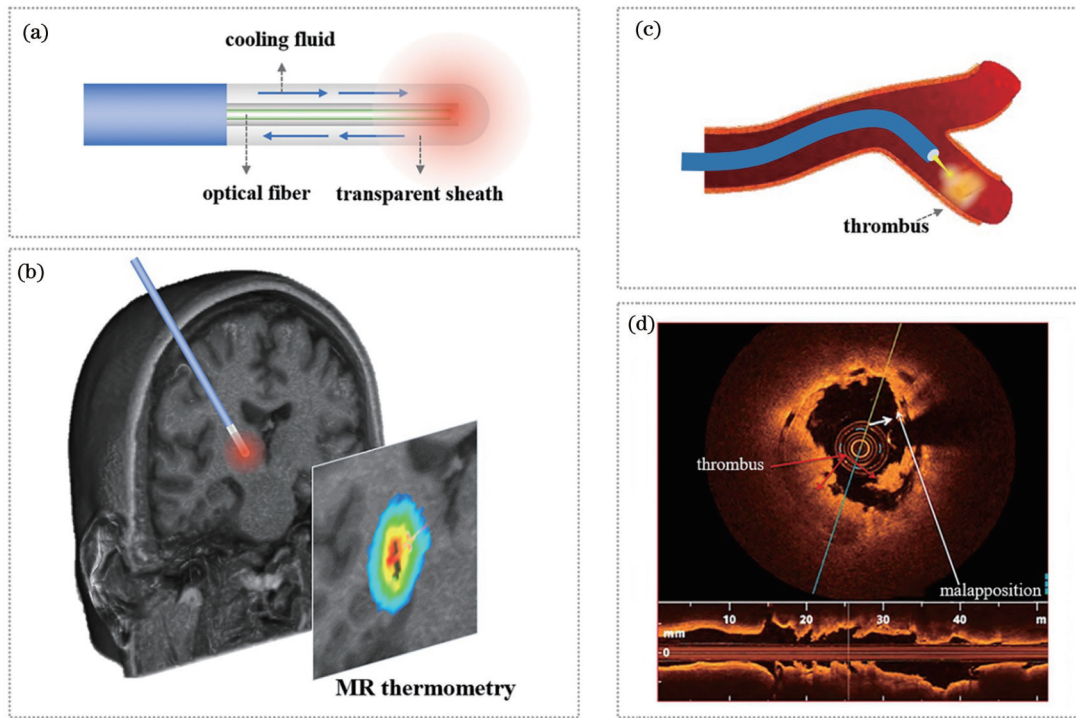


图 8 激光消融的原理与应用示意。(a)激光光纤的水冷示意图;(b)MRI 引导的脑部肿瘤激光热消融示意图;(c)激光溶栓示意图;(d)光学断层成像下的血栓图像<sup>[115]</sup>

Fig. 8 Principle and applications of laser ablation. (a) Schematic diagram of cooling mechanism for optical fiber; (b) MRI-guided laser ablation for brain tumor; (c) schematic diagram of thrombus removal by laser ablation; (d) thrombus images generated by OCT<sup>[115]</sup>

传统的化疗、手术治疗,可达到更长的总生存期。Montemurro 等<sup>[121]</sup>对 17 项应用于复发性神经胶质瘤的激光消融研究进行分析,也表明激光消融是复发神经胶质瘤的有效治疗方式。此外,激光消融目前也是药物难治性癫痫的新型治疗手段,Shimamoto 等<sup>[122]</sup>对相关研究进行了总结,说明了激光消融在消除癫痫上的有效性。而对于较复杂的癫痫病况,病灶位于大脑深部,激光消融相比于传统开颅手术,可以大大降低并发症发生的概率,有重要的临床价值<sup>[122]</sup>。除神经外科领

域,激光消融还常应用于甲状腺疾病的治疗,可以达到与传统射频消融相近的效果<sup>[123]</sup>;同时,配合温度监测可以防止损伤喉返神经等周边重要组织。此外,激光消融还应用于肝肿瘤<sup>[124]</sup>、肺肿瘤<sup>[125]</sup>、乳腺肿瘤<sup>[126]</sup>、前列腺癌<sup>[127]</sup>等的治疗,具体的对比如表 1 所示。总体来说,激光消融的优势在于可以结合温度场的实时监测,实现精准治疗,因此可用于一些风险较高的手术情况<sup>[128]</sup>。但激光消融在实施时,光纤的准确放置需要医生有丰富的经验,尤其是针对多个光纤治疗的情况。

表 1 激光消融应用在不同类型肿瘤治疗的对比

Table 1 Comparison of laser ablation applications in treatment of various tumors

	Brain tumor <sup>[116]</sup>	Liver tumor <sup>[124]</sup>	Lung tumor <sup>[125]</sup>	Breast tumor <sup>[126]</sup>	Prostate tumor <sup>[127]</sup>
Laser type	Nd:YAG /diode laser	Nd:YAG /diode laser	Nd:YAG /diode laser	Nd:YAG /diode laser	Nd:YAG /diode laser
Imaging guidance	MRI	MRI, ultrasound, CT	MRI, CT	Ultrasound, MRI	MRI, ultrasound
Number of ablation needles	Single	Single or multiple	Single or multiple	Single	Single or multiple
Anesthesia methods	General anesthesia	General or local anesthesia	General or local anesthesia	Local anesthesia	General anesthesia
Major complications	Edema, functional tissue injury, bleeding, etc.	Bleeding, pneumothorax, bile duct injury, liver failure, etc.	Pneumothorax, bleeding, etc.	Bleeding, subcutaneous lung emphysema, pneumothorax, skin burns, etc.	Hematuria, urinary incontinence, acute urinary retention, etc.

精准性与安全性目前仍是激光消融领域研究的热点,尤其是针对神经外科领域的应用。目前,结合传统

机器学习或是人工智能,已经提出了多种计算机辅助技术和机器人辅助技术来提升激光消融的精准性与安

全性。其中“智能化”图像算法是关键的发展方向之一。基于深度学习的影像分割算法可以提供个性化的解剖模型,在此基础上,诸多研究围绕路径规划展开,比如直线入路规划<sup>[129-130]</sup>及激光消融曲线路径规划<sup>[131]</sup>;智能分割得到的解剖模型也是个性化消融模拟的重要前提;而精准的个性化消融模拟预测,包括光热转换、热传导、热损伤等过程,是诸多研究人员关注的重点<sup>[132-133]</sup>。作者所在课题组也提出了一种基于统计分布的热损伤预测方法<sup>[134]</sup>,可利用术中温度数据预测组织的损伤状态。在消融精准执行方面,辅助机器人近年来备受关注<sup>[135]</sup>。此外,在消融过程中,组织变化和三维状态下温度的监测是保证消融效果以及消融安全性的重要手段,相关的研究越来越受到关注<sup>[136]</sup>,前沿的探索正在围绕基于 MRI 的三维空间温度监测展开<sup>[137]</sup>。

### 4.3 激光消融在血管疾病治疗中的应用

除肿瘤治疗外,激光消融还可应用于血管病变的治疗,尤其是血栓溶栓,如图 8(c)所示。高功率的脉冲激光可以使血栓快速消融,达到治疗目的,在溶栓上有独特优势。

早期的激光溶栓研究多在体外进行,用于探索和优化与溶栓效果相关的激光参数。Grundfest 等<sup>[138]</sup>进行动脉粥样硬化的体外溶栓实验发现,准分子激光比 Nd:YAG 产生的切口更深、热损伤更少,因而更适合血管内消融手术。Janis 等<sup>[139]</sup>提出一种体外实验方法,用来评估激光参数改变对溶栓效率的影响;实验表明较低的脉冲能量和较高重复频率同样可保证溶栓的效率,该研究为后续临床应用提供了依据。Papaioannou 等<sup>[140]</sup>随后对溶栓过程产生颗粒的机理进行了相关研究。

在体外实验的基础上,激光消融可应用于静脉血栓的消融。Boersma 等<sup>[141]</sup>的临床研究表明能量是静脉激光消融手术成功的关键要素,能量越高,治疗成功率越高。以往临床研究多为短期随访,Wallace 等<sup>[142]</sup>追踪了静脉内激光手术治疗的长期疗效,结果表明相比于切除手术,激光消融手术后复发率更低。除静脉血栓消融外,激光还可以应用于动脉血栓消融。Ginsburg 等<sup>[143]</sup>和 Kennedy 等<sup>[144]</sup>进行了早期的探索,分别在股动脉和冠状动脉进行了溶栓治疗。溶栓效果与激光波长密切相关。其中紫外波段的激光波长较短,穿透深度浅,易于被组织吸收,可有效作用于血栓和斑块。近年来,经美国食品和药物管理局的认证,波长为 308 nm 的激光可应用于冠状动脉病的治疗。目前应用比较成熟的激光器有准分子激光器<sup>[145]</sup>和 Nd:YAG 三次谐波固体激光器<sup>[146]</sup>。Shibata 等<sup>[147]</sup>的研究结果表明 308 nm 激光对于首次发作的心肌梗塞患者治疗效果良好。Herzog 等<sup>[148]</sup>则利用 355 nm 激光作用于外周动脉的钙化性斑块,研究结果显示该波长激光有较高的安全性。与激光热消融类似,图像引导也是激

光溶栓的重要发展方向,术中影像可以帮助评估溶栓效果,有利于进行及时修正,提高手术的成功率。比如,Berndt 等<sup>[149]</sup>在 OCT 的引导下进行激光溶栓,如图 8(d)所示,结果表明结合 OCT 的溶栓未造成血管层破坏。

### 4.4 激光消融发展的前景与趋势

激光目前是微创介入手术中的重要治疗形式,在治疗肿瘤和血管疾病上有重要的临床价值。相比于传统的射频消融、微波消融,激光消融在精准性上有独特的优势:一方面光纤细长,可以灵活地到达深部病灶,配合 MRI 热成像可以保证消融的安全性。另一方面,脉冲激光能量集中,可使组织迅速消融,在血管疾病上有一定的优势。尽管如此,现阶段实现精准消融仍然十分挑战。主要原因在于热消融结果受多物理因素影响,目前缺少精准的预测手段;与此同时,临床置入光纤大多依赖医生经验,精度有限,可能存在风险。

激光消融的精准治疗仍是当前发展的重要趋势,尤其在神经外科领域。具体有如下发展方向:(1)结合人工智能的解剖结构分割。智能化的分割算法可以提供精准的解剖结构,是后续个性化激光消融模拟和手术规划的重要前提。而且基于深度学习的脑结构、脑肿瘤分割一直是医学图像处理领域的热点问题。(2)精准的激光消融数值模拟。结合患者解剖结构,考虑热生成、热传递、热损伤等物理过程,实现准确的个性化消融区预测以及激光治疗参数优化,是许多研究人员正在探索的方向<sup>[150]</sup>。(3)机器人辅助的激光消融。机器人结合智能的影像分割与配准算法,将大大提升光纤植入的精度。(4)消融过程的组织状态与温度监测。近年来越来越多的研究关注消融过程中的温度监测技术,希望通过监测来保证消融的准确性与安全性。(5)结合纳米颗粒的激光消融。通过引入纳米颗粒来增加病灶内的热累积,同时减少对周边正常组织的热损伤。纳米颗粒与激光结合是精准热消融的热点研究方向之一<sup>[151]</sup>。(6)在血管疾病的治疗方面,如何整合术中成像(比如 OCT 技术)来实时监测治疗结果,也是后续重点发展的方向。

## 5 总结与展望

光学辅助与光学治疗技术是微创介入精准治疗的关键技术。其中,光学辅助技术主要利用光的信息属性,包括提供可视化的增强现实技术,以及提供定量信息的光学追踪与感知技术;光学治疗技术则利用光的能量属性,尤其是激光消融技术,在微创介入中有重要临床价值。本文从增强现实、光学追踪与感知、激光消融三个重要方面,来分析总结光学辅助与激光消融技术在微创介入中的研究进展。

AR 技术为微创介入提供新的可视化方式,通过将虚拟影像和实际影像融合,为医生提供更加丰富、直观的视觉信息。现有研究中,AR 设备主要包括基于

显示器、基于投影和基于光学透视三种形式。相比之下,基于光学透视的头戴式 AR 是目前发展的趋势。现阶段,已有诸多 AR 研究应用于不同类型疾病的微创介入治疗,但实际的临床应用相对较少。这与当前 AR 设备的准确度不足、使用舒适度与方便度欠佳有关。今后的研究重点主要围绕 AR 的核心技术展开,包括显示、跟踪与配准。通过研发设计新的光学系统、硬件组合以及新材料,提升 AR 设备的性能与准确度;结合微创介入的实际需求与规范,利用计算机视觉与人工智能技术解决现有方案中存在的跟踪、配准问题,使得增强现实更加智能与高效。

光学追踪与感知可为微创介入提供定量信息,如手术工具的位置与姿态信息、治疗过程的作用状态信息以及组织的多维信息等。现有研究已给出许多高效、临床可行的光学辅助手术方案,但一些不足仍难以避免,比如光学追踪设备被遮挡的问题、空间配准效率问题。伴随着现代手术中信息的不断增多(尤其是影像与视频信息),多元信息融合成为新的研究趋势,既为传统光学追踪带来新活力,也为无标记定位与追踪提供了新的解决方案。今后智能定位、智能配准以及智能手术场景理解将是重点的研究方向,可以为手术提供更丰富精准的定量信息。此外,组织的多维信息感知也是手术导航的重要发展方向。以 FBG 为代表的光学感知,可以测量多种物理状态信息,已成为微创介入手术智能感知的重要领域;基于 FBG 的多维度信息感知(如力、温度感知)应用于微创介入手术,正在被越来越多的研究人员关注。基于光学的表面重建以及光学成像,同样是组织多维信息感知的重要途径,进一步的发展将与人工智能算法密切结合,使得信息处理更加智能化。

激光消融是微创介入中的重要治疗形式,目前已经被应用于肿瘤和血管疾病的治疗。现阶段,MRI 引导的激光消融在精准治疗上展现了独特优势。尽管如此,提高消融治疗的精准度仍然是当前研究的重点。实现该目标一方面依赖于影像信息的智能化处理,比如基于深度学习的解剖结构分割、个性化精准的消融模拟预测等,另一方面也依赖于辅助机器人的发展以及术中温度监测技术的发展。此外,利用激光进行血栓治疗目前仍是比较新的领域,诸多研究正在探索,从精准治疗的角度,结合术中成像(如 OCT)的激光溶栓是今后重点发展的方向。

在人工智能快速发展的大背景下,通过与计算机视觉、信息科学、材料科学等多学科融合,光学辅助与激光消融技术在微创治疗中迎来了新发展。AR 技术提供新的可视化方式,提升医生操作自信度;光学追踪与感知使得手术更加精准;激光消融在精准治疗上展现了优势。目前相关的研究越来越多。我们有理由相信,伴随着智能化光学辅助与激光消融技术的发展,未来的微创介入手术会更加智能化、精准化与个性化。

## 参 考 文 献

- [1] Cleary K, Peters T M. Image-guided interventions: technology review and clinical applications[J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2010, 12: 119-142.
- [2] Chu K F, Dupuy D E. Thermal ablation of tumours: biological mechanisms and advances in therapy[J]. *Nature Reviews Cancer*, 2014, 14(3): 199-208.
- [3] Yun S H, Kwok S J J. Light in diagnosis, therapy and surgery[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2017, 1(1): 1-16.
- [4] 李阳曦, 胡成全, 马龙飞, 等. 智能化精准光学诊疗技术研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1507002.  
Li Y X, Hu C Q, Ma L F, et al. Research progress in intelligent and precise optical diagnosis and treatment technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1507002.
- [5] Birlo M, Edwards P J E, Clarkson M, et al. Utility of optical see-through head mounted displays in augmented reality-assisted surgery: a systematic review[J]. *Medical Image Analysis*, 2022, 77: 102361.
- [6] Barcali E, Iadanza E, Manetti L, et al. Augmented reality in surgery: a scoping review[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(14): 6890.
- [7] Gholizadeh M, Bakhshali M A, Mazlooman S R, et al. Minimally invasive and invasive liver surgery based on augmented reality training: a review of the literature[J]. *Journal of Robotic Surgery*, 2023, 17(3): 753-763.
- [8] Quero G, Lapergola A, Soler L, et al. Virtual and augmented reality in oncologic liver surgery[J]. *Surgical Oncology Clinics of North America*, 2019, 28(1): 31-44.
- [9] Meola A, Cutolo F, Carbone M, et al. Augmented reality in neurosurgery: a systematic review[J]. *Neurosurgical Review*, 2017, 40(4): 537-548.
- [10] Contreras López W O, Navarro P A, Crispin S. Intraoperative clinical application of augmented reality in neurosurgery: a systematic review[J]. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 2019, 177: 6-11.
- [11] Jud L, Fotouhi J, Andronic O, et al. Applicability of augmented reality in orthopedic surgery: a systematic review[J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2020, 21(1): 103.
- [12] Sutherland C, Hashtrudi-Zaad K, Sellens R, et al. An augmented reality haptic training simulator for spinal needle procedures[J]. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 2013, 60(11): 3009-3018.
- [13] Auloge P, Cazzato R L, Ramamurthy N, et al. Augmented reality and artificial intelligence-based navigation during percutaneous vertebroplasty: a pilot randomised clinical trial[J]. *European Spine Journal*, 2020, 29(7): 1580-1589.
- [14] Bernhardt S, Nicolau S A, Soler L, et al. The status of augmented reality in laparoscopic surgery as of 2016[J]. *Medical Image Analysis*, 2017, 37: 66-90.
- [15] Hallet J, Soler L, Diana M, et al. Trans-thoracic minimally invasive liver resection guided by augmented reality[J]. *Journal of the American College of Surgeons*, 2015, 220(5): e55-e60.
- [16] Thompson S, Schneider C, Bosi M, et al. *In vivo* estimation of target registration errors during augmented reality laparoscopic surgery[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2018, 13(6): 865-874.
- [17] Coelho G, Trigo L, Faig F, et al. The potential applications of augmented reality in fetoscopic surgery for antenatal treatment of myelomeningocele[J]. *World Neurosurgery*, 2022, 159: 27-32.
- [18] Mela C A, Lemmer D P, Bao F S, et al. Real-time dual-modal vein imaging system[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2019, 14(2): 203-213.
- [19] 邢树伟, 丁辉, 王广志. C形臂 X 线机的原位投影增强系统[J]. *北京生物医学工程*, 2019, 38(6): 551-559.  
Xing S W, Ding H, Wang G Z. A projection-augmented system

- for *in situ* projection for mobile C-arms[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2019, 38(6): 551-559.
- [20] Wu B X, Liu P, Xiong C, et al. Stereotactic co-axial projection imaging for augmented reality neuronavigation: a proof-of-concept study[J]. Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, 2022, 12(7): 3792-3802.
- [21] Zeng B W, Meng F L, Ding H, et al. A surgical robot with augmented reality visualization for stereoelectroencephalography electrode implantation[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2017, 12(8): 1355-1368.
- [22] Wen R, Chui C K, Ong S H, et al. Projection-based visual guidance for robot-aided RF needle insertion[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2013, 8(6): 1015-1025.
- [23] Gao Y, Zhao Y Y, Xie L, et al. A projector-based augmented reality navigation system for computer-assisted surgery[J]. Sensors, 2021, 21(9): 2931.
- [24] Gavaghan K, Oliveira-Santos T, Peterhans M, et al. Evaluation of a portable image overlay projector for the visualisation of surgical navigation data: phantom studies[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2012, 7(4): 547-556.
- [25] Sebeom P, Shokhrukh B, Yosoon C. Review of Microsoft HoloLens applications over the past five years[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7259.
- [26] Cheng D W, Wang Q W, Liu Y, et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(3): 336.
- [27] 罗栩豪, 董思禹, 王占山, 等. 超表面VR/AR显示技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011002.
- [28] Luo X H, Dong S Y, Wang Z S, et al. Research progress of metasurface-based VR/AR display technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011002.
- [29] Xiong J H, Hsiang E L, He Z Q, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 1-30.
- [30] Gsaxner C, Li J N, Pepe A, et al. The HoloLens in medicine: a systematic review and taxonomy[J]. Medical Image Analysis, 2023, 85: 102757.
- [31] Ahmad H S, Yoon J W. Intra-operative wearable visualization in spine surgery: past, present, and future[J]. Journal of Spine Surgery, 2022, 8(1): 132-138.
- [32] Laverdière C, Corban J, Khoury J, et al. Augmented reality in orthopaedics: a systematic review and a window on future possibilities[J]. The Bone & Joint Journal, 2019, 101-B(12): 1479-1488.
- [33] Verhey J T, Haglin J M, Verhey E M, et al. Virtual, augmented, and mixed reality applications in orthopedic surgery[J]. The International Journal of Medical Robotics+Computer Assisted Surgery: MRCAS, 2020, 16(2): e2067.
- [34] Burström G, Persson O, Edström E, et al. Augmented reality navigation in spine surgery: a systematic review[J]. Acta Neurochirurgica, 2021, 163(3): 843-852.
- [35] Doughty M, Ghugre N, Wright G. Augmenting performance: a systematic review of optical see-through head-mounted displays in surgery[J]. Journal of Imaging, 2022, 8(7): 203.
- [36] Liebmann F, Roner S, von Atzigen M, et al. Pedicle screw navigation using surface digitization on the Microsoft HoloLens[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2019, 14(7): 1157-1165.
- [37] Dennler C, Jaberg L, Spirig J, et al. Augmented reality-based navigation increases precision of pedicle screw insertion[J]. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 2020, 15(1): 174.
- [38] Li Y, Chen X L, Wang N, et al. A wearable mixed-reality holographic computer for guiding external ventricular drain insertion at the bedside[J]. Journal of Neurosurgery, 2019, 131(5): 1599-1606.
- [39] Lareyre F, Chaudhuri A, Adam C, et al. Applications of head-mounted displays and smart glasses in vascular surgery[J]. Annals of Vascular Surgery, 2021, 75: 497-512.
- [40] Williams M A, McVeigh J, Handa A I, et al. Augmented reality in surgical training: a systematic review[J]. Postgraduate Medical Journal, 2020, 96(1139): 537-542.
- [41] Unberath M, Fotouhi J, Hajek J, et al. Augmented reality-based feedback for technician-in-the-loop C-arm repositioning[J]. Healthcare Technology Letters, 2018, 5(5): 143-147.
- [42] Liao H E, Inomata T, Sakuma I, et al. 3-D augmented reality for MRI-guided surgery using integral videography autostereoscopic image overlay[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2010, 57(6): 1476-1486.
- [43] Ma L F, Jiang W P, Zhang B Y, et al. Augmented reality surgical navigation with accurate CBCT-patient registration for dental implant placement[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2019, 57(1): 47-57.
- [44] Chen F, Cui X W, Han B X, et al. Augmented reality navigation for minimally invasive knee surgery using enhanced arthroscopy[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2021, 201: 105952.
- [45] Zhang X R, Chen G W, Liao H E. High-quality see-through surgical guidance system using enhanced 3-D autostereoscopic augmented reality[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2017, 64(8): 1815-1825.
- [46] Brunet J N, Mendizabal A, Petit A, et al. Physics-based deep neural network for augmented reality during liver surgery[M] // Shen D G, Liu T M, Peters T M, et al. Medical image computing and computer assisted intervention-MICCAI 2019. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2019, 11768: 137-145.
- [47] Doughty M, Ghugre N R. HMD-EgoPose: head-mounted display-based egocentric marker-less tool and hand pose estimation for augmented surgical guidance[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2022, 17(12): 2253-2262.
- [48] Doughty M, Singh K, Ghugre N R. SurgeonAssist-net: towards context-aware head-mounted display-based augmented reality for surgical guidance[M] // de Bruijne M, Cattin P C, Cotin S, et al. Medical image computing and computer assisted intervention-MICCAI 2021. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2021, 12904: 667-677.
- [49] Eckert M, Volmerg J S, Friedrich C M. Augmented reality in medicine: systematic and bibliographic review[J]. JMIR MHealth and UHealth, 2019, 7(4): e10967.
- [50] Condino S, Carbone M, Piazza R, et al. Perceptual limits of optical see-through visors for augmented reality guidance of manual tasks[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2020, 67(2): 411-419.
- [51] Edgecombe P, Pratt P, Yang G Z, et al. Pico Lantern: surface reconstruction and augmented reality in laparoscopic surgery using a pick-up laser projector[J]. Medical Image Analysis, 2015, 25(1): 95-102.
- [52] Golse N, Petit A, Lewin M, et al. Augmented reality during open liver surgery using a markerless non-rigid registration system[J]. Journal of Gastrointestinal Surgery, 2021, 25(3): 662-671.
- [53] Pfeiffer M, Riediger C, Leger S, et al. Non-rigid volume to surface registration using a data-driven biomechanical model[M] // Martel A L, Abolmaesumi P, Stoyanov D, et al. Medical image computing and computer assisted intervention-MICCAI 2020. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2020, 12264: 724-734.
- [54] 刘锴, 华鉴瑜, 陈林森, 等. 虚实融合裸眼3D显示现状与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011004.
- [55] Liu K, Hua J Y, Chen L S, et al. Present situation and prospect of glasses-free augmented reality 3D display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011004.
- [56] Streeter S S, Hebert K A, Bateman L M, et al. Current and future applications of fluorescence guidance in orthopaedic surgery[J].

- Molecular Imaging and Biology, 2023, 25(1): 46-57.
- [55] Sajedi S, Sabet H, Choi H S. Intraoperative biophotonic imaging systems for image-guided interventions[J]. Nanophotonics, 2019, 8(1): 99-116.
- [56] Zhou Z T, Wu B, Duan J, et al. Optical surgical instrument tracking system based on the principle of stereo vision[J]. Journal of Biomedical Optics, 2017, 22(6): 065005.
- [57] Lin Q Y, Cai K, Yang R Q, et al. Development and validation of a near-infrared optical system for tracking surgical instruments[J]. Journal of Medical Systems, 2016, 40(4): 107.
- [58] Sorriento A, Porfido M B, Mazzoleni S, et al. Optical and electromagnetic tracking systems for biomedical applications: a critical review on potentialities and limitations[J]. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2020, 13: 212-232.
- [59] Minchev G, Kronreif G, Martínez-Moreno M, et al. A novel miniature robotic guidance device for stereotactic neurosurgical interventions: preliminary experience with the iSYS1 robot[J]. Journal of Neurosurgery, 2017, 126(3): 985-996.
- [60] Smith J A, Jivraj J, Wong R, et al. 30 years of neurosurgical robots: review and trends for manipulators and associated navigational systems[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2016, 44(4): 836-846.
- [61] Lefranc M, Peltier J. Evaluation of the ROSA™ Spine robot for minimally invasive surgical procedures[J]. Expert Review of Medical Devices, 2016, 13(10): 899-906.
- [62] Khan A, Meyers J E, Siasios I, et al. Next-generation robotic spine surgery: first report on feasibility, safety, and learning curve [J]. Operative Neurosurgery, 2019, 17(1): 61-69.
- [63] Tian W, Han X G, Liu B, et al. A robot-assisted surgical system using a force-image control method for pedicle screw insertion[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e86346.
- [64] Lachenmayer A, Tinguely P, Maurer M H, et al. Stereotactic image-guided microwave ablation of hepatocellular carcinoma using a computer-assisted navigation system[J]. Liver International, 2019, 39(10): 1975-1985.
- [65] Min Z, Ren H L, Meng M Q H. Estimation of surgical tool-tip tracking error distribution in coordinate reference frame involving pivot calibration uncertainty[J]. Healthcare Technology Letters, 2017, 4(5): 193-198.
- [66] Yaniv Z. Which pivot calibration? [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9415: 941527.
- [67] Gerber N, Gavaghan K A, Bell B J, et al. High-accuracy patient-to-image registration for the facilitation of image-guided robotic microsurgery on the head[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2013, 60(4): 960-968.
- [68] Song J, Ding H, Han W, et al. A motion compensation method for bi-plane robot-assisted internal fixation surgery of a femur neck fracture[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of Engineering in Medicine, 2016, 230(10): 942-948.
- [69] Li J Y, Huang L, Zhou W Y, et al. Evaluation of a new spinal surgical robotic system of Kirschner wire placement for lumbar fusion: a multi-centre, randomised controlled clinical study[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2021, 17(2): e2207.
- [70] Li L, Wu J L, Ding H, et al. An “eye-in-body” integrated surgery robot system for stereotactic surgery[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2019, 14(12): 2123-2135.
- [71] Yoo H, Sim T. Automated machine learning (AutoML)-based surface registration methodology for image-guided surgical navigation system[J]. Medical Physics, 2022, 49(7): 4845-4860.
- [72] Xu L S, Zhang H R, Wang J L, et al. Information loss challenges in surgical navigation systems: from information fusion to AI-based approaches[J]. Information Fusion, 2023, 92: 13-36.
- [73] Dai H D, Zeng Y D, Wang Z W, et al. Prior knowledge-based optimization method for the reconstruction model of multicamera optical tracking system[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(4): 2074-2084.
- [74] Pfeiffer J H, Borbáth Á, Dietz C, et al. A new module combining two tracking cameras to expand the workspace of surgical navigation systems[C] //2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), December 13-15, 2016, Sapporo, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 477-482.
- [75] Wang J L, Meng M Q H, Ren H L. Towards occlusion-free surgical instrument tracking: a modular monocular approach and an agile calibration method[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 12(2): 588-595.
- [76] Wang J L, Song S, Ren H L, et al. Surgical instrument tracking by multiple monocular modules and a sensor fusion approach[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(2): 629-639.
- [77] Vaccarella A, De Momi E, Enquobahrie A, et al. Unscented Kalman filter based sensor fusion for robust optical and electromagnetic tracking in surgical navigation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(7): 2067-2081.
- [78] Enayati N, De Momi E, Ferrigno G. A quaternion-based unscented Kalman filter for robust optical/inertial motion tracking in computer-assisted surgery[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(8): 2291-2301.
- [79] Wang J L, Qi L, Meng M Q H, et al. Robot-assisted occlusion avoidance for surgical instrument optical tracking system[M]. New York: IEEE Press, 2015.
- [80] Meng Y Y, You Y G, Geng P X, et al. Development of an intra-operative active navigation system for robot-assisted surgery[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), December 27-31, 2021, Sanya, China. New York: IEEE Press, 2022: 1755-1760.
- [81] 赵鹏. 手术导航系统中光学和惯性组合定位方法的研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Zhao P. Research on optical and inertial combined positioning method in surgical navigation system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [82] Meng F L, Zhai F W, Zeng B W, et al. An automatic markerless registration method for neurosurgical robotics based on an optical camera[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2018, 13(2): 253-265.
- [83] Franz A M, Haidegger T, Birkfellner W, et al. Electromagnetic tracking in medicine: a review of technology, validation, and applications[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2014, 33(8): 1702-1725.
- [84] Kassahun Y, Yu B B, Tibebu A T, et al. Surgical robotics beyond enhanced dexterity instrumentation: a survey of machine learning techniques and their role in intelligent and autonomous surgical actions[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2016, 11(4): 553-568.
- [85] Mascagni P, Alapatt D, Sestini L, et al. Computer vision in surgery: from potential to clinical value[J]. NPJ Digital Medicine, 2022, 5(1): 1-9.
- [86] Haque A, Milstein A, Li F F. Illuminating the dark spaces of healthcare with ambient intelligence[J]. Nature, 2020, 585(7824): 193-202.
- [87] Li L, Feng P F, Ding H, et al. A preliminary exploration to make stereotactic surgery robots aware of the semantic 2D/3D working scene[J]. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, 2022, 4(1): 17-27.
- [88] 冯鹏飞, 李亮, 丁辉, 等. 基于深度学习的手术机器人单目视觉患者头部姿态估计[J]. 中国生物医学工程学报, 2022, 41(5): 537-546.
- Feng P F, Li L, Ding H, et al. Head pose estimation of patients with monocular vision for surgery robot based on deep learning[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2022, 41(5): 537-546.

- [89] 齐华, 冯艳, 张华, 等. 光纤布拉格光栅传感器在微创医疗中的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1300004.
- Qi H, Feng Y, Zhang H, et al. Research progress of fiber Bragg grating sensor in minimally invasive medical treatment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1300004.
- [90] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [91] Park Y L, Elayaperumal S, Daniel B, et al. Real-time estimation of 3-D needle shape and deflection for MRI-guided interventions[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(6): 906-915.
- [92] Kim J S, Chatrasingh M, Kim S, et al. Fiber Bragg grating based needle shape sensing for needle steering system: evaluation in inhomogeneous tissue[C]//2017 IEEE SENSORS, October 29-November 1, 2017, Glasgow, UK. New York: IEEE Press, 2017.
- [93] Zhang L F, Li C L, Dong H J, et al. Fiber Bragg grating-based sensor system for sensing the shape of flexible needles[J]. Measurement, 2023, 206: 112251.
- [94] Chen W, Gassino R, Liu Y, et al. Performance assessment of FBG temperature sensors for laser ablation of tumors[C]//2015 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) Proceedings, May 7-9, 2015, Turin, Italy. New York: IEEE Press, 2015: 324-328.
- [95] Sametova A, Kurmashev S, Ashikbayeva Z, et al. Optical fiber distributed sensing network for thermal mapping in radiofrequency ablation neighboring a blood vessel[J]. Biosensors, 2022, 12(12): 1150.
- [96] Bianchi L, Mooney R, Cornejo Y, et al. Fiber Bragg grating sensors-based thermometry of gold nanorod-enhanced photothermal therapy in tumor model[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 22(12): 11297-11306.
- [97] He X C, Handa J, Gehlbach P, et al. A submillimetric 3-DOF force sensing instrument with integrated fiber Bragg grating for retinal microsurgery[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2014, 61(2): 522-534.
- [98] Du C J, Wei D H, Wang H, et al. Development of the X-Perce: a universal FBG-based force sensing kit for laparoscopic surgical robot[J]. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, 2022, 4(1): 183-193.
- [99] Li J H, Wang C Y, Mao Z Y, et al. A compact FBG-based triaxial force sensor with parallel helical beams for robotic-assisted surgery[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 7503709.
- [100] Gao A Z, Liu N, Zhang H J, et al. Spiral FBG sensors-based contact detection for confocal laser endomicroscopy[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2020, 170: 112653.
- [101] Maier-Hein L, Mounthey P, Bartoli A, et al. Optical techniques for 3D surface reconstruction in computer-assisted laparoscopic surgery[J]. Medical Image Analysis, 2013, 17(8): 974-996.
- [102] Mahmoud N, Collins T, Hostettler A, et al. Live tracking and dense reconstruction for handheld monocular endoscopy[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019, 38(1): 79-89.
- [103] Drexler W, Liu M Y, Kumar A, et al. Optical coherence tomography today: speed, contrast, and multimodality[J]. Journal of Biomedical Optics, 2014, 19(7): 071412.
- [104] 杨雪芳, 刘哲晰, 王璞. 共聚焦内窥镜成像技术及其应用[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1907002.
- Yang X F, Liu Z X, Wang P. Confocal endoscopic microscopy and its applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1907002.
- [105] El-Haddad M T, Tao Y K. Advances in intraoperative optical coherence tomography for surgical guidance[J]. Current Opinion in Biomedical Engineering, 2017, 3: 37-48.
- [106] Lin L, Wang L V. The emerging role of photoacoustic imaging in clinical oncology[J]. Nature Reviews Clinical Oncology, 2022, 19(6): 365-384.
- [107] Zuo C, Qian J M, Feng S J, et al. Deep learning in optical metrology: a review[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 1-54.
- [108] Lo Presti D, Massaroni C, Jorge Leitão C S, et al. Fiber Bragg gratings for medical applications and future challenges: a review[J]. IEEE Access, 2020, 8: 156863-156888.
- [109] Niemz M H. Light acting on matter[M]//Niemz M H. Laser-tissue interactions. Cham: Springer, 2019: 45-152.
- [110] Schena E, Saccomandi P, Fong Y. Laser ablation for cancer: past, present and future[J]. Journal of Functional Biomaterials, 2017, 8(2): 19.
- [111] Missios S, Bekelis K, Barnett G H. Renaissance of laser interstitial thermal ablation[J]. Neurosurgical Focus, 2015, 38(3): E13.
- [112] Pacella C M, Jiang T. Experimental data and clinical studies of laser ablation[M]//Pacella C M, Jiang T, Mauri G. Image-guided laser ablation. Cham: Springer, 2020: 19-30.
- [113] Pacella C M, Breschi L, Bottacci D, et al. Physical principles of laser ablation[M]//Pacella C M, Jiang T, Mauri G. Image-guided laser ablation. Cham: Springer, 2020: 7-18.
- [114] 付博, 赵小丽, 张晗, 等. 激光技术在血栓消融中的应用与进展[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1907001.
- Fu B, Zhao X L, Zhang H, et al. Application and progress of laser technology for thrombus ablation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1907001.
- [115] Leesar M A, Feldman M D. Thrombosis and myocardial infarction: the role of bioresorbable scaffolds[J]. The Journal of Cardiovascular Aging, 2023, 3(1): 7.
- [116] Rahmathulla G, Recinos P F, Kamian K, et al. MRI-guided laser interstitial thermal therapy in neuro-oncology: a review of its current clinical applications[J]. Oncology, 2014, 87(2): 67-82.
- [117] Blackwell J, Krašny M J, O'Brien A, et al. Proton resonance frequency shift thermometry: a review of modern clinical practices [J]. Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2022, 55(2): 389-403.
- [118] Bown S G. Phototherapy of tumors[J]. World Journal of Surgery, 1983, 7: 700-709.
- [119] Sugiyama K, Sakai T, Fujishima I, et al. Stereotactic interstitial laser-hyperthermia using Nd-YAG laser[J]. Stereotactic and Functional Neurosurgery, 1990, 54/55: 501-505.
- [120] Banerjee C, Snelling B, Berger M H, et al. The role of magnetic resonance-guided laser ablation in neurooncology[J]. British Journal of Neurosurgery, 2015, 29(2): 192-196.
- [121] Montemurro N, Anania Y, Cagnazzo F, et al. Survival outcomes in patients with recurrent glioblastoma treated with laser interstitial thermal therapy (LITT): a systematic review[J]. Clinical Neurology and Neurosurgery, 2020, 195: 105942.
- [122] Shimamoto S, Wu C Y, Sperling M. Laser interstitial thermal therapy in drug-resistant epilepsy[J]. Current Opinion in Neurology, 2019, 32: 237-245.
- [123] Cesareo R, Manfrini S, Pasqualini V, et al. Laser ablation versus radiofrequency ablation for thyroid nodules: 12-month results of a randomized trial (LARA II study) [J]. The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 2021, 106(6): 1692-1701.
- [124] Sartori S, Di Vece F, Ermili F, et al. Laser ablation of liver tumors: an ancillary technique, or an alternative to radiofrequency and microwave? [J]. World Journal of Radiology, 2017, 9(3): 91-96.
- [125] Jiang T, Zhao Q. Lung tumors laser ablation[M]//Pacella C M, Jiang T, Mauri G. Image-guided laser ablation. Cham: Springer, 2020: 107-115.
- [126] Kerbage Y, Betrouni N, Collinet P, et al. Laser interstitial thermotherapy application for breast surgery: current situation and new trends[J]. The Breast, 2017, 33: 145-152.
- [127] Lee T, Mendhiratta N, Sperling D, et al. Focal laser ablation for localized prostate cancer: principles, clinical trials, and our initial experience[J]. Reviews in Urology, 2014, 16(2): 55-66.
- [128] Tombesi P, Di Vece F, Sartori S. Radiofrequency, microwave,

- and laser ablation of liver tumors: time to move toward a tailored ablation technique?[J]. *Hepatology Research*, 2015, 1(2): 52.
- [129] Vakharia V N, Sparks R, Li K, et al. Automated trajectory planning for laser interstitial thermal therapy in mesial temporal lobe epilepsy[J]. *Epilepsia*, 2018, 59(4): 814-824.
- [130] Scorza D, El Hadji S, Cortés C, et al. Surgical planning assistance in keyhole and percutaneous surgery: a systematic review[J]. *Medical Image Analysis*, 2021, 67: 101820.
- [131] Pinzi M, Vakharia V N, Hwang B Y, et al. Computer assisted planning for curved laser interstitial thermal therapy[J]. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 2021, 68(10): 2957-2964.
- [132] Blauth S, Hübner F, Leithäuser C, et al. Mathematical modeling and simulation of laser-induced thermotherapy for the treatment of liver tumors[C]//Pinnau R, Gauger N R, Klar A. *Modeling, simulation and optimization in the health- and energy-sector*. Cham: Springer, 2022: 3-23.
- [133] Fahrenholtz S J, Madankan R, Danish S, et al. Theoretical model for laser ablation outcome predictions in brain: calibration and validation on clinical MR thermometry images[J]. *International Journal of Hyperthermia*, 2018, 34(1): 101-111.
- [134] Liang L B, Gao T T, Ding H, et al. A distribution-based method for thermal damage model analysis and optimization in brain laser interstitial thermal therapy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12032: 120323S.
- [135] Hori Y S, González Martínez J A, Barnett G H. Robotics in laser ablation procedures[M]//González Martínez J A, Cardinale F. *Robotics in neurosurgery*. Cham: Springer, 2022: 131-140.
- [136] Geoghegan R, Ter Haar G, Nightingale K, et al. Methods of monitoring thermal ablation of soft tissue tumors: a comprehensive review[J]. *Medical Physics*, 2022, 49(2): 769-791.
- [137] Alpers J, Reimert D L, Rötzer M, et al. 2.5D thermometry maps for MRI-guided tumor ablation[M]//de Bruijne M, Cattin P C, Cotin S, et al. *Medical image computing and computer-assisted intervention-MICCAI 2021. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2021, 12904: 311-320.
- [138] Grundfest W S, Litvack F, Forrester J S, et al. Laser ablation of human atherosclerotic plaque without adjacent tissue injury[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 1985, 5(4): 929-933.
- [139] Janis A D, Buckley L A, Gregory K W. Laser thrombolysis in an *in-vitro* model[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3907: 582-588.
- [140] Papaioannou T, Levisman J, Sorokoumov O, et al. Particulate debris analysis during excimer laser thrombolysis: an *in-vitro* study [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4609: 404-412.
- [141] Boersma D, Smulders D L J, Bakker O J, et al. Endovenous laser ablation of insufficient perforating veins: energy is key to success [J]. *Vascular*, 2016, 24(2): 144-149.
- [142] Wallace T, El-Sheikha J, Nandhra S, et al. Long-term outcomes of endovenous laser ablation and conventional surgery for great saphenous varicose veins[J]. *British Journal of Surgery*, 2018, 105(13): 1759-1767.
- [143] Ginsburg R, Kim D S, Guthaner D, et al. Salvage of an ischemic limb by laser angioplasty: description of a new technique[J]. *Clinical Cardiology*, 1984, 7(1): 54-58.
- [144] Kennedy J W, Ritchie J L, Davis K B, et al. Western Washington randomized trial of intracoronary streptokinase in acute myocardial infarction[J]. *The New England Journal of Medicine*, 1983, 309(24): 1477-1482.
- [145] Pradhan A, Bhandari M, Snigdha B. Lasers for the treatment of coronary artery disease: an update[J]. *Heart India*, 2020, 8(1): 3.
- [146] Herzog A, Bogdan S, Glikson M, et al. Selective tissue ablation using laser radiation at 355 nm in lead extraction by a hybrid catheter; a preliminary report[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2016, 48(3): 281-287.
- [147] Shibata N, Takagi K, Morishima I, et al. The impact of the excimer laser on myocardial salvage in ST-elevation acute myocardial infarction via nuclear scintigraphy[J]. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, 2020, 36(1): 161-170.
- [148] Herzog A, Oszkini G, Planer D, et al. Atherectomy using a solid-state laser at 355 nm wavelength[J]. *Journal of Biophotonics*, 2017, 10(10): 1271-1278.
- [149] Berndt R, Rusch R, Hummitzsch L, et al. Development of a new catheter prototype for laser thrombolysis under guidance of optical coherence tomography (OCT): validation of feasibility and efficacy in a preclinical model[J]. *Journal of Thrombosis and Thrombolysis*, 2017, 43(3): 352-360.
- [150] Singh S, Melnik R. Thermal ablation of biological tissues in disease treatment: a review of computational models and future directions[J]. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2020, 39(2): 49-88.
- [151] Pang S M, Kapur A, Zhou K R, et al. Nanoparticle-assisted, image-guided laser interstitial thermal therapy for cancer treatment [J]. *Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 2022, 14(5): e1826.

## Research Progress of Intelligent Optic-Assisted Technology and Laser Ablation in Minimally Invasive Intervention

Liang Libin<sup>1\*</sup>, Li Liang<sup>2</sup>, Gao Tingting<sup>3</sup>, Wang Guangzhi<sup>3</sup>, Ding Hui<sup>3</sup>, Wan Mingxi<sup>1</sup>, Zhang Zhenxi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, Department of Biomedical Engineering, School of Life Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

<sup>2</sup>School of Biomedical Engineering and Informatics, Nanjing Medical University, Nanjing 211100, Jiangsu, China;

<sup>3</sup>Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>4</sup>Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, Institute of Biomedical Photonics and Sensing, School of Life Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China

### Abstract

**Significance** Minimally invasive intervention techniques have become increasingly important in clinical practice, with the advantages of minimal trauma, reduced bleeding, and quick postoperative recovery. However, these techniques have limited visual fields or operating spaces due to the small incision size and the need to minimize damage to normal tissue. Consequently, preoperative planning and operation under image guidance are necessary. Commonly used image guidance in clinical practice includes computed



tomography (CT), magnetic resonance imaging (MRI), ultrasound imaging and X-ray fluoroscopy, etc. Nevertheless, these guidance methods have limitations in terms of visualizing and perceiving surgical information. Firstly, the two-dimensional screen used in the image guidance lacks stereoscopic vision, making it difficult to observe complex three-dimensional anatomical structures. Secondly, the operator's attention needs to be switched repeatedly between the screen and the surgical position, which poses a problem for hand-eye coordination. Thirdly, the above image guidance methods are difficult to track or perceive the relative positions of the patient's lesions and surgical tools in real-time, continuous, and accurate manner. Therefore, the success of a surgical procedure heavily relies on the doctor's experience and spatial imagination, which carries the risk of imprecise treatment and potential complications. Moreover, current minimally invasive interventions face challenges in achieving precise control over the treatment range due to limitations in the surgical treatment form (mechanical resection, heat, or radiation-based forms) or a lack of intraoperative treatment status monitoring.

In recent years, optical technology has rapidly developed and been widely applied in the diagnosis and treatment in biomedical field. In the field of minimally invasive intervention, optical assistance and laser ablation technologies play a crucial role in improving surgical precision and safety. Among them, augmented reality (AR) can provide new intraoperative information visualization schemes; optical tracking and sensing technology can provide quantitative spatial information and lay the foundation for precise surgical operations. Laser energy, with its excellent spatial directionality and flexibility, can be delivered to lesions through slender optical fibers and, when combined with intraoperative MRI temperature monitoring, can achieve more precise therapeutic effects. At the same time, the rapid development of artificial intelligence and its fusion with optical technology are promoting the development of minimally invasive interventions towards intelligent, precise, and personalized directions. Therefore, summarizing the optical assistance and laser ablation techniques is necessary to guide future development of this field.

**Progress** In this paper, the research progress of optical assistance and laser ablation technologies is reviewed based on three aspects: (1) augmented reality; (2) optical tracking and sensing; (3) laser ablation.

The existing research on AR devices mainly includes three forms (Fig. 2): monitor-based, projection-based, and optical see-through. Among these, optical see-through head-mounted AR is currently the leading trend in development. Although numerous AR research studies have been conducted on minimally invasive interventions for different types of diseases (Fig. 3), actual clinical applications are still relatively scarce. This is largely due to the insufficient accuracy, discomfort, and inconvenience of current AR devices. Future research will primarily focus on the core technology of AR, specifically display, tracking, and registration. Artificial intelligence methods will play a crucial role in advancing these areas.

Optical tracking and sensing provide valuable quantitative information, including the position and shape of surgical tools and multi-dimensional tissue information. Current research primarily focuses on optical tracking, fiber Bragg grating (FBG), and optical imaging. Optical tracking is currently used in many minimally invasive procedures (Fig. 5), but it still has some limitations, such as the problem of occlusion of optical tracking equipment and image registration efficiency. With the increasing amount of information in modern surgery, the fusion of multiple information sources has become a new research trend, offering new solutions for markerless localization and tracking. In the future, intelligent localization, registration, and understanding of surgical scenes will be the focus of research. Additionally, perceiving multi-dimensional information of tissues is also an important development direction for surgical navigation. Researchers are increasingly paying attention to the application of FBG-based multi-dimensional information sensing in minimally invasive surgery (Fig. 6). Optical surface reconstruction and imaging, as important means of perceiving multi-dimensional tissue information, will be further integrated with artificial intelligence algorithms to make information processing more intelligent.

Laser ablation is an important form of minimally invasive intervention therapy and has been applied to the treatment of tumors and vascular diseases. Currently, MRI-guided laser ablation has shown unique advantages in precise treatment (Fig. 8). However, improving the precision of ablation therapy is still the focus of current research. Achieving this goal depends on intelligent processing of imaging information, such as deep learning-based anatomical structure segmentation and personalized precise ablation simulation prediction, as well as the development of assisted robots and intraoperative temperature monitoring technology. In addition, the use of lasers for thrombus treatment is still a relatively new field, and many studies are exploring the combination of laser thrombolysis with intraoperative imaging (such as optical CT) from the perspective of precise treatment, which will be the focus of future development.

**Conclusions and Prospects** With the rapid development of artificial intelligence, optical assistance and treatment technologies have seen new advancements in minimally invasive therapy by integrating with multidisciplinary fields such as computer vision, information science, and material science. AR technology provides a new visualization method and enhances doctors' confidence in their operations. Optical tracking and sensing make surgery more precise, while laser ablation has demonstrated advantages in precise treatment. Currently, there are numerous related studies, and we have reason to believe that intelligent optical assistance and treatment technology will continue to advance, leading to more intelligent, precise, and personalized minimally invasive interventions in the future.

**Key words** medical optics; augmented reality; optical tracking and sensing; laser ablation; minimally invasive intervention