

工业机器人视觉定位技术在微创手术中的应用

杨鼎国

北京 100010

DOI: 10.61369/TACS.2026050004

摘 要： 微创手术因创伤小、出血少、恢复周期短等优势，成为现代外科临床治疗主流。随医疗精准化、智能化诊疗需求升级，工业机器人技术向医疗外科领域迁移，视觉定位技术作为核心支撑，对提升手术精度、保障稳定性、降低风险至关重要。本文从工业机器人视觉定位技术原理入手，对比单目、双目等技术方案特点，结合骨科、腹腔镜等手术场景，阐述其在病灶识别等方面的应用机制。针对软组织形变等实际难题，剖析现有技术瓶颈并提出优化策略。最后结合人工智能等技术趋势，展望其在微创手术领域的未来方向。研究旨在为医疗机器人研发、临床实践及学术研究提供理论参考与实践思路。

关 键 词： 工业机器人；视觉定位；微创手术；手术导航；机器视觉；多模态融合

Application of Industrial Robot Visual Positioning Technology in Minimally Invasive Surgery

Yang Dingguo

Beijing 100010

Abstract： Minimally invasive surgery has become the mainstream approach in modern surgical clinical practice due to its advantages of minimal trauma, reduced bleeding, and shorter recovery periods. With the upgrading of precision and intelligent diagnostic and therapeutic demands in healthcare, industrial robotics technology is being applied to the field of medical surgery, where visual positioning technology serves as a core support for enhancing surgical accuracy, ensuring stability, and reducing risks. This article begins by examining the principles of industrial robot visual positioning technology, compares the characteristics of monocular and binocular technical solutions, and illustrates their application mechanisms in lesion recognition through surgical scenarios such as orthopedics and laparoscopy. Addressing practical challenges like soft tissue deformation, the study analyzes existing technical bottlenecks and proposes optimization strategies. Finally, it explores future directions for minimally invasive surgery by integrating technological trends such as artificial intelligence. The research aims to provide theoretical references and practical insights for medical robot development, clinical practice, and academic research.

Keywords： industrial robot; visual positioning; minimally invasive surgery; surgical navigation; machine vision; multimodal fusion

引言

（一）研究背景

现代外科医疗技术进入微创化、精准化、智能化新阶段，腹腔镜等微创诊疗设备广泛普及，手术操作从传统宏观粗放式转向微观精细式。尽管微创手术优化了治疗效果，但存在操作空间狭小、视野受限、震颤难消除、依赖医生经验等局限，影响手术安全与患者康复，制约其发展。机器人在精度、稳定性、承载能力上有优势，引入微创手术领域可精准操控器械、稳定持镜、辅助切割缝合，弥补人工手术缺陷。机器人精准感知手术环境、定位病灶与器械位置，核心依赖视觉定位技术，它是连接机器人与微创手术的桥梁，也是推动微创机器人升级的核心技术。

（二）研究意义

从临床应用层面看，工业机器人视觉定位技术可实现亚毫米级手术定位，减小误差、降低误伤、提升准确率，适用于高精度手术，提升微创手术安全性与有效性。从工程技术层面看，将该技术从工业迁移至医疗需突破技术难题，推动跨领域融合创新，完善技术体系，促进核心技术自主化。从社会医疗层面看，依托此技术可降低复杂微创手术门槛，提升基层医院能力，缩小地区差距，助力精准与

普惠医疗，缓解资源分配不均问题。

（三）国内外研究现状

国外微创手术机器人视觉定位技术研究起步早、积累深厚，如达芬奇手术机器人已实现高清三维视觉与主从操控的成熟临床应用，构建了完善技术体系。近年来，美国高校科研机构围绕无标记视觉追踪等方向深入研究，提升了视觉定位技术的鲁棒性与智能化水平。国内相关研究起步晚，但在政策扶持与科研投入加大推动下，技术快速突破，北京航空航天大学等科研院校在多领域取得重要成果，部分自主研发产品进入临床试验与应用阶段。不过，我国在核心算法鲁棒性等方面与国际先进水平有差距，相关技术有待进一步优化完善。

一、工业机器人视觉定位技术基本原理

工业机器人视觉定位技术，核心是通过图像传感器采集手术区域视觉信息，经图像处理等流程获取病灶、手术器械三维空间位姿信息，引导机器人精准操作的技术体系。与工业生产场景相比，微创手术对视觉定位技术要求更严苛，核心为亚毫米级定位精度、高实时性、强场景鲁棒性、高医疗安全冗余性，不同类型视觉定位技术原理与应用特点有差异。

（一）单目视觉定位技术

单目视觉定位技术用单个图像传感器获取手术区域二维图像信息，通过目标物体先验尺寸、运动恢复结构或 PnP 算法，实现二维图像到三维空间坐标转换以定位目标。该技术硬件结构简单、成本低、设备小巧，易集成在微型微创诊疗器械中，适合空间有限的手术场景。但它缺乏直接深度信息，定位精度有限，对人工标记物依赖性强，多用于穿刺导航、简单手术器械定位及低成本微创机器人系统。

（二）双目立体视觉定位技术

双目立体视觉定位技术模拟人双眼视觉，用两参数一致的图像传感器从不同视角同步采集手术区域图像，基于视差原理与三角测量法计算目标深度信息实现三维定位。核心流程有相机标定、极线校正、特征匹配、三维重建、位姿解算。该技术成熟度高，能获取完整三维信息，实时性好，无需额外投射结构光，适配多数微创手术场景。不过，它对传感器基线距离、光照一致性要求高，手术器械或组织遮挡易使特征匹配失效，影响定位精度。目前，该技术广泛用于腹腔镜三维重建、骨科术中配准、持镜机器人定位等场景。

（三）结构光视觉定位技术

结构光视觉定位技术投射结构化光源，结合图像传感器拍摄手术区域图像，经解码计算获取目标物体深度信息，完成三维重建与定位。该技术三维重建密度高、定位精度优，对弱纹理区域感知效果好，能精准重建组织表面形态。不过，结构光易受术中血液、烟雾、组织反光等干扰，动态场景下定位稳定性差，多用于静态或准静态组织表面重建、术前手术规划与术中图像配准等环节。

二、视觉定位技术在微创手术中的典型应用

（一）骨科微创手术

骨科微创手术对骨骼定位、器械置入精度要求高，工业机器

人视觉定位技术解决传统手术精度不足问题。在脊柱椎弓根螺钉置入手术中，利用双目视觉或光学导航系统精准配准术前 CT 影像与术中解剖标志，引导机器人按术前规划路径置入螺钉，定位误差控制在 1mm 以内，降低神经、血管损伤风险；在全膝关节、髋关节置换微创手术中，视觉定位系统实时监控截骨平面与假体置入角度，精准控制截骨量与假体位置，提升假体与人体骨骼匹配度，减少术后疼痛与假体翻修概率。

（二）腹腔镜微创手术

腹腔镜手术是视觉定位技术的代表性应用场景。三维腹腔镜视觉系统能为医生提供清晰的三维视野与深度感知信息，避免传统腹腔镜手术中“穿孔”“误扎”等问题；基于视觉定位的自动持镜机器人可根据医生需求实时调整镜头位置与角度，替代助手持镜，解放医生双手，提升手术连贯性；此外，视觉定位系统能实时追踪手术器械位置，规划防碰撞路径，设置安全操作区域告警，提升手术安全性。

（三）神经外科微创手术

神经外科手术涉及脑组织、血管等精密脆弱组织，操作容错率极低，视觉定位技术是保障手术安全的核心支撑。在内镜下脑肿瘤切除手术中，视觉定位系统融合术前 MRI 影像数据，增强显示病灶边界，引导精准切除肿瘤，减少正常脑组织损伤；在深部脑刺激电极植入手术中，依托该技术实现亚毫米级靶点定位，确保电极植入位置精准，保障手术效果；利用视觉语义分割技术，能实时识别血管、神经等危险区域，提前发出避让提示，降低术中并发症发生率。

（四）眼科显微微创手术

眼科显微手术操作空间极小，对操作精度的要求达到微米级，人工手术难以避免手部震颤带来的操作误差。工业机器人结合视觉定位技术，可实时捕捉手术器械位姿，自动抵消人手微小震颤，实现稳定的显微操作；将 OCT 影像与显微视觉定位技术融合，能够精准定位视网膜、玻璃体等眼部组织，完成视网膜下注射、玻璃体切割等超精细手术操作，实现人工手术无法完成的复杂诊疗操作，拓展了眼科疾病的治疗方案。

三、临床应用中的关键技术难点与优化策略

（一）软组织形变导致的定位漂移问题

人体腹腔、颅脑等部位软组织会因生理运动和手术器械操作发生弹性形变，导致术前组织三维模型与术中实际位置偏差，引

发视觉定位漂移、降低操作精度。针对此问题，可利用术中实时三维重建技术动态更新软组织形态模型、同步修正定位数据；引入生物力学模型预测软组织形变趋势，提前补偿定位信息；采用多模态影像实时配准技术融合术中超声、OCT 等影像信息，动态校准定位误差，提升软组织场景定位稳定性。

（二）术中环境干扰导致的视觉感知失效

微创手术中，电凝烟雾、术中出血、光照不均等问题会使视觉图像模糊、特征缺失，导致视觉定位系统感知失效。对此，可通过图像增强、去雾、降噪算法预处理原始图像，优化图像质量；采用基于深度学习的鲁棒特征提取模型，降低图像质量对特征识别的影响，提升复杂干扰场景下特征提取成功率；搭建视觉与惯性测量单元融合定位系统，在视觉短时感知失效时，由惯性测量单元维持定位连续性，避免定位中断。

（三）多器械操作遮挡导致的追踪中断

腹腔镜、胸腔镜等微创手术中，多器械同时操作易出现相互遮挡问题，导致视觉特征丢失、器械追踪中断。优化方案如下：采用多视角视觉传感器布置方案，从不同角度采集手术区域信息，弥补单一视角遮挡缺陷；基于器械运动轨迹预测算法，对短时遮挡的器械进行轨迹插值跟踪，维持定位连续性；优化无标记深度学习追踪模型，提升器械部分遮挡场景下的识别与追踪能力，减少追踪中断概率。

四、未来发展趋势

（一）人工智能与视觉定位深度融合

未来，小样本学习、自监督学习、迁移学习等人工智能技术将与视觉定位深度融合，解决微创手术数据标注难度大、场景复

杂多样的问题，进一步提升手术器械、病灶组织的识别精度与追踪稳定性，实现真正意义上的无标记、全自动视觉定位，推动微创机器人向自主化、智能化方向发展。

（二）多模态融合感知技术持续升级

单一视觉信息仅能获取组织表面信息，无法满足复杂手术的深层感知需求，未来视觉定位将进一步融合 OCT、超声、CT、力学、生理信号等多维度信息，构建全息化手术场景感知体系，实现从“表面视觉感知”到“深层组织穿透感知”的升级，提升复杂病灶、隐蔽组织的定位能力。

（三）视觉传感器微型化与柔性化

针对人体自然腔道、狭小手术空间的应用需求，视觉传感器将朝着微型化、柔性化方向发展，微型内窥相机、柔性视觉探头等设备将不断迭代，能够深入更多传统器械无法到达的手术区域，拓展微创手术的适应症范围，提升诊疗的灵活性与适用性。

五、结论

工业机器人视觉定位技术为微创手术提供“环境感知－精准定位－操作执行”闭环技术支撑，破解传统微创手术精度低等难题，推动其从人工经验主导转向精准智能主导。技术从传统视觉定位发展到结构光等，突破医疗复杂场景应用约束，在多个微创领域有优异应用价值。现阶段，该技术在微创手术应用中面临软组织形变等难题，需结合临床需求持续优化。未来，随人工智能等技术发展，视觉定位技术将朝智能化等方向演进，完善医疗机器人技术体系，推动微创手术机器人升级为智能外科系统，为精准、智能医疗发展提供核心技术支撑。

参考文献

[1] 王田苗, 胡天亮, 张帆. 医疗外科机器人研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(15): 1-12.
[2] 孙立宁, 杜志江. 微创手术机器人技术与临床应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 45-89.
[3] 季林红, 李剑, 王兴松. 骨科手术机器人视觉导航关键技术研究进展 [J]. 医用生物力学, 2021, 36(02): 175-182.
[4] 张福学, 刘畅, 赵万华. 腹腔镜三维视觉定位与机器人操控系统设计 [J]. 中国医疗器械杂志, 2020, 44(03): 198-203.
[5] 马宏伟, 赵万华, 周建军. 神经外科手术机器人视觉导航定位精度优化研究 [J]. 中华神经外科杂志, 2019, 35(08): 845-849.
[6] 吴鑫, 王战玺, 李丽. 双目立体视觉在微创穿刺手术中的定位应用研究 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(11): 267-274.
[7] 李祖贺, 王凤琴, 张龙. 基于深度学习的手术器械无标记视觉追踪方法 [J]. 模式识别与人工智能, 2022, 35(04): 361-369.
[8] 陈世雄, 刘军, 王浩. 多模态影像融合在微创外科手术导航中的应用研究 [J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(06): 926-930.
[9] 杨运泰, 陈峰, 吴伟. 工业机器人手眼标定技术在微创外科中的优化应用 [J]. 控制与决策, 2020, 35(07): 1756-1762.
[10] 国家药品监督管理局医疗器械技术审评中心. 手术机器人技术指导原则与临床评价要点 [Z]. 2023-05-12.