

支气管镜手术机器人发展现状及关键技术分析

段星光^{1,2,3}✉, 谢东升¹, 方冯歆云², 何睿², 李长胜^{2,3}✉

1) 北京理工大学医学技术学院, 北京 100081 2) 北京理工大学机电学院, 北京 100081 3) 北京理工大学郑州研究院, 郑州 450000

✉ 通信作者, E-mail: duanstar@bit.edu.cn, lics@bit.edu.cn

摘要 支气管镜机器人是一种新型医疗设备, 通过医疗机器人技术实现对肺部组织和病灶的高精度检测和治疗。本文综述了支气管镜机器人技术的发展现状和关键技术, 探讨了支气管镜机器人在肺癌早期诊断、微创治疗等方面的应用。针对狭窄腔道柔性机器人设计、复杂气道树状网络内导航及支气管镜手术机器人控制方法等关键技术进行了讨论和分析, 并在总结研究成果与分析关键技术的基础上, 指出支气管镜手术机器人今后的发展趋势与面临的挑战。支气管镜机器人技术是未来医疗领域的重要发展方向, 有望在提高治疗效果、减少创伤风险、提升手术效率等方面发挥重要作用。本文的工作在于全面总结和介绍支气管镜机器人技术的发展现状和应用前景, 旨在为医疗领域的从业人员和研究者提供有益的参考和借鉴。

关键词 支气管镜机器人系统; 柔性机构; 动态导航; 共享控制; 经支气管肺活检

分类号 TP242.3

Research progress and key technology analysis of bronchoscopic robot

DUAN Xing-guang^{1,2,3}✉, XIE Dong-sheng¹, FANG Feng-xin-yun², HE Rui², LI Chang-sheng^{2,3}✉

1) School of Medical Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2) School of Mechatronical Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

3) Zhengzhou Research Institute, Beijing Institute of Technology, Zhengzhou 450000, China

✉ Corresponding author, E-mail: duanstra@bit.edu.cn, lics@bit.edu.cn

ABSTRACT In recent years, bronchoscopic robot technology has emerged as a groundbreaking advancement in medical technology, particularly in the diagnosis and treatment of lung diseases. Traditional bronchoscopy, though effective, presents significant challenges in achieving the level of precision required for accurately detecting and treating lung tissue and lesions. While navigation-guided bronchoscopy has made notable strides in addressing some of these limitations, further improvements were necessary to enhance precision, accessibility, and overall effectiveness. Bronchoscopic robot technology bridges this gap by integrating robotics and advanced imaging sensors to elevate diagnostic and therapeutic capabilities. The core of bronchoscopic robot technology lies in its ability to combine the dexterity of robotic arms with the clarity provided by state-of-the-art imaging systems. This synergy allows for highly precise detection and treatment of lung tissue and lesions. The inherent flexibility of robotic arms enables doctors to navigate complex bronchial networks with ease, facilitating accurate localization of lesions, performing delicate biopsies, and conducting minimally invasive surgical procedures. These capabilities represent a significant leap forward in the treatment of lung diseases, providing clinicians with tools that surpass the limitations of conventional bronchoscopy in both precision and control. This paper provides a comprehensive overview of the current development status and the key technologies underpinning bronchoscopic robot technology. It begins by analyzing the application status of this technology in clinical diagnosis and treatment. The review examines how

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB4702600)

地址: 北京市海淀区学院路 30 号

E-mail: xuebaozr@ustb.edu.cn

邮政编码: 100083

<http://cje.ustb.edu.cn>

电话: 010-62333436

bronchoscopic robots are currently being utilized in medical settings and their impact on enhancing procedural accuracy and efficiency. By highlighting real-world applications, the paper emphasizes the transformative role that this technology is playing in improving outcomes for patients with lung diseases. The second focus of the paper delves into the technical principles that form the foundation of bronchoscopic robot technology. This section explores critical aspects such as mechanism design, navigation methods, and control systems. A detailed understanding of these technical components not only provides insights into how the technology operates but also identifies potential areas for future refinement. For instance, advanced navigation techniques enable accurate tracking of instruments within the lung's intricate structure, while innovative control systems ensure smooth, precise operation of robotic components. Furthermore, the paper discusses the current industrialization status of bronchoscopic robots, evaluating the progress made in translating laboratory innovations into practical, clinical tools. This includes an assessment of the technology's readiness for widespread adoption, challenges in scaling production, and efforts to integrate it into routine medical practices. Understanding the industrial landscape is essential for gauging the technology's potential for widespread clinical use and its long-term impact on healthcare. Finally, the paper looks toward the future by exploring research directions and emerging development trends. One major trend is the integration of lesion navigation, biopsy, real-time confirmation, and immediate treatment into a unified bronchoscopic diagnosis and treatment platform. Additionally, combining artificial intelligence with robotic systems is anticipated to significantly enhance the intelligence of bronchoscopic robots. AI-driven algorithms could provide advanced decision-making support, improving diagnostic accuracy and enabling personalized treatment strategies. These advancements have the potential to revolutionize the field by making procedures less invasive and more effective. By summarizing the current development status and key technologies of bronchoscopic robot technology, this paper highlights its immense potential to transform the diagnosis and treatment of lung diseases. The integration of robotics, imaging, and artificial intelligence is paving the way for more accurate, efficient, and patient-friendly medical procedures. As the technology continues to evolve, it promises to deliver improved patient outcomes, reduce procedural risks, and redefine the standards of care in pulmonary medicine.

KEY WORDS bronchoscopic robot system; flexible mechanism; dynamic navigation; shared control; transbronchial lung biopsy

1 引言

肺癌是起源于肺部支气管黏膜或腺体的恶性肿瘤，是我国新增和死亡人数最多的疾病，严重威胁人民生命健康。根据世界卫生组织国际癌症研究机构 GLOBOCAN 2020 数据显示，肺癌居全球总体癌症发病率第二位、致死率第一位^[1]，早期诊断对于肺癌患者的生存率至关重要，早期肺癌的 5 年生存率约为晚期肺癌的 6 倍。例如，1A1 期肺癌的治愈率可超过 90%，而晚期肺癌的治愈率不足 20%^[2, 3]。然而，仅有 15% 的肺癌病例在早期阶段被发现^[4, 5]。因此，肺癌的早期诊断和治疗已成为有效改变现状极大改善患者健康水平的有效方法，早发现、早诊断、早治疗，尤为重要。

肺癌的早期表现通常为肺部微小结节，因此对肺部微小结节进行良恶性的鉴别诊断是早期肺癌诊断的关键。流调研究显示，体检人群中肺结节检出率高达 16.90%，小结节占比超过 90%，患者群体庞大，良恶性鉴别非常困难^[6]。传统的肺小结节诊断方法主要包括 X 线胸片、计算机断层（computed tomography, CT）扫描、经皮穿刺活检等，但这些方法存在着一些局限性和缺陷。例如，X 线胸片的敏感性和特异性较低，难以对早期肺癌进行准确诊断；CT 扫描的辐射剂量大、成本高，对肺结节和肺腺癌的诊断准确度也存在局限性；经皮穿刺活检虽然可以获得病理诊断，但操作过程中存在较高的并发症风险。经支气管活检是近年来临床上新兴的肺部病灶诊断技术（图 1），具有诊断率高、并发症率低且创口小的优势^[7-9]，但传统支气管镜存在结节定位困难、操作复杂、学习曲线长等问题。结合环境感知、动态导航、精准操作等手术机器人技术，使柔性手术机器

人经支气管自然腔道到达小结节位置处，并对小结节进行取样诊断，可以有效解决上述难题，极大提高诊断率、安全性和有效性，满足临床上对微小结节微创或无创诊断的迫切需求，具有广泛的应用前景^[10, 11]。

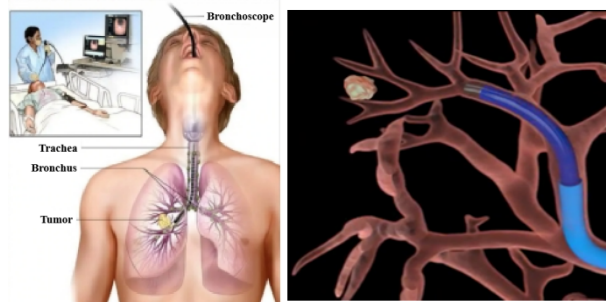


图1 经支气管活检手术术式

Fig.1 Transbronchial biopsy surgery

本文改编 PRISMA 的来确定要纳入综述的文献^[12]，文献纳入标准为：（1）与“支气管镜机器人”主题相关的临床或技术研究；（2）文献类型为正式发表的研究性论著、学位论文，期刊或综述等。这些文章可以进一步分为临床研究、机构设计、导航技术和控制技术等几个主要类别。本文的整体架构如图 2 所示，首先分析了支气管镜机器人在临床诊疗中的应用现状，接着对技术原理进行详细介绍，包括机构设计、导航方法和控制系统等，然后对目前支气管镜机器人的产业化现状进行了介绍，最后对未来的研究方向和发展趋势进行展望。

2 支气管镜技术临床应用

支气管镜是一种经口或鼻置入患者下呼吸道，用于做肺叶、段及亚段支气管病变的观察、活检采样、细菌学和细胞学检查，配合显示系统可进行摄影、示教和动态记录的医疗器械。近年来，支气管镜技术在临床肺癌的诊断中取得了显著的进展和应用价值。支气管镜技术的方便和快捷特点使其在临床医疗诊断中得到广泛应用^[13-15]。在临床应用中，主要可以分为传统支气管镜技术、导航引导的支气管镜技术和机器人辅助支气管镜技术。

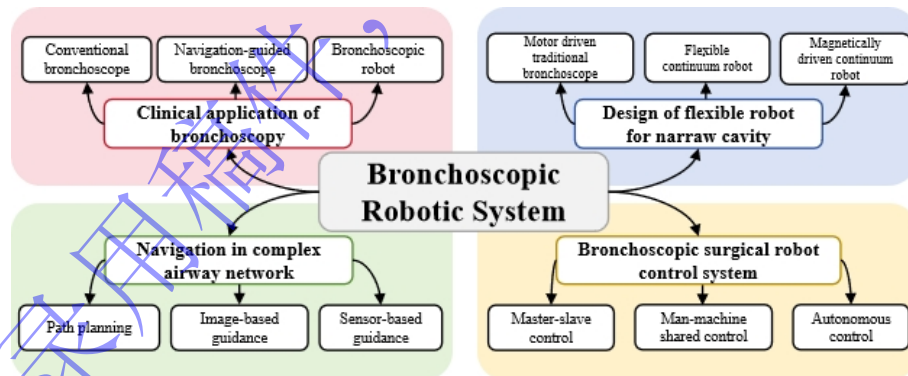


图2 文章整体架构

Fig.2 Overall structure

2.1 传统支气管镜

传统支气管镜在内镜图像引导下，由医生操作进入呼吸道进行肺部检查与诊断，特别是对肺部外周病变的恶性诊断具有重要价值。除肺癌外，支气管镜还适用于慢性阻塞性肺病、哮喘等疾病。研究表明，相较其他方法，支气管镜能够降低不良事件发生率，提高诊断阳性率，具有较高的安全性和有效性^[7, 16-18]。

2.2 导航引导支气管镜

传统支气管镜依赖医生结合 CT 影像和 X 线确认位置，存在辐射暴露和迷失方向的风险。导航

技术通过术前路径规划与术中图像配准，显示规划路径并引导支气管镜到达病变，提高了手术效率和诊断率，尤其对肺外周病变的诊断有重要帮助。导航技术包括虚拟支气管镜导航（virtual bronchoscope navigation, VBN）和电磁导航支气管镜（electromagnetic navigation bronchoscope, ENB）。VBN 通过实时导航图像辅助医生操作，显著降低并发症风险，而 ENB 则利用电磁系统引导支气管镜到目标部位，提高了定位准确性^[19-24]。

2.3 支气管镜机器人

支气管镜机器人技术结合机械臂和图像传感器，提供高精度的肺部病变定位和微创治疗。机器人平台如 Monarch 和 Ion 已获 FDA 批准，广泛应用于支气管镜手术，并在活检率、诊断率和并发症控制方面表现优于传统技术^[25-27]。研究表明，机器人可改善对小结节的可视化和采样能力，并具有易学习的操作优势^[28-30]。尽管支气管镜机器人展现出巨大的潜力，但目前仍处于临床应用早期阶段，需进一步通过大规模随机研究明确其实际效果。未来的发展方向包括将导航、活检和治疗整合为一体，同时结合人工智能技术，提升智能化水平，为胸科疾病诊疗提供更全面的支持^[31-33]。

3 狭窄腔道柔性机器人设计

柔性末端执行器是支气管镜机器人系统的关键核心部件，由可控弯曲部和主软管（被动弯曲）构成。可控弯曲部集成微型内窥镜、光源和传感器等，引导机器人支气管镜进入患者的呼吸道，实现对肺部和支气管的内窥镜检查。它还提供了一个工具通道，支持活检钳、刷子、超声探头等设备的通过，满足肺外周结节活检的需求。根据文献调研的结构，目前支气管镜机器人的机构设计可分为电机驱动的传统支气管、柔性末端连续体机器人和磁驱动连续体机器人。

3.1 电机驱动传统支气管镜

在现有临床使用的支气管镜基础上添加额外的机械结构和电机，搭建机器人硬件平台是一种常见且高效的方法。这种方法利用现有医疗设备进行改装和扩展，以实现支气管镜机器人的导航和控制能力，并验证相关算法和方法的性能^[34, 35]。如图 3 所示，通过添加机械结构和电机，机器人平台获得了远程运动和操作能力，研究人员可以在这个平台上验证导航和控制算法，包括自主导航、路径规划、障碍物避障和定位精度等^[36]。他们还可以开发自主控制方法，使机器人能够自主执行特定任务，如器械操作、组织采样和手术干预等^[37, 38]。

本文将该类方法统称为电机驱动传统支气管镜方法，这种支气管镜机器人平台具有以下优势：首先，它利用现有临床设备，避免了从头设计和制造机器人硬件平台的时间和成本。其次，通过添加额外的机械结构和电机，研究人员可以快速验证他们提出的导航算法和自主控制方法的性能和可行性。此外，机器人平台的结构和功能可以根据需要进行定制和扩展，以适应不同的研究目标和临床需求。综上所述，这类方法是一种高效且可行的研究方法，可为研究人员提供快速验证导航和控制性能的硬件平台，推动支气管镜机器人领域的发展和应用。

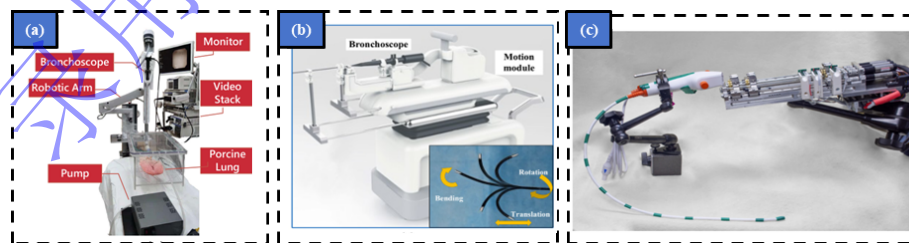


图 3 电机驱动传统支气管镜机器人. (a) Gu 等构建的支气管镜机器人平台^[36]; (b) Zou 等构建的支气管镜机器人平台^[37]; (c) Hoelscher 等构建的支气管镜机器人平台^[38]

Fig.3 Motor-driven traditional bronchoscopic robot: (a) Bronchoscopy robot platform constructed by Gu et al.^[36]; (b) Bronchoscopy robot platform constructed by Zou et al.^[37]; (c) Bronchoscopy robot platform constructed by Hoelscher et al.^[38]

3.2 柔性末端连续体机器人

在支气管镜机器人的整体系统设计中，一些学者聚焦于机器人末端柔性连续体机构及近端驱动机构设计，综合考虑多个因素，包括支气管镜直径、机械人相对于气道中轴线的角度以及在转向时的最小曲率半径等^[39]，以提升机器人在体内环境中的灵活性和可达空间。为此，他们设计了一系列柔性末端机器人^[40-42]。这些机器人的设计旨在适应复杂的解剖结构和狭小的空间，并能够灵活地进行操作，如图 4 所示。

中国科学院自动化研究所边桂彬团队提出了一种具有全维弯曲能力的连续体机器人，外径为 3.5 mm，内部工作通道为 2.6 mm^[43]，并利用混合运动学模型和误差补偿模型，提高了连续体机器人的位置精度^[44]；上海交通大学陈卫东团队提出的缺口管连续体机构，将不对称的交叉轴缺口集成到一对同心 Ni-Ti 管，实现相同的弯曲刚度下更大的最大弯曲角度^[45]；北理工段星光团队提出了一种 Ni-Ti 管切槽的连续体机构，外径为 3.2mm，配备 1.4mm 的工作通道，同时引入可变刚度和可变弯曲部分长度，以适应不同手术阶段的需求^[46,47]；Liu 等提出的互锁圆形关节末端连续体机构^[48, 49]以及 Kuan 等提出的多段 30° 间隙连续体机构^[50]都提供了灵活操作和控制的能力，适用于支气管镜介入治疗；Webster 等提出了一种同心管支气管镜机器人机构，通过手术工具通道进行手术操作，去除病变组织，并进行了离体动物实验^[51-53]。

这些创新的机器人系统有望在肺部疾病的诊断和治疗中发挥重要作用，并提高操作的精确性和效率，为支气管镜机器人在医疗领域的应用提供了新的可能性。它们能够在狭小和复杂的解剖结构中进行精确的操作和病灶定位，为医生提供更准确、安全和有效的诊断和治疗手段。这些创新的机器人设计为未来的研究和发展提供了基础，推动了支气管镜机器人技术的进步。

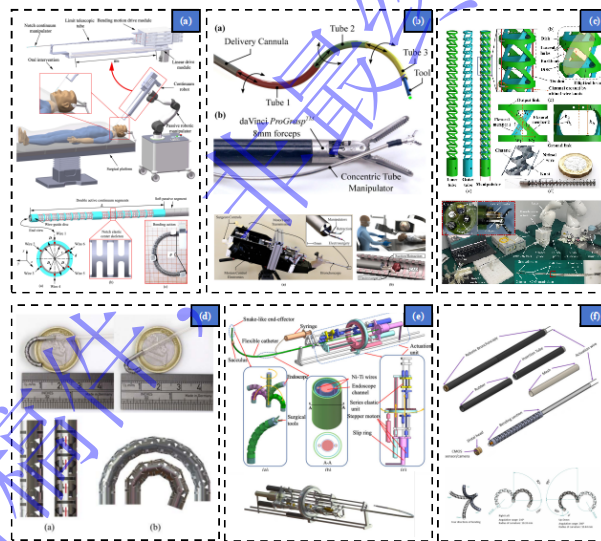


图 4 柔性连续体支气管镜机器人. (a)中国科学院自动化研究所边桂彬团队提出的具有全维弯曲能力的连续体机构^[43]; (b) Webster 等提出的同心管机构^[51-53]; (c)上海交通大学陈卫东团队提出的缺口管连续体机构^[45]; (d) Liu 等提出的互锁圆形关节末端连续体机构^[48,49]; (e)北理工段星光团队提出的 Ni-Ti 管切槽连续体机构^[46,47]; (f) Kuan 等提出的多段 30° 间隙连续体机构^[50]

Fig.4 Flexible continuum bronchoscopic robot: (a) Continuum mechanism with full-dimensional bending capability proposed by Bian et al.^[43]; (b) Concentric pipe mechanism proposed by Gafford et al.^[51-53]; (c) Notched-tube continuum manipulator proposed by Chen et al.^[45]; (d) Interlocking circular joint end continuum mechanism proposed by Liu et al. ^[48,49]; (e) Continuous mechanism of Ni-Ti tube grooving proposed by Duan et al. ^[46,47]; (f) Multi sub-section with 30° gap proposed by Kuan et al.^[50]

3.3 磁驱动连续体机器人

远程磁驱动柔性机器人是近年来新兴的机器人系统，能够以远程可控方式主动转向和导航，在医疗应用中具有很大的前景，已发展多种术式，如治疗颈动脉瘤、支气管内镜诊断肺癌肿瘤、结肠

镜诊断结肠癌肿瘤、髓内连锁钉手术等^[54]。如图 5 所示，Kim 等提出了一种亚毫米级自润滑软连续体机器人，采用铁磁性软聚合物基质和水凝胶皮肤制作机器人本体，可以实现全方位转向和导航，到达人体内难以到达的部位^[55]。为了提供更大的灵巧性和能够进入以前不可行的位置，Gafford 等提出了螺旋纤维增强方法^[56]。Lin 等提出了反磁化连续体机器人磁场控制的概念，可以在小尺寸范围内灵活操纵。相比于其他均匀磁化磁控机器人，反磁化磁连续体机器人具有较大的尖端可达工作空间和灵活性^[57]。利兹大学 STROM 实验室进行了磁驱动连续体机器人在支气管活检手术模拟环境的测试，他们根据患者的术前扫描，个性化定制优化导管的磁化谱和成形驱动场，并在支气管模型上进行了验证，该机器人的长度为 80 毫米，直径为 2 毫米^[58]。此外，浙江大学陆豪健、王越和熊蓉团队提出了一种小型混合驱动分层支气管镜机器人，它由外径为 4.5 mm 的外肌腱驱动导管和外径为 2.4 mm 的内磁性工作通道组成，将磁驱动和绳驱动连续体机器人的优势结合起来，增加了进入末端细支气管进行肺部检查的灵活性^[59]。这些创新的磁驱动柔性机器人技术有望在临床应用中提供更准确、灵活和可控的操作手段，为医生提供更好的诊断和治疗工具。

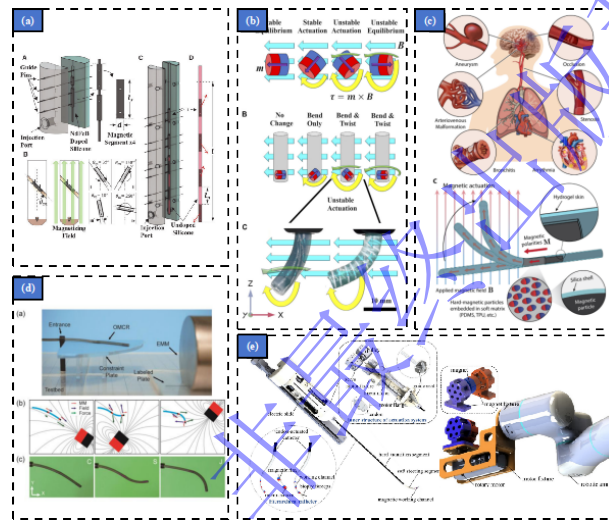


图 5 磁驱动支气管镜机器人。(a) Pittiglio 等个性化定制优化导管的磁化谱和成形驱动场^[58]；(b) Gafford 等提出的螺旋纤维增强连续体机器人^[56]；(c) Kim 等提出的亚毫米级自润滑软连续体机器人^[55]；(d) Lin 等提出的反磁化连续体机器人^[57]；(e) 浙江大学小型混合驱动分层支气管镜机器人^[59]

Fig.5 Magnetically driven continuum bronchoscopic robot: (a) Pittiglio et al. optimizes the catheters' magnetization profiles and the shape-forming actuating field^[58]; (b) Helical fiber reinforcement continuum robot proposed by Gafford et al.^[56]; (c) Submillimeter-scale, self-lubricating soft continuum robot proposed by Kim et al.^[55]; (d) Opposite-magnetized magnetic continuum robot proposed by Lin et al.^[57]; (e) Soft hybrid actuated hierarchical bronchoscope robot proposed by Lu et al.^[59]

4 复杂气道树状网络内导航

肺支气管腔为树形拓扑结构，分岔繁多，各级结构相似性高。仅依靠 CT 影像操作，很容易丢失当前位置，难以到达目标肺结节，手术效率低。为此，需要建立术中导航系统，对医生的手术操作进行引导。支气管镜机器人的导航系统主要分为术前和术中两个部分，术前采集患者的 CT 数据，导入规划软件重建肺部三维模型，根据目标结节位置规划机器人路径；术中经过配准后，将规划路径显示到导航界面上，引导医生操作或机器人进行自主运动，并通过内窥镜及传感器信息实时反馈，定位当前机器人在支气管内的位置，提供给医生或机器人控制系统，进行下一步主从或自主运动。

4.1 路径规划

路径规划是术前阶段的核心任务，而肺气道的三维重建是支气管镜机器人路径规划和导航的基

础^[60]。在 2022 年的 MICCAI (Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention) 会议上, 气道树建模(ATM '22)的挑战赛引起了广泛关注。该挑战提供了大规模的 CT 扫描和详细的肺气道注释, 包括 500 个 CT 扫描用于训练、验证和测试。通过该挑战赛, 肺气道分割方法更接近图像分辨率的极限, 嵌入了拓扑连续性增强的深度学习模型在肺气道分割中取得了良好的性能, 可以在兼顾准确性和拓扑完备性。然而, 气道的解剖标记(如分支气道分类或分割)仍需进一步研究, 以为支气管镜导航提供更详细的地图^[61]。此外, 气道树的呼吸运动仿真也是该领域的一个重要发展方向。

如图 6 所示, 在肺气道树(支气管树)三维重建的基础上, Kiraly 等提出了一种骨架化算法来获取包含路径和分支结构的树状结构^[62]。Khare 等和 Gibbs 等结合手持支气管镜的操作, 集成已知的路线约束, 将计算出的路径自动转化为操作计划, 以符合医生的支气管镜检查训练和操作习惯^[63, 64]。Rosell 等基于虚拟支气管镜考虑了支气管镜的几何形状和运动学约束, 规划了从气管到周围肺病变的路径^[65]。Kuan 等结合了后向路径规划和前向导航的策略, 记录路径上分叉口的转向操作, 实现了机器人的虚拟导航, 无需机器人前端的精确定位信息^[50]。Gibbs 等关注于穿刺过程的末端姿态规划和可视化, 提出了一种自动计算最佳采样姿态的方法, 以提高采样的成功率^[66]。Alan 等和 Hoelscher 等关注通过口腔部署机器人到组织采样的全流程手术规划方法, 包括经口部署支气管镜、穿刺针(从气道刺入肺实质), 以及能够导航到目标的可操纵针三个阶段, 以提高规划效率并避免重要血管等解剖障碍物^[38, 67]

由于人体自然腔道的结构相似性, 血管介入的路径规划方法也逐渐被应用到支气管机器人上^[68]。然而, 现有的方法主要基于支气管树三维模型的中心线或医生手持支气管镜的操作方式, 在机器人在支气管内自主运动的路径规划方面相对较少。此外, 多发肺小结节是临床上常见的问题, 需要研究多目标的最优路径规划方法, 在给定约束条件下选择最佳路径, 以确保高效的病变检测和治疗。这些研究方向将进一步推动支气管镜机器人技术的发展, 为肺部疾病的提供更准确、安全和高效的术前手术规划方案。

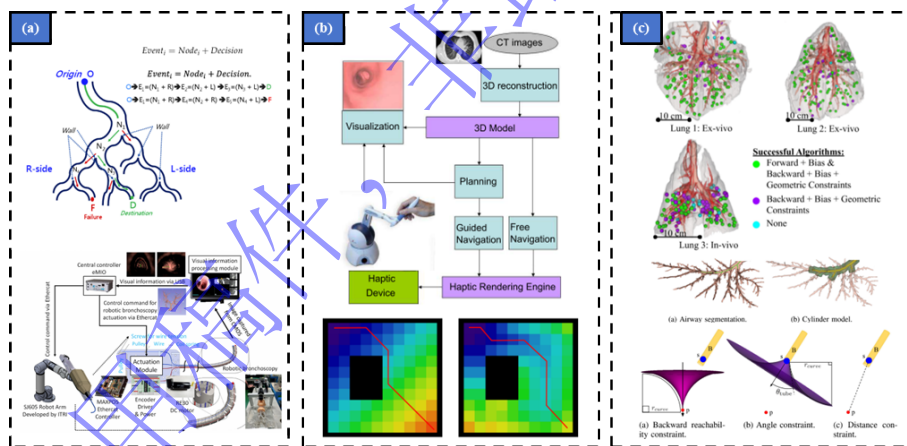


图 6 路径规划方法。(a)Kuan 等提出的后向路径规划和前向导航结合策略^[50]; (b) Rosell 等提出的基于支气管镜几何形状和运动学约束的路径规划方法^[65]; (c) Hoelscher 等提出的三级逆向规划方法^[38]

Fig.6 Path planning methods: (a) The combination strategy of backward path planning and forward navigation proposed by Kuan et al.^[50]; (b) Path planning method based on bronchoscope geometry and kinematic constraints proposed by Rosell et al.^[65]; (c) Three-Stage backward planning approach proposed by Hoelscher et al.^[38]

4.2 基于图像引导

在支气管镜机器人领域, 基于图像引导的导航方式是最常见最广泛研究的方法。Teena 等通过将术中透视图像与术前 CT 扫描的 2D 和 3D 气道可视化图像叠加在一起, 增强医生的视野^[69], 但该方法不能实现连续的图像引导, 逐渐被基于图像或视频的方法替代^[70]。这类方法利用内窥镜获取的图像或视频(如图 7 所示), 在识别重要的解剖组织(如支气管分支)的基础上, 分析支气管镜的运动^[71, 72]。通过提取代表气道分叉的解剖学上有意义的区域, 对分叉的结构特征及其空间分布进

行编码，从而实现支气管镜的定位导航^[73, 74]。

基于 2D--3D 配准的支气管镜定位策略主要依赖于内窥镜图像和术前预分割的三维支气管树模型。由于支气管镜在呼吸运动下随气道一起运动，因此基于配准的方法的准确性受气道整体运动变化的影响较小，仅需解决支气管镜视频图像与生成的虚拟视图之间的局部气道变形问题。现有的方法通常使用定义具有局部特征的相似性度量来匹配真实支气管镜图像与基于 CT 的虚拟支气管镜图像^[75, 76]。Lee 等采用图像饱和度和亮度特征消除由内窥镜光源和气泡所产生的唾液的干扰^[77]，Chien 等提出了基于自适应网络的模糊推理系统的图像匹配方法，根据从 3D 模型中提取的图像验证真实支气管镜图像的位置^[78]，Gu 等提出了一种视觉相似网络(Visual Similarity Network, VSN)来提取内镜图像中腔体结构的域不变特征，并引入了一种运动学改进网络(Kinematic Refinement Network, KRN)，该网络通过网络预测和机器人控制信号逐步改进相机姿态估计^[36]，Liu 等融合电磁关键点配准的初始姿态和基于空间感知网络的特征比较器，利用群体智能进行高效的最优姿态搜索^[79]。此外，Zhao 等提出了一种基于学习的全局定位方法，脱离相似性度量策略，通过引入循环生成结构生成大量虚拟图像用于训练，并可以通过真实图像进行部署^[80]。Lavasani 等提出了一种中心线引导的高斯混合模型，用于根据提取的中心线配准支气管镜的位置，在期望最大化框架下，迭代地估计特征对应和空间变换，从而将问题公式化并求解^[81]。基于 2D--3D 配准的方式具有直观性，算法耗时较短，但由于腔道内图像相似性很高，容易产生误匹配，影响导航效果。

基于深度估计的 3D-3D 配准和视觉里程计是基于图像引导的另一种重要方法。深度估计作为二维支气管镜场景中气道结构三维重建的基础，研究人员致力于在获取真实支气管镜图像/图像序列有限的情况下合成逼真的支气管镜视频，以开发和评估深度估计方法^[82, 83]。Shen 等提出了一种条件生成对抗学习框架，基于上下文感知恢复单目视频深度，提高了导航系统的鲁棒性^[84]。此外，Marco 等和 Deng 等先后建立了视觉里程计数据集，用于支气管镜导航相关研究^[85, 86]。这些数据集包含支气管镜视频序列和相机位姿的真值，研究人员可以利用这些数据集来训练和评估视觉里程计算法的性能。Wang 等引入了即时定位与地图构建(Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)技术，并在模拟呼吸运动的模型上验证了在支气管镜导航中的有效性^[87]。Luó 等在配准的基础上，使用图像特征特征和对极几何约束来估计相机移动，显著提高了导航性能^[88]。基于 3D-3D 配准的方式准确率高，但 3D 重建的过程复杂度较高，耗时较长，影响导航的实时性。

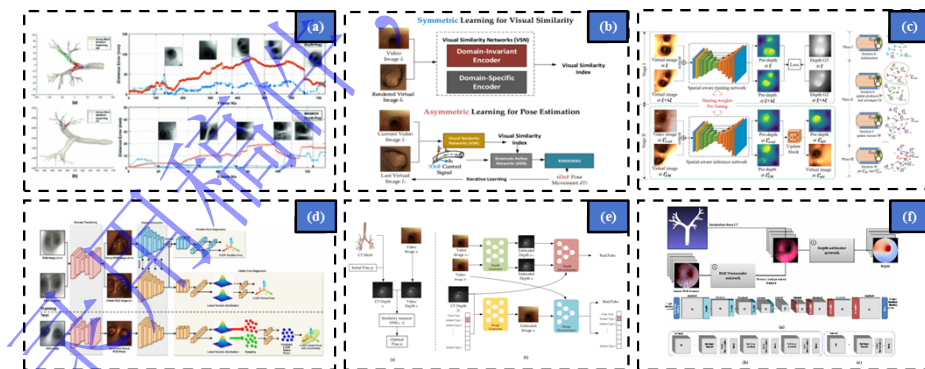


图 7 基于图像引导的导航方法. (a) Shen 等提出的基于分叉结构特征识别的导航方法^[74]; (b) Gu 等提出的视觉相似性和位姿估计网络^[36]; (c) Liu 等提出的具有空间几何感知的支气管镜导航策略^[79]; (d) Zhao 等提出的基于学习的全局定位方法^[80]; (e) Shen 等提出的基于上下文感知的深度和姿态估计网络^[84]; (f) Marco 等提出的视觉里程计数据集及全卷积网络结构^[85]

Fig.7 Navigation method based on image guidance: (a) Bifurcation structure recognition method proposed by Shen et al.^[74]; (b) Visual similarity and pose estimation network proposed by Gu et al.^[36]; (c) Navigation scheme with spatial geometry awareness proposed by Liu et al.^[79]; (d) Learning-based global localization method proposed by Zhao et al.^[80]; (e) Context-aware depth and pose estimation method proposed by Shen et al.^[84]; (f) Visual odometry dataset and full convolutional network structure proposed by Marco et al.^[85]

4.3 基于传感器引导

除了基于视觉的方法，外部传感器也被广泛部署在支气管镜导航中，以提高导航效果。其中，最有代表性的例子是 Monarch 机器人系统的基于电磁（Electromagnetic，EM）传感器的导航系统和 Ion 机器人系统的基于光纤光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）形状感知的导航系统。此外，力感知和反馈的引入也增强了支气管镜系统的环境感知能力^[89-91]。

如图 8 所示，基于电磁传感器的导航系统通常将微型电磁传感器安装在支气管镜的尖端或插入到仪器通道，以提供实时的方向和位置的相机^[92-94]。电磁导航的优势是可以无视组织遮挡实现传感器在人体内的实时精准定位，但是易受到周围铁磁材料的影响，研究人员结合光学跟踪器和实时图像等补偿优化方式，提高了导航定位精度^[95-98]。基于形状感知的导航系统得益于近年来基于 FBG 的形状重建技术的发展，通常在支气管镜中嵌入光纤光栅传感器通道，通过测量光波长变化来实时获取形状信息，从而实现机器人定位导航^[99]。但基于形状感知的方式容易引起累计误差，多种传感器的数据融合的导航方式是支气管镜机器人领域的热点研究方向。

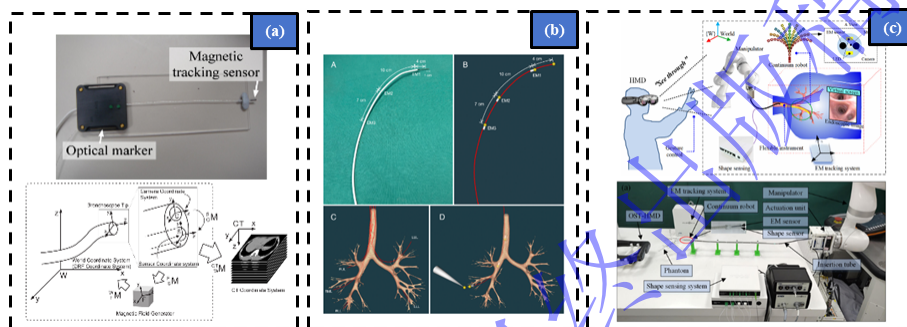


图 8 基于传感器引导的导航方法. (a) Mori 等提出的光学跟踪器补偿电磁跟踪系统^[96]; (b) Brekken 等基于光纤形状感知的末端定位方法^[99]; (c) 上海交通大学陈卫东团队光纤电磁融合的 AR 导航方法^[100]

Fig.8 Navigation method based on sensor guidance: (a) The optical tracker compensation electromagnetic tracking system proposed by Mori et al^[96]; (b) tip localization using fiber optic shape sensing proposed by Brekken et al. ^[99]; (c) AR navigation method of optical fiber electromagnetic fusion proposed by Chen et al.^[100]

5 支气管镜手术机器人控制系统

支气管镜手术机器人的运动控制逻辑包括：首先将医生或人工智能（Artificial Intelligence，AI）或共享控制信号转换为机器人的运动指令。这些指令用于生成期望的位姿，然后进行逆运动学计算，以确定导丝的位移量和电机的角位移。最后，将计算得到的位移和角位移下发给电机执行，以实现导管的弯曲。当导管发生运动时，会引起内窥镜视野和传感器信号的变化。根据这些变化，系统会进行下一步的运动决策，并继续控制机器人的运动。

主从控制是支气管镜手术机器人领域最常用的控制方法。研究人员致力于对支气管介入运动特性进行研究，并进行数值模拟和仿真，以建立相应的运动控制理论^[34, 35, 101, 102]。在主从控制中，机器人系统的主控制器由外科医生操控，通过手柄或控制台输入指令，而从控制器则负责执行实际的手术操作^[103, 104]。张茂杨等针对主从同步控制的位置跟踪性能要求，提出了 IALO（Improve Antlion Optimization Algorithm）-BP-PID 机器人控制算法，增强了支气管镜机器人系统的控制性能^[105]。上海交通大学陈卫东团队探索了基于增强现实（Augmented Reality，AR）的无接触手势控制方法，增强了机器人系统的可视化效果^[100]。

在主从控制的基础上，研究团队引入人工智能辅助构建人机共享控制系统，机器人系统通过感知和分析外科医生的手术意图，与医生共同完成手术任务。Xiang 等基于人工势场引入了力反馈机制，辅助外科医生的操作，从而提高安全性以及远程支气管镜检查的可靠性^[106]。如图 9 所示，浙江大学陆豪健、王越和熊蓉团队设计了一个人工智能辅助控制的支气管镜机器人，利用支气管镜视频对专家操作进行模仿学习，通过人工智能-人类共享控制算法使年轻医生能够实现肺部安全控

制，减少误操作^[107]。这种控制方式将人的智能与机器人的精确性相结合，实现了外科医生与机器人的协同作业，提高了手术的安全性和效果。

在自主化方面，Kuntz 等聚焦于采样工具的穿刺过程自主化，采用高度灵活的可操纵穿刺针沿着曲线轨迹进行运动，自主地导航针头穿过活体组织，绕过解剖障碍到目标组织^[108]。天津大学李建民团队提出了一种高度鲁棒和精确的管腔中心检测方法，该方法将基于深度学习的目标检测与直方图反投影相结合，实现了在管腔中心的图像引导下，自动完成支气管镜的定位和插入^[37]。这些研究都实现了部分任务自主，视觉引导用于辅助机器人定位或姿态保持，然而在分叉处的腔道选择等关键决策方面依然依赖医生操作。因此，建立经自然腔道机器人自主导航与控制系统框架，使机器人系统能够根据预设的算法和规则，自主地执行手术任务，而无需外科医生的实时操控，显得尤为重要。通过自主控制，机器人系统可以实现自主感知、决策和执行，从而减轻外科医生的工作负担，促进支气管镜机器人自主化智能化发展。

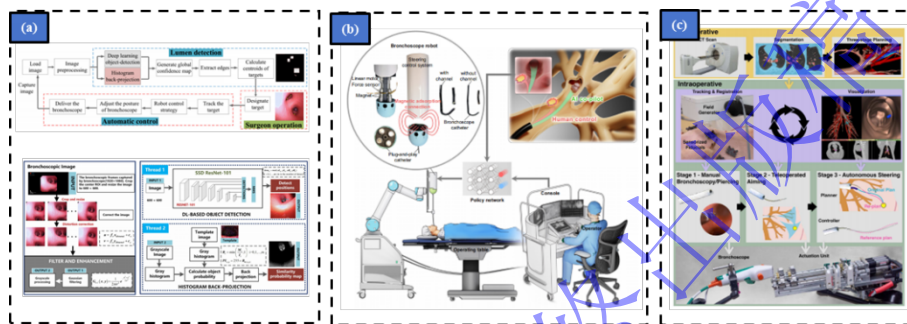


图9 支气管镜手术机器人控制系统。(a) 天津大学支气管镜自动介入机器人系统^[37]；(b) 浙江大学人工智能辅助控制支气管镜机器人系统^[107]；(c) Kuntz 等提出的经支气管活检针自主控制系统^[108]

Fig.9 Bronchoscopic surgical robot control system: (a) Automatic orientation and insertion robotic system proposed by Li et al. ^[73]; (b) AI co-pilot bronchoscope robot proposed by Lu et al. ^[143]; (c) Autonomous medical needle steering system proposed by Kuntz et al. ^[144]

6 产业化现状

近年来，支气管镜机器人的产业化在国内外呈现快速发展的趋势。如图 10 所示，美敦力公司的 superDimension、莛博医疗的 LungPoint 系列、朗开医疗的支气管镜导航系统均已获得相关的医疗器械注册证（FDA 或 NMPA），这些系统在传统支气管镜的基础上引入电磁导航系统，实现术中实时定位，引导医生到达目标位置进行活检采样手术。

在机器人整机系统方面，Ion、Monarch 是最具有代表性的支气管镜机器人系统，均已获得 FDA 及 NMPA 认证。Ion 机器人由 Intuitive 公司开发，其末端执行器外径为 3.5mm，配有 2.0mm 的工作通道，通过光纤形状传感的方式进行定位导航，并可以通过术中 C 臂进行位置确认。Monarch 支气管镜机器人由 Auris Health 公司研制，该系统具有末端为 4.2mm 直径的支气管镜和 6mm 直径的外鞘，工作通道为 2.1mm，采用蛇骨机构驱动，具备精细的导管运动能力。在国内，朗合医疗、微创机器人以及精锋医疗等公司在该领域取得了显著的进展。他们的机器人系统结合了柔性内镜、操作手柄、电磁导航和多自由度机械臂等技术，能够实现术前肺支气管模型分割重建、术中路径导航和可视化活检等操作，为支气管镜手术提供了更精确和高效的解决方案，以提高手术效率和患者的治疗体验。









Representative manufacturer	Auris Health	Intuitive	LungHealth	Edge Medical	MicroPort	Medtronic	Broncus	LungCare
Robotic system								
Certificate	FDA/NMPA	FDA/NMPA	-	-	-	FDA	FDA/NMPA	NMPA
End effector	4.2mm	3.5mm	3.3mm	None reported		Only navigation platform		
Tool channel	2.1mm	2.0mm	1.2mm					
Navigation mode	ENB/VBN	FBG/C-arm	ENB/VBN	ENB/VBN	VBN	ENB/VBN	AR/VBN	ENB/VBN

图 10 支气管镜机器人产业化现状

Fig.10 Current situation of bronchoscope robot industrialization

7 发展趋势及面临的挑战

利用支气管镜机器人实现经支气管的无创化肺小结节活检及定位，是提高诊断率、安全性和有效性的先进手段，有着十分重要的临床价值。本文首先对支气管镜机器人的临床应用及研究现状进行了总结分析，并对其中涉及到的柔性机器人设计、导航方法、交互控制等关键技术问题进行了详尽的分析。支气管镜手术机器人作为多学科交叉产物，其在造福患者的同时，也可以促进介入式医学学科以及机器人技术的发展。然而，要进一步提升手术机器人的性能并更好地应用于临床，仍面临着许多挑战，当然也蕴含着巨大的机遇。

在未来的发展趋势中，高集成度和大角度弯曲末端柔性机器人设计以及精准控制是重要方向。这意味着机器人需要具备更高的柔性和灵活性，以适应复杂的肺部解剖结构，并能够在狭小的空间内进行准确的操作。为了实现这一目标，研究人员需发展更先进的柔性机器人材料和机构设计，以实现高度可控的运动和灵敏的感知能力。此外，随着支气管镜进一步深入支气管，支气管的内径将变得更小，因此需要进一步减小机器人的尺寸以及各种传感器的尺寸。

在多模影像环境感知、高安全性自主导航、肺小结节精准定位等方面依然需要进一步研究。研究人员将致力于整合多种影像技术，如 CT、MRI 和超声等，以提供更全面准确的肺部解剖结构信息，如分支气道的分类和分割，以提供更详细的导航地图。此外，对气道树的呼吸运动进行仿真也是一个重要的发展方向，以帮助机器人通过动态补偿方法进一步提高导航系统的精度。

自主化和智能化是手术机器人领域的热点研究方向之一，目前的研究已经实现了经支气管活检采样手术的部分任务自主化，在分叉处的腔道选择等关键决策方面依然依赖医生操作。为了实现全自主化的操作，研究人员将致力于建立经自然腔道机器人的自主导航与控制系统框架，通过结合视觉引导、感知技术和智能算法，使机器人能够自主地完成诊疗过程。同时，安全控制问题也需要得到充分考虑，确保机器人在操作过程中不会对患者造成伤害。

在临床应用方面，未来的发展方向包括将病变导航、活检、现场确认和立即治疗等整合到支气管镜诊疗一体化中，并结合人工智能等技术，使机器人具备更高的智能化水平，为胸科疾病的诊断和治疗提供更多的帮助。虽然支气管镜机器人在改善肺部病变诊断和治疗方面显示出潜力，但仍然需要进行大规模、前瞻性和随机的研究，以进一步明确其在真实世界中的临床效果。

参考文献

- [1] Sung H, Ferlay J, Siegel R L, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin*, 2021, 71(3): 209
- [2] Kim J, Lee H, Huang B W. Lung cancer: diagnosis, treatment principles, and screening[J]. *American family physician*,

- 105(2022), 5,p.487-494.
- [3] Bade B C, Cruz C S D. Lung cancer 2020: epidemiology, etiology, and prevention[J]. *Clinics in chest medicine*, 41(2020), 1,p.1-24.
- [4] Team N L S T. Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening[J]. *New England Journal of Medicine*, 365(2011), 5,p.395-409.
- [5] Blandin Knight S, Crosbie P A, Balata H, et al. Progress and prospects of early detection in lung cancer[J]. *Open biology*, 7(2017), 9,p.170070.
- [6] Gould M K, Tang T, Liu I A, et al. Recent trends in the identification of incidental pulmonary nodules. *Am J Respir Crit Care Med*, 2015, 192(10): 1208
- [7] Yafang W, Enguo C. Interventional bronchoscopic treatment of lung cancer. *Laparosc Endosc Robot Surg*, 2021, 5(2): 52
- [8] Chen J X, Chen X B, Xie F F, et al. Expert Consensus on Technical Specifications for Diagnosis, Localization, and Treatment Guided by Domestic Electromagnetic Navigation Bronchoscopy System (2021 Edition). *Chinese Journal of Lung Cancer*, 2021, 24(08): 529
(陈军祥, 陈小波, 谢芳芳, 等. 国产电磁导航支气管镜系统引导下诊断、定位和治疗技术规范专家共识(2021版). *中国肺癌杂志*, 2021, 24(08): 529)
- [9] Guo C, Diao X, Huang C, et al. Application and Progress of Electromagnetic Navigation Bronchoscopy in Thoracic Surgery. *Chinese Journal of Lung Cancer*, 2022, 25(02): 118
(郭超, 刁夏尧, 黄诚, 等. 电磁导航支气管镜在胸外科中的应用及进展. *中国肺癌杂志*, 2022, 25(02): 118)
- [10] Khan F, Seaman J, Hunter T D, et al. Diagnostic outcomes of robotic-assisted bronchoscopy for pulmonary lesions in a real-world multicenter community setting. *BMC Pulm Med*, 2023, 23(1):161
- [11] Guo C, Zhang J Q, Li Z, et al. Application status and prospect of medical robot in diagnosis and treatment of pulmonary nodules. *Chinese Journal of Thoracic Surgery(Electronic Edition)*, 2022, 9(01): 35
(郭超, 张家齐, 李桢, 等. 医疗机器人在肺部小结节诊疗中的应用现状及前景展望. *中华胸部外科电子杂志*, 2022, 9(01): 35)
- [12] Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Int J Surg*, 2010, 8(5): 336
- [13] Li R C, Xie F F, Chen J X, et al. New progress in bronchoscopic diagnosis and treatment of peripheral pulmonary diseases. *Chinese Journal of Clinical Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2023, 30(03): 470
(李润昌, 谢芳芳, 陈军祥, 等. 肺外周病变经支气管镜诊治新进展. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2023, 30(03): 470)
- [14] Criner G J, Eberhardt R, Fernandez-Bussy S, et al. Interventional bronchoscopy. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 202(1): 29
- [15] Steinfurt D P, Bonney A, See K, et al. Sequential multimodality bronchoscopic investigation of peripheral pulmonary lesions. *Lancet Respir Med*, 2016, 47(2):607
- [16] Sarsam M, Baste J, Thiberville L, et al. How Bronchoscopic Dye Marking Can Help Minimally Invasive Lung Surgery. *J Clin Med*, 2022, (11): 3246
- [17] Zhu S Y, Zhang X Y, Yan Y R, et al. Application of interventional bronchoscopy in diagnosis and treatment of pulmonary diseases. *Chinese Journal of Lung Diseases(Electronic Edition)*, 2024, 17(01): 148
(朱斯悦, 张晓莹, 严玉茹, 等. 介入支气管镜在肺部疾病诊断和治疗中的应用. *中华肺部疾病杂志(电子版)*, 2024, 17(01): 148)
- [18] Chen L L, Li Y, Pan P H. Bronchoscopic interventional treatment of emphysema. *Journal of Central South University(Medical Science)*, 2022, 47(05): 665
(陈伶俐, 李毅, 潘频华. 肺气肿的支气管镜介入治疗现状. *中南大学学报(医学版)*, 2022, 47(05): 665)

- [19] Tsukasa I, Alexander G, Terunaga I. Bronchoscopic navigation and tissue diagnosis. *Gen Thorac Cardiovasc Surg*, 2020, (7): 672
- [20] A K, K O, R I, et al. Reproducibility of peripheral branches in virtual bronchoscopic navigation using VINCENT and LungPoint software for peripheral lung lesions. *Respiratory investigation*, 2021, (6): 772
- [21] Giri Mohan. *Diagnostic value of bronchoscopy assisted by virtual navigation and non-virtual navigation in pulmonary peripheral lesions* [Dissertation]. Chongqing: Journal of Chongqing Medical University, 2021
(Giri Mohan. 虚拟导航与非虚拟导航辅助支气管镜对肺部周围性病变的诊断价值[学位论文]. 重庆: 重庆医科大学, 2021)
- [22] Fu P, Huang W T, Long F, et al. Application of LungPoint virtual navigation assisted bronchoscopy in the diagnosis of peripheral pulmonary nodules. *Journal of Clinical Pulmonary Medicine*, 2020, (10): 1462
(付鹏, 黄文婷, 龙发, 等. LungPoint虚拟导航辅助支气管镜检查在肺外周结节诊断中的应用. 临床肺科杂志, 2020, (10): 1462)
- [23] Tan X G, Zhang Y. Clinical application of electromagnetic navigation bronchoscope in diagnosis and treatment of peripheral pulmonary diseases. *Journal of Capital Medical University*, 2022, (4): 570
(谭晓刚, 张毅. 电磁导航支气管镜在肺外周病变诊断及治疗的临床应用. 首都医科大学学报, 2022, (4): 570)
- [24] Becker H D, Herth F, Ernst A, et al. Bronchoscopic biopsy of peripheral lung lesions under electromagnetic guidance: a pilot study. *J Bronchology Interv Pulmonol*, 2005, 12(1): 9
- [25] Mondoni, Michele, Giovanni S. Bronchoscopic management of peripheral pulmonary lesions: robotic approach paves the way to the future. *BMC Pulm Med*, 2019, 19(1): 166
- [26] Rickman O B, Mahajan A K, Hogarth D K, et al. "Tool-In-Lesion" accuracy of galaxy system: robotic-assisted, electromagnetic navigation bronchoscopy with integrated tool-in-lesion-tomosynthesis technology: the match study. *Chest*, 2022, (4): 2650
- [27] Lee-Mateus A Y, Naina S, Hartley C, et al. Efficacy of Robotic Bronchoscopy for Molecular Marker Analysis in Primary Lung Cancer. *Clin Lung Cancer*, 2023, 25(1):110
- [28] Brownlee A R, Watson J J, Akhmerov A, et al. Discussion to: Robotic navigational bronchoscopy in a thoracic surgical practice: Leveraging technology in the management of pulmonary nodules. *JTCVS Open*, 2023, 16:7
- [29] Bajwa A, Bawek S, Bajwa S, et al. 76 consecutive cases of robotic-assisted navigational bronchoscopy at a single center. *Tp137. Tp137 Thoracic Oncology: Diagnosis and Treatment: Ip, Surgery, and Radiation*, American Thoracic Society, 2021, p.A4820
- [30] Rojas-Solano J R, Ugalde-Gamboa L, Machuzak M. Robotic bronchoscopy for diagnosis of suspected lung cancer: a feasibility study. *J Bronchology Interv Pulmonol*, 2018, 25(3): 168
- [31] Nakul R, Elliot H, Ajay W, et al. Advanced imaging for robotic bronchoscopy: A review. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(5): 990
- [32] Donna E, Wu S, Arias S. Proof of concept: Shape-sensing robotic-assisted bronchoscopy performed under moderate sedation. *Respir Med Case Rep*, 2022, 41: 101787
- [33] Ni P Z, Yu H J, Tang J, et al. Research progress of robotic bronchoscopy system and prospect of the combination with artificial intelligence. *Chin J Clin Thorac Cardiovasc Surg*, 2021, 28(10): 1167
(倪彭智, 俞豪杰, 汤杰, 等. 机器人支气管镜系统应用的研究进展及其与人工智能结合的展望. 中国胸心血管外科临床杂志, 2021, 28(10): 1167)
- [34] Liu H J, *Study on the motion characteristics and numerical simulation of catheter intervention in bronchoscopy* [Dissertation]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021
(刘贺军. 支气管镜术导管介入运动特性及数值模拟研究[学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021)
- [35] Jiang J, *Design of robotic bronchoscopy mechanism and research on flexible end effector pose* [Dissertation]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023

- (姜洁. 经支气管诊疗机器人机构设计及柔性末端执行器位姿研究[学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023)
- [36] Gu Y, Gu C J, Yang J, et al. Vision-kinematics interaction for robotic-assisted bronchoscopy navigation. *IEEE Trans Med Imaging*. 2022, 41(12): 3600
- [37] Zou Y L, Guan B, Zhao J C, et al. Robotic-assisted automatic orientation and insertion for bronchoscopy based on image guidance. *IEEE Trans Med Robot Bionics*, 2022, No.3: 588
- [38] Hoelscher J, Fu M Y, Fried I, et al. Backward planning for a multi-stage steerable needle lung robot. *IEEE Robot Autom Lett*, 2021, 6(2): 3987
- [39] Fried I, Hoelscher J, Fu M, et al. Design considerations for a steerable needle robot to maximize reachable lung volume // *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Xi'an, 2021
- [40] Li J, Han C, Yu T, et al. Bronchoscopic interventional surgery robot which constrained by a shear-fork mechanism // *2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*. Xining, 2021
- [41] Ai X J, Gao A Z, Lin Z C, et al. A multi-contact-aided continuum manipulator with anisotropic shapes. *IEEE Robot Autom Lett*, 2021, No.3: 4560
- [42] Kato T, King F, Takagi K, et al. Robotized catheter with enhanced distal targeting for peripheral pulmonary biopsy. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2021, No.5: 2451
- [43] Bian G B, Wang S, Li Z, et al. Design and nonlinear error compensation of a multi-segment soft continuum robot for pulmonary intervention. *IEEE Trans Med Robot Bionics*, 2023, No.4: 1
- [44] Wang S, *Design of a soft continuum robot for pulmonary intervention* [Dissertation]. Beijing: North China University of Technology, 2023
(王爽. 面向肺部介入的柔性连续体机器人设计研究[学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2023)
- [45] Ai X J, Cai Y L, Gao A Z, et al. A steerable cross-axis notched continuum manipulator for endobronchial intervention. *IEEE Trans Med Robot Bionics*, 2024
- [46] Duan X G, Xie D S, Zhang R T, et al. A novel robotic bronchoscope system for navigation and biopsy of pulmonary lesions. *Cyborg Bionic Syst*, 2023, 4: 0013
- [47] Zhang R T, Xie D S, Qian C, et al. Design of a flexible robot toward transbronchial lung biopsy. *Robotica*, 2023, No.3: 1055
- [48] Liu N, Bergeles C, Yang G. Design and analysis of a wire-driven flexible manipulator for bronchoscopic interventions // *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Stockholm, 2016
- [49] Liu N, Abdelaziz M E M K, Shen M, et al. Design and kinematics characterization of a laser-profiled continuum manipulator for the guidance of bronchoscopic instruments // *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Brisbane, 2018
- [50] Kuan C P, Huang S, Wu H Y, et al. Path planning and navigation of miniature serpentine robot for bronchoscopy application. *Micromachines (Basel)*, 2023, 14(5): 969
- [51] Gafford J B, Webster S, Dillon N, et al. A concentric tube robot system for rigid bronchoscopy: a feasibility study on central airway obstruction removal. *Ann Biomed Eng*, 2020, 48(1): 181
- [52] Gilbert H B, Iii R J W. Can concentric tube robots follow the leader? // *The 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013)*. Karlsruhe, 2013
- [53] Swaney P J, Mahoney A W, Ramirez A A, et al. Tendons, concentric tubes, and a bevel tip: three steerable robots in one transoral lung access system // *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle, 2015
- [54] Chen C, Yeh P, Cheng C, et al. Magnetic targeting systems for endo-bronchoscope diagnosis and intramedullary-nail surgery: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 2021, No.11: 12545
- [55] Kim Y, Parada G A, Liu S, et al. Ferromagnetic soft continuum robots. *Sci Robot*, 2019, 4(33): eaax7329

- [56] Lloyd P, Koszowska Z, Di Lecce M, et al. Feasibility of fiber reinforcement within magnetically actuated soft continuum robots. *Front Robot AI*, 2021, 8:715662
- [57] Lin D J, Jiao N D, Wang Z D, et al. A magnetic continuum robot with multi-mode control using opposite-magnetized magnets. *IEEE Robot Autom Lett*, 2021, 6(2): 2485
- [58] Pittiglio G, Lloyd P, Da Veiga T, et al. Patient-specific magnetic catheters for atraumatic autonomous endoscopy. *Soft Robot*, 2022, 9(6): 1120
- [59] Zhang J Y, Fang Q, Xiang P Y, et al. Soft hybrid actuated hierarchical bronchoscope robot for deep lung examination. *IEEE Robot Autom Lett*, 2024, No.1: 811
- [60] Zhang H X, Shen M L, Shah P L, et al. Pathological airway segmentation with cascaded neural networks for bronchoscopic navigation // *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Paris, 2020
- [61] Zhang M H, Wu Y Q, Zhang H X, et al. Multi-site, multi-domain airway tree modeling (ATM²²): a public benchmark for pulmonary airway segmentation. *Med Image Anal*, 2023, 90: 102957
- [62] Kiraly A P, Helferty J P, Hoffman E A, et al. Three-dimensional path planning for virtual bronchoscopy. *IEEE Trans Med Imaging*, 2004, 23(11): 1365
- [63] Khare R, Bascom R, Higgins W E. Hands-free system for bronchoscopy planning and guidance. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2015, 62(12): 2794
- [64] Gibbs J D, Graham M W, Bascom R, et al. Optimal procedure planning and guidance system for peripheral bronchoscopy. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2014, 61(3): 638
- [65] Jan R, Alexander P, Paolo C, et al. Motion planning for the virtual bronchoscopy // *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Saint Paul, 2012
- [66] Gibbs J D, Taeparasit P, Higgins W E. Planning and visualization methods for effective bronchoscopic target localization // *Medical Imaging 2012: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*. San Diego, 2012: 466
- [67] Kuntz A, Torres L G, Feins R H, et al. Motion planning for a three-stage multilumen transoral lung access system // *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Hamburg, 2015
- [68] Antiga L. *Patient-specific modeling of geometry and blood flow in large arteries* [Dissertation]. Milano: Politecnico di Milano, 2002
- [69] Steger T, Hosbach M. Navigated bronchoscopy using intraoperative fluoroscopy and preoperative CT // *2012 9th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*. Barcelona, 2012
- [70] Merritt S M, Khare R, Bascom R, et al. Interactive CT-video registration for the continuous guidance of bronchoscopy. *IEEE Trans Med Imaging*, 2013, 32(8): 1376
- [71] Byrnes P D, Higgins W E. Efficient Bronchoscopic video summarization. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2019, 66(3): 848
- [72] Lederer C, Altstadt S, Andriamonje S, et al. Design of a flexible interactive tool for guided bronchoscopy // *2017 IEEE Region 10 Conference, TENCON 2017*. Penang, 2017
- [73] Gil D, Esteban-Lansaque A, Borràs A, et al. Intraoperative extraction of airways anatomy in video bronchoscopy. *IEEE Access*, 2020, 159696
- [74] Shen M L, Giannarou S, Shah P L, et al. Branch: Bifurcation recognition for airway navigation based on structural characteristics // *2017 Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*. Quebec City, 2017: 182
- [75] Lee J D, Chien J C, Chen H C, et al. A registration method for real bronchoscopy image with virtual bronchoscope images using similarity measures // *2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*. Osaka, 2019
- [76] Zang L G, Ai D N, Liu S Y, et al. Bronchoscopic localization method guided by prior knowledge of branch structure // *2023 5th International Conference on Intelligent Medicine and Image Processing (IMIP)*. Tianjin, 2023
- [77] Lee J D, Chen H C, Li S H. Registration of bronchoscopic image and CT virtual image with coarse-to-fine strategy //

- 2018 *IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*. Chiba, 2018
- [78] Jongchih C, Jiannder L, Ellen S, et al. A bronchoscope localization method using an augmented reality co-display of real bronchoscopy images with a virtual 3D bronchial tree model. *Sensors (Basel)*. 2020, 20(23): 6997
- [79] Liu H, Zhang S K, Yang Y M, et al. A robust pose optimization scheme with spatial geometry awareness for hybrid bronchoscopic navigation. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2024, 73: 1
- [80] Zhao C, Shen M L, Sun L. Generative localization with uncertainty estimation through video-CT data for bronchoscopic biopsy. *IEEE Robot Autom Lett*, 2020, No.1: 258
- [81] Lavasani S N, Farnia P, Najafzadeh E, et al. Bronchoscope motion tracking using centerline-guided Gaussian mixture model in navigated bronchoscopy. *Phys Med Biol*, 2021, 66(2): 025001
- [82] Guo L, Nahm W. A cGAN-based network for depth estimation from bronchoscopic images. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2024, 19(1):33
- [83] Guo L, Nahm W. Texture synthesis for generating realistic-looking bronchoscopic videos. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2023, 18(12): 2287
- [84] Shen M L, Gu Y, Liu N, et al. Context-aware depth and pose estimation for bronchoscopic navigation. *IEEE Robot Autom Lett*, 2019, No.2: 732
- [85] Visentini-Scarzanella M, Sugiura T, Kaneko T, et al. Deep monocular 3D reconstruction for assisted navigation in bronchoscopy. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2017, 12(7): 1089
- [86] Deng J N, Li P Z, Dhaliwal K, et al. Feature-based visual odometry for bronchoscopy: a dataset and benchmark // 2023 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Detroit, 2023.
- [87] Wang C, Oda M, Hayashi Y, et al. A visual SLAM-based bronchoscope tracking scheme for bronchoscopic navigation. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2020, 15(10): 1619
- [88] Luó X, Feuerstein M, Deguchi D, et al. Development and comparison of new hybrid motion tracking for bronchoscopic navigation. *Med Image Anal*, 2012, 16(3): 577
- [89] Wang Q, Ou Y S, Xu Y S. A prototype virtual haptic bronchoscope // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Lausanne, 2002.
- [90] Wu Z C, Gao A Z, Liu N, et al. FBG-based triaxial force sensor integrated with an eccentrically configured imaging probe for endoluminal optical biopsy // 2020 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Paris, 2020
- [91] Zhang J Y, Fang Q, Xiang P Y, et al. Flexible biopsy robot with force sensing for deep lung examination. *Advanced Intelligent Systems*, 2024 6(2): 2300107
- [92] Jaeger H A, Nardelli P, O'Shea C, et al. Automated catheter navigation with electromagnetic image guidance. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2017, 64(8): 1972
- [93] Luo X B, Mori K. Real-time bronchoscope three-dimensional motion estimation using multiple sensor-driven alignment of CT images and electromagnetic measurements. *Comput Med Imaging Graph*, 2014, 38(6): 540
- [94] Reichl T, Gardiazabal J, Navab N. Electromagnetic servoing-a new tracking paradigm. *IEEE Trans Med Imaging*, 2013, 32(8): 1526
- [95] Mori K, Deguchi D, Akiyama K, et al. Hybrid bronchoscope tracking using a magnetic tracking sensor and image registration // *International conference on medical image computing and computer-assisted intervention (MICCAI)*. Palm Springs, 2005: 543
- [96] Mori K, Ishitani K, Deguchi D, et al. Compensation of electromagnetic tracking system using an optical tracker and its application to bronchoscopy navigation system // *Medical Imaging 2007: Visualization and Image-Guided Procedures*. San Diego, 2007: 213
- [97] Luo X B, Kitasaka T, Mori K. Externally navigated bronchoscopy using 2-D motion sensors: Dynamic phantom validation. *IEEE Trans Med Imaging*. 2013, 32(10):1745

- [98] Luo X B, Wan Y, He X J, et al. Observation-driven adaptive differential evolution and its application to accurate and smooth bronchoscope three-dimensional motion tracking. *Med Image Anal*, 2015, 24(1): 282
- [99] Brekken R, Hofstad E F, Solberg O V, et al. Accuracy of instrument tip position using fiber optic shape sensing for navigated bronchoscopy. *Med Eng Phys*, 2024, 125: 104116
- [100] Lin Z C, Gao A Z, Ai X J, et al. ARei: Augmented-reality-assisted touchless teleoperated robot for endoluminal intervention. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2022, 27(5): 3144
- [101] Emil N, Stefan-Dan P, Lucian G, et al. Explicit dynamics simulation of the catheter movement during bronchoscopic sampling of pulmonary nodules. *Mater Today Proc*, 2023, 93(4): 630
- [102] Guo C, Tang X R, Zhao K, et al. Segmentation-informed sampling planning algorithm and dynamic simulation of a bronchial interventional diagnostic robot. *Chinese Journal of Clinical Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2022, 29(10): 1260
(郭超, 汤向荣, 赵珂, 等. 支气管介入诊断机器人的分段知情采样规划算法与动力学仿真. 中国胸 心血管外科临床杂志. 2022, 29(10): 1260)
- [103] Graetzel C F, Sheehy. Robotic bronchoscopy drive mode of the Auris Monarch platform // *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Montreal, 2019: 3895
- [104] Liu S J, *Design and research of bronchoscope assisted robot system* [Dissertation]. Jinlin: Jinlin University, 2023
(刘士杰. 支气管镜辅助机器人系统的设计与研究[学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2023)
- [105] Zhang M Y, Wang Y G, Bai C, et al. Bronchoscopy robot system based on IALO and BP neural network. *Modeling and Simulation*, 2023, 12(6):5897
(张茂杨, 王亚刚, 白冲, 等. 基于IALO和BP神经网络的支气管镜机器人系统. 建模与仿真, 2023, 12(6):5897)
- [106] Xiang P Y, Zhang J Y. Image-guided teleoperation for soft bronchoscopy robot // *2023 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*. Hefei, 2023: 807
- [107] Zhang J Y, Liu L L, Xiang P Y, et al. AI co-pilot bronchoscope robot. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 241.
- [108] Kuntz A, Emerson M, Ertop T E, et al. Autonomous medical needle steering in vivo. *Sci Robot*, 2023, 8(82): eadf7614