

机器人肺叶切除术应用及研究进展

孙思远¹, 周一凡^{2*}

¹右江民族医学院临床医学院, 广西 百色

²广西壮族自治区人民医院胸部外科, 广西 南宁

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月13日; 发布日期: 2025年5月22日

摘要

肺癌作为全球恶性肿瘤相关死亡的首要原因, 其外科手术治疗始终是首选方式。达芬奇机器人手术系统作为微创外科技术的革命性平台, 近年来在胸外科领域实现了从技术探索到常规应用的跨越式发展。相较于传统胸腔镜手术, 机器人辅助胸腔镜手术通过三维高清视野、仿生腕器械及震颤过滤系统进一步优化了肺叶切除术的技术路径。本文系统综述机器人辅助肺叶切除术在肺癌治疗中的临床应用进展, 探讨远程手术和远程教育的创新发展, 展望机器人胸外科手术在未来发展方向。

关键词

达芬奇机器人, 肺叶切除术, 肺癌

Application and Research Progress of Robotic Pulmonary Lobectomy

Siyuan Sun¹, Yifan Zhou^{2*}

¹School of Clinical Medicine, Youjiang Medical University for Nationalities, Baise Guangxi

²Department of Thoracic Surgery, Guangxi Zhuang Autonomous Region People's Hospital, Nanning Guangxi

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 13th, 2025; published: May 22nd, 2025

Abstract

As the leading cause of malignancy related death worldwide, surgical treatment of lung cancer is always the preferred method. As a revolutionary platform of minimally invasive surgical technology, Da Vinci robotic surgical system has achieved a leapfrog development from technical exploration to routine application in the field of thoracic surgery in recent years. Compared with traditional thoracoscopic

*通讯作者。

文章引用: 孙思远, 周一凡. 机器人肺叶切除术应用及研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(5): 1469-1476.
DOI: 10.12677/acm.2025.1551516

surgery, robot-assisted thoracoscopic surgery further optimizes the technical path of pulmonary lobectomy through 3D high-definition visual field, bionic wrist instruments and tremor filtration system. This article systematically reviews the clinical application of robot-assisted pulmonary lobectomy in the treatment of lung cancer, discusses the innovative development of remote surgery and distance education, and looks forward to the future development direction of robotic thoracic surgery.

Keywords

Da Vinci Robot, Pulmonary Lobectomy, Lung Cancer

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

肺癌, 又称原发性支气管肺癌, 是起源于气管、支气管黏膜或腺体的最常见肺部恶性肿瘤, 是世界上最常见的癌症之一[1][2]。肺癌负担的日趋严重, 多数国家的肺癌发病率持续上升, 已然成为全球公共卫生领域的重大挑战[3][4]。

为应对此挑战, 肺癌的筛查与治疗策略在多方面均取得了显著进展。低剂量螺旋 CT、肺癌肿瘤标志物及肺癌预测模型在肺癌早期诊断中发挥了关键作用, 而纳米药物给药系统、分子靶向治疗、微波消融疗法、免疫治疗等先进治疗手段亦随着生物技术的飞速发展和跨学科合作的深入而不断涌现[5]。尽管如此, 手术切除依然是当前肺癌治疗的首选方案。

肺癌手术治疗在医学技术发展的推动下, 呈现出新的变化趋势。首先, 手术切除范围的金标准已从全肺切除逐步演进为肺叶切除, 并进一步拓展至肺段切除; 其次, 手术方式亦经历了从传统的开胸手术到现代微创手术的转变。开胸手术由于其长切口、肌肉与肋骨损伤大、术后并发症多、恢复速度慢及术后生活质量差等局限性, 逐渐被微创手术所取代。微创手术以其切口小、创伤少、手术切口美观、疼痛程度轻、术后并发症发生率低及恢复速度快等优势, 受到广泛青睐。

随着达芬奇机器人手术系统的引入, 胸外科微创手术进一步发展为电视辅助胸腔镜手术(Video-assisted thoracoscopic surgery, VATS)和机器人辅助胸腔镜手术(Robot-assisted thoracoscopic surgery, RATS)两种。自 Kirby 博士和 Rice 博士[6]在 1993 年首次实施胸腔镜肺叶切除术并证实其安全性与可行性以来, 胸腔镜肺叶切除术在全球范围内得到了迅速推广。随后, Melfi 及其同事于 2002 年首次报道了达芬奇机器人肺叶切除术的应用[7], 标志着肺癌治疗领域进入了新的时代。

2. 达芬奇机器人手术系统概述

达芬奇 Xi 手术机器人系统作为最新的智能手术平台, 由两大核心模块组成, 其一是人体工程学设计的医生控制台, 外科医生通过指套式控制器实现手部动作的转换, 经由主-从式远程控制系统驱动机械臂完成精密操作, 完成复杂的手术; 其二是配备四支 EndoWrist®可转腕器械的交互式机械臂, 其七个自由度的活动能力设计, 突破人类手腕生理活动极限, 可精准复现外科医生的三维空间操作轨迹, 使复杂的手术简单化。

此外, 该系统还具备以下技术优势: 首先, 内置三维高清视频系统, 能够清晰展示支气管血管束的显微解剖结构, 使肺段间平面更容易识别, 大大降低手术风险。其次, 震颤过滤系统, 达芬奇机器人手术系统通过机械臂滤除医生手部震颤, 显著提高了手术的稳定性和精准度。最后, 机械臂七个自由度的

活动能力, 可在狭小胸腔内实现亚肺段级别的精细解剖, 有效降低血管误损伤风险。

3. 达芬奇机器人辅助肺叶切除术的临床应用

3.1. 麻醉与体位管理

手术采用健侧卧位, 胸部垫高以充分打开肋间隙。采用双腔气管插管的方式进行麻醉管理。主刀医生坐在机器人控制台操纵机械臂, 第一助手于患者腹侧站位负责辅助器械操控及紧急中转开胸预案执行。

3.2. 手术切口设计

RATS 肺叶切除手术目前的切口布局已形成标准化术式, 四孔法作为经典入路, 光学通道和两个机械臂孔多选择在第 7~9 肋间[8], 辅助孔则位于前侧胸壁锁骨中线区域。术者根据习惯选择不同的肋间进行手术。此外, 四臂五孔切口[9]、三孔切口[10]的手术方式也备受众多学者青睐, 后者通过减少辅助孔数量降低术后疼痛程度。目前, 理论上侵入性最小的切口布局是罗清泉教授提出的单孔机器人肺叶切除术的方式[11]。

3.3. 手术入路与过程

3.3.1. 单向式肺叶切除

前入路单向式肺叶切除于 2010 年由刘伦旭教授首次提出[12], 该术式核心在于遵循“由浅入深”的解剖层次递进原则, 优先处理肺静脉的浅层解剖平面, 采用血管闭合器进行精准离断, 其次沿支气管血管鞘向深部解剖, 通过“隧道技术”游离支气管与肺动脉, 最后处理肺裂。该方式避免了肺叶的反复翻转, 从而减少术中出血的发生。

3.3.2. 后入路肺叶切除

后入路单向式肺叶切除术的方向则与前入路不同, 首先打开叶裂交界处, 分离周围组织进入后纵隔胸膜, 逐步暴露支气管及并全面暴露肺门结构后依次离断支气管、肺动脉、肺静脉。此外, 在后入路的基础上学者们探索出了一种改良的后入路手术方式, 创新性地实施“支气管优先离断 + 血管复合离断”技术, 通过仅仅两次离断将病灶完全取出, 减少术中时长, 提高手术效率。

3.3.3. 剑突入路肺叶切除

传统胸腔镜肺叶切除术在采用单孔剑突入路时, 患者取仰卧体位, 于剑突下方作 3~4 cm 的横行或纵行切口。而达芬奇机器人辅助肺叶切除术在采用剑突入路时, 患者仍取健侧卧位, 并采用四臂五孔方式。Puwalani、Shruti 等学者[13] [14]报道了剑突入路机器人肺叶切除术的案例, 进入胸腔后从前部开始逐层分离叶裂, 暴露叶静脉、支气管、肺动脉后依次离断。

3.4. 常见术后并发症管理

3.4.1. 肺部并发症

肺部并发症是达芬奇机器人辅助肺叶切除术最常见的并发症之一[15], 包括肺炎、持续漏气、肺不张等。术前肺功能锻炼能有效预防术后肺部并发症的发生。对于术后肺不张, 可采取止痛、抗菌药物治疗、支气管扩张剂吸入、持续正压通气、支气管镜诊治等治疗方法[16]-[18]。对于术后肺部持续漏气, 保守治疗是改善 PAL 的基础[19], 包括引流管管理、疼痛管理、数字监测胸腔引流系统、改善肺功能及营养支持等。Pier 等学者的一项单中心前瞻性观察性研究[20]表明, 数字监测胸腔引流系统能有效缩短胸管持续时间和总体住院时间。此外, Alessio 等学者的多中心队列回顾性研究[21]显示, 自体血贴片胸膜固定术安全有效地减少了住院时间, 并可实现胸管的早期拔除, 且未增加并发症发生率。化学胸膜融合术, 如碘胸膜融合术, 也被证实为治疗肺切除术后持续漏气的有效方法之一, 其在漏气时间、住院时间、气胸

复发等方面优于单纯多西环素胸膜穿刺术或引流术[22]。近年来, 针对持续漏气的新方法, 如自体血浆治疗、自体血小板凝胶治疗、生物工程组织密封剂、支气管阀门、干细胞治疗等, 为患者提供了新的治疗选择[19]。随着研究的深入和技术的完善, 这些方法有望在治疗持续漏气中发挥重要作用。

3.4.2. 术后房颤

心房颤动(Atrial Fibrillation, AF)作为非心脏胸外科手术最为常见的持续性心律失常类型, 其在肺叶切除术后发生率约为 17% [23]。鉴于术后房颤带来的潜在风险和临床负担, 预防其发生的重要性远超过治疗本身。Zhang 等学者通过对 12 项随机试验的 Meta 分析[24], 深入探讨了术后房颤的预防策略。结果显示, 胺碘酮作为预防性药物, 其效果尤为显著。单次使用胺碘酮能够显著降低房颤的发生率, 从原本的 39.2%降低至 8.3%, 且未观察到显著的严重并发症。

在新发术后房颤的治疗策略上, 应基于患者的血流动力学稳定性进行个体化处理。对于血流动力学不稳定的患者, 应立即实施紧急复律治疗, 以确保患者生命安全。而对于血流动力学稳定的患者, 则可采取控制心率或恢复窦性心律的治疗策略, 旨在优化患者的症状和生活质量[25] [26]。

4. 达芬奇机器人肺叶切除术手术研究进展

近年来, 达芬奇机器人手术系统在技术创新与临床应用领域取得了显著突破, 其相关的研究也取得了十足的进展。根据 2023 年 Wu 等学者的倾向性评分匹配分析发现, RATS 在早期胸管拔除、早期出院、较低的开胸率、更少的术后漏气以及淋巴清扫数量方面优于 VATS [27]。同年, 另一项基于 5721 案例的研究认为, RATS 的手术时间短于 VATS 和开放手术, 同时 RATS 的转化率较低、住院时间和术后输血率均低于 VATS [28]。由此可知, 达芬奇机器人系统行肺叶切除术是优于传统胸腔镜行肺叶切除术, 在达芬奇机器人肺叶切除术的探索中, 学者们对不同的机器人使用方式进行了深入研究。2022 年 Lou 教授团队通过对双端口与多端口进行达芬奇机器人肺叶切除术进行研究, 发现手术端口的减少不会延长患者的恢复时间, 也不会增加患者的痛苦, 其中双端口机器人的平均手术时间较多端口短[29]。2023 年 Veronica Manolache 等学者通过对达芬奇机器人单端口手术与多端口手术比较, 认为单端口肺机器人肺叶切除术是安全可靠的手术方式, 在中位数手术时间、中位数住院时间比多端口更具优势[30]。

随着手术机器人技术的迭代升级, 全球范围内已形成多平台协同发展的创新格局。2023 年一项基于对国产 Toumai 机器人与达芬奇机器人的临床研究, 结果表明 Toumai 手术机器人在肺叶切除术中展现出与达芬奇机器人手术系统具有相似的临床效能[31]。值得注意的是, 新型系统的探索仍在持续推进, 2024 年日本学者 Takashi Suda 进行了首例 Hinotori™ 手术机器人系统左下肺叶切除术, 其认为需要进一步改进才能用于肺癌手术, 但即使在目前的状态下, 与达芬奇机器人相比没有差异[32]。Giuseppe Aresu 等学者使用英国 Versius 手术系统对尸体模型进行胸外科手术, 其中 18 例肺叶切除术中仅 1 例肺叶切除术由于控制台系统故障而未完成, 其验证了 Versius 手术系统的临床应用潜力, 该研究为 Versius 手术系统后续小规模临床试验提供了循证支持[33]。然而, 尽管全球手术机器人系统呈现多元化发展趋势, 目前通过权威认证并常规应用于胸外科领域的平台仍相对有限。这一现状与胸外科手术特有的技术挑战密切相关: 首先, 胸腔内纵隔结构空间狭小且毗邻重要脉管系统, 要求机器人系统具备微型化与高自由度优势; 其次, 肺门淋巴结清扫及支气管血管吻合等操作需实时精准识别。

5. 达芬奇机器人辅助肺叶切除术的优势

在当前背景下, 达芬奇系统作为目前胸外科应用最成熟的机器人平台, 其肺叶切除术的临床循证积累与技术迭代方向仍具标杆意义。作为胸外科机器人手术的先行者, 其独有的高自由度器械与沉浸式三维视野, 可精准剥离肺门血管及支气管, 显著降低术中误伤风险; 而模块化设计适配单孔或多孔入路,

为复杂解剖结构的个体化切除提供了灵活解决方案。

5.1. 适应症的拓展

达芬奇机器人手术系统凭借其三维高清视野、图像稳定与放大、灵活的机械臂以及生理学震颤的过滤功能,克服了 VATS 的局限,显著拓展了其在胸外科的应用范围。与 VATS 相比,达芬奇机器人消除了助手控制手术视野的需求,同时克服了 VATS 仪器在解剖精度上的限制,特别是在处理解剖隆突间隙、裂缝中的肺动脉和肺静脉时展现出卓越的灵巧性[34]。

在肺癌治疗中,对于高 T 分期(TNM T3~T4)的局部晚期肺癌的手术方式一直存在争议,主要是由于这些肿瘤通常体积较大,位于中心位置,并伴有支气管和血管侵犯,使得微创入路根治性切除更具挑战性。然而,达芬奇机器人手术系统提供的独特技术特征为微创手术治疗高分期肺癌提供了更多可能性。Ghada 等学者关于高分期非小细胞肺癌的回顾性研究[35],机器人辅助治疗高分期 NSCLC 肿瘤(特别是高 T 期和预处理患者)是可行的,且具有较高的根治率。

因此,达芬奇机器人手术系统凭借其独特的技术特征,极大地拓展了肺癌微创手术的适应症,使传统胸腔镜手术难以触及的禁区得以在微创手术下安全有效地进行。

5.2. 远程手术的应用前景

随着信息技术的飞速发展,远程医疗和远程手术逐渐成为现实。自 2001 年纽约外科医生通过远程方式为法国患者实施机器人胆囊切除术以来[36],远程手术领域取得了显著进步。特别是 5G 网络的出现和新一代机器人手术系统的诞生,为远程手术的发展提供了有力支持。George 等学者[37]的研究表明,通过 5G 网络,外科医生能够在数百公里外凭借高清视频进行手术操作,这不仅扩大了高水平外科医生的医疗辐射范围,也促进了医疗欠发达地区对优质医疗服务的获取。Tian 等学者开展基于 5G 网络的远程机器人脊柱手术的研究[38],进一步证明了基于 5G 网络的远程机器人手术的可行性,并探索了“一对多”远程手术的新模式。

然而,尽管远程手术具有诸多优势,如减少地区间医疗水平差异、及时应对紧急情况等,但其普及仍面临诸多挑战。Andrew 等学者[39]指出,远程监控和远程手术促进了世界范围内外科技术的教学以及向医疗欠发达地区提供更为实用方便的外科护理方面援助,但网络要求、远程机器人设备、安全、法律及伦理等问题仍是制约远程手术普及的关键因素。因此,未来在推动远程手术发展的同时,需要充分考虑并解决这些问题。

5.3. 远程教育 with 培训

远程手术平台不仅促进了不同医疗机构之间的交流与合作,还为远程培训与远程教育提供了新途径。经验丰富的外科医生可以通过远程手术平台实时指导经验不足的同事进行手术操作,促进技能发展和知识转移[40]。Mitchell 等学者认为[41],远程教学在提供足够的外科培训和教育的同时,还能增加对偏远地区、农村地区及发展中国家的访问。这种教学方式克服了现场指导计划的成本问题,提供了一种实用且经济的替代指导工具。因此,大力发展远程教育与培训是提高基层医疗水平和技术的新出路,对于缩小地区间医疗水平差异具有重要意义。

6. 挑战与展望

6.1. 当前面临的挑战

达芬奇机器人凭借临床应用中的卓越表现让人惊叹,但极高的使用成本仍然令人诟病。Florian 和

Johannes 两位学者通过对比 RATS 和 VATS 手术[42]发现, RATS 的购置成本、维护成本以及机器人仪器和一次性产品的费用均显著高于 VATS, 导致手术费用整体上升约 50%, 为患者带来了沉重的经济负担。此外, 达芬奇机器人系统缺乏触觉反馈的问题也受到了广泛关注。Armin 等学者指出[43], 触觉反馈是确保手术安全操作的基本要素。

与此同时, 新兴竞争对手和替代机器人手术系统的出现也对达芬奇机器人的市场地位构成了挑战。Transenterix、Meere 和 Titan Medical 等公司已经推出了新的机器人平台, 为机器人微创手术提供新的选择方案。Pradeep 发表了一篇关于新兴手术机器人系统与达芬奇机器人系统对比的文章[44], 重点阐述了其中新兴机器人系统针对达芬奇机器人系统高成本和触觉反馈等缺点的优化和改进。如 Senhance 手术机器人系统, 具有眼动追踪功能。术者可通过观察手术区域的各个位置来控制摄像头, 同时操作器械的手柄具有触觉反馈, 腹腔镜设备可重复使用降低成本; REVO-I 机器人手术系统, 仪器可重复使用率高达 20 次, 且同样具有有力反馈系统。尽管这两种新兴的手术系统与达芬奇手术系统仍存在差距, 但眼动追踪、触觉反馈及仪器的重复使用都让众多学者振奋不已。

6.2. 未来展望

随着医疗与科技的持续发展, 达芬奇机器人手术系统的迭代升级正推动肺癌外科进入智能精准时代, 其技术演进将聚焦以下维度: 首先, 力触觉反馈系统优化, 使外科医生能够更真实地感知手术工具在组织上的作用力, 从而提高手术安全性。其次, 软体机器人技术的创新, 采用基于形状记忆合金的连续体机器人器械, 通过其蛇形结构可在狭窄胸腔实现非结构化环境下的仿生运动, 克服狭窄胸腔内的限制, 增加可视空间和手术灵活性, 以更好地应对非结构化环境。最后, 与人工智能的深刻整合, 基于术前高分辨率 CT 三维重建来规划肺段间平面切割及三维血管重建, 在术中给予术者路径引导与提醒, 同时术中结合实时扫描术中情况更新导航模型, 以预测血管、气管、神经的走行情况, 避免术中误切误断的情况出血, 辅助医生进行更精准的手术操作。

除了上述技术层面的创新外, 微型化与模块化设计、更多机械臂协同操作、以及自然腔道手术拓展等也是未来达芬奇机器人系统可能实现的发展方向。上述技术融合如果能实现, 将重构肺癌外科范式, 实现更安全高效的医疗模式。

7. 结论

达芬奇机器人辅助胸腔镜肺叶切除术在肺癌治疗领域已得到广泛应用, 其独特的三维高清视野和手术精准性为患者带来了显著的临床效益, 提高了术后生活质量并拓宽了手术适应症范围。随着人工智能等新技术的不断引入, 达芬奇机器人手术系统将继续发展, 打破现有手术方式, 提供更多新型的手术思路。我们期待未来机器人新技术的持续发展, 进一步增强机器人手术系统的能力, 为患者带来更大的福祉。作为一个持续发展的领域, 机器人手术系统将在医疗领域发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 郑荣寿, 陈茹, 韩冰峰, 等. 2022 年中国恶性肿瘤流行情况分析[J]. 中华肿瘤杂志, 2024, 46(3): 221-231.
- [2] Thai, A.A., Solomon, B.J., Sequist, L.V., Gainor, J.F. and Heist, R.S. (2021) Lung Cancer. *The Lancet*, **398**, 535-554. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(21\)00312-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)00312-3)
- [3] Luo, G., Zhang, Y., Etxeberria, J., Arnold, M., Cai, X., Hao, Y., et al. (2023) Projections of Lung Cancer Incidence by 2035 in 40 Countries Worldwide: Population-Based Study. *JMIR Public Health and Surveillance*, **9**, e43651. <https://doi.org/10.2196/43651>
- [4] Li, C., Lei, S., Ding, L., Xu, Y., Wu, X., Wang, H., et al. (2023) Global Burden and Trends of Lung Cancer Incidence and Mortality. *Chinese Medical Journal*, **136**, 1583-1590. <https://doi.org/10.1097/cm9.0000000000002529>

- [5] Li, Y., Yan, B. and He, S. (2023) Advances and Challenges in the Treatment of Lung Cancer. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **169**, Article ID: 115891. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.115891>
- [6] Kirby, T.J. and Rice, T.W. (1993) Thoracoscopic Lobectomy. *The Annals of Thoracic Surgery*, **56**, 784-786. [https://doi.org/10.1016/0003-4975\(93\)90980-v](https://doi.org/10.1016/0003-4975(93)90980-v)
- [7] Melfi, F.M., Menconi, G.F., Mariani, A.M., *et al.* (2002) Early Experience with Robotic Technology for Thoracoscopic Surgery. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, **21**, 864-868. [https://doi.org/10.1016/s1010-7940\(02\)00102-1](https://doi.org/10.1016/s1010-7940(02)00102-1)
- [8] Oh, D.S., Tisol, W.B., Cesnik, L., Crosby, A. and Cerfolio, R.J. (2019) Port Strategies for Robot-Assisted Lobectomy by High-Volume Thoracic Surgeons: A Nationwide Survey. *Innovations: Technology and Techniques in Cardiothoracic and Vascular Surgery*, **14**, 545-552. <https://doi.org/10.1177/1556984519883643>
- [9] Cerfolio, R.J., Bryant, A.S., Skylizard, L. and Minnich, D.J. (2011) Initial Consecutive Experience of Completely Portal Robotic Pulmonary Resection with 4 Arms. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **142**, 740-746. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2011.07.022>
- [10] Park, B.J., Flores, R.M. and Rusch, V.W. (2006) Robotic Assistance for Video-Assisted Thoracic Surgical Lobectomy: Technique and Initial Results. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **131**, 54-59. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2005.07.031>
- [11] Yang, Y., Song, L., Huang, J., Cheng, X. and Luo, Q. (2021) A Uniportal Right Upper Lobectomy by Three-Arm Robotic-Assisted Thoracoscopic Surgery Using the Da Vinci (XI) Surgical System in the Treatment of Early-Stage Lung Cancer. *Translational Lung Cancer Research*, **10**, 1571-1575. <https://doi.org/10.21037/tlcr-21-207>
- [12] Liu, L., Che, G., Pu, Q., Ma, L., Wu, Y., Kan, Q., *et al.* (2010) A New Concept of Endoscopic Lung Cancer Resection: Single-Direction Thoracoscopic Lobectomy. *Surgical Oncology*, **19**, e71-e77. <https://doi.org/10.1016/j.suronc.2009.04.005>
- [13] Vidanapathirana, C.P., Papoulidis, P., Nardini, M., Trevis, J., Bayliss, C. and Dunning, J. (2019) Subxiphoid Robotic-Assisted Right Pneumonectomy. *Journal of Thoracic Disease*, **11**, 1629-1631. <https://doi.org/10.21037/jtd.2019.03.63>
- [14] Jayakumar, S., Nardini, M., Papoulidis, P. and Dunning, J. (2018) Robotic Right Middle Lobectomy with a Subxiphoid Utility Port. *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery*, **26**, 1049-1050. <https://doi.org/10.1093/icvts/ivx436>
- [15] Zhang, O., Alzul, R., Carelli, M., Melfi, F., Tian, D. and Cao, C. (2022) Complications of Robotic Video-Assisted Thoracoscopic Surgery Compared to Open Thoracotomy for Resectable Non-Small Cell Lung Cancer. *Journal of Personalized Medicine*, **12**, Article No. 1311. <https://doi.org/10.3390/jpm12081311>
- [16] Duggan, M., Kavanagh, B.P. and Warltier, D.C. (2005) Pulmonary Atelectasis: A Pathogenic Perioperative Entity. *Anesthesiology*, **102**, 838-854. <https://doi.org/10.1097/00000542-200504000-00021>
- [17] Peroni, D.G. and Boner, A.L. (2000) Atelectasis: Mechanisms, Diagnosis and Management. *Paediatric Respiratory Reviews*, **1**, 274-278. <https://doi.org/10.1053/prrv.2000.0059>
- [18] Zeng, C., Lagier, D. and Vidal Melo, M.F. (2022) Perioperative Pulmonary Atelectasis: Reply. *Anesthesiology*, **137**, 126-127. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000004232>
- [19] Leivaditis, V., Skevis, K., Mulita, F., Tsalikidis, C., Mitsala, A., Dahm, M., *et al.* (2024) Advancements in the Management of Postoperative Air Leak Following Thoracic Surgery: From Traditional Practices to Innovative Therapies. *Medicina*, **60**, Article No. 802. <https://doi.org/10.3390/medicina60050802>
- [20] Filosso, P.L., Nigra, V.A., Lanza, G., *et al.* (2015) Digital versus Traditional Air Leak Evaluation after Elective Pulmonary Resection: A Prospective and Comparative Mono-Institutional Study. *Journal of Thoracic Disease*, **7**, 1719-1724.
- [21] Campisi, A., Dell'Amore, A., Gabryel, P., Ciarrocchi, A.P., Sielewicz, M., Zhang, Y., *et al.* (2022) Autologous Blood Patch Pleurodesis: A Large Retrospective Multicenter Cohort Study. *The Annals of Thoracic Surgery*, **114**, 273-279. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2021.06.089>
- [22] Jabłoński, S., Kordiak, J., Wcisło, S., Terlecki, A., Misiak, P., Santorek-Strumiłło, E., *et al.* (2016) Outcome of Pleurodesis Using Different Agents in Management Prolonged Air Leakage Following Lung Resection. *The Clinical Respiratory Journal*, **12**, 183-192. <https://doi.org/10.1111/crj.12509>
- [23] Passman, R.S., Gingold, D.S., Amar, D., Lloyd-Jones, D., Bennett, C.L., Zhang, H., *et al.* (2005) Prediction Rule for Atrial Fibrillation after Major Noncardiac Thoracic Surgery. *The Annals of Thoracic Surgery*, **79**, 1698-1703. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2004.10.058>
- [24] Zhang, L. and Gao, S. (2016) Systematic Review and Meta-Analysis of Atrial Fibrillation Prophylaxis after Lung Surgery. *Journal of Cardiovascular Pharmacology*, **67**, 351-357. <https://doi.org/10.1097/fjc.0000000000000351>
- [25] Frendl, G., Sodickson, A.C., Chung, M.K., Waldo, A.L., Gersh, B.J., Tisdale, J.E., *et al.* (2014) 2014 AATS Guidelines for the Prevention and Management of Perioperative Atrial Fibrillation and Flutter for Thoracic Surgical Procedures. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **148**, e153-e193. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2014.06.036>
- [26] Hindricks, G., Potpara, T., Dagres, N., Arbelo, E., Bax, J.J., Blomström-Lundqvist, C., *et al.* (2020) 2020 ESC Guidelines

- for the Diagnosis and Management of Atrial Fibrillation Developed in Collaboration with the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS). *European Heart Journal*, **42**, 373-498. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehaa612>
- [27] Zhiqiang, W. and Shaohua, M. (2023) Perioperative Outcomes of Robotic-Assisted versus Video-Assisted Thoracoscopic Lobectomy: A Propensity Score Matched Analysis. *Thoracic Cancer*, **14**, 1921-1931. <https://doi.org/10.1111/1759-7714.14938>
- [28] Kent, M.S., Hartwig, M.G., Vallières, E., Abbas, A.E., Cerfolio, R.J., Dylewski, M.R., *et al.* (2021) Pulmonary Open, Robotic, and Thoracoscopic Lobectomy (PORTaL) Study: An Analysis of 5721 Cases. *Annals of Surgery*, **277**, 528-533. <https://doi.org/10.1097/sla.0000000000005115>
- [29] Gu, Z., Huang, J., Tian, Y., Jiang, L. and Luo, Q. (2022) A Retrospective Comparative Cohort Study on the Efficacy and Safety of Bi-Port Robotic-Assisted Lobectomy and Multi-Port Robotic-Assisted Lobectomy. *Journal of Thoracic Disease*, **14**, 2970-2976. <https://doi.org/10.21037/jtd-22-1003>
- [30] Manolache, V., Motas, N., Bosinceanu, M.L., de la Torre, M., Gallego-Poveda, J., Dunning, J., *et al.* (2023) Comparison of Uniportal Robotic-Assisted Thoracic Surgery Pulmonary Anatomic Resections with Multiport Robotic-Assisted Thoracic Surgery: A Multicenter Study of the European Experience. *Annals of Cardiothoracic Surgery*, **12**, 102-109. <https://doi.org/10.21037/acs-2022-urats-27>
- [31] Huang, J., Zhu, H., Lu, P., Li, J., Tian, Y., Takase, Y., *et al.* (2023) Comparison of Lobectomy Performed through Toumai® Surgical Robot and Da Vinci Surgical Robot in Early-Stage Non-Small Cell Lung Cancer: A Retrospective Study of Early Perioperative Results. *Translational Lung Cancer Research*, **12**, 2219-2228. <https://doi.org/10.21037/tlcr-23-603>
- [32] Suda, T., Morota, M., Negi, T., Tochii, D. and Tochii, S. (2024) First Case of Major Lung Resection Using the Hinotori™ Surgical Robot System. *General Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **72**, 810-813. <https://doi.org/10.1007/s11748-024-02082-2>
- [33] Aresu, G., Dunning, J., Routledge, T., Bagan, P. and Slack, M. (2022) Preclinical Evaluation of Versius, an Innovative Device for Use in Robot-Assisted Thoracic Surgery. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, **62**, eac178. <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezac178>
- [34] Al-Mufarrej, F., Margolis, M., Tempesta, B., Strother, E., Najam, F. and Gharagozloo, F. (2010) From Jacobaeus to the Da Vinci: Thoracoscopic Applications of the Robot. *Surgical Laparoscopy, Endoscopy & Percutaneous Techniques*, **20**, 1-9. <https://doi.org/10.1097/sle.0b013e318181edb9e5>
- [35] Shahin, G.M.M., Vos, P.W.K., Hutteman, M., Stigt, J.A. and Braun, J. (2023) Robot-Assisted Thoracic Surgery for Stages IIB-IVA Non-Small Cell Lung Cancer: Retrospective Study of Feasibility and Outcome. *Journal of Robotic Surgery*, **17**, 1587-1598. <https://doi.org/10.1007/s11701-023-01549-3>
- [36] Marescaux, J., Leroy, J., Rubino, F., Smith, M., Vix, M., Simone, M., *et al.* (2002) Transcontinental Robot-Assisted Remote Telesurgery: Feasibility and Potential Applications. *Annals of Surgery*, **235**, 487-492. <https://doi.org/10.1097/00000658-200204000-00005>
- [37] Moustris, G., Tzafestas, C. and Konstantinidis, K. (2023) A Long Distance Telesurgical Demonstration on Robotic Surgery Phantoms over 5G. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, **18**, 1577-1587. <https://doi.org/10.1007/s11548-023-02913-2>
- [38] Tian, W., Fan, M., Zeng, C., Liu, Y., He, D. and Zhang, Q. (2020) Telerobotic Spinal Surgery Based on 5G Network: The First 12 Cases. *Neurospine*, **17**, 114-120. <https://doi.org/10.14245/ns.1938454.227>
- [39] Hung, A.J., Chen, J., Shah, A. and Gill, I.S. (2018) Telementoring and Telesurgery for Minimally Invasive Procedures. *Journal of Urology*, **199**, 355-369. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2017.06.082>
- [40] Reddy, K., Gharde, P., Tayade, H., Patil, M., Reddy, L.S. and Surya, D. (2023) Advancements in Robotic Surgery: A Comprehensive Overview of Current Utilizations and Upcoming Frontiers. *Cureus*, **15**, e50415. <https://doi.org/10.7759/cureus.50415>
- [41] Pfennig, M., Lee, A. and Mi, M. (2022) How Does Telementoring Impact Medical Education within the Surgical Field? A Scoping Review. *The American Journal of Surgery*, **224**, 869-880. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2022.04.038>
- [42] Augustin, F. and Bodner, J. (2017) Robotic-assisted Thoracic Surgery: A Helpful Tool or Just Another Expensive Gadget? *Journal of Thoracic Disease*, **9**, 2881-2883. <https://doi.org/10.21037/jtd.2017.08.85>
- [43] Ehrampoosh, A., Shirinzadeh, B., Pinski, J., Smith, J., Moshinsky, R. and Zhong, Y. (2022) A Force-Feedback Methodology for Teleoperated Suturing Task in Robotic-Assisted Minimally Invasive Surgery. *Sensors*, **22**, Article No. 7829. <https://doi.org/10.3390/s22207829>
- [44] Rao, P.P. (2018) Robotic Surgery: New Robots and Finally Some Real Competition! *World Journal of Urology*, **36**, 537-541. <https://doi.org/10.1007/s00345-018-2213-y>