



刘意抒, 医学硕士, 副主任护师, 海军军医大学第三附属医院内科学与野战内科学教研室教学秘书。现任上海市医学伦理学会叙事医学分会委员、上海市实验动物学会教育培训与科普专委会委员。长期从事医学教育及教学管理工作, 主持教育部、上海市及院校各类课题6项, 入选医院优青托举、教菁人才项目2项。以第一作者/通信作者发表SCI论文1篇, 核心期刊论文15篇; 副主编专著2部, 参编2部; 申请授权国家发明专利6项, 实用新型专利20项, 软件著作权4项。个人先后取得全国、上海市及各类国际医学模拟师资认证13项, 获上海市医学会教育技术优秀成果评选一等奖1项、三等奖3项, 并先后获得国家、上海市各类教育及科学论坛征文比赛荣誉。同时致力于提高公众健康素养, 积极投身科普工作, 先后在“科普中国”、《医师报》等国家和省部级媒体发表多篇科普文章。



蔡丽萍, 主管技师, 动物学硕士, 海军军医大学第一附属医院手术机器人培训中心核心导师, 国内首位达芬奇手术机器人培训课程专职兽医, 国家执业兽医师。主要从事实验动物在手术机器人、腹腔镜、导管介入等微创外科手术医学模拟课程的应用研究。现任上海市实验动物学会教育培训与科普专委会委员、实验动物设施与资源专委会委员, 中国实验动物学会实验动物技术专家(高级)。现主持教育部产学研合作协同育人项目1项, 参与上海市高等教育学会等各类模拟医学教学课题6项。副主编专著1部, 参编教材2部; 以第一作者/通信作者发表SCI论文1篇, 核心期刊论著9篇; 于“新华网”“科普中国”等国家、省部级媒体和期刊发表科普作品6项, 科普视频1部; 授权国家发明专利8项, 实用新型专利18项, 软件著作权4项。

## 实验猪在达芬奇手术机器人培训中的应用进展及挑战

刘意抒<sup>1</sup>, 蔡丽萍<sup>2</sup>

(1. 海军军医大学第三附属医院内科学与野战内科学教研室, 上海 200438; 2. 海军军医大学第一附属医院临床教育中心, 上海 200433)

**[摘要]** 实验猪在生命科学研究中占据重要地位, 同时在促进临床新技术与新方法的实际应用过程中也发挥着不可或缺的关键性作用。达芬奇手术机器人系统由美国 Intuitive Surgical 公司开发, 自2000年获美国FDA批准以来, 已广泛应用于多个外科领域, 因其高精度和准确性而备受推崇。随着手术机器人技术的不断进步, 对专业医疗人员的技能要求也日益提高。因此, 手术技能培训成为确保手术安全和有效的关键环节。本文对国内外达芬奇手术机器人的培训现状进行了简要概述, 并重点探讨了实验猪在国内达芬奇手术机器人培训中的实际应用情况, 指出其不仅能够有效模拟人体手术环境, 使受训者在安全可控的条件下进行实践操作, 还能加快受训者对手术机器人的熟悉和掌握, 显著缩短学习曲线, 提高手术操作精准度和稳定性, 降低手术风险。然而, 实验动物在手术机器人培训中的应用也面临着挑战, 包括实验动物与人体差异导致的局限性、潜在的伦理风险及舆论压力等。为此, 本文提出了促使伦理法规完善和执行、推动虚拟现实和增强现实技术研发等建议, 以期减少手术培训对实验动物的依赖, 并提升培训效果, 对推动达芬奇手术机器人培训模式的创新与发展提供更多参考。

**[关键词]** 实验猪; 手术模拟; 达芬奇手术机器人; 实验动物伦理; 虚拟现实

**[中图分类号]** R-332; Q95-33 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1674-5817(2024)06-0667-08



## Advances and Challenges of Using Experimental Pigs in Da Vinci Surgical Robot Training

**[基金项目]** 海军军医大学第三附属医院人才培养“腾飞工程”-优青托举项目“内科与野战内科学教研室主管护师刘意抒”(TF2024TJYQ07)

**[第一作者]** 刘意抒(1988—), 女, 硕士, 副主任护师, 研究方向: 医学模拟教育、院校教育。E-mail: yishu1128@163.com。ORCID: 0009-0002-2989-4557

**[通信作者]** 蔡丽萍(1983—), 女, 硕士, 主管技师, 研究方向: 实验动物应用研究、医学模拟教育。E-mail: ccg9115@126.com。ORCID: 0009-0003-5485-5506

**LIU Yishu<sup>1</sup>, CAI Liping<sup>2</sup>**

(1. Department of Internal Medicine and Field Internal Medicine, The Third Affiliated Hospital of Naval Medical University, Shanghai 200438, China; 2. Clinical Education Center, The First Affiliated Hospital of Naval Medical University, Shanghai 200433, China)

Correspondence to: CAI Liping (ORCID: 0009-0003-5485-5506), E-mail: ccg9115@126.com

**[ABSTRACT]** Experimental pigs occupy a crucial position in life sciences research and have been indispensable in advancing the practical application of new clinical technologies and methods. The Da Vinci Surgical Robot System, developed by Intuitive Surgical in the United States, has been widely used across various surgical fields since its approval by the U.S. Food and Drug Administration (FDA) in 2000, and is highly esteemed for its precision and accuracy. With the continuous advancement of surgical robot technology, the skill requirements for medical professionals have also increased. Consequently, surgical skills training has become an essential component of ensuring both surgical safety and effectiveness. This article briefly reviews the current status of Da Vinci surgical robot training, both domestically and internationally, with a focus on the practical application of experimental pigs in domestic Da Vinci surgical robot training. It emphasizes that experimental pigs not only effectively simulate the human surgical environment, enabling trainees to practice in a safe and controlled setting, but also help accelerate the trainees' familiarity with and mastery of the surgical robot. This, in turn, significantly shortens the learning curve, enhances the precision and stability of surgical procedures, and reduces surgical risks. However, the use of experimental animals in surgical robot training also encounters challenges, including limitations caused by the differences between experimental animals and humans, potential ethical concerns, and public opinion pressures. In response to these challenges, the paper proposes suggestions such as improving and enforcing ethical regulations, as well as advancing the development of virtual reality (VR) and augmented reality (AR) technologies. These efforts aim to reduce reliance on experimental animals in surgical training while enhancing training effectiveness, thereby contributing to the innovation and development of Da Vinci surgical robot training models.

**[Key words]** Experimental pigs; Surgical simulation; Da Vinci surgical robot; Ethics for laboratory animals; Virtual reality

达芬奇手术机器人又称“内窥镜手术器械控制系统”，该系统由美国 Intuitive Surgical 公司开发，于 2000 年获得美国食品药品监督管理局（Food and Drug Administration, FDA）的批准<sup>[1]</sup>。达芬奇手术机器人实现了医学科学、机器人技术和工程学的交叉融合<sup>[2]</sup>，可提供高清晰度的三维视觉系统和高灵活度的机械臂，使外科医师能够以更高的精确度和准确性进行复杂的手术，从而减少术后并发症的发生，因此被广泛应用于泌尿外科、妇科、普通外科和心胸外科等多个领域。

随着手术机器人技术的迭代和手术适应症范围的不断扩大，对专业医疗人员的技能要求也随之提高。为了更精确地掌握手术机器人系统的操控技巧，操作技能培训成为确保手术有效进行和安全的关键环节。近年来，模拟手术在外科教学中变得越来越重要，法国国家卫生管理局（Haute Autorité de Santé, HAS）发

表了“永远不要第一次在患者身上操作”的声明，突出强调了目标和道德优先原则<sup>[3]</sup>。Fisher 等<sup>[4]</sup>则认为培训课程是全球标准化培训和认证外科医师进行机器人手术程序的关键步骤。因此，建立系统、全面的达芬奇手术机器人培训项目，利用模拟手术降低术者的试错风险成本，对于提高手术成功率、保障患者安全以及推动外科技术的发展具有不可估量的价值<sup>[5]</sup>。

实验动物在医学研究和培训中的应用历史悠久，尤其在医疗器械开发、手术技能培训中具有重要意义，发挥着不可替代的作用<sup>[6]</sup>。大量研究表明，利用活体猪进行模拟训练是提高机器人手术技能的有效手段<sup>[7]</sup>。因此，实验猪成为支持达芬奇手术机器人培训项目顺利进行的重要环节。2017 年 2 月，海军军医大学第一附属医院（上海长海医院）正式启用了达芬奇手术机器人国际培训中心，成为国内继香港之后第二家获得 Intuitive Surgical 公司官方授权的培训基地。该

中心的成立标志着长海医院在机器人手术领域中迈出了新的一步,成为在全国范围内该行业培训的规范和标杆、标准制定者和方向引领者,具有里程碑式的战略意义。本文基于笔者所在机构的培训实践经验,系统性地综述了当前国内外达芬奇手术机器人培训的现状,并着重分析了实验猪在此类培训中的应用情况。内容涵盖选择实验猪作为培训用动物的原因及标准、培训的基本流程和关键操作技巧等方面,深入探讨了实验猪在达芬奇手术机器人培训中所面临的局限性和困境,并剖析这些挑战产生的根本原因,继而探索可能的解决方案。同时,本文也对实验猪在未来手术机器人培训中的应用前景进行了展望,期望通过科学研究、技术创新以及伦理标准的提升,进一步优化实验猪在培训中的角色,力求在保障培训质量的同时,尽可能减少对实验动物的依赖。

## 1 达芬奇手术机器人培训现状

### 1.1 国外培训中心

自2000年欧洲首次引入达芬奇手术机器人以来,其应用范围已从最初的泌尿外科扩展至消化外科、胸腔外科、妇科等多个专业领域。根据Intuitive Surgical公司发布的财务报告,截至2023年12月,达芬奇手术系统的装机量增长到8 914台,2023年完成了约2 286 000例手术,且该数字仍在持续快速增长<sup>[8]</sup>。有鉴于此,全球范围内外科住院医师以及有意向开展或参与机器人手术项目的资深外科医师申请进行专业培训的需求量呈现激增态势。

国际上,达芬奇手术机器人培训中心作为专业技能提升的重要基地,致力于提供高标准的机器人辅助手术培训。培训中心通常配备先进的达芬奇手术机器人模拟系统,以及专为模拟实际手术情景而设计的实验室,以确保受训者在安全的情况下,练习并掌握基本操作技能,提升应对复杂手术情况的决策能力。培训涵盖多学科成员,强调手术团队的协作训练。同时,培训中心会提供持续教育课程,以确保医疗专业人员掌握最新的手术技术和临床应用。

达芬奇手术机器人培训体系的构建严格遵循经过科学验证的教育框架,不仅强调扎实的理论知识,还深度融合了提升技能的多维度实践环节。因其独特的技术特性和环境要求,达芬奇手术机器人手术在操作方式上与传统腹腔镜手术存在显著差异。然而,两者在多个方面仍具备共通性。外科医师需适应通过机器

界面进行手术的新方式,并重新审视手术流程中的某些步骤,以确保整个机器人手术过程在绝对安全的环境中进行。术者需要习得的关键技能包括:机器人专用穿刺钳的正确定位、仪器推车臂的准确对接、结合多种功能的多个脚踏板的使用、与体内仪器多维关节操作相关的新特定手势,同时也要持续关注技术创新及其更新进展<sup>[9]</sup>。总之,国外培训中心多是基于验证课程的培训体系,注重持续教育与最新技术跟踪。

### 1.2 国内培训中心

我国机器人外科领域的发展起步较晚,然而,随着达芬奇手术机器人在中国的引进与广泛应用,相关领域对于专业培训的需求日益迫切。初期,国内仅有香港地区建立了符合国际标准且具备官方授权的培训基地,这导致大量有潜力的外科手术人才不得不远赴香港或海外接受相关培训。因此,培训条件的限制使得国内达芬奇手术专业人才的培养遇到瓶颈。直到2017年,海军军医大学第一附属医院(上海长海医院)机器人手术培训中心落成启用,这对加快我国手术机器人医师人才的培养建设提供了有力保障<sup>[10]</sup>,也为国内医疗行业的可持续发展提供了人才支撑。

近年来,随着技术的进一步推广和培训的逐步规范化,国内其他地区也相继建立起具备资质的培训中心。中国人民解放军总医院、四川大学华西医院、南京鼓楼医院等医疗机构也相继通过资质审核和认证,成功建立起一批达芬奇手术机器人培训中心,为推动国内机器人手术技术的发展和普及提供了进一步的有力支持,同时促进了国际交流与合作,推动了我国医疗技术走向世界舞台。各中心在沿用国际先进技术和培训理念的基础上,结合中国医疗实践的特点,开发了符合国情的培训课程和教学方法。例如,通过与国内顶尖医院的合作,引入具有中国特色的手术案例,成立专科高级临床培训中心,使培训更加贴近国内医师的实际工作。此外,一些培训中心还开展了远程教学和数字化教学资源建设,以提高培训的效率和可及性。总之,国内培训中心已经从单纯引进到培训模式本土化,并不断强调创新与特色。

## 2 达芬奇手术机器人培训中的实验动物应用现状

### 2.1 实验动物的选择原因与标准

实验动物是探索疾病治疗及预防策略的关键工具,不仅在药物研发过程中发挥着不可替代的作用,还是

研究人类疾病与衰老机制的重要载体。在医疗新技术与新术式的研发及推广领域,实验动物模型的应用同样扮演着至关重要的角色。随着基因编辑技术的不断进步,其应用范围亦日益扩大,涵盖了异种移植、环境污染风险评评估以及药物发现等多个重要领域<sup>[11]</sup>。值得一提的是,2024年9月23日,华中科技大学同济医学院陈忠华团队、澳门科技大学医学院张康团队、海南医科大学第二附属医院王毅团队和成都中科奥格生物科技有限公司潘登科团队联合成功实施了两例从转基因小型猪到脑死亡患者的单肾异种移植,将观察期延长至术后12 d,移植后患者的肾功能得以恢复<sup>[12]</sup>。这不仅标志着异种移植技术迈出了重要一步,更彰显了实验猪在医学新技术研发中的核心价值。

大量研究表明,实验猪在机器人手术培训中起到不可替代的作用,Tiong等<sup>[13]</sup>强调了活体动物模型在使用手术机器人模拟缝合环境中的核心地位,其可模拟出真实且复杂的生物组织触感,这一特性极大地增强了训练模型的有效性,其优势是计算机模拟、干模型训练及尸体模型所难以比拟的。日本学者的一项研究<sup>[14]</sup>进一步证明实验动物在机器人手术技术验证中的价值,他们通过实验动物模型验证了机器人在执行肺切除与淋巴结清扫术时,能够达到与标准开胸手术相当的技术精度与效果,这标志着机器人手术技术在复杂手术领域的应用潜力。与此同时,Kasabwala等<sup>[15]</sup>的研究聚焦于机器人辅助骶骨盆底固定术的学习曲线,揭示了构建高效手术培训模块对于掌握此类复杂手术技能的重要作用。针对手术培训过程中面临的高昂成本、潜在感染风险、组织适应性差异以及人类尸体资源稀缺等困境,该研究进一步强调了采用活体猪模型作为替代训练平台的现实意义、可行性与成本效益优势。活体猪模型不仅能够模拟人体解剖结构与生理反应,为学员提供接近真实的手术操作环境,还能有效缓解培训资源限制问题,为胸外科医师在机器人手术领域的技能精进开辟了新的途径。

选择实验动物必须遵循一套严格的标准体系,以确保所选动物在组织结构、生理功能及代谢机制等方面与人类保持高度的相似性。这一原则对于维护试验结果的准确性、可靠性以及可推广性至关重要。目前,国内手术机器人培训中心优选的实验动物为体重约30 kg的未成年雌性长白猪,其多项生理特性使其成为理想的培训模型。首先,长白猪的耳缘静脉显著,便于迅速建立静脉通道,可确保在长时间的培训过程中

实现即时给药,以维持动物生命体征的稳定。其次,相较于雄性猪,雌性猪的尿道结构更利于术中导尿管操作,可有效预防膀胱过度充盈对手术视野的干扰,提升培训效果。此外,雌性猪的子宫是电能量操作训练的理想靶器官,在模拟实训中能够充分锻炼术者在电能量辅助下的组织分离、血管处理等关键技术,对提升手术技能具有关键作用<sup>[16]</sup>。从成本效益角度考量,相较于同体型的实验犬等动物,雌性长白猪在满足复杂手术操作需求的同时,还展现出更高的经济性。除此之外,科研人员还可依托这一模型,深入剖析手术机器人在复杂手术环境中的实际效能,精准捕捉技术瓶颈与改进空间,为该领域实现科技进步与临床应用的协同发展作出有力推动。

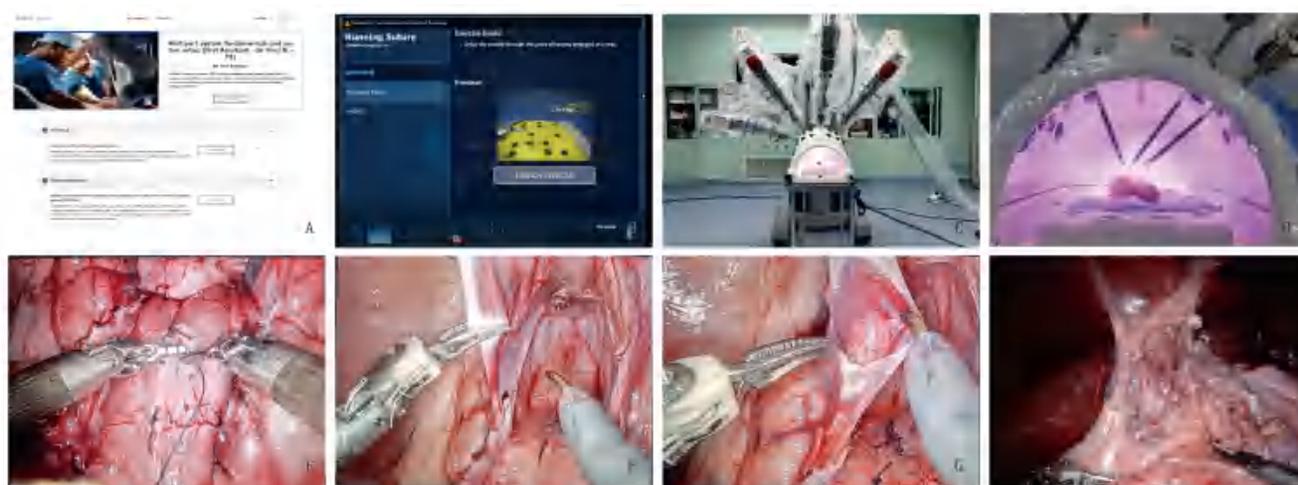
## 2.2 动物实训基本流程和操作技巧

达芬奇手术机器人培训通常以团队为单位,团队成员包括主刀医生、助手以及护理人员。培训体系严格遵循递进原则,主刀医生的培训主要为线上理论学习、SimNow电脑模拟训练器训练、Dry Lab腹部模型训练和Wet Lab动物模拟实训共4个模块(图1)。在培训开始前,受训者需完成手术机器人相关的线上理论学习,且考核合格。培训当日依次通过SimNow电脑模拟训练器和Dry Lab腹部模型训练后,方可进入Wet Lab动物模拟实训阶段(图2)。



图1 达芬奇手术机器人主刀医生培训项目时间轴  
Figure 1 Timeline of Da Vinci surgical robot surgeon training program

培训中选取体重为(28±3) kg的雌性长白猪,术前禁食12 h,禁水4 h,肌注0.4 mg/kg舒泰镇定,行气管插管术连接动物麻醉机进行麻醉维持,异氟烷浓度调至2%~3%。经尿道放置导尿管,术中持续监测并记录动物的心率、无创平均血压、呼气末二氧化碳和血氧饱和度等生命体征数值<sup>[17]</sup>。实验猪采取仰卧位固定,建立气腹后进行打孔。放置乔卡后安装对接机械



注：A，达芬奇手术机器人线上理论课程界面；B，SimNow电脑模拟训练器中连续缝合训练模块界面；C，利用Dry Lab腹部模型执行装机与器械安装训练；D，利用Dry Lab腹部模型执行缝合打结训练；E，镜下组织缝合打结界面；F，镜下电能量使用界面；G，镜下钝性分离界面；H，镜下血管分离界面。

Note: A, Interface of theoretical course for Da Vinci surgical robot; B, Interface of continuous suture training module in SimNow computer simulation trainer; C, Performing setup and instrument installation training with Dry Lab abdominal model; D, Performing suture and knotting training with Dry Lab abdominal model; E, Interface of suturing and knot tying under endoscope; F, Interface of electric energy use under endoscope; G, Interface of blunt dissection under endoscope; H, Interface of vascular separation under endoscope.

图2 运用实验猪进行达芬奇手术机器人的培训各阶段示例

Figure 2 Illustrative stages of using experimental pigs for Da Vinci surgical robot training

臂。受训者按照培训要求练习使用手术机器人完成组织缝合、电能量使用、钝性游离、血管游离等培训内容并进行手术技能操作练习。

### 3 实验动物在达芬奇手术机器人培训中面临的局限与困境

#### 3.1 实验动物与人体差异导致的局限性

实验动物是支撑生命科学和生物医药等领域科技创新的重要基础科研条件之一<sup>[18]</sup>。在达芬奇手术机器人的培训过程中，尽管实验动物模型为医师提供了大量宝贵的实践机会，但是动物模型与人体在解剖结构和生理机能上不可避免地存在若干差异，这些差异在一定程度上限制了培训效果的最大化。例如，实验动物的血管直径、组织弹性以及器官位置与人类存在显著差异，这可能会影响医师对手术器械操作的感知和技能的精准度。这些差异对实际手术中采取的操作方式和操作技巧有着直接影响。

与此同时，技能转移也是以实验动物为载体的培训人员需要面对的问题。医师在动物模型上获得的手术操作经验并不总能直接应用于人体手术。例如，机器人手术系统在人体手术中的操作可能受到患者体位、手术区域的可及性以及手术团队成员站位等因素的影响，这些因素在应用动物模型培训中难以得到完全模

拟。所以，受训者需要在实验动物实训的基础上，通过临床实践和进一步的专业培训，不断调整和完善手术技能，以适应真正临床手术的特殊要求。

#### 3.2 潜在的伦理风险及舆论压力

达芬奇手术机器人培训内容涵盖面广且复杂，涉及长时间的麻醉与精细手术操作，每只实验动物在培训过程中均需经历超过8 h的麻醉与手术处理。这对培训过程中保障动物福利和遵守相关的法律法规提出了更为严格的要求。因此，培训机构在启动动物实验前，需将医学研究与动物福利的平衡作为首要考量，严格执行伦理审批流程，实验全程实施疼痛管理和福利保障措施，确保实验过程符合伦理标准，并最大限度地减少动物痛苦和不适，推动医学教育的健康发展。

此外，随着公众对动物权益保护意识的日益增强，医学培训中使用实验动物的行为正面临着来自社会各界的伦理审视和舆论压力。伦理法规的完善和执行不仅体现了对生命尊严和权利的尊重，也是提升医疗机构社会责任感和公众信任度的重要途径。因此，培训中心亟需加强与公众的有效沟通，以透明化实验动物使用情况，说明所采取的伦理措施和保障，并广泛普及实验动物在医学教育和研究中的不可或缺性。同时，培训机构应当积极致力于探索并推广替代动物模型的培训方法，如虚拟现实（virtual reality, VR）模拟技术

和计算机模拟手术等,以逐步减少对实验动物的依赖,实现医学教育与动物福利保护的双重目标。

## 4 实验动物在达芬奇手术机器人培训中的应用展望

### 4.1 促使伦理法规的完善和执行

伦理法规的严格执行是确保培训活动合规、合法及符合伦理标准的关键,也是维护动物福利、回应公众关切的重要途径。随着医疗技术的发展和人们对生命伦理的日益重视,使用实验动物需进行更为严格的审查和监督,建立更为健全的伦理法规体系,这些对于促进达芬奇手术机器人培训的健康可持续发展,为医疗行业培养出更多具备高技能和高伦理标准的外科医师具有重要意义。

### 4.2 推动虚拟/增强现实技术的研发

近年来,实验动物在医学研究和手术技能培训中应用的局限性以及伦理问题日益凸显,VR和增强现实(augmented reality, AR)技术作为替代方案,在手术机器人关键技能的培养中获得了蓬勃发展。二者可通过构建高度逼真的虚拟手术环境,为手术机器人的技能培训提供创新途径,为医学教育带来革命性变革。这些技术能够模拟各种复杂的手术场景,使受训者在安全的环境中反复练习,从而快速掌握关键技能。同时,VR和AR技术还具备可重复性和可定制性的优势,能够根据受训者的需求和水平调整训练难度,实现个性化的培训效果。

当前,外科培训领域广泛采纳了多种形式的VR技术,这些技术不仅获得了全面而高质量的验证支持,还显著推动了外科教育的发展。Raison等<sup>[19]</sup>通过精心设计的随机对照试验,深入比较了程序性VR模拟训练与基础VR模拟训练在机器人手术技能培训中的效果。该研究纳入了26名无机器人手术经验的初学者,并随机分配他们为程序性VR培训组和基础VR培训组。程序性VR培训组的参与者主要接受结构化的程序性VR培训,使用RobotiX Mentor机器人辅助前列腺切除术(robot-assisted radical prostatectomy, RARP)模块,完成膀胱颈解剖(bladder neck dissection, BND)和尿道膀胱吻合(urethrovesical anastomosis, UVA)等具体的手术任务。这些参与者在5周内进行了1h的指导性BND和UVA任务训练,训练过程中得到了专家机器人外科医生的即时培训和指导。相比之下,基础VR培训组的参与者则接受的是更多地侧重于如手腕操作、抓取、三维视觉、灵巧度、组织处理、器械控制和摄像

头控制等基础手术技能的培训。培训结束后,所有参与者通过模拟器数据来分析学习曲线,并使用新鲜冷冻尸体进行技能转移评估。此外,还招募了9名未接受任何机器人技能培训的新手参与者作为对照组。研究结果显示,两种VR培训均有效地提升了技术技能,尤其是程序性VR培训组在全球吻合口破裂评估评分(global evaluation of anastomotic rupture score, GEARS)上表现更为出色,显著提高了评分,预示着其在高级外科技能培训中的巨大潜力。

此外,Fotouhi等<sup>[20]</sup>创新性地提出了一种基于头戴显示器(head-mounted display, HMD)的AR系统,该系统聚焦于优化手术机器人臂的配置过程。通过HMD,外科医生能够实时将实际机器人机械臂与预设的虚拟模型进行精准对齐,利用反射式AR技术从多角度同步展示增强内容,创造出一种沉浸式的多视角AR体验,极大地促进了虚拟与实体之间的直观匹配。试验数据表明,相较于传统方法,该系统在机器人臂的虚拟与实体对齐方面实现了显著改进,对于提升手术操作的效率和精确度具有里程碑式的意义。

在国际外科教育的前沿,SimLife模拟模型<sup>[21-24]</sup>的引入更是为复杂手术技能的培训开辟了新纪元。该模型通过先进的血液灌注与人工通气技术,成功模拟了人体的血液循环搏动与呼吸运动,为住院医师提供了一个高度仿真且贴近真实手术环境的训练平台。借助该平台,学员不仅能够有效提升外科手术技能,还能在模拟实战中逐步克服实际操作中可能遭遇的心理压力与焦虑情绪。此外,随着三维打印技术的飞速进步,合成器官模型在机器人手术训练领域的应用也迎来了突破性进展。特别是在泌尿外科的机器人手术培训中,一种经过严格验证且具备高度成本效益的高仿真程序模型应运而生。这类模型不仅精准复制了目标器官的结构与特性,还能够在多种手术场景中模拟复杂的操作环境,可为受训者提供前所未有的训练体验<sup>[25]</sup>。这一创新不仅标志着机器人手术教育模式的重大转型,也预示着数字模型和合成器官模型将逐步成为未来培训的主流趋势。因此,我们有理由相信,这些技术的融合将为未来的培训模式带来革新,通过不断完善其独特优势,最终减少乃至完全取代动物模型的使用<sup>[26]</sup>。

## 5 结语

可以预见,达芬奇手术机器人的培训模式将不断迈向高科技与人性化的新高度。鉴于VR、AR,以及

人工智能等尖端技术的快速发展,未来的培训将有望为医生提供更加逼真、个性化的操作体验,从而有效减少对实验动物的依赖。这种转变不仅体现了科技进步对医学教育的深刻影响,也符合现代医学教育对效率和伦理的双重追求。同时,远程培训和在线协作平台的建立,将进一步打破地域限制,促进全球范围内医学知识和技能的交流。此外,随着伦理法规的完善和社会公众对动物福利关注度的不断提高,我们有理由相信,在科技、法规和公众意识的共同推动下,未来的医学教育将迎来更加美好的明天。

### [医学伦理声明 Medical Ethics Statement]

本研究涉及的所有动物实验均已通过海军军医大学第一附属医院(上海长海医院)伦理委员会审查批准[CHec(A.E)2023-012]。所有实验过程均遵照中国实验动物相关法律法规条例要求进行。

All animal experiments involved in this study have been reviewed and approved by the Ethics Committee of the First Affiliated Hospital of Naval Medical University (Changhai Hospital, Shanghai) [CHec(A.E)2023-012]. All experimental procedures were carried out in accordance with the relevant laws and regulations on experimental animals in China.

### [作者贡献 Author Contribution]

刘意抒负责初稿写作,以及全文修改;  
蔡丽萍负责写作指导和定稿。

### [利益声明 Declaration of Interest]

所有作者均声明本文不存在利益冲突。

### [参考文献 References]

- [1] BEN-OR S, NIFONG L W, JR CHITWOOD W R. Robotic surgical training[J]. *Cancer J*, 2013, 19(2):120-123. DOI: 10.1097/PPO.0b013e3182894887.
- [2] RIVERO-MORENO Y, ECHEVARRIA S, VIDAL-VALDERRAMA C, et al. Robotic surgery: a comprehensive review of the literature and current trends[J]. *Cureus*, 2023, 15(7): e42370. DOI: 10.7759/cureus.42370.
- [3] BRESLER L, PEREZ M, HUBERT J, et al. Residency training in robotic surgery: the role of simulation[J]. *J Visc Surg*, 2020, 157(3): S123-S129. DOI: 10.1016/j.jviscsurg.2020.03.006.
- [4] FISHER R A, DASGUPTA P, MOTTRIE A, et al. An over-view of robot assisted surgery curricula and the status of their validation[J]. *Int J Surg*, 2015, 13: 115-123. DOI: 10.1016/j.ijsu.2014.11.033.
- [5] BUFFI N, VAN DER POEL H, GUAZZONI G, et al. Methods and priorities of robotic surgery training program[J]. *Eur Urol*, 2014, 65(1):1-2. DOI: 10.1016/j.eururo.2013.07.020.
- [6] MUKHERJEE P, ROY S, GHOSH D, et al. Role of animal models in biomedical research: a review[J]. *Lab Anim Res*, 2022, 38(1):18. DOI: 10.1186/s42826-022-00128-1.
- [7] RAISON N, POULSEN J, ABE T, et al. An evaluation of live porcine simulation training for robotic surgery[J]. *J Robot Surg*, 2021, 15(3):429-434. DOI: 10.1007/s11701-020-01113-3.
- [8] Intuitive Surgical, Inc. Intuitive announces preliminary fourth quarter and full year 2023 results[EB/OL]. (2024-01-09)[2024-04-10]. <https://investor.intuitivesurgical.com/news-releases/news-release-details/intuitive-announces-preliminary-fourth-quarter-and-full-year-3>.
- [9] NASSER KOTBY M, WAHBA H A, KAMAL E, et al. Animal model for training and improvement of the surgical skills in endolaryngeal microsurgery[J]. *J Voice*, 2012, 26(3): 351-357. DOI: 10.1016/j.jvoice.2011.04.002.
- [10] 李建萍, 刘意抒, 蔡丽萍, 等. 达芬奇手术机器人国际培训中心建设[J]. *解放军医院管理杂志*, 2017, 24(12):1156-1158. DOI: 10.16770/J.cnki.1008-9985.2017.12.016.
- [10] LI J P, LIU Y S, CAI L P, et al. Construction of the da vinci surgical robot international training center[J]. *Hosp Adm J Chin People's Liberation Army*, 2017, 24(12):1156-1158. DOI: 10.16770/J.cnki.1008-9985.2017.12.016.
- [11] WALTERS E M, WELLS K D, BRYDA E C, et al. Swine models, genomic tools and services to enhance our understanding of human health and diseases[J]. *Lab Anim*, 2017, 46(4):167-172. DOI: 10.1038/labani.1215.
- [12] WANG Y, CHEN G, PAN D, et al. Pig-to-human kidney xenotransplants using genetically modified minipigs[J]. *Cell Rep Med*, 2024, 5(10): 101744. DOI: 10.1016/J.XCRM. 2024. 101744.
- [13] TIONG H Y, GOH B Y S, CHIONG E, et al. Robotic kidney autotransplantation in a porcine model: a procedure-specific training platform for the simulation of robotic intracorporeal vascular anastomosis[J]. *J Robot Surg*, 2018, 12(4): 693-698. DOI: 10.1007/s11701-018-0806-5.
- [14] KAJIWARA N, KAKIHANA M, USUDA J, et al. Training in robotic surgery using the da Vinci® surgical system for left pneumonectomy and lymph node dissection in an animal model[J]. *Ann Thorac Cardiovasc Surg*, 2011, 17(5): 446-453. DOI: 10.5761/atcs.oa.10.01613.
- [15] KASABWALA K, GOUELI R, CULLIGAN P J. A live porcine model for robotic sacrocolpopexy training[J]. *Int Urogynecol J*, 2019, 30(8):1371-1375. DOI: 10.1007/s00192-019-03936-7.
- [16] LI D W, LIU Z X, ZANG Y, et al. Video laryngoscope-guided urethral catheterization in female minipigs[J]. *Lab Anim*, 2022, 56(5):446-453. DOI: 10.1177/00236772221092933.
- [17] 刘意抒, 赵善民, 蔡丽萍. 不同麻醉通气方法在胸外科微创手术培训中的应用与比较[J]. *实验动物与比较医学*, 2024, 44(1):97-104. DOI: 10.12300/j.issn.1674-5817.2023.135.
- [17] LIU Y S, ZHAO S M, CAI L P. Application and comparison of different anesthetic ventilation methods in minimally invasive thoracic surgery training[J]. *Lab Anim Comp Med*, 2024, 44(1):97-104. DOI: 10.12300/j.issn.1674-5817.2023.135.
- [18] 贺争鸣, 陈洪岩, 陈振文, 等. 基于科研范式变革的实验动物资源创新发展[J]. *实验动物科学*, 2024, 41(1):84-88. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6179.2024.01.015.
- [18] HE Z M, CHEN H Y, CHEN Z W, et al. Reflection on the innovation and development of laboratory animal resources based on the transformation of scientific research paradigm [J]. *Lab Anim Sci*, 2024, 41(1):84-88. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6179.2024.01.015.
- [19] RAISON N, HARRISON P, ABE T, et al. Procedural virtual reality simulation training for robotic surgery: a randomised controlled trial[J]. *Surg Endosc*, 2021, 35(12): 6897-6902. DOI: 10.1007/s00464-020-08197-w.
- [20] FOTOUHI J, SONG T Y, MEHRFARD A, et al. Reflective-AR

display: an interaction methodology for virtual-to-real alignment in medical robotics[J]. IEEE Robot Autom Lett, 2020, 5(2):2722-2729. DOI: 10.1109/LRA.2020.2972831.

[21] CULLIGAN P, GURSHUMOV E, LEWIS C, et al. Predictive validity of a training protocol using a robotic surgery simulator[J]. Female Pelvic Med Reconstr Surg, 2014, 20(1):48-51. DOI: 10.1097/SPV.0000000000000045.

[22] DELPECH P O, DANION J, ORIOT D, et al. SimLife a new model of simulation using a pulsated revascularized and ventilated cadaver for surgical education[J]. J Visc Surg, 2017, 154(1):15-20. DOI: 10.1016/j.jviscsurg.2016.06.006.

[23] DANION J, BREQUE C, ORIOT D, et al. SimLife\* technology in surgical training-a dynamic simulation model[J]. J Surg Surg, 2020, 157(3 Suppl 2): S117-S122. DOI: 10.1016/j.jviscsurg.2020.02.013.

[24] DANION J, DONATINI G, BREQUE C, et al. Bariatric surgical simulation: evaluation in a pilot study of SimLife, a new dynamic simulated body model[J]. Obes Surg, 2020, 30(11): 4352-4358. DOI: 10.1007/s11695-020-04829-1.

[25] COSTELLO D M, HUNTINGTON I, BURKE G, et al. A review of

simulation training and new 3D computer-generated synthetic organs for robotic surgery education[J]. J Robot Surg, 2022, 16(4):749-763. DOI: 10.1007/s11701-021-01302-8.

[26] 张超超, 田雪松. 虚拟现实在实验动物行为分析中的应用进展[J]. 实验动物与比较医学, 2023, 43(1):73-78. DOI: 10.12300/j.issn.1674-5817.2022.078.

ZHANG C C, TIAN X S. Application of virtual reality in the behavior analysis of laboratory animal[J]. Lab Anim Comp Med, 2023, 43(1):73-78. DOI: 10.12300/j.issn.1674-5817.2022.078.

(收稿日期: 2024-05-29 修回日期: 2024-07-29 )  
( 本文编辑: 张俊彦, 翟玉凤, 丁宇菁, 洪怡)

[引用本文]

刘意抒, 蔡丽萍. 实验猪在达芬奇手术机器人培训中的应用进展及挑战[J]. 实验动物与比较医学, 2024, 44(6): 667-674. DOI: 10.12300/j.issn.1674-5817.2024.075.

LIU Y S, CAI L P. Advances and challenges of using experimental pigs in Da Vinci surgical robot training[J]. Lab Anim Comp Med, 2024, 44(6): 667-674. DOI: 10.12300/j.issn.1674-5817.2024.075.

\*\*\*\*\*

《实验动物与比较医学》2024年审稿专家致谢名单

- |         |         |         |          |          |          |         |
|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|
| 白玉(北京)  | 白玉(河北)  | 包晶晶(浙江) | 包义君(辽宁)  | 卞勇(江苏)   | 常亮堂(上海)  | 常在(北京)  |
| 陈傍柱(广东) | 陈方明(浙江) | 陈国元(上海) | 陈洪岩(黑龙江) | 陈鸿军(上海)  | 陈民利(浙江)  | 陈仁金(江苏) |
| 陈瑛(河北)  | 陈真(上海)  | 陈振文(北京) | 崔东红(上海)  | 崔永春(北京)  | 代解杰(云南)  | 戴方伟(浙江) |
| 戴建军(上海) | 戴然然(上海) | 邸亚男(北京) | 丁玉强(上海)  | 杜小燕(北京)  | 杜旭光(北京)  | 范薇(北京)  |
| 冯洁(上海)  | 付瑞(北京)  | 傅江南(广东) | 富群华(上海)  | 高彩霞(黑龙江) | 高静(上海)   | 高苒(北京)  |
| 高巍(吉林)  | 葛良鹏(重庆) | 葛龙(甘肃)  | 官建中(安徽)  | 郭连香(江苏)  | 郭喻(湖北)   | 韩利文(山东) |
| 韩凌霞(上海) | 韩新巍(河南) | 郝智慧(北京) | 何国栋(上海)  | 何远清(江苏)  | 和占龙(云南)  | 贺争鸣(北京) |
| 黄冰(广东)  | 黄朝晖(江苏) | 黄镇(福建)  | 季樱红(上海)  | 贾六军(北京)  | 江振洲(江苏)  | 金帆(浙江)  |
| 邝高艳(湖南) | 邝少松(广东) | 赖国旗(重庆) | 郎廷元(重庆)  | 李洪涛(广东)  | 李秦(北京)   | 李善刚(云南) |
| 李顺(上海)  | 李文德(广东) | 李新华(山东) | 李秀(江苏)   | 李垚(上海)   | 李自发(山东)  | 林惠然(深圳) |
| 林金杏(上海) | 刘恩岐(陕西) | 刘吉宏(上海) | 刘晓宇(北京)  | 刘燕萍(四川)  | 刘永刚(黑龙江) | 刘月环(浙江) |
| 刘云波(北京) | 刘真(上海)  | 刘忠华(广东) | 卢晓(上海)   | 卢选成(北京)  | 陆尔奕(上海)  | 陆益红(江苏) |
| 罗小泉(江西) | 吕龙宝(云南) | 麻彬(上海)  | 孟长虹(江苏)  | 孟庆刚(上海)  | 牛廷献(甘肃)  | 潘登科(四川) |
| 潘学营(上海) | 庞万勇(北京) | 庞晓斌(河南) | 彭长庚(上海)  | 蒲小平(北京)  | 蒲小燕(青海)  | 权福实(吉林) |
| 饶军华(广东) | 师长宏(陕西) | 施爱民(江苏) | 史晓光(北京)  | 宋春红(山东)  | 宋国华(山西)  | 宋宁宁(上海) |
| 宋晓明(上海) | 孙德明(北京) | 孙丽光(吉林) | 谭娟(上海)   | 谭毅(重庆)   | 汤静(上海)   | 唐炜(上海)  |
| 唐元家(上海) | 陶雨风(北京) | 陶元清(青海) | 田嘉军(四川)  | 屠伟峰(江苏)  | 王春霞(上海)  | 王德军(浙江) |
| 王刚(广东)  | 王贵平(江苏) | 王含必(北京) | 王健(上海)   | 王可洲(山东)  | 王守立(江苏)  | 王爽洁(上海) |
| 王萧(广东)  | 王宇(上海)  | 王玉娥(重庆) | 王朝霞(上海)  | 魏强(北京)   | 吴宝金(上海)  | 吴德国(北京) |
| 吴剑(上海)  | 吴强(江苏)  | 相磊(北京)  | 肖君华(上海)  | 谢家骏(上海)  | 谢建芸(上海)  | 谢淑武(上海) |
| 熊炜(上海)  | 徐彭(江西)  | 徐平(上海)  | 徐汪节(上海)  | 徐永君(福建)  | 许彤辉(上海)  | 薛整风(江苏) |
| 闫明霞(上海) | 杨斐(上海)  | 杨利峰(北京) | 杨伟敏(上海)  | 杨文(上海)   | 杨晓辉(上海)  | 杨玉琴(上海) |
| 姚明(上海)  | 叶茂青(上海) | 应华忠(浙江) | 于士颜(上海)  | 于艳(北京)   | 于志锋(上海)  | 余梅(上海)  |
| 袁韩涛(上海) | 袁进(广东)  | 袁晓龙(广东) | 岳秉飞(北京)  | 张超超(上海)  | 张董晓(北京)  | 张海丛(河北) |
| 张厚森(江苏) | 张评浒(江苏) | 张泉(江苏)  | 张涛(北京)   | 张笑人(广东)  | 张璇(上海)   | 张周(上海)  |
| 赵静(江苏)  | 赵彦光(上海) | 赵勇(上海)  | 郑和平(福建)  | 郑茂恩(山东)  | 周聪颖(上海)  | 周晓辉(上海) |
| 周正宇(江苏) | 朱德生(北京) | 朱佳蕾(上海) | 朱顺星(江苏)  | 朱彦兵(北京)  | 朱焰(上海)   | 庄乐南(浙江) |
| 卓振建(广东) | 邹洪(上海)  |         |          |          |          |         |

(以拼音字母排序)