

# 3D 打印模型在消化外科中的应用进展\*

吕祥康 毛金磊 综述 孙晓东\*\*① 王知非① 审校

(浙江中医药大学第二临床医学院, 杭州 310053)

文献标识:A 文章编号:1009-6604(2023)01-0060-06

doi:10.3969/j.issn.1009-6604.2023.01.013

随着内镜技术与微创手术的兴起,消化外科迎来蓬勃的发展。手术视频的广泛传播使许多住院医师有随时学习手术操作的机会<sup>[1]</sup>。面对复杂且高难度的消化外科手术,手术医生能够安全且高效地完成这些手术步骤,术前操作培训和术前规划是必不可少的。现今全球疫情大流行,生物样本与大规模的手术训练机会大量减少<sup>[2,3]</sup>,手术培训面临空前的难度。3D 打印技术的快速推广恰恰为解决这一难题提供了出路<sup>[4]</sup>。3D 打印以相对简单的方式创建精准的解剖模型,为消化外科医生提供术前规划的蓝本和反复训练的机会,同时推动材料学在消化外科的发展<sup>[5]</sup>。本文对 3D 打印模型在消化外科中的应用进展进行文献总结。

## 1 3D 打印模型简介

自 1986 年 Charles W. Hull 首次报道 3D 打印技术以来,3D 打印技术已经普遍应用于各个生产领域<sup>[6]</sup>。目前认可的 3D 打印模型制作工艺流程大致分为 7 步:①还原型光固化;②材料喷涂成型;③材料喷射;④材料挤出;⑤粉末床融化;⑥薄片层叠;⑦定向沉积<sup>[7]</sup>。因为 3D 打印模型优秀的透明性、刚度及可变形性,且厂家能精确控制模型的尺寸、形状和 3D 空间中的框架结构,所以被频繁应用于临床医学的教育与科普中<sup>[8]</sup>,如术前手术规划、操作培训和医患沟通<sup>[9]</sup>。相比于直接利用动物尸体甚至人体临床实验,3D 打印组织器官训练模型具有低成

本、合乎伦理道德、易于操作执行的显著优势<sup>[10,11]</sup>。

消化系统以柔软的空腔脏器居多,为模仿其真实的质感,3D 打印模型多以柔性材料来制备<sup>[12]</sup>。柔性 3D 打印模型的构筑方法分为直接 3D 打印构筑法和间接模板浇筑法。直接 3D 打印构筑法是提前设计制备具有优异光固化性能的柔性材料墨水,研究其光固化反应动力学,通过调节墨水组分和优化光固化 3D 打印参数,实现高精度模型 3D 打印。间接模板浇筑法是以 3D 打印的方式制备组织器官模型的阴模,然后将配制好的柔性材料前驱体灌入模具中,通过凝胶化方法使其固化,制备出具有优异理化性能的组织器官模型。

## 2 3D 打印模型在消化外科教学培训中的应用

在微创手术大行其道的今天,消化外科医生最迫切要解决的是培训模型稀缺与培训模型价格昂贵的问题。柔性 3D 打印组织器官模型代替生物活体进行外科培训已成为目前医学模拟研究领域的热点研究方向<sup>[13]</sup>。

### 2.1 医学教学

国内外医学生对消化系统解剖的学习大多基于书籍或者图谱中获取的简单图片,因此,对细节和空间关系的理解较差<sup>[14]</sup>。尸体模型作为教学培训的金标准,在各大医学院校中却极其稀少<sup>[15]</sup>。3D 打印模型因优秀的可塑性,依据患者的医学图像或尸体扫描的器官图片生成同比例的消化系统脏器,用

\* 基金项目:国家科学技术部重点研发计划子课题(2018YFB1107104)

\*\* 通讯作者, E-mail: sunxiaodong@hmc.edu.cn

① (浙江省人民医院 杭州医学院附属人民医院肝胆胰微创外科, 杭州 310014)

来充当教学模型<sup>[16]</sup>。Cromeens 等<sup>[17]</sup>对 21 位医师进行腹部解剖相关培训,使用 3D 打印模型培训的参与者能够在  $(6.6 \pm 0.5) \text{ min}$  内完成问题解答,明显快于单独使用 CT 者  $(18.9 \pm 2.5) \text{ min}$  或 CT + 腹部平片者  $(14.9 \pm 1.5) \text{ min}$  ( $P \leq 0.05$ )。3D 打印的解剖模型能加深外科医生对腹部脏器形状和比例的理解,提升识别复杂解剖结构的能力。医学生通过直观接触 3D 打印模型的方式夯实对解剖的理解,为后续的手术和操作做好铺垫。

## 2.2 消化外科内镜训练

消化系统中有大量迂曲的管状通道,不同的管道又有不同的特质。在进行结肠息肉内镜治疗时,隐藏在结肠环形皱襞下的息肉,常常会躲过内镜医生的清扫,特别是在结肠弯曲处的息肉即使被内镜医生正确识别,完整切除也是非常困难的<sup>[18]</sup>。3D 打印模型可以仿真模拟患者结肠的状态,并在特定的部位设置息肉模型,供受训者反复训练,降低内镜医生漏诊漏切的概率<sup>[19]</sup>。

不同于单向通道的胃肠系统,胆道系统是由多个分支组成的,胆道镜对治疗胆道结石和胆道良恶性狭窄起着至关重要的作用。由于胆道系统迷宫状的解剖结构和频繁的解剖变异<sup>[20]</sup>,缺乏经验的内镜医生在进行胆道镜检查时很可能会迷失在胆管树中。3D 打印提供可连续观察和反复操作的人工胆道系统模型,为受训者创造仿真的操作环境和提供良好的操作反馈。Li 等<sup>[21]</sup>将 20 名实习医生分为 3D 打印模型训练组与虚拟模型训练组,进行 2 周的胆道解剖学习和胆道镜技术培训,2 周后对 3D 打印模型训练组与虚拟模型训练组进行胆道镜操作测试,2 组对胆道解剖识别的准确率分别为 95%、27% ( $P \leq 0.05$ ),且 3D 打印模型训练组操作时间由训练前  $(29 \pm 8) \text{ min}$  缩短到训练后  $(16 \pm 3) \text{ min}$  ( $P \leq 0.001$ )。可见,受训者通过 3D 打印模型培训,不仅加深对胆道解剖的认识,同时也减少胆道镜手术训练的时间。

## 2.3 初级腹腔镜手术培训

针对如胆囊炎、阑尾炎等良性消化外科疾病,腹腔镜手术已成为首选的治疗手段<sup>[22]</sup>。由于腔镜器械直线性的活动模式和狭窄的活动范围,对于青年医师来说需要陡峭且漫长的学习曲线才能逐渐适应与熟悉腔镜的操作<sup>[23]</sup>。因此,急需大量可重复使用

的操作模型帮助年轻医生反复锤炼腹腔镜手术技巧<sup>[24]</sup>。Sommerhalder 等<sup>[25]</sup>应用 3D 打印技术和人工制造技术,构建 6 个模型样本集(阑尾切除术、胆囊切除术、胆总管探查术、腹壁疝修补术、胸腔引流术和皮肤缝合),通过反复使用的 3D 打印模型既降低手术训练的门槛,也降低了 85% 的手术训练成本。Zhang 等<sup>[26]</sup>对 16 位有初步手术经验的外科医生进行腹腔镜 Nissen 胃底折叠手术培训,通过手术技能客观结构化评估量表(OSATS)对训练表现进行评分。3D 打印模型训练组 OSATS  $(26.25 \pm 1.67)$  分,明显高于无特殊训练组  $(17.50 \pm 2.07)$  分( $t = 9.31, P < 0.0001$ ),手术时间  $(76.25 \pm 2.49) \text{ min}$ ,明显短于无特殊训练组  $(110.13 \pm 3.36) \text{ min}$  ( $t = 22.92, P < 0.0001$ )。Casas-Murillo 等<sup>[27]</sup>应用柔性材料设计腹腔镜胆囊切除术的 3D 打印模型,13 名外科医生进行评估测试,61% 的评估者对模型的真实感表示满意,92% 的评估者表示会推荐 3D 打印模型用于腹腔镜胆囊切除术的培训。综上,3D 打印模型通过模拟腹腔镜胃食折叠术、腹腔镜阑尾切除术和腹腔镜胆囊切除术等相对简单的普外科手术,优化了住院医师腹腔镜手术的培训模式,为住院医师反复的手术练习提供可能。

## 2.4 复杂腹腔镜手术培训

一些复杂消化外科手术,如恶性肿瘤的根治术,经常会涉及淋巴的清扫、管道的重建和血管、神经裸化的问题,手术操作经常在肝门区、贲门膈顶区、直肠陷窝区这些十分狭窄的空间内进行<sup>[28]</sup>。这类步骤繁琐且操作要求极高的复杂手术,即使是高级医师,同样需要进行系统的训练<sup>[29]</sup>。3D 打印模型能很好地模拟这些复杂的腹腔环境,为微创手术训练提供条件<sup>[26]</sup>。Burdall 等<sup>[30]</sup>通过 3D 打印构建复杂的肝脏、胰管和胆总管囊肿的混合组件模型,模拟腹腔镜胆总管囊肿手术的复杂操作环境,并邀请 10 位外科医生对手术模型进行测评,受试者对模型进行 1~10 分测评(分数越高认为实用性越强),测评得分  $(7.36 \pm 1.57)$  分(4~9 分),大部分测评者表示模型有很高的实用性,同时会向他人推荐这个模型。

为探讨 3D 打印模型在胆道吻合培训上的可行性,Shen 等<sup>[31]</sup>对 3D 打印干式模型的腹腔镜胆道吻合模拟训练进行文献回顾,收集 15 名外科医生的基线数据。随着培训次数的增加,所需操作时间呈减

少趋势,直至进入一个相对稳定的平台期。青年组外科医生在第 5 次训练时,学习曲线趋于平稳;中年组外科医生在进行第 3 次训练时,学习曲线趋于平稳。胆道吻合术的 3D 打印模型可以帮助外科医生进行模拟培训,通过训练为实际手术提供经验和技能的积累。因此,复杂腹腔镜手术的培训,使用 3D 打印模型是高效可行的。

## 2.5 达芬奇机器人手术培训

在过去的几十年时间里,达芬奇机器人辅助手术呈现几何倍数的增长<sup>[32]</sup>。由于机器人手术操作缺乏力反馈,因此,在进行消化系统的精细解剖、缝合、切割时需要反复的训练与适应<sup>[33]</sup>。结合中国的国情,达芬奇机器人未进入医保,在消化外科中仅有复杂的手术操作会使用达芬奇机器人辅助。未经过完整的学习曲线进行机器人复杂手术,手术风险极高,因此,达芬奇机器人手术培训的开展迫在眉睫。Rice 等<sup>[34]</sup>将进行机器人胰十二指肠切除术(robotic pancreaticoduodenectomy, RPD)的手术医生分为 3 类:①没有接受过师徒制培训和课程培训的手术医生;②接受过师徒制培训,但没有接受过课程培训的手术医生;③同时接受师徒制培训和课程培训的手术医生。3 类手术医生分别施行 258 例(50.2%)、151 例(29.3%)和 82 例(15.9%) RPD,接受 RPD 的 3 组患者除术前美国麻醉医师协会分级为 3 级患者的构成比(78.3% vs. 88.1% vs. 84.1%,  $P = 0.04$ )和术前接受新辅助化疗患者构成比(26.0% vs. 37.1% vs. 36.6%,  $P = 0.03$ )存在差异外,3 组患者术前组间特征相似。3 组患者手术时间[(450.8 ± 121.0) min vs. (388.5 ± 76.7) min vs. (348.6 ± 52.6) min,  $P < 0.001$ ],术后并发症 Clavien-Dindo 分级大于 2 级发生率(28.7% vs. 19.9% vs. 14.6%,  $P = 0.01$ )和术中出血量[(426 ± 525.8) ml vs. (288.6 ± 335) ml vs. (254.7 ± 274.1) ml,  $P < 0.001$ ]差异均有显著性。与上一代外科医生相比,后辈外科医生因有师徒制的传承和完善的课程培训手术时间往往更短,学习曲线也更加平滑<sup>[35]</sup>。因此,正确的手术指导和完善的机器人手术培训课程可以在不影响患者安全的前提下,降低外科医生机器人手术的学习曲线。

达芬奇机器人动辄 2000 多万人民币的成本价格,国内目前也仅有 3 家达芬奇手术机器人国际培

训中心。传统的手术培训方式是以动物及人尸体(湿性模型)为主,存在以下诸多问题:伦理难、价格高、场地限制、污染风险、管理负责和模型数目有限<sup>[36]</sup>。因此,传统湿性模型的机器人培训模式在国内往往难以开展。相较于湿性模型,3D 打印模型因拟真、便捷、可重复性高、个体化制作的特性为达芬奇机器人的培训提供了出路。罗彻斯特大学医学中心运用图像分割、3D 打印技术和聚合物成形技术,模拟腹部脏器的质地、解剖和血流灌注,结合脏器周围的脂肪、肠道和肌肉组织,为外科医生提供充分的沉浸手术体验<sup>[11]</sup>。Wei 等<sup>[37]</sup>成功构造肝外胆管癌微创根治术的 3D 打印手术模型,模拟血液和胆汁可以在门静脉和胆管中循环,并邀请 6 位胆道外科医生使用腹腔镜或机器人进行手术,最后均顺利完成全程手术。Wei 等<sup>[38]</sup>通过 3D 打印技术结合微型测压模型设计机器人胰肠吻合术的训练模型,3 名高级医师参加手术测试,其中 1 位医师在经过 6 h 常规 3D 模型训练后,进行机器人辅助下吻合测试时,尝试 6 次便达到了连续 3 次成功吻合的测试目标,其他 2 位医师分别尝试 20、25 次,所有受训者均表示从 3D 打印模型训练中获益,为真正的临床手术操作提供了切实的参考经验。可见,3D 打印模型的出现为机器人手术培训提供了一项优质的选择。

## 3 术前规划

术前规划对手术的成功实施起至关重要的作用,有助于降低术中风险,减少手术时间<sup>[39]</sup>。过去临床医生通常借助个人经验将 MRI 与 CT 图像中的 2D 信息转换为脑海中的抽象 3D 模型,但由于个人水平的局限性和病灶的不确定性往往导致重建结果与实际情况不一致。Pietrabissa 等<sup>[40]</sup>为 12 例计划行腹腔镜脾切除术的患者构建 3D 打印模型,患者和主刀医师对模型进行 1~5 分的评分(1 分是无用,5 分是非常有用),10 例患者给出 5 分,2 例给出 4 分;6 名住院医师给出 5 分,4 名给出 4 分。在进行肝切除术时,由于肝脏有 2 套供血系统,再加上肝内四通八达的胆管树,正确识别病变部位与周围胆管、血管的位置关系十分的困难。3D 打印模型通过术前影像资料可以构建一些个性化的解剖结构模型,如肝脏血管解剖变异或胆道恶性肿瘤邻近门静脉或下腔静脉等<sup>[41]</sup>。Bati 等<sup>[42]</sup>选取 5 例肝胆疾病

并分别建立他们的 MRCP 图像、3D 图像和 3D 打印模型,然后由 19 位外科住院医师分别进行测试,评分 1~10 分(1 分表示最低,10 分表示最高),结果显示在疾病认识方面 3D 打印模型要优于 MRCP ( $Z = -3.854, P < 0.001$ ) 和 3D 图像 ( $Z = -2.865, P < 0.005$ )。可见,3D 打印模型能帮助主刀医生更好地了解病人肝脏、胆道的解剖特点,从而优化手术方案。3D 打印模型能够立体、清晰和实物化显示肿瘤解剖学位置及与周围器官、血管的毗邻关系,且与术中实际情况大致相符<sup>[43]</sup>。通过术前构建患者个性化的病灶 3D 模型,可以为临床决策与手术规划提供参考蓝图。

#### 4 医患沟通

消化系统的肿瘤根治术涉及许多脏器的切除与管道的重建。尽管外科医生在术前清晰讲解手术过程,患者及家属也只能理解有限的一部分。3D 打印模型能呈现出直观逼真的手术效果,提高患者及家属对病情和术式的认知能力<sup>[44, 45]</sup>,同时也为良好的医患交互模式打下基础。

#### 5 3D 打印模型应用于消化外科的不足

目前,消化外科的 3D 打印模型制作原料以硅胶为主<sup>[46]</sup>。由于硅胶本身理化特征的局限性,目前仍无法解决消化外科手术培训模型的共性难点:第一,虽然硅胶可以实现外科切割和管道重建等常规操作,但是不能显示出如同正常活体组织半永久性变形的物理特性,以及提供湿软生物组织的真实触感<sup>[39]</sup>。第二,硅胶无法通过电外科器械(电刀,超声刀)产生手术的仿真模拟。例如电凝可以使组织焦化从而凝血止血,超声刀切割实质性脏器、凝闭血管等。第三,常规的 3D 打印模型是用软件将器官或者病灶周围组织去掉,暴露得到所需的标准模型。但是在真正的消化系统手术中,这些周围组织及血管分支正是在显露病灶过程中需要进行外科处理的部分,这些无法通过硅胶实现。第四,消化外科手术沿组织层次进行解剖,要求更多细微差别的物理学性质的材料,而目前的模型材料难以实现。第五,电刀烧灼硅胶材料时会产生有毒气体,危害受训者的健康<sup>[47]</sup>。

目前,国际上应用 3D 打印模型进行外科训练

多是小样本、单中心且研究时间短的报道,缺少高质量的随机对照研究,且 3D 打印技术缺少统一的标准(包括文件格式、应用的软件、技术的可及性等),限制不同中心的头对头比较<sup>[48]</sup>。此外,受训的外科医生提供实时的反馈评价对于建立手术培训评价体系也是至关重要的<sup>[49]</sup>。因此,根据消化科代表性的手术特点,制备高度仿真的消化系统器官模型,并建立标准化评价体系用于推动外科手术培训是目前该领域最重要的挑战。

#### 6 小结与展望

尽管目前 3D 打印模型尚有许多不足,但针对 3D 打印模型的研究从未止步<sup>[50]</sup>。随着制作原理的不断创新以及 3D 打印机和材料成本的逐步降低,3D 打印已逐渐成为一种低门槛、多功能、高效率的先进制造方法,满足日常生产生活的应用需求<sup>[51]</sup>。水凝胶等<sup>[52]</sup>更优质的材料可替代硅胶进行模型制造。3D 打印模型在诸如组织工程学和再生医学等最前沿的学科也有所应用<sup>[6, 53]</sup>,尽管在消化系统领域的摸索尚处于早期阶段,但诸如肝脏替代的动物实验<sup>[54]</sup>和体外小肠仿生模型的应用<sup>[55]</sup>已有报道。

不同背景的研究人员、医生和工程师相互之间鼎力合作,构建出个性化的 3D 打印模型,同时也促进各行业之间的交流与进步<sup>[56]</sup>。3D 打印模型以患者为范本,广大外科医师为受众,进一步优化消化外科的培训模式。现今 3D 打印模型在消化外科中仍只是小范围应用,期待在未来有进一步大规模的推广普及。

#### 参考文献

- 1 Evans CH, Schenarts KD. Evolving educational techniques in surgical training. *Surg Clin North Am*, 2016, 96(1): 71–88.
- 2 Okland TS, Pepper JP, Valdez TA. How do we teach surgical residents in the COVID-19 era? *J Surg Educ*, 2020, 77(5): 1005–1007.
- 3 Al-Jabir A, Kerwan A, Nicola M, et al. Impact of the coronavirus (COVID-19) pandemic on surgical practice – Part 1. *Int J Surg*, 2020, 79: 168–179.
- 4 Wang Y, Ahmed A, Azam A, et al. Applications of additive manufacturing (AM) in sustainable energy generation and battle against COVID-19 pandemic: The knowledge evolution of 3D printing. *J Manuf Syst*, 2021, 60: 709–733.

- 5 Rybicki FJ. Medical 3D printing and the physician-artist. *Lancet*, 2018,391(10121):651–652.
- 6 Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol*, 2014,32(8):773–785.
- 7 Pietrabissa A, Marconi S, Negrello E, et al. An overview on 3D printing for abdominal surgery. *Surg Endosc*, 2020,34(1):1–13.
- 8 Liaw CY, Guvendiren M. Current and emerging applications of 3D printing in medicine. *Biofabrication*, 2017,9(2):024102.
- 9 Agung NP, Nadhif MH, Irdam GA, et al. The role of 3D-printed phantoms and devices for organ-specified appliances in urology. *Int J Bioprint*, 2021,7(2):333–346.
- 10 Sandmann J, Müschenich FS, Riabikin A, et al. Can silicone models replace animal models in hands-on training for endovascular stroke therapy? *Interv Neuroradiol*, 2019,25(4):397–402.
- 11 Ghazi A. A call for change. Can 3D printing replace cadavers for surgical training? *Urol Clin North Am*, 2022,49(1):39–56.
- 12 Estermann SJ, Pahr DH, Reisinger A. Quantifying tactile properties of liver tissue, silicone elastomers, and a 3D printed polymer for manufacturing realistic organ models. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2020,104:103630.
- 13 周倩,魏涛,胡紫宜,等. 国内外临床教学中应用 3D 打印模型相关研究的知识图谱分析. *中华医学教育杂志*, 2021,41(1):40–43.
- 14 Pugliese L, Marconi S, Negrello E, et al. The clinical use of 3D printing in surgery. *Updates Surg*, 2018,70(3):381–388.
- 15 Ghosh SK. Cadaveric dissection as an educational tool for anatomical sciences in the 21st century. *Anat Sci Educ*, 2017,10(3):286–299.
- 16 Jones DB, Sung R, Weinberg C, et al. Three-dimensional modeling may improve surgical education and clinical practice. *Surg Innov*, 2016,23(2):189–195.
- 17 Cromeens BP, Ray WC, Hoehne B, et al. Facilitating surgeon understanding of complex anatomy using a three-dimensional printed model. *J Surg Res*, 2017,216:18–25.
- 18 van Doorn SC, van der Vlugt M, Depla A, et al. Adenoma detection with Endocuff colonoscopy versus conventional colonoscopy: a multicentre and randomised controlled trial. *Gut*, 2017,66(3):438–445.
- 19 Walter BM, Hann A, Frank R, et al. A 3D-printed cap with sideoptics for colonoscopy: a randomized ex vivo study. *Endoscopy*, 2017,49(8):808–812.
- 20 Choi JW, Kim TK, Kim KW, et al. Anatomic variation in intrahepatic bile ducts: an analysis of intraoperative cholangiograms in 300 consecutive donors for living donor liver transplantation. *Korean J Radiol*, 2003,4(2):85–90.
- 21 Li A, Tang R, Rong Z, et al. The use of three-dimensional printing model in the training of choledochoscopy techniques. *World J Surg*, 2018,42(12):4033–4038.
- 22 Okamoto K, Suzuki K, Takada T, et al. Tokyo Guidelines 2018: flowchart for the management of acute cholecystitis. *J Hepatobiliary Pancreat Sci*, 2018,25(1):55–72.
- 23 Nota CL, Rinkes IHB, Hagendoorn J. Setting up a robotic hepatectomy program: a Western-European experience and perspective. *Hepatobiliary Surg Nutr*, 2017,6(4):239–245.
- 24 The L. The best science for achieving Healthy China 2030. *Lancet*, 2016,388(10054):1851.
- 25 Sommerhalder C, Chacin AC, Williams TP, et al. Utilizing in-hospital fabrication to decrease simulation costs. *J Surg Res*, 2021,265:79–85.
- 26 Zhang Y, Xia J, Zhang J, et al. Validity of a soft and flexible 3D-printed Nissen fundoplication model in surgical training. *Int J Bioprint*, 2022,8(2):61–69.
- 27 Casas-Murillo C, Zuñiga-Ruiz A, Lopez-Barron RE, et al. 3D-printed anatomical models of the cystic duct and its variants, a low-cost solution for an in-house built simulator for laparoscopic surgery training. *Surg Radiol Anat*, 2021,43(4):537–544.
- 28 Ma D, Wang W, Wang J, et al. Laparoscopic versus open surgery for hilar cholangiocarcinoma: a retrospective cohort study on short-term and long-term outcomes. *Surg Endosc*, 2022,36(6):3721–3731.
- 29 Beyer-Berjot L, Palter V, Grantcharov T, et al. Advanced training in laparoscopic abdominal surgery: a systematic review. *Surgery*, 2014,156(3):676–688.
- 30 Burdall OC, Makin E, Davenport M, et al. 3D printing to simulate laparoscopic choledochal surgery. *J Pediatr Surg*, 2016,51(5):828–831.
- 31 Shen J, Chen M, Jin R, et al. A study of simulation training in laparoscopic bilioentericanastomosis on a 3D-printed dry lab model. *Surg Endosc*, 2022 Aug 9. doi:10.1007/s00464-022-09465-7.
- 32 Armijo PR, Pagkratis S, Boilesen E, et al. Growth in robotic-assisted procedures is from conversion of laparoscopic procedures and not from open surgeons' conversion: a study of trends and costs. *Surg Endosc*, 2018,32(4):2106–2113.
- 33 Van der Meijden OA, Schijven MP. The value of haptic feedback in conventional and robot-assisted minimal invasive surgery and virtual reality training: a current review. *Surg Endosc*, 2009,23(6):1180–1190.
- 34 Rice MK, Hodges JC, Bellon J, et al. Association of mentorship and a formal robotic proficiency skills curriculum with subsequent generations' learning curve and safety for robotic pancreaticoduodenectomy. *JAMA Surg*, 2020,155(7):607–615.
- 35 Al Abbas AI, Wang C, Hamad AB, et al. Mentorship and formal robotic proficiency skills curriculum improve subsequent generations' learning curve for the robotic distal pancreatectomy. *HPB (Oxford)*, 2021,23(12):1849–1855.
- 36 Gilbody J, Prasthofer AW, Ho K, et al. The use and effectiveness

- of cadaveric workshops in higher surgical training: a systematic review. *Ann R Coll Surg Eng*, 2011, 93(5):347–352.
- 37 Wei F, Wang W, Gong H, et al. Reusable modular 3D-printed dry lab training models to simulate minimally invasive choledochojunostomy. *J Gastrointest Surg*, 2021, 25(7):1899–1901.
- 38 Wei F, Xu M, Lai X, et al. Three-dimensional printed dry lab training models to simulate robotic-assisted pancreaticojejunostomy. *ANZ J Surg*, 2019, 89(12):1631–1635.
- 39 Tejo-Otero A, Buj-Corral I, Fenollosa-Artés F. 3D printing in medicine for preoperative surgical planning: A review. *Ann Biomed Eng*, 2020, 48(2):536–555.
- 40 Pietrabissa A, Marconi S, Peri A, et al. From CT scanning to 3-D printing technology for the preoperative planning in laparoscopic splenectomy. *Surg Endosc*, 2016, 30(1):366–371.
- 41 周桂华, 史宪杰. 3D 打印技术在特殊部位及复杂肝胆系疾病精准救治中的应用. *中华肝胆外科杂志*, 2016, 22(9):645–648.
- 42 Bati AH, Guler E, Ozer MA, et al. Surgical planning with patient-specific three-dimensional printed pancreaticobiliary disease models- Cross-sectional study. *Int J Surg*, 2020, 80:175–183.
- 43 苏昭杰, 李文岗, 陈福真, 等. 三维重建及 3D 打印技术在腹膜后肿瘤术前评估中应用研究. *中国实用外科杂志*, 2017, 37(1):79–83.
- 44 Yuan X, Liu X, Jing Q, et al. The application of full-size three-dimensional individual printed model combined with three-dimensional digital demonstration can facilitate patient's preoperative comprehension to robotic-assisted laparoscopic partial nephrectomy. *Perioper Med (Lond)*, 2022, 11(1):22–30.
- 45 Guo HC, Wang Y, Dai J, et al. Application of 3D printing in the surgical planning of hypertrophic obstructive cardiomyopathy and physician-patient communication: a preliminary study. *J Thorac Dis*, 2018, 10(2):867–873.
- 46 Kaneko N, Mashiko T, Ohnishi T, et al. Manufacture of patient-specific vascular replicas for endovascular simulation using fast, low-cost method. *Sci Rep*, 2016, 15(6):39168.
- 47 Ratnam R, Quayle M, Crock J, et al. Challenges in creating dissectible anatomical 3D prints for surgical teaching. *J Anat*, 2019, 234(4):419–437.
- 48 Sanicola HW, Stewart CE, Mueller M, et al. Guidelines for establishing a 3-D printing biofabrication laboratory. *Biotechnol Adv*, 2020, 45:107652.
- 49 Ganguli A, Pagan-Diaz GJ, Grant L, et al. 3D printing for preoperative planning and surgical training: a review. *Biomed Microdevices*, 2018, 20(3):65–89.
- 50 Shapira A, Dvir T. 3D tissue and organ printing-hope and reality. *Adv Sci (Weinh)*, 2021, 8(10):2003751.
- 51 Liu H, Zhang H, Han W, et al. 3D printed flexible strain sensors: From printing to devices and signals. *Adv Mater*, 2021, 33(8):e2004782.
- 52 Janarthanan G, Shin HS, Kim IG, et al. Self-crosslinking hyaluronic acid-carboxymethylcellulose hydrogel enhances multilayered 3D-printed construct shape integrity and mechanical stability for soft tissue engineering. *Biofabrication*, 2020, 12(4):045026.
- 53 Berthiaume F, Maguire TJ, Yarmush ML. Tissue engineering and regenerative medicine: history, progress, and challenges. *Annu Rev Chem Biomol Eng*, 2011, 2:403–430.
- 54 Yang H, Sun L, Pang Y, et al. Three-dimensional bioprinted hepatorganoids prolong survival of mice with liver failure. *Gut*, 2021, 70(3):567–574.
- 55 Taebnia N, Zhang R, Kromann EB, et al. Dual-material 3D-printed intestinal model devices with integrated Villi-like scaffolds. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(49):58434–58446.
- 56 Kabir A, Datta P, Oh J, et al. 3D Bioprinting for fabrication of tissue models of COVID-19 infection. *Essays Biochem*, 2021, 65(3):503–518.

(收稿日期:2022–09–16)

(修回日期:2022–10–27)

(责任编辑:李贺琼)