

· 专题:双清论坛“虚拟生理人体与医学应用” ·

## 个性化虚拟手术研究综述\*

郝爱民<sup>1,2\*\*</sup> 郭全民<sup>3</sup> 李帅<sup>1,2</sup> 高阳<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室,北京 100191
2. 鹏城实验室虚拟现实院士工作室,深圳 518055
3. 新疆医科大学口腔医学院,乌鲁木齐 830011

**[摘要]** 基于虚拟人体的虚拟手术是虚拟现实、人工智能、生物医学、现代医学等多学科交叉的国际前沿技术。高质量的个性化虚拟手术需构建人体组织器官可交互的几何、物理和生理模型,仿真复杂手术过程,评价手术仿真操作对实际手术技能提升的作用。虚拟手术技术涉及多模态医学影像智能分析处理、个性化人体器官混合建模、复杂手术现象交互仿真、手术仿真评价等一系列前沿科学技术问题,可服务于手术机器人研发、远程协作手术、医疗器械研发等前沿领域技术的发展。未来,继续深入研究突破人体器官多维度多粒度虚实映射理论、个性化人体器官多尺度生理建模方法、人体器官生理信息模型库构建、智能三维虚拟人体交互仿真算法框架等关键技术问题,对提高我国虚拟人体领域的源头创新能力具有积极意义,对推动手术研究与转化的模式创新具有重要价值。

**[关键词]** 虚拟手术;医学影像处理;个性化人体建模;交互现象仿真;虚拟孪生人体

智慧医疗正在成为支撑我国全民健康事业创新发展的新技术手段。在国家大力推动“健康中国”战略发展以及全民抗击新冠疫情的大背景下,如何融合高新技术,加快智慧医疗技术体系建设,并在医生技能培训、临床诊断、手术治疗等环节安全应用,已成为既利当前又利长远的国家重大需求。作为下一代智慧医疗平台核心基础的虚拟人体与虚拟手术仿真技术,目前在多模态临床影像数据处理的适用性、协同性和高效性,数字人体器官混合建模的鲁棒性、可信性和可用性,以及手术仿真的效度评价、个性化应用、手术研究转化等方面还面临诸多挑战。

个性化虚拟手术仿真,有助于更为有效地分析患者临床数据,通过建立个性化可交互的人体器官模型,可为手术技能培训、计算机辅助诊断、手术方案规划预演、术中4D导航、机器人远程手术、远程跟踪随访等智慧医疗应用提供覆盖诊断、治疗、随



**郝爱民** 北京航空航天大学教授,博士生导师。虚拟现实/增强现实技术及应用国家工程实验室(北航)主任,虚拟现实技术与系统国家重点实验室(北航)副主任,工信部电子科技委委员,中国仿真学会理事,中国仿真学会医疗仿真专业委员会主任委员。长期从事虚拟现实中的建模理论与绘制方法的研究与应用工作。主持

国家自然科学基金重大/重点项目、国家重点研发计划、科技部重大仪器等国家级项目或课题10余项,发表包括IEEE汇刊在内的学术论文130余篇,获国家发明专利授权50余项。获得国家科技进步奖一等奖1项,国家科技进步奖二等奖1项,省部级奖一等奖3项、二等奖2项,全国创新争先奖1项,中国产学研合作创新奖2项,入选2006年度教育部新世纪优秀人才支持计划。

访等全诊疗流程的核心技术支撑。因此,虚拟手术关键技术的突破将引领虚拟现实、人工智能和医学影像学中一系列基础科学问题的研究,进一步提高我国在医工交叉领域的源头创新能力。

收稿日期:2021-12-31;修回日期:2022-03-14

\* 本文根据第296期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email:ham@buaa.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(62172437,6187070137)资助。

### 1 个性化虚拟手术面临的挑战

围绕虚拟人体建模和虚拟手术关键技术,从多模态复杂医学影像分析、人体器官形态和功能模型构建、手术操作过程实时交互仿真等基础理论,到个性化人体建模工具、手术分析与评价,仍存在诸多困难,亟需进一步研究。

(1) 医学图像种类繁多、成像原理和成像侧重点各异,各种具有一定相似性的柔性组织在不同个体中存在的位置、大小、形状都有较大差异,甚至同一种组织在不同个体中的表现也存在着差异,亟需进一步研究多模态医学影像精确融合与智能语义分析的理论与方法。

(2) 人体器官组织结构复杂,某些组织间的成像差异不明显、尺度跨度大,且其几何、物理、生理特征存在较强的关联性,在个性化手术仿真过程中需保证三者间的一致性,刻画其相互制约关系,亟需进一步研究医学影像数据驱动的个性化人体器官多维度高效建模方法。

(3) 人体器官的物理和生理活动一般都具有复杂的非线性特性,加之手术交互操作复杂,导致准确的物理和生理建模,以及对其进行实时精确求解成为难题,需进一步研究具有多材质耦合和非线性特性的复杂手术操作过程实时交互仿真技术。

个性化虚拟手术技术复杂性高、研制难度大、创新性突出。如何通过信息科学、认知科学、仿真科学和数字医学的多维度、深层次交叉融合,突破内蕴特征空间多模态医学影像高效分析处理、多源数据驱动的人体器官形态和功能模型构建、复杂手术现象实时交互仿真等关键技术问题,仍面临诸多困难与挑战。

### 2 虚拟手术关键技术研究进展

如图 1 所示,个性化虚拟手术需要基于多模态医学影像和物理/生理/病理等数据,在数字空间中构建形态和功能一体化的人体器官可交互模型,使参与者可利用真实手术器械在数字模型上开展带有力反馈的复杂手术操作,从而实现医疗手术全过程全要素仿真,具有风险和成本低,适用范围广、针对性强、便于精准评价和远程协同等优势。涉及多模态医学影像智能分析、个性化人体数字器官建模、复杂手术过程操作仿真三方面关键技术研究,手术仿真系统的研发与评价验证。个性化虚拟手术技术已成为虚拟现实与数字医学深度交叉融合的国际学术研究前沿。

#### 2.1 多模态医学影像智能分析处理

个性化手术仿真首先需要基于医学影像数据构建器官的矢量化三维模型,医学影像协同分析处理是个性化人体器官建模的重要依据。临床诊断与治疗过程中产生的多模态医学影像所蕴含的信息之间既有冗余又有互补。为了从多源数据中获取最大的信息量与关键特征,提高建模精度,多模态医学影像协同分析处理方法日益成为医学影像、人工智能、计算机图形学等领域的研究热点。多模态数据之间呈现截然不同的信号强度变化和解剖结构差异,使得多模态医学影像协同分析处理面临着如下难题:医学影像中的目标器官往往与周围组织高度粘连,且不同的成像模态所能清晰捕获的组织类型也不同,导致多类组织耦合的复杂器官结构及其个性化差异难以区分。如何高效进行医学影像特征提取并在此基础上精确表征多尺度内蕴结构,是多模态医学影像智能分析处理的关键。

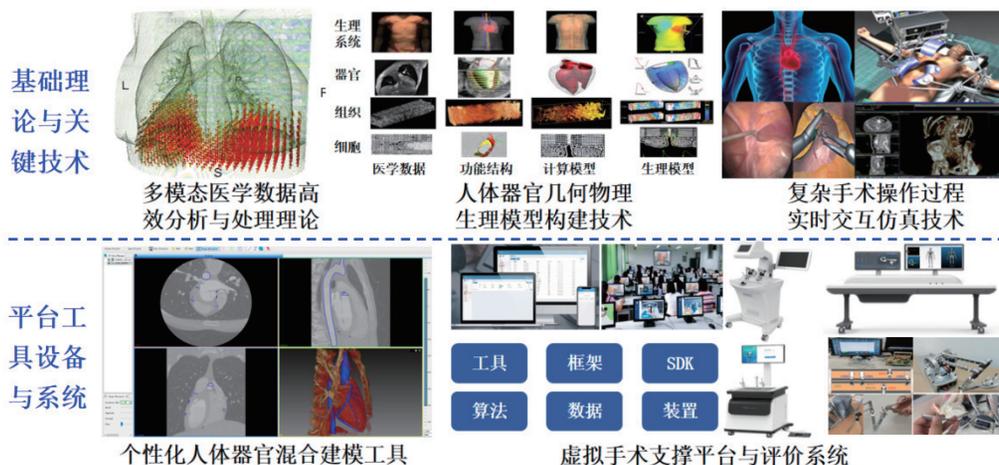


图 1 个性化虚拟手术关键技术构架示意图

智能化医学影像分析处理模型常需要依赖大量精心标注的医学图像,从复杂的三维医学体数据中准确提取依附于器官结构的稳定特征。为了解决这一问题,Cheng 等人<sup>[1]</sup>提出了一种自监督医学图像小样本语义分割框架,缓解了对强标注训练数据集的依赖。Quellec 等人<sup>[2]</sup>基于小样本学习框架进行了眼底医学图片中罕见病理的自动检测。此外,Roy 等人<sup>[3]</sup>利用小样本学习对于只有少量标注的切片数据进行了三维医学图像分割。为了减轻医生标注数据时繁琐的工作,医学小样本病例诊断还经常利用弱监督学习方法进行建模。Hui 等人<sup>[4]</sup>提出了一种基于部分点标注的弱监督分割框架,该框架包括两个学习阶段:在第一阶段设计了一个半监督学习策略来部分辅助结节位置探测模型,并利用未标注区域来增强结节探测抑制假阳性;第二阶段基于检测到的结节位置,以弱监督的方式训练分割模型,并利用互补信息从检测点中提取两种粗略标签,然后用来训练深度神经网络。近期,单样本医学数据分析受到了大家的广泛关注。Wang 等人<sup>[5]</sup>通过学习从标记数据集到未标记数据的对应关系来进行单样本学习,其中,具有分割标签的样本特征可以被转移到未标记数据上。He 等人<sup>[6]</sup>提出了一种新的深度互补联合模型,用于复杂场景的配准和小样本医学数据分割:通过嵌入一个扰动因子来增加形变的灵活性,从而保持增强数据的多样性,并在弱监督数据中突出对齐区域、抑制错位区域的干扰,实现了精细配准。

通过内蕴特征空间医学影像的多尺度协同分析处理,可在多模态医学影像融合时更好地保留稳定的跨尺度结构特征。Qin 等人<sup>[7]</sup>认为医学影像中的人体器官存在结构特征描述和外观特征描述,并提出了一个基于无监督学习和多模态结构表示的网络,可将不同模态的影像在结构域内进行处理与分析。Blendowski 等人<sup>[8]</sup>提出的形状编解码网络,可将影像编码到隐式空间进行迭代优化分析。Liu 等人<sup>[9]</sup>发现利用深度卷积神经网络的特征图在隐空间中进行分析,可更充分地利用多层特征图信息,并通过融合浅层特征蕴含的局部结构信息、深层特征蕴含的整体语义信息先验,提出了一种用于 3D 脑部核磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)图像配准的概率多层正则网络。Xu 等人<sup>[10]</sup>基于不同模态医学影像特征间的差异,融合 CT-to-MR、MR-to-MR 双流配准架构,提出了一种快速自适应的电子计算机断层扫描(Computed Tomography,

CT)、MRI 多模态医学影像配准方法。Wang 等人<sup>[11]</sup>提出使用拉普拉斯金字塔解码将不同模态影像特征映射到高维空间的方法,并使用自适应稀疏表示,在 MRI 与 CT 影像上取得了很好的融合效果。Chen 等人<sup>[12]</sup>则在每一次上采样时使用注意力机制将本层特征与高层特征相融合,进一步丰富不同尺度信息的表达能力。上述方法均寄希望于神经网络可以学到面向于数据处理与分析任务的特征表示,但存在可解释性差、缺少显式特征数学描述等问题。对于多模态医学影像,多尺度浅层结构特征图往往蕴含共用的描述信息,而目前的方法大多关注于深层的语义特征图而忽视了浅层结构信息,导致难以获得针对多模态数据处理与分析的特征描述。

## 2.2 人体器官几何、物理与宏观生理特性混合建模

在虚拟人体器官建模方面,近年来的研究工作主要围绕多尺度、多维度和多粒度人体器官几何、物理、生理混合建模,生理/病理动态机能行为自主演化与可交互仿真,人体生理孪生效用定量评价等方向展开。按照模型复杂度及难易程度,个性化人体器官混合建模可分为几何建模、物理建模与宏观生理特征混合建模等几个层面。

基于几何形态学和观测数据的器官运动仿真以构建与病人数据契合的个性化孪生模型为首要目标。法国飞利浦研究院的 Prakosa 等人<sup>[13]</sup>基于心脏机电模型和真实临床 4D 图像序列合成了心脏图像时间序列。法国国家信息与自动化研究所的 Duchateau 等人<sup>[14]</sup>提出了一种基于真实健康数据序列合成病理性心脏序列的方法。德国西门子公司的 Heimann 等人<sup>[15]</sup>利用辨别学习方法来定位 X 射线图像中的经食管超声心动图传感器,可从传感器单个体积图像中自动生成所需的训练数据,从而避免了手动标记。ProEGAN-MS 模型<sup>[16]</sup>则通过 GAN 实现了对心电信号的补足。由于刻画生理生化反应机制的复杂性较高,上述方法均以机器学习和数据为基础,以“黑盒”形式构建出要素与现象的联系,这也提供了一种低成本的研究方法。

人体组织器官物理的物理建模在几何模型的基础上,进一步引入简化的物理动力学模型,以实现三维人体器官功能仿真与自主演化。宾夕法尼亚州立大学的 Hao 等人<sup>[17]</sup>针对主动脉肿瘤生长问题,采用任意欧拉拉格朗日(Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)法与有限元法(Finite Element Method, FEM)建立了一个多尺度流固耦合(Fluid-structure Interaction, FSI)模型,以定量预测心血管环境中的

动脉瘤风险。该模型涉及两个时间尺度:以秒为单位的血流—动脉壁相互作用尺度;以年为单位的腹主动脉肿瘤(Abdominal Aortic Aneurysm, AAA)生长模型。该模型与腹主动脉肿瘤患者的历史三维CT数据进行对比,其预测处于合理范围内。罗彻斯特理工学院的 Alawad 和 Wang 建立了一个数据驱动模型<sup>[18]</sup>,该模型根据 12 导联心电图(Electrocardiograph, ECG)定位心室激活的来源。由于患者个体之间存在巨大生理差异,因此训练数据必须通过在体测量方法获得。西门子医疗的 Meister 等人<sup>[19]</sup>建立了一套基于深度学习加速有限元法的模型,用于生物力学中复杂软组织形变计算。复旦大学的 Zhu<sup>[20]</sup>等人通过构建有限元心室模型,在模型的心肌分割、局部特异性等物理属性上添加了约束。德国马克思普朗克智能系统研究所的 Kim 等人<sup>[21]</sup>使用数据驱动的方法构建了人体软组织动画。Duriez 等人<sup>[22]</sup>在软组织模型上实现了尖锐物体与柔体的交互仿真。东京大学的 Kariya 等人<sup>[23]</sup>建立了一个基于多尺度多物理场的个性化先天性心脏病的心脏模型,成功再现了右心室病理生理学特征,用于手术期病人状态预测。

在几何、物理模型基础上融合生理生化特性的可交互混合仿真模型主要有两大类方法:一类是自下而上的方法,通过构建一个含有所有已知微观生理生化反应的集合,并用一些临床数据提取的参数对每一个特异性组织、器官设定反应约束,从而构建起一个完备、复杂的多层次、多维度生理生化模型;另一类则是鉴于人体生理生化反应的复杂性,认为难以清晰理解每一层的反应机理,因此主要通过神经网络或者数字孪生的方法,自上而下构建高通量模型<sup>[24]</sup>,再根据临床数据,反推出各种参数的生理意义。洛桑联邦理工学院的 Quarteroni 等人<sup>[25]</sup>建立了一个多尺度多物理场心脏模型,将电生理学、组织力学、流体力学特征统一到全心脏模拟的数学模型中。马斯特里赫特大学 Shahmohammadi 等人提出了一种二自由度的闭环心血管系统模型<sup>[26]</sup>,从而实时模拟了第一心音和第二心音的产生。实验结果表明,该心血管系统模型与真实心音信号具有较高的相似性。奥克兰大学的 Hunter 等人<sup>[27]</sup>介绍了虚拟欧洲生理人计划(Virtual Physiology Human, VPH, 又称 Physiome Project),该计划由国际生理科学联盟(IUPS)在 1997 年发起,旨在“应用计算机模拟生物过程,合成从分子到细胞、组织、器官的定量生物学知识”。

### 2.3 视—力觉一致的复杂手术操作仿真

为实现逼真度高、交互性强的手术操作模拟,虚拟手术需要对虚拟人体和虚拟手术器械之间的交互进行建模仿真,包括虚拟器官在虚拟手术器械作用下的运动、形变以及交互过程产生的力反馈。虚拟手术三维场景中包含刚体(手术钳,手术刀,手术针)、柔体(肌肉脂肪、手术线等)、流体(血流和冲洗液)以及其他多材质耦合物体。有限元法是一种广泛应用的柔体变形仿真方法<sup>[28]</sup>,然而该方法需要构建每个时间步长的刚度矩阵,这是一个相当耗时的步骤,当涉及拓扑更新时,会使得整个线性系统矩阵变得十分复杂。在一些对实时性要求更高的手术模拟场景,基于位置的动力学(Position-based Dynamics, PBD)方法有更广泛的应用<sup>[29]</sup>,该方法首先计算物体不受约束时的运动,然后再用约束来更新物体位置。PBD 具有实时性、无条件稳定性等优点,可用来对布料、绳子、刚体、柔体、流体等进行建模。在物体之间的交互(碰撞,摩擦等)建模方面, Jiang 等人<sup>[30]</sup>和 Mahvash 等人<sup>[31]</sup>将手术针沿着水平方向按一定的速度插入到聚乙烯醇材料中,利用传感器记录受力情况,从材料力学角度观察缝合过程中物体受力与变形之间的关系,并根据这个关系来实时的计算反馈力。Christian Duriez 等人<sup>[32]</sup>基于有限元法对手术针和柔体的交互行为进行了耦合。首先,他们分别对手术针和柔体进行无约束的位置更新,之后再碰撞检测产生耦合约束,形成线性互补(Linear Complementarity Problem, LCP)的线性方程组,利用高斯—赛德尔求解该 LCP 方程组。在此过程当中,需要在每次迭代步骤内计算 Delassus 算子(一个巨大的稀疏矩阵)的逆,这个过程较为耗时。

### 2.4 虚拟手术系统

现有手术实践高度依赖尸体、硅胶模型、动物和志愿者,成本高、风险大、针对性差、定量评价难。虚拟手术是解决上述问题的关键突破口。基于可交互可演化虚拟生理人体的虚拟手术相比于传统的依靠实体患者的新型手术研发模式,在降低手术风险、避免伦理道德问题等多方面具有显著优势,是近年来医工交叉领域的重点研究内容<sup>[33]</sup>。具有动态、可交互、可演化等特性的虚拟生理人体能够刻画真实手术过程中人体器官、组织的行为表现,可用于模拟各类复杂的手术操作。特别地,个性化虚拟生理人体可有效描述病例的个体化差异,用于临床手术方案仿真与推演,有助于实现针对特定患者的精准诊疗,

是手术仿真领域未来的研究与发展方向。

在虚拟手术仿真系统相关研究方面,美国、以色列、瑞典等国家的研究起步较早,目前已有成熟的商业产品投入使用。Satava 等人<sup>[34]</sup>于 1993 年提出一种基于虚拟人体的腹腔镜手术仿真系统,可用于解剖教学与手术流程培训。尽管受限于当时的显示技术,手术仿真系统的视觉逼真度较低,但基于解剖学知识建立的高精度虚拟器官模型具有真实感与可交互性,为基于虚拟生理人体的虚拟手术仿真奠定了基础。Cotin 等人<sup>[35]</sup>于 2000 年首次提出了一种血管介入手术仿真系统,仿真系统包括人体心血管系统的几何模型、血液动力学模型,能够模拟介入导管在心血管中的运动以及血管造影等介入治疗过程,可用于介入手术训练。为了复现医生在使用精密手术器械对人体器官进行触碰、感知、操作的情境,虚拟手术仿真系统应具备根据虚拟器官的形变提供实时力反馈的能力<sup>[36]</sup>。Li 等人<sup>[37]</sup>提出一种个性化心血管介入虚拟手术仿真系统,该仿真系统以患者临床 CT、ECG 数据作为输入,可快速生成个性化虚拟人体以及介入手术三维场景,具有真实手术器械追踪与力反馈模块,能够检测用户对真实手术器械进行的操作,并能够利用检测结果在虚拟场景中对手术器械以及人体器官进行建模仿真并提供实时力反馈。Pan 等人<sup>[38]</sup>使用基于位置的动力学方法对人体器官进行动力学建模,提出了一种具有实时力反馈的胆囊切除术手术仿真系统,该仿真系统已应用于腹腔镜手术模拟训练,如图 2 所示。用户测试与专家验证结果表明该手术仿真系统相比于桌面式模拟器可以提供更好的用户体验,个性化虚拟人体建模方法的精度与效率满足手术预演的需求,手术仿真系统可以应用于心血管介入手术训练与手术预演。同时,基于虚拟现实的手术模拟器可以从多个方面记录受训者的训练过程,并可采用多维度评估标准对受训者的手术技能进行全面考核和评估<sup>[39]</sup>。已有的相关研究验证了使用手术仿真系统

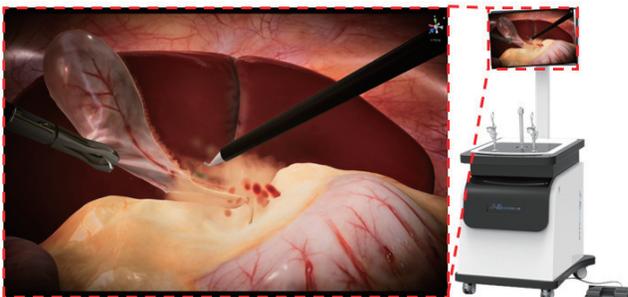


图 2 腹腔镜手术模拟系统<sup>[38]</sup>

或手术模拟器可以训练获得例如切割、缝合等基础手术技巧<sup>[40, 41]</sup>,能够缩短医生的学习曲线,促进在真实手术环境中的训练效果。

### 3 个性化虚拟手术的前景展望

以虚拟现实、人工智能、人机交互、现代医学等技术为支撑,建立虚拟人体并开展个性化虚拟手术研究,可实现人体从微观到宏观的结构和功能的数字化仿真,完整呈现组织器官的形态与功能。未来,个性化虚拟手术领域技术发展方向包括:从个性化几何形态为主的三维建模到个性化器官混合建模,从几何物理与宏观生理到几何物理与多尺度生理,从可视精度的物理仿真到器官生理机能仿真,从脚本化的器官动态行为到器官行为的自主演化,从定性力觉反馈估算到定量的精确力触觉反馈,从以手术仿真为主的应用到医学医药转化的支撑平台。实现上述技术和应用的发展,需要在以下几方面个性化虚拟手术的技术发展方向上进行科研攻关。

#### 3.1 个性化虚拟手术的未来研究重点

如图 3 所示,基于现有个性化虚拟手术研究,未来应深入开展虚拟人体数字孪生建模技术研究,需攻关基础理论和关键技术包括:

(1) 突破融合机能关系约束的器官活性结构矢量化建模方法、时空生理数据驱动的个性化人体器官 4D 重建方法、生理系统数字孪生的多尺度混合建模方法等,构建具有多尺度特性的矢量化器官生理信息模型库,为各类医学仿真提供基础数据支持和形式化的先验知识;

(2) 建立多源生理数据信息融合及虚实双向数据映射理论,综合互补利用高通量、多模态、低介入的生物信息采集手段动态获取高质量属性数据,保

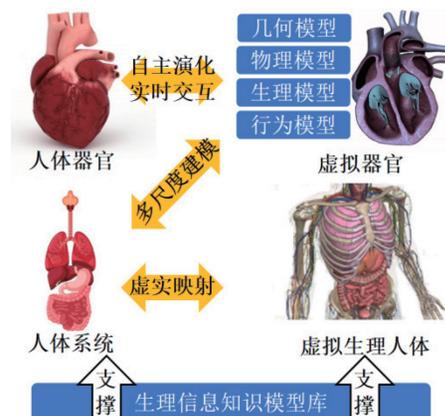


图 3 个性化虚拟手术未来关键技术示意图

证这些交互数据的虚实同步映射,并与上述属性数据实时互通共融,进而实现虚实交互映射模型构建;

(3) 以人体器官为研究对象建立生理孪生多尺度建模理论,使计算机能够对这些数据进行内蕴特征提取、高效存储、随机访问、并保证在跨尺度交互作用时实时联动更新,为其他复杂生理系统的多尺度建模仿真提供理论基础;

(4) 形成从几何形态、物理模型、生理过程仿真到微观反应、宏观现象、全局交互仿真的可自主智能演化与实时交互器官动态仿真算法框架,为各类医学应用提供新概念仿真手段和逼真呈现的基础算法支撑。

### 3.2 个性化虚拟手术技术应用前景

在实现上述创新研究的基础上,个性化虚拟手术将为手术机器人研发、远程协同手术、新概念医疗器械研发提供更有力的技术支撑。

#### 3.2.1 手术机器人研发与测试

虚拟手术技术和手术机器人相结合,基于个性化虚拟人体和虚拟手术在数字化的信息空间开展手术相关的手术研究与机器人测试验证,能够充分发挥可交互人体器官三维模型及实时人机交互技术优势,通过数据驱动和物理生理仿真方法,灵活设置不同疾病下人体器官的形态和功能特性,以及不同手术操作下的交互响应,定性定量相结合地开展更为精准的仿真测试<sup>[42]</sup>,缩短产品周期,避免伦理风险,可快速提升手术机器人研发与产品转化水平。

#### 3.2.2 远程协同手术

通过结合虚拟人体建模、个性化虚拟手术和人工智能技术,可高效构建包含人体器官三维几何/物理/宏观生理特征的高精度可交互模型以及各类医疗器械三维模型的虚拟场景,并利用5G技术在线实时逼真呈现,从而为远程手术操作者提供手术环境和手术对象信息,辅助制定可实时交互的临床手术操作。同时,手术实施团队所有成员可协同开展手术突发情况预演和方案对比,反复优化手术流程和不同角色的手术配合,充分考虑各种并发症等应急策略,确定最佳手术方案,保证手术质量,降低手术风险。

#### 3.2.3 新概念医疗器械研发

现有的以病人、尸体和动物标本为操作对象的手术器械验证和技能培模式已难以适应医疗器械研发和技术进步的速度,迫切呼唤科技进步推动下

的新型手术器械验证模式的创新。虚拟人体和虚拟手术可以模拟活体组织的各种几何、物理及生理特征,为手术器械(如手术刀,手术钳等)提供一个具有真实感和沉浸感的模拟试验环境<sup>[42, 43]</sup>,结合实时力觉反馈,使得手术器械可以近似反映出实际手术中的手感和交互效果,从而在保证器械操作效果和效率的同时,大幅度降低测试成本和风险。同时,基于虚拟手术的器械测试,还可以减少研发者和测试人员在危险环境如X射线下的暴露时间,改善操作流程。因此,作为新型手术器械的实验靶场,个性化虚拟手术具有广阔的应用前景。

## 4 总 结

个性化虚拟手术仿真技术是支撑现代医学研究与转化、临床方案规划与预演、医学教育与培训模式变革的新型信息基础平台。现有研究工作在多模态医学影像智能分析处理、人体器官几何、物理与宏观生理特性混合建模、视-力觉一体的复杂手术操作仿真等技术领域取得良好进展,展现了个性化虚拟手术技术在技能培训、手术方案规划预演、术中导航与术后量化评价等方面的重要应用价值。未来,围绕数字孪生人体建模与仿真方向,突破人体器官多维度多粒度虚实映射理论、个性化人体器官多尺度生理建模方法、人体器官生理信息模型库构建、智能三维虚拟人体交互仿真算法框架等关键科学技术问题,面向手术机器人研发、远程手术、新概念医疗器械研发等重大应用继续深入虚拟手术关键技术研究,对促进智慧医疗体系建设,服务“健康中国”战略目标具有积极意义。

## 参 考 文 献

- [1] Ouyang C, Biffi C, Chen C, et al. Self-supervision with superpixels: training few-shot medical image segmentation without annotation. *Computer Vision-ECCV 2020*, 2020: 762—780.
- [2] Quéllec G, Lamard M, Conze PH, et al. Automatic detection of rare pathologies in fundus photographs using few-shot learning. *Medical Image Analysis*, 2020, 61: 101660.
- [3] Guha Roy A, Siddiqui S, Pölsterl S, et al. ‘Squeeze & excite’ guided few-shot segmentation of volumetric images. *Medical Image Analysis*, 2020, 59: 101587.
- [4] Qu H, Wu PX, Huang QY, et al. Weakly supervised deep nuclei segmentation using partial points annotation in histopathology images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2020, 39(11): 3655—3666.

- [5] Wang SX, Cao SL, Wei D, et al. LT-net: label transfer by learning reversible voxel-wise correspondence for one-shot medical image segmentation. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020; 9159—9168.
- [6] He YT, Li TT, Yang GY, et al. Deep complementary joint model for complex scene registration and few-shot segmentation on medical images. *Computer Vision-ECCV 2020*, 2020; 770—786.
- [7] Qin C, Shi BB, Liao R, et al. Unsupervised deformable registration for multi-modal images via disentangled representations. *Information Processing in Medical Imaging*, 2019; 249—261.
- [8] Blendowski M, Bouteldja N, Heinrich MP. Multimodal 3D medical image registration guided by shape encoder-decoder networks. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2020, 15(2): 269—276.
- [9] Liu LH, Hu XW, Zhu L, et al. Probabilistic multilayer regularization network for unsupervised 3D brain image registration. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention-MICCAI 2019*, 2019; 346—354.
- [10] Xu Z, Luo J, Yan JP, et al. Adversarial uni- and multi-modal stream networks for multimodal image registration. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention-MICCAI 2020*, 2020; 222—232.
- [11] Wang ZB, Cui ZJ, Zhu Y. Multi-modal medical image fusion by Laplacian pyramid and adaptive sparse representation. *Computers in Biology and Medicine*, 2020, 123: 103823.
- [12] Chen XY, Zhang R, Yan PK. Feature fusion encoder decoder network for automatic liver lesion segmentation. 2019 IEEE 16th International Symposium on Biomedical Imaging, Venice, Italy. *IEEE*, 2019; 430—433.
- [13] Prakosa A, Sermesant M, Delingette H, et al. Generation of synthetic but visually realistic time series of cardiac images combining a biophysical model and clinical images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2013, 32(1): 99—109.
- [14] Kariya T, Washio T, Okada JI, et al. Personalized perioperative multi-scale, multi-physics heart simulation of double outlet right ventricle. *Annals of Biomedical Engineering*, 2020, 48(6): 1740—1750.
- [15] Heimann T, Mountney P, John M, et al. Real-time ultrasound transducer localization in fluoroscopy images by transfer learning from synthetic training data. *Medical Image Analysis*, 2014, 18(8): 1320—1328.
- [16] Yang HX, Liu JH, Zhang LH, et al. ProEGAN-MS: a progressive growing generative adversarial networks for electrocardiogram generation. *IEEE Access*, 2021, 9: 52089—52100.
- [17] Hao WR, Sun PT, Xu JC, et al. Multiscale and monolithic arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for a hemodynamic fluid-structure interaction problem involving aneurysms. *Journal of Computational Physics*, 2021, 433: 110181.
- [18] Alawad M, Wang LW. Learning domain shift in simulated and clinical data; localizing the origin of ventricular activation from 12-lead electrocardiograms. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2019, 38 ( 5 ): 1172—1184.
- [19] Meister F, Passerini T, Mihalef V, et al. Deep learning acceleration of Total Lagrangian Explicit Dynamics for soft tissue mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 358: 112628.
- [20] Zhu HL, Jin L, Zhang JY, et al. Optimization of rabbit ventricular electrophysiological model and simulation of synthetic electrocardiogram. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 2021, 21(1): 2150001.
- [21] Kim M, Pons-Moll G, Pujades S, et al. Data-driven physics for human soft tissue animation. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 1—12.
- [22] Duriez C, Guébert C, Marchal M, et al. Interactive simulation of flexible needle insertions based on constraint models. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2009*, 2009; 291—299.
- [23] Kariya T, Washio T, Okada JI, et al. Personalized perioperative multi-scale, multi-physics heart simulation of double outlet right ventricle. *Annals of Biomedical Engineering*, 2020, 48(6): 1740—1750.
- [24] Allen A, Siefkas A, Pellegrini E, et al. A digital twins machine learning model for forecasting disease progression in stroke patients. *Applied Sciences*, 2021, 11(12): 5576.
- [25] Quarteroni A, Lassila T, Rossi S, et al. Integrated Heart—Coupling multiscale and multiphysics models for the simulation of the cardiac function. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2017, 314: 345—407.
- [26] Shahmohammadi M, Luo HX, Westphal P, et al. Hemodynamics-driven mathematical model of first and second heart sound generation. *PLoS Computational Biology*, 2021, 17(9): e1009361.
- [27] Hunter P. The virtual physiological human; the physiome project aims to develop reproducible, multiscale models for clinical practice. *IEEE Pulse*, 2016, 7(4): 36—42.
- [28] Smith B, De Goes F, Kim T. Stable neo-hookean flesh simulation. *ACM Transactions on Graphics*, 2018, 37(2): 1—15.
- [29] Gao Y, Li S, Qin H, et al. An efficient FLIP and shape matching coupled method for fluid-solid and two-phase fluid simulations. *The Visual Computer*, 2019, 35 ( 12 ): 1741—1753.
- [30] Jiang S, Li P, Yu Y, et al. Experimental study of needle-tissue interaction forces; effect of needle geometries, insertion methods and tissue characteristics. *Journal of Biomechanics*, 2014, 47(13): 3344—3353.
- [31] Mahvash M, Dupont PE. Mechanics of dynamic needle insertion into a biological material. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 2010, 57(4): 934—943.
- [32] Duriez C, Guébert C, Marchal M, et al. Interactive simulation of flexible needle insertions based on constraint models. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2009*, 2009; 291—299.

- [33] 韩少山, 宋涛, 姚英民, 等. 三维可视化及虚拟手术技术在住院医师肝脏手术规范化培训中的作用. *中国医学教育技术*, 2021, 35(5): 641—646.
- [34] Satava RM. Virtual reality surgical simulator. *Surgical Endoscopy*, 1993, 7(3): 203—205.
- [35] Cotin S, Dawson SL, Meglan D, et al. ICTS, an interventional cardiology training system. *Studies in Health Technology and Informatics*, 2000, 70: 59—65.
- [36] Basdogan C, De S, Kim J, et al. Haptics in minimally invasive surgical simulation and training. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2004, 24(2): 56—64.
- [37] Li S, Cui JH, Hao AM, et al. Design and evaluation of personalized percutaneous coronary intervention surgery simulation system. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2021, 27(11): 4150—4160.
- [38] Pan JJ, Yang YH, Gao Y, et al. Real-time simulation of electrocautery procedure using meshfree methods in laparoscopic cholecystectomy. *The Visual Computer*, 2019, 35(6): 861—872.
- [39] 高阳, 赵沁平, 周学东, 等. 虚拟现实技术在新医科人才培养中的作用及应用现状. *四川大学学报(医学版)*, 2021, 52(2): 182—187.
- [40] Derossis AM, Bothwell J, Sigman HH, et al. The effect of practice on performance in a laparoscopic simulator. *Surgical Endoscopy*, 1998, 12(9): 1117—1120.
- [41] Botden SMBI, Jakimowicz JJ. What is going on in augmented reality simulation in laparoscopic surgery? *Surgical Endoscopy*, 2009, 23(8): 1693—1700.
- [42] Pan JJ, Li RY, Yu DF, et al. Augmented Reality based Surgical Navigation for Percutaneous Endoscopic Transforaminal Discectomy. *VR Workshops 2021*: 454—455.
- [43] Yu P, Pan JJ, Wang ZX, et al. Cognitive load/flow and performance in virtual reality simulation training of laparoscopic surgery. *2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops*. Lisbon, Portugal. IEEE, 2021: 466—467.

## Survey of Researches on Personalized Virtual Surgery

Hao Aimin<sup>1,2\*</sup> Guo Quanmin<sup>3</sup> Li Shuai<sup>1,2</sup> Gao Yang<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191

2. Virtual Reality Academician Studio, Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055

3. College of Stomatology, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011

**Abstract** Surgery simulation based on virtual human modeling is an international frontier technology of virtual reality, artificial intelligence, biomedicine and modern medicine. High-quality virtual surgery requires the construction of geometric, physical, and physiological models on human tissues and organs that can interact, the simulation of complex surgical processes, and the effect evaluation about surgical simulation on the skill improvement. Virtual surgery technology involves a series of cutting-edge scientific and technological issues, such as multi-modal medical image intelligent analysis and processing, human organ hybrid modeling, visual-force consistent interactive simulation, and surgical evaluation. Virtual surgery technology can serve the development of surgical robot research and development, remote collaborative surgery, medical device development and soon. The development of virtual surgery technologies has positive significance of improving the source innovation ability related to the virtual human body. It has essential value of promoting surgical research and technological mode innovation.

**Keywords** virtual surgery; medical image processing; personalized human body modeling; interactive phenomenon simulation; digital twin human modeling

(责任编辑 吴征天)

\* Corresponding Author, Email: ham@buaa.edu.cn