

数字孪生驱动的手术智慧管理平台应用研究^{*}

宓林晖 袁骏毅 侯旭敏

(上海市胸科医院/上海交通大学医学院附属胸科医院 上海 200030)

〔摘要〕 目的/意义 利用信息化手段加强手术管理,提升医疗服务能力。方法/过程 以上海市胸科医院为研究对象,基于数字孪生技术构建手术智慧管理平台,通过物联网采集手术追溯数据,实现手术过程的质量监管。结果/结论 实证结果显示,患者CT定位等候时间、手术室平均接台时间明显缩短,手术预估时长的准确率显著提高,保证了手术环节的有序衔接,为手术室的智慧化转型提供参考依据。

〔关键词〕 手术追溯;数字孪生;手术质量

〔中图分类号〕 R-058 〔文献标识码〕 A 〔DOI〕 10.3969/j.issn.1673-6036.2023.11.014

Application Research of the Surgical Intelligent Management Platform Driven by Digital Twinning

MI Linhui, YUAN Junyi, HOU Xumin

Shanghai Chest Hospital/Shanghai Chest Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200030, China

〔Abstract〕 **Purpose/Significance** To explore the application of information technology to strengthen surgical management and improve medical service capacity. **Method/Process** Taking Shanghai Chest Hospital as the research object, a surgical intelligent management platform is built based on digital twinning, and the retrospective data of surgery is collected through the internet of things to realize the quality supervision of surgical process. **Result/Conclusion** The empirical results show that the waiting time of CT positioning and the average access time in the surgical room decreases significantly, and the accuracy rate of surgical estimated time is significantly improved, which ensures the orderly connection of surgical links, and provides references for the intelligent transformation of surgical room.

〔Keywords〕 surgical tracing; digital twinning; surgical quality

1 引言

数字孪生技术是综合运用物联网、大数据、人工智能等信息技术将真实世界中的物理实体镜像投射至虚拟空间中,通过虚实数据的双向传输与交

互,在虚拟空间中实现物理实体模型的仿真优化,并按需提供各类智能应用^[1]。数字孪生技术早期主要应用于航空航天、工业制造领域,近年来逐步推广到智慧城市、医疗等领域,受到业界广泛关注^[2]。阴艳超等^[3]研究指出,通过数字孪生技术构建的数字车间有助于动态分析车间运行情况,为优化生产资源调度、提高车间生产效率提供决策支持。手术涉及多环节、多部门、多资源、多人员的协作,是一项复杂的系统工程,也是医疗质量管理的重点关注内容。2021年出台的《关于推动公立医院高质量发展的要求》提出医疗机构应充分利用数字化技术,强化医疗卫生服务的内涵质量^[4]。国内

〔修回日期〕 2023-05-10

〔作者简介〕 宓林晖,硕士,中级工程师,发表论文19篇;通信作者:侯旭敏,博士,主任医师。

〔基金项目〕 上海市医院协会管理研究基金(项目编号:Q2022065);上海市徐汇区人工智能医疗院地合作项目(项目编号:2021-010)。

外医院通常已建成手术信息系统，实现手术记录、术中生命体征等资料登记。然而，手术追溯研究主要集中在手术器械、植入性耗材等方面，关于手术环节监管的研究较少^[5]。因此，本研究将数字孪生技术融入手术管理，结合实际业务需求建立手术智慧管理平台，优化手术流程、加强质量控制，为其他医疗机构加强手术过程质量监管提供借鉴参考。

2 围手术期患者转运流程

手术能力是衡量医院医疗水平的重要标准，手术资源需要统筹管理和动态规划。上海市胸科医院是一家以心肺疑难手术为特长的三级甲等专科医院，2022 年手术量 2.23 万例。随着手术量逐年攀升，患者术前等候时间长、医疗资源紧张的问题日渐突出。研究表明，在医院复杂的工作环境中，空间感知服务能够提高医疗流程运行效率^[6]。2022 年 5 月医院实施物联网覆盖，采用无线射频识别技术（radio frequency identification, RFID）实现手术患者佩戴感应式手环信息的追溯。依托 RFID 采集患者实时位置，记录手术环节时间点。物联网技术带来了以下变化：一是患者进入手术室扫描腕带和手环定位，双重身份确认模式保障转运交接安全；二是改变既往手术室护士人工记录方式，家属等候区自动更新显示手术即时状态；三是病区护士及时掌握即将返回的术后患者，合理进行术后护理工作准备，见图 1。

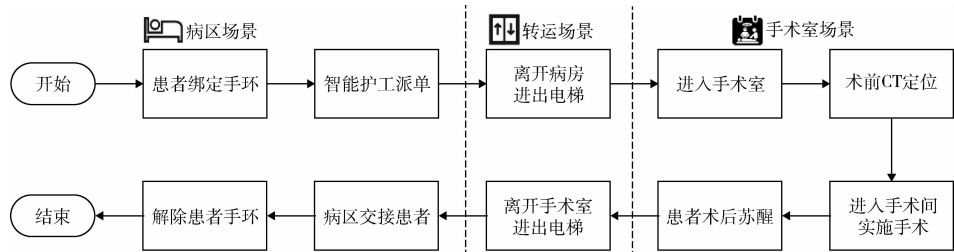


图 1 物联网全面覆盖的手术患者转运流程

3 数字孪生技术应用关键方法

3.1 手术信息化建设常见问题

手术信息化涉及的软硬件众多，平面化数据管理存在范畴交叉、信息互斥等现象。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》^[7]提出，要运用数字技术扩展应用场景，促进公共服务的创新。手术信息化建设通常面临两类问题：一是顶层设计管理理念滞后，关键指标项定义不明晰，全局层面分析手段欠缺；二是数据融合互通能力不足，涉及手术、麻醉等多套异构软件，对接难度较大^[8]。

3.2 数字孪生技术在手术信息化建设中的应用

数字孪生的逻辑模型包括真实世界、虚拟空间、驱动指令和数据链路，涵盖孪生数据库、业务

院，2022 年手术量 2.23 万例。随着手术量逐年攀升，患者术前等候时间长、医疗资源紧张的问题日渐突出。研究表明，在医院复杂的工作环境中，空间感知服务能够提高医疗流程运行效率^[6]。2022 年 5 月医院实施物联网覆盖，采用无线射频识别技术（radio frequency identification, RFID）实现手术患者佩戴感应式手环信息的追溯。依托 RFID 采集患者实时位置，记录手术环节时间点。物联网技术带来了以下变化：一是患者进入手术室扫描腕带和手环定位，双重身份确认模式保障转运交接安全；二是改变既往手术室护士人工记录方式，家属等候区自动更新显示手术即时状态；三是病区护士及时掌握即将返回的术后患者，合理进行术后护理工作准备，见图 1。

软件、使用角色、功能模块和应用场景^[9]。通过 RFID 传感器、麻醉系统、移动手持终端转运交接记录等实时采集真实世界中患者手术转运期间的动态过程数据，形成底层数据链路。在此基础上，结合转运事件、交接要求、业务时间线等驱动指令，对数据进行清洗、归类、关联、适配与融合，从而在虚拟空间中复制患者手术转运全过程，保障真实世界与虚拟空间中患者状态的一致性和同步性，为后续应用落地提供更全面、准确的数据支撑。在应用方面，基于转运过程数据的智能分析，满足主刀医生、医务部门等各类角色的不同业务需求，如向主刀医生提供手术开台时间预测，便于其安排术前谈话及准备事宜；向医务部门提供转运各环节耗时、手术室忙闲状态等，为其优化手术流程提供决策支持。因此，将数字孪生技术应用于手术管理有助于实现手术流程的实时掌控和环节优化，提供创新的全局性分析框架和管理范式，见图 2。

场景的分层结构设计，数据库为 SQL Server 2016，由 2 台互为主备的业务数据库服务器和 4 台并行集群的应用服务器组成。平台无缝整合电子医嘱系统（computerized physician order entry，CPOE）、护理信息系统（nurse information system，NIS）等 6 套临床业务软件，通过 RFID 手环、移动手持终端等物联网设备采集数据，全量抽取复制到数据层，将多模态数据汇聚成多维度数据集。数字孪生层作为平台核心，具有数据存储、智能规则、公共接口 3 项功能。一是数据清洗和适配后，按类别进行数据元管理和建模，形成全镜像库。二是内嵌身份核查、节点提醒等智能规则引擎，保证逻辑内涵一致性。三是提供数据汇集、分析决策的公共标准接口服务，保障软件互联耦合度。场景应用层围绕手术实时状态，同步分发信息至物理显示屏和医护人员手机。同时，平台提供大数据分析功能，对手术关键指标实现智慧预测预警，见图 3。

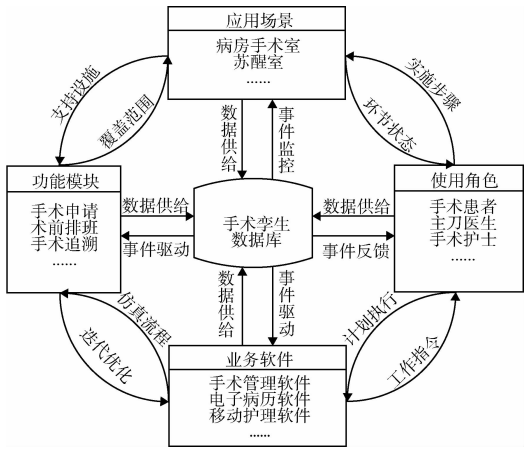


图2 手术信息化建设逻辑模型
(数字孪生驱动的视角)

4 技术架构和主要功能

4.1 平台技术架构

手术智慧管理平台采用软件、设施、数据、

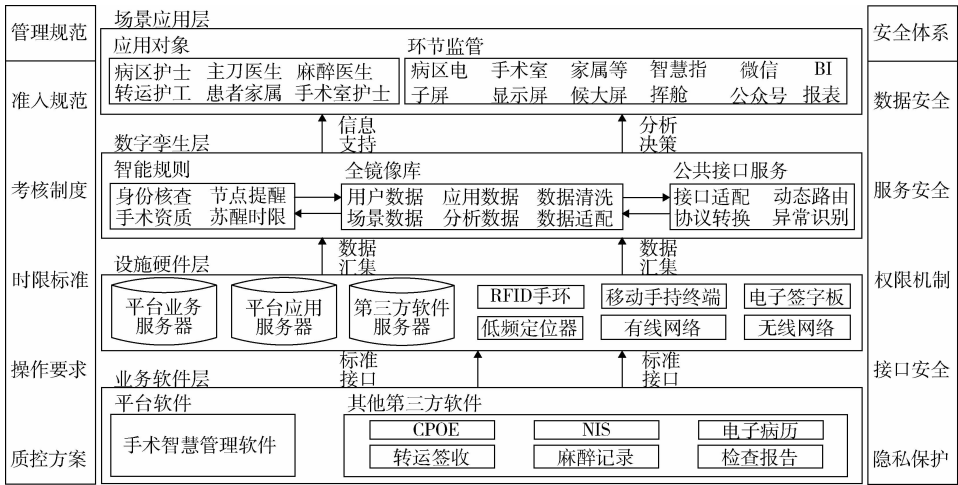


图3 手术智慧管理平台架构

4.2 主要功能

4.2.1 手环绑定与身份核查 患者择期手术当日，病区护士为患者佩戴定位手环，使用移动手持终端扫描腕带，将手术信息与手环进行绑定。患者经过沿途部署的物联网低频定位器时，轨迹数据被记录。手术室护士签收时扫描转运单，确认手环信号已到达指定位置。患者术后返回，病区护士解绑手环，浸泡消毒以便循环使用。护理部查询手环绑

定率，保证转运交接的医疗安全。

4.2.2 电子屏实时状态显示 根据手环位置信号，平台通过电子屏同步显示当前状态。患者进入手术室时，门口电子屏显示“房间占用”以及患者姓名和主刀医生，手术结束后显示“空闲中”。患者家属在等候区通过大屏得知患者手术进程，减轻其等候时的焦灼心理。患者离开苏醒区推出手术室时，病区护理大屏闪烁提醒术后患者即将返回，便于病区护士提前做好接床准备。

4.2.3 手术全程追溯记录 基于沿途部署的物联网和智能定位算法，平台精确描绘出患者全程网格化轨迹。在病区、转运电梯、手术室、CT定位室等10个关键位置，全程记录手环移动定位数据。位置点信号覆盖范围内设置2个定位器，分别执行进入和离开触发事件。平台智能解析位置点接收信号，待前序和后续位置确认后计入有效运行路线。

4.2.4 智能医护消息提醒 建立多元化智能规则知识库，保障医护人员及时知晓关键信息。知识库面向医生、护士、患者、医务管理4类对象，实现手术情况的实时及预测提醒。首台手术患者到达手术室时，主刀医生手机接收到提醒，确保手术准台率（首台手术准点率）。基于历史手术时长预测分析，病区护士知晓手术预计起止时间，保证环节衔接有序。

4.2.5 智慧管理指挥舱 利用孪生数据库的决策分析能力设立管理指挥舱电子屏，主要围绕环节管控和终末分析两方面对相关监测指标进行量化分析和智慧预警。电子屏中心区域高亮显示当日和1周内的重点关注指标，包括手术人次、手术室实时动态、接台时长等，左侧区域展示手环绑定情况、转运关键环节时长及手术排班情况，右侧区域则对手术室整体忙闲状况及重点预警信息进行展示，并且针对术后苏醒等超时限情况滚动预警显示个案。

5 应用效果和实证分析

5.1 应用效果

手术智慧管理平台于2022年9月投入使用，截至2023年2月底，记录分析18 571例手术全程数据。其中，以手术难度划分的三、四级手术占75.71%。为有效保障医疗质量，医院建立了手术患者手环佩戴考核奖惩制度，手环绑定率达到98.57%。作为数据汇集核心的孪生数据库，总存储容量673GB，建立了32张标准术语映射表，涉及

7个类别，包括患者信息、手术排班、手环信息、定位数据、麻醉信息、转运交接、手术室使用情况，以及53条智能提醒逻辑规则，服务接口日志约421万条。在医疗大数据信息技术赋能下，实现了手术环节的无缝衔接，保障医疗质量精细化管理。

5.2 实证分析

5.2.1 研究资料 选取手术智慧管理平台实施前后的手术情况进行对比，将2022年1—2月的手术患者纳入参照组，将2023年1—2月平台实施后的手术患者纳入研究组。样本范围设定为已实施手术、治疗过程不存在严重并发症且出院患者。参照组男性317例，女性624例，年龄 55 ± 19.4 岁；研究组男性256例，女性493例；年龄 57 ± 22.7 岁。两组样本在年龄、手术类型、切口等级等方面差异均无统计学意义，具有可比性。为简化分析且保证同质化，选取相同手术类型比对，排除个体原因导致的扰动性数据，纳排标准如下^[10]：胸腔镜下肺叶节段切除术的患者；收治病区为肿瘤外科、胸外科；排除术后出现严重并发症，转入重症监护室的患者；排除急诊等非择期手术。

5.2.2 统计学方法 使用SPSS 18.0对数据统计分析，两组样本相互独立，总体方差齐性且服从正态分布。对于时间间隔等计量资料，采用 t 检验；准确率等计数资料，采用非参数检验 χ^2 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义^[11]。

5.2.3 评价指标和结果 （1）CT定位等候时间。统计患者到达等待区域和进入CT定位室的时间差值，间隔越短表明排队等待做CT定位耗时越少，见表1。（2）平均接台时间。统计手术开始和上台手术结束的时间差值，间隔越短表明手术室资源使用效率越高，见表2。（3）手术预估时长准确率。统计手术患者离开至术后返回病区的时间间隔在标准范围的占比，比例越高说明转运、开刀、苏醒等全程环节越流畅，见表3。

表 1 两组 CT 定位等候时间比较 ($\bar{x} \pm s$)

组别	手术代码	手术名称	胸外科		肿瘤外科	
			例数	CT 定位等候时间 (分钟)	例数	CT 定位等候时间 (分钟)
参照组	32. 3000	胸腔镜肺叶节段切除术	599	16. 29 $\pm$ 4. 13	342	13. 98 $\pm$ 3. 46
研究组	32. 3000	胸腔镜肺叶节段切除术	491	10. 21 $\pm$ 1. 75	258	11. 77 $\pm$ 2. 19
t				32. 63		9. 54
P				<0. 001		<0. 001

表 2 两组平均接台时间比较 ($\bar{x} \pm s$)

组别	手术代码	手术名称	胸外科		肿瘤外科	
			例数	平均接台时间 (分钟)	例数	平均接台时间 (分钟)
参照组	32. 3000	胸腔镜肺叶节段切除术	599	84. 53 $\pm$ 19. 32	342	51. 89 $\pm$ 16. 38
研究组	32. 3000	胸腔镜肺叶节段切除术	491	33. 23 $\pm$ 11. 47	258	44. 61 $\pm$ 14. 64
t				54. 34		5. 73
P				<0. 001		<0. 001

表 3 两组手术预估时长准确率 (χ^2)

组别	手术代码	手术名称	胸外科		肿瘤外科	
			例数	预估时长准确率 [n (%)]	例数	预估时长准确率 [n (%)]
参照组	32. 3000	胸腔镜肺叶节段切除术	599	467 (77. 96)	342	277 (80. 99)
研究组	32. 3000	胸腔镜肺叶节段切除术	491	439 (89. 41)	258	237 (91. 86)
χ^2				24. 38		13. 27
P				<0. 001		<0. 001

6 讨论

6.1 应用智慧系统管理有利于优化手术质量的闭环管控

本研究围绕手术过程数据，建立了手术流程监控方法。智慧管理平台通过对病房、手术室、苏醒区等 10 个关键位置的数据采集，实现了 40 项监测指标的环节管控。既往由于技术手段缺失，手术管理偏重于终末质量分析^[12]。在数字孪生技术加持下，实施精细化环节管理可以有效减少医疗环节差错。本研究结果显示，观察组手术预估时长准确率显著高于对照组 ($P < 0. 001$)，医疗管理部门能够通过该系统追溯手术全程数据，迅速掌握环节堵

点，及时采取改进措施，保障术前、术中和术后的质量闭环管理。

6.2 信息实时共享保障手术环节的通畅性和医患知晓度

物联网手环作为移动数据载体，汇集手术流程全生命周期数据至孪生数据库，为手术参与各方提供了通畅的信息获取渠道。据统计，2023 年 2 月手术室准台率达到 84. 23%。平台根据测算的手术预计起止时间发出提醒，便于医生术前谈话等准备工作^[13]。本研究结果显示，观察组的 CT 定位等候时间显著短于对照组 ($P < 0. 001$)，表明通过环节的紧凑衔接，保障了手术精细化排程，减轻患者术前等候焦虑心理。通过工作站、手机、显示大屏等多

种终端，医患双方均可便捷知晓手术台次、手术状态等实时情况，住院患者满意度达到 98.35%。

6.3 多维度数据互联和挖掘提高手术资源利用率

医院由规模扩张向提质增效转型，必须实现手术资源高效利用。手术具有流程复杂、管理难度大等特点，既往手术分析往往存在滞后性问题^[14]。本研究利用数字孪生技术实现真实世界手术全程数据实时采集和智能分析，使医院管理者能够及时、全面地掌握手术运行情况。本研究结果显示，观察组的平均接台时间显著短于对照组（ $P < 0.001$ ），表明通过大数据分析和决策，有助于医院更好地协调手术资源，提高手术室、麻醉科工作效率，加快手术室运营周转速率，提升医疗服务能级。未来，将进一步扩大数据采集范围，纳入手术设备、术中病理等业务，持续完善手术管理指标体系，助推医院手术服务高质量发展。

参考文献

1 陈玉倩，侯晓慧，朱碧帆，等. 数字孪生在精准医疗应用中的研究进展和挑战 [J]. 海军军医大学学报, 2023, 44 (1): 97 - 101.

2 陶飞，刘蔚然，张萌，等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (1): 1 - 18.

3 阴艳超，冯嘉胜，易斌，等. 面向流程制造的数字孪生车间可视化监控系统研究 [EB/OL]. [2023 - 04 - 26].

<https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1006>.

4 刘玉霞. 数字经济时代下的智慧医院发展分析 [J]. 医学信息学杂志, 2022, 43 (2): 52 - 56.

5 余云红，刘洋，赵体玉，等. 我国手术室工作效率现状及提升策略研究进展 [J]. 中国临床护理, 2021, 13 (10): 650 - 653.

6 GALETSI P, KATSALIAKI K. Big data analytics in health: an overview and bibliometric study of research activity [J]. Health information and libraries journal, 2020, 37 (1): 5 - 25.

7 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. [2023 - 04 - 16]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

8 许琴，邱燕，朱涛. 基于数据融合技术的手术信息管理系统 [J]. 微型电脑应用, 2020, 36 (2): 156 - 159.

9 张晶. 基于数字孪生技术的图书馆空间再造研究 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38 (2): 138 - 140.

10 高瞻，高艳，韩玖阳，等. 以诊疗数据挖掘为指导的三甲医院发展策略研究 [J]. 医学信息学杂志, 2022, 43 (2): 43 - 47.

11 袁骏毅，沈颖洁，潘常青. 医院互联网健康咨询系统应用研究 [J]. 医学信息学杂志, 2022, 43 (1): 73 - 77.

12 王玲英. 精细化管理对手术室护理质量及手术效率的影响分析 [J]. 中国社区医师, 2022, 38 (27): 111 - 113.

13 高誉峰，王颖，徐聘，等. 提高手术室首台择期手术准时开台方法的探索 [J]. 中国卫生标准管理, 2022, 13 (1): 22 - 27.

14 许辉，肖明，孙咏梅，等. 全闭环转运信息系统在手术患者流转安全的应用 [J]. 中国医药指南, 2022, 20 (30): 1 - 4.

(上接第 51 页)

31 CROCE P, RICCI L, PULITANO P, et al. Machine learning for predicting levetiracetam treatment response in temporal lobe epilepsy [J]. Clinical neurophysiology, 2021, 132 (12): 3035 - 3042.

32 HAKEEM H, FENG W, CHEN Z, et al. Development and validation of a deep learning model for predicting treatment response in patients with newly diagnosed epilepsy [J]. JAMA neurology, 2022, 79 (10): 986 - 996.

33 LUCKETT P H, MACCOTTA L, LEE J J, et al. Deep learning resting state functional magnetic resonance imaging lateralization of temporal lobe epilepsy [J]. Epilepsia, 2022, 63 (6): 1542 - 1552.

34 SINCLAIR B, CAHILL V, SEAH J, et al. Machine learning approaches for imaging - based prognostication of the outcome of surgery for mesial temporal lobe epilepsy [J]. Epilepsia, 2022, 63 (5): 1081 - 1092.

35 YOSSOFZAI O, FALLAH A, MANIQUIS C, et al. Development and validation of machine learning models for prediction of seizure outcome after pediatric epilepsy surgery [J]. Epilepsia, 2022, 63 (8): 1956 - 1969.

36 詹世鹏，马攀，刘芳. 机器学习在治疗药物监测与个体化用药中的应用 [J]. 中国药房, 2023, 34 (1): 117 - 121, 128.

37 LEE, E J, KIM Y H, KIM N, et al. Deep into the brain: artificial intelligence in stroke imaging [J]. Journal of stroke, 2017, 19 (3): 277 - 285.