

人工智能在医疗机构感染防控行为管理领域的应用

陆群 王虹 倪凯文 童彤 金丁萍

浙江大学医学院附属第二医院感染管理科, 杭州 310009

通信作者: 金丁萍, Email: 2196012@zju.edu.cn

基金项目: 浙江省自然科学基金(LQ23G030008); 浙江省医药卫生科技计划项目(2024KY081)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2025.05.027

自 21 世纪以来, SARS、埃博拉、COVID-19 等新发突发传染病频发爆发, 给医院应急管理带来了巨大的挑战^[1-3]。人工智能(artificial intelligence, AI)技术目前正深刻变革临床诊疗、患者服务、科研教学、和感染预警等医疗领域^[4]。然而, AI 在感染防控行为管理中的应用研究仍然较少^[5]。已有证据表明, 利用 AI 管理医务人员的感染防控行为, 有助于预防疾病传播, 降低职业暴露风险^[6]。面对未来可能再次爆发的公共卫生事件, 开发精准的监测预警系统, 并利用 AI 技术赋能感染防控行为管理, 已成为提高医疗机构感染防控水平的新动力。本文采用 Arksey 和 O'Malley^[7]、Levac 等^[8]提出并细化的范围综述方法, 汇总国内外文献, 旨在厘清 AI 技术在感染防控行为管理中的应用现状与挑战, 以及探讨未来的研究方向。

1 资料与方法

1.1 文献检索

检索从数据库建立至 2025 年 3 月 19 日期间收录于 MEDLINE、EMBASE、EBSCO、Cochrane library、Web of Science、CNKI、中华医学杂志等数据库的文献。英文关键词包括 healthcare、hospital acquired infection、nosocomial infection、infection prevention and control program、artificial intelligence、machine learning、internet of things、intelligent technology、computer vision、conventional neural network、monitor 等。中文关键词包括感染预防控制、医院感染、院感防控、人工智能、计算机视觉、基于 AI 等。

1.2 文献纳入与排除标准

纳入标准:(1)报道 AI 技术应用于医疗机构感染防控相关行为的中英文文献。排除标准:(1)涉及医院感染相关监测、预警的人工智能系统;(2)涉及患者筛查、诊断和其他与感染预防和控制无关的文章;(3)无法获取全文的文献。

1.3 文献筛选

文章由一位作者评估, 通过阅读文题和摘要, 查找和阅读全文进行初筛和复筛, 有争议的文章由第二位作者共

同评估。提取的内容包括感染防控行为的主题领域, 研究类型, 研究内容和涉及的人员/科室。

2 结果

2.1 文献基本情况

研究流程图如 1 所示。共纳入 15 篇文献, 其中 8 篇关于 AI 在手卫生方面的应用, 5 篇围绕个人防护装备(personal protection equipment, PPE)开展, 1 篇围绕血透防控, 2 篇涉及环境卫生。

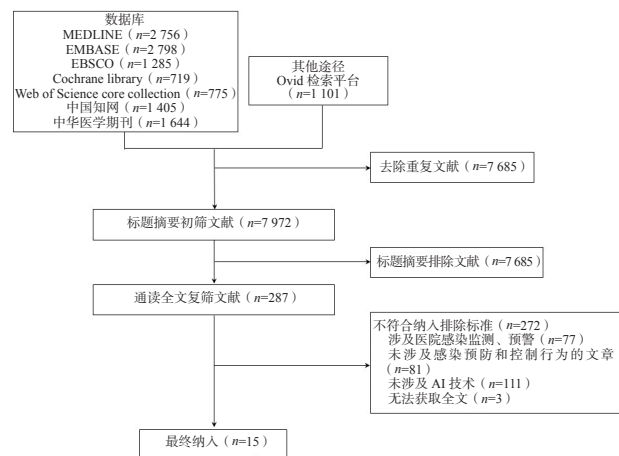


图 1 纳入研究流程图

2.2 结果综合一览

最终纳入文献总结见表 1。

2.3 AI 技术在监测手卫生方面的应用

直接观察是调查手卫生依从情况的金标准。然而, 由于对人力资源的高要求, 在实践中观察到的所有手卫生机会不到 1.5%^[23]。在过去十年中, 各种技术被用于监测手卫生, 例如射频识别, 视频摄像, 低功耗蓝牙等^[24]。Singh 等^[13]利用卷积神经网络, 训练机器学习算法来检测 ICU 监测图像中手卫生装置的使用情况, 然后将该算法的准确性与金标准进行比较。研究结果发现机器学习算法的敏感度和特

表 1 研究结果一览表

纳入研究	主题领域	研究类型	研究内容	涉及人员 / 科室
Jeo 等, 2023 ^[9]	手卫生	横断面调查	调查医护人员对基于人工智能的手卫生监测系统的态度	美国农村医疗中心 48 名医护人员
Greco 等, 2022 ^[10]	手卫生	观察研究	基于深度传感器获取的图像, 以评估手卫生执行情况	意大利萨莱诺大学医学系 53 名志愿者
屈世豪, 2022 ^[11]	手卫生	试点研究	基于人工智能图像处理的检测系统对多人洗手流程进行监管	医院手术室洗手池
黄晓霞等, 2021 ^[12]	手卫生	试点研究	通过手卫生识别系统和个人防护智能监控系统对员工感控行为进行监控管理	浙江大学医学院附属第二医院急诊监护室
Singh 等, 2020 ^[13]	手卫生	观察研究	利用计算机视觉技术和深度传感器自动检测手卫生	斯坦福大学附属儿童医院
Geilleit 等, 2018 ^[14]	手卫生	混合性研究	评估基于人工智能的手卫生监控系统的有效性、可行性	新加坡学术医疗中心儿科门诊 9 位医生
Wong 等, 2024 ^[15]	手卫生	试点研究	调查人工智能机器人在中心位置进行视频广播对患者 / 医护人员卫生影响	香港玛丽医院日间化疗中心
Kim 等, 2024 ^[16]	手卫生	观察研究	基于 3D 卷积神经网络自动监测手术室麻醉人员的手卫生动作	手术室及 8 名非医务人员
Huang 等, 2023 ^[6]	个人防护	干预研究	探索智能培训和监测系统 (AITMS) 在个人防护穿戴过程中的有效性	深圳市第三人民医院的医护人员
Segal 等, 2023 ^[17]	个人防护	试点研究	评估人机智能监控系统监控个人防护穿戴过程的准确性	某医院模拟的 30 次穿戴场景和观察员
Preda 等, 2022 ^[18]	个人防护	干预研究	评估个人防护智能监控系统在实际环境中的应用场景	澳大利亚某教学医院的 74 名医护人员
Kim 等, 2025 ^[19]	个人防护	观察研究	评估计算机视觉系统与人类观察在识别 PPE 情况的效果差异	华盛顿国立儿童医院 12 名护士
傅恩琴等, 2023 ^[20]	血透感控	观察研究	基于计算机视觉技术开发护士操作行为的监控系统	血液透析中心
Khan 等, 2020 ^[21]	环境卫生	综述	通过机器人设备和传感系统对医院洗手间进行清洁消毒	医院洗手间
Naik 等, 2022 ^[22]	环境卫生	综述	采用机器人设备, 对医院环境表面清洁消毒	医院、机场和购物中心

异度分别为 92.1% 和 98.3%, 与金标准的符合率为 96.8%, 用计算机视觉算法检测手卫生装置使用情况相当于直接观察。中国一家三甲医院同样利用快速手消液器开关量信号采集与视频序列识别结合的方式, 在医护人员取用快速手消液后, 由系统采集手卫生动作, 通过机器学习的方式对手卫生动作进行分析, 初步实现手卫生的监管^[12]。

不同于上述基于产品使用情况的观察, 意大利的一项研究提出了一种能够自动实时分析深度相机获取的图像序列以直接评估洗手过程的系统。值得一提的是, 该研究通过重叠滑动窗口考虑了时间信息, 实现了洗手过程分割难点的攻克^[10], 成功评估洗手过程的质量。Kim 等^[16] 同样证明基于 3D 卷积神经网络的视频分析手卫生的准确性和特异性。另一项研究不仅对洗手动作进行了识别, 还将洗手动作与洗手人员的身份结合在一起, 同时对多人洗手进行区分监管^[11]。

门诊环境中患者 - 医生接触的频率很高, 然而在门诊开展的手卫生监测研究数量寥寥无几。Geilleit 等^[14] 在门诊开展的一项实时手卫生通知机器学习系统表明, 该系统能够将门诊的手卫生依从性提高近两倍, 估计每年能够减少 440 例与门诊手卫生及时性相关的流感样疾病的发生, 该系统的年运行成本估计比直接观察低 46% (31 791 美元)。该调查还发现医护人员一致认为实时反馈系统有可能改善手卫生依从性。实时手卫生通知机器学习系统能够实现实时手卫生的通知, 为改善和监测手卫生提供了一种有前途的经济有效的方法。上述研究均侧重研究如何应用 AI 技术, 而有一项研究关注在 AI 技术对用户福祉的影响, 75% 比例的受访者对基

于 AI 的手卫生监测系统表示满意; 研究认为基于 AI 的手卫生监测系统满意度越高, 提供者幸福感越高^[9]。Wong 等^[15] 发现 AI 机器人的引入显著改善了日间化疗中心患者的手卫生情况, 一定程度拓宽 AI 在患者感染预防控制中的实践。

2.4 AI 技术在个人防护装备穿戴方面的应用

5 篇研究报道了 AI 在 PPE 领域的应用。正确使用 PPE 是防控行为中的最后一道防线, 对防止污染和疾病传播至关重要。黄晓霞等^[12] 人结合机器学习与深度学习系统对穿戴口罩与工作帽的视频进行识别, 通过 5G 传输, 在短时间内存触发警报, 提示医护人员及时穿戴防护用品。Segal 等^[17] 开发了人 - 人工智能系统, 使平板电脑可以作为一面镜子, 在穿和脱的过程中提供关于个人防护装备穿戴和脱下过程遵守情况的 AI 实时反馈, 并能够由远程人工同时查看, 后者在需要时提供额外支持和音频纠正反馈。更惊喜的是, 该系统表现了百分之百的准确率, 其中 AI 能够在 89% 的步骤中自动执行, 而无需远程人工纠正。一项针对 74 名医护人员进行的研究具体分析了 AI 在判断 PPE 穿戴情况上的性能, 该 AI-PPE 平台对脱个人防护装备的敏感度为 98.9%, 对穿个人防护装备的敏感度为 85.3%^[18]。Huang 等^[6] 构建了一种新的基于人工智能的培训和监测系统 (AITMS), 通过 AITMS 医护人员穿戴 / 脱下个人防护装备的准确率由 52.15% 显著提升至 98.14%, 同时医院感染的频率随着 AITMS 的使用而下降, 医院感染的频率由 2019、2020 的 1.31% 和 1.39% 降至 2021 年的 0.58% 和 2022 年的 0.38%。Kim 等^[19] 证明自动化计算机视觉检测

优于人类观察，它具有同时追踪多个个体，不易受时间影响的优点。

2.5 AI 技术在血透操作感染防控行为方面的应用

1 项研究探索了 AI 在血透操作感染防控行为领域的应用，观测包括内瘘上、下机操作，透析导管上、下机操作，透析管路密闭式冲洗，静脉用药等 6 个行为中的手卫生执行、个人防护、皮肤消毒、物品和环境消毒情况。结果表明系统使用前后（除导管断开外）护士操作规范率有显著提升。计算机视觉监测到血液透析操作的正确识别率达 90.1%，与人工观察结果接近^[20]。研究同时指出血透操作全过程如透析导管的置入、医疗废物处置等的空白数据有待补充。

2.6 AI 技术在环境清洁消毒方面的应用

2 项研究报道了 AI 在医院环境卫生中的应用，主要用途包括紫外线消毒与环境清洁^[21]。在新冠疫情席卷全球的背景下，紫外线消毒机器人系统正在兴起，诸如“蓝海机器人”、“UVD 机器人”和“Kenex”等机器人正在世界各地的医院中运用^[22]。人工智能消毒机器人能够对物体进行有效识别，对按钮、手柄、桌子、椅子和人的准确率分别为 90%、93.3%、90%、93.3% 和 100%^[25]。

3 讨论

医院感染是医疗保健中最常见的不良事件，也是全球关注的公共卫生问题^[26]。医院感染防控行为的管理是有效预防和控制医院感染的基础。然而，人工监测大量的感染防控行为不仅成本高昂、人力资源有限而且缺乏标准化。随着 AI 技术的发展，AI 为医院感染防控提供了新的工具和潜力，一方面它可将感染防控行为管理标准化，另一方面降低管理成本和节省时间。

据报道，截至 2020 年 5 月，130 个国家有 152 888 位医疗工作者的感染 COVID-19，其中多达 17 000 人死亡。20 世纪以来多次重大疫情中始终存在医疗工作者由于个人防护不当造成感染的情况^[1-2]。传统的集中式院感培训模式存在很多局限性，如费时费力，无法保证所有受训者都正确掌握，不能及时对过程进行监督和纠正。在未来可能再次面临突如其来的突发公共卫生事件背景下，利用 AI 管理医院感染防控行为能在短时间内对大量人员进行严格且高质量的培训与实时反馈，减少职业暴露，提高医院紧急疫情的应对能力。

此外，利用 AI 常态化管理感染防控行为，有助于实现“无伤害、无感染”的优质医疗服务。ICU 是医疗机构中医院感染发生率最高的科室，患者发生感染的风险是普通病房的 5~10 倍^[27]。由于 ICU 既需要大量的侵入性操作又是多重耐药菌感染的重灾区，因此管理医院感染防控行为是 ICU 重点且永恒的工作。另外值得注意的是，烧伤患者约占

全部院内感染患者的 77%，其住院期间的感染率高，深度烧伤患者的创面感染率甚至可高达 20% 以上^[28]。曾妃等^[29]研究曾报道 2020 年温岭市槽罐车爆炸事件造成的群体大面积烧爆复合伤患者“一患者一配套”的实时院感防控的有效实践。利用 AI 开展常态的医院感染防控行为管理（例如床单元及高频接触表面的清洁消毒、手卫生及 PPE 实时监测反馈）可有效降低 ICU、烧伤患者的感染风险，可能是提高其救治成功率的有效武器。

总体而言，AI 结合 IPC 行为的研究尚且有限，未来仍有很大的发展空间。目前 AI 结合 IPC 行为研究仅限于单个地点或物品类型（例如口罩穿戴型号），需要在更广泛情境、更实际的临床现场中持续地测试，以明确 AI 结合 IPC 行为管理的有效性^[18]。AI 监测涉及的设施设备存在维护成本，大多数研究认为基于 AI 的系统建立后的持续监测比人工观察更节约成本^[19]，但成本效益情况仍缺乏具体研究。由于透明度和保密性、用户态度是影响新技术的关键因素^[30]，仍需进一步调查医疗工作者对 AI 结合 IPC 行为管理技术的态度和接受程度，以保证未来应用的可持续性。此外，AI 技术本身远非完美无瑕。到目前为止，仍然存在许多技术上的局限性：识别精度受到许多因素的影响^[13]，例如相机角度、人移动速度和运动标准化情况^[31]，尤其是对精细运动的识别^[32]；AI 自主学习效率有限^[33]，例如有限的训练数据量，未来需要有更多公开、高质量的数据集用于训练。有待填补现有医疗环境清洁消毒、血透等常规领域证据基础上的空白。更重要的是，随着 AI 快速迭代与多学科交叉融合，AI 在感染防控行为领域的应用也需突破传统认知框架。

此范围综述存在一定局限性。首先，搜寻的数据库有限，可能存在该数据库外适用的文章。此外，有可能由于搜索条件不完整或无意的筛选遗漏而错过了一些适用的研究。

4 总结与展望

目前 AI 技术已在手卫生、PPE、环境卫生、血液透析感控行为方面有所探索，但研究尚且有限，未来仍有很大的发展空间。在未来可能再次面临突如其来的突发事件背景下，利用 AI 管理感染防控行为有助于提高医院紧急疫情的应对能力。此外，考虑到医院感染的“重灾区”，未来利用 AI 管理医院感染防控行为在 ICU 或烧伤病房将大有裨益。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

- [1] Fischer WA 2nd, Weber D, Wohl DA. Personal protective equipment: protecting health care providers in an Ebola outbreak[J]. Clin Ther, 2015, 37(11): 2402-2410. DOI: 10.1016/j.clinthera.2015.07.007.

- [2] 中国疾病预防控制中心新型冠状病毒肺炎应急响应机制流行病学组. 新型冠状病毒肺炎流行病学特征分析[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(2): 145-151. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2020.02.003.
- [3] 张浩军, 陈文森, 高晓东, 等. 应对新冠肺炎局部暴发疫情定点医院感染防控工作模式思考[J]. 中华医院感染学杂志, 2021, 31(24): 3691-3694. DOI: 10.11816/cn.ni.2021-216427.
- [4] Sajid MI, Ahmed S, Waqar U, et al. SARS-CoV-2: has artificial intelligence stood the test of time[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2022, 135(15): 1792-1802. DOI: 10.1097/CM9.0000000000002058.
- [5] Brownstein JS, Rader B, Astley CM, et al. Advances in artificial intelligence for infectious-disease surveillance[J]. *N Engl J Med*, 2023, 388(17): 1597-1607. DOI: 10.1056/NEJMr2119215.
- [6] Huang T, Ma Y, Li SX, et al. Effectiveness of an artificial intelligence-based training and monitoring system in prevention of nosocomial infections: a pilot study of hospital-based data[J]. *Drug Discov Ther*, 2023, 17(5): 351-356. DOI: 10.5582/DDT.2023.01068.
- [7] Arksey H, O'Malley L. Scoping studies: towards a methodological framework[J]. *Int J Soc Res Methodol*, 2005, 8(1): 19-32. DOI: 10.1080/1364557032000119616.
- [8] Levac D, Colquhoun H, O'Brien KK. Scoping studies: advancing the methodology[J]. *Implement Sci*, 2010, 5: 69. DOI: 10.1186/1748-5908-5-69.
- [9] Joe L. Provider satisfaction with artificial intelligence-based hand hygiene monitoring system during the COVID-19 pandemic: study of a rural medical center[J]. *J Chiropr Med*, 2023, 22(3): 197-203. DOI: 10.1016/j.jcm.2023.03.004.
- [10] Greco A, Percannella G, Ritrovato P, et al. A deep learning based system for handwashing procedure evaluation[J]. *Neural Comput Appl*, 2022: 1-16. DOI: 10.1007/s00521-022-07194-5.
- [11] 屈世豪. 基于人工智能图像处理的多人洗手流程自动监管系统[J]. 智能物联技术, 2022, 5(4): 36-42.
- [12] 黄晓霞, 李瑶, 陈昊天, 等. 结合 5G 和人工智能技术构建新一代智慧化 ICU 单元的探索[J]. 中华急诊医学杂志, 2021, 30(10): 1269-1273. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2021.10.021.
- [13] Singh A, Haque A, Alahi A, et al. Automatic detection of hand hygiene using computer vision technology[J]. *J Am Med Inform Assoc*, 2020, 27(8): 1316-1320. DOI: 10.1093/jamia/ocaa115.
- [14] Geilleit R, Hen ZQ, Chong CY, et al. Feasibility of a real-time hand hygiene notification machine learning system in outpatient clinics[J]. *J Hosp Infect*, 2018, 100(2): 183-189. DOI: 10.1016/j.jhin.2018.04.004.
- [15] Wong SC, Ip SC, Kwok MO, et al. Promoting hand hygiene in a chemotherapy day center: the role of a robot[J]. *Antimicrob Resist Infect Control*, 2024, 13(1): 154. DOI: 10.1186/s13756-024-01510-5.
- [16] Kim M, Choi J, Jo JY, et al. Video-based automatic hand hygiene detection for operating rooms using 3D convolutional neural networks[J]. *J Clin Monit Comput*, 2024, 38(5): 1187-1197. DOI: 10.1007/s10877-024-01179-6.
- [17] Segal R, Bradley WP, Williams DL, et al. Human-machine collaboration using artificial intelligence to enhance the safety of donning and doffing personal protective equipment (PPE)[J]. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 2023, 44(5): 732-735. DOI: 10.1017/ice.2022.169.
- [18] Preda VA, Jayapadman A, Zacharakis A, et al. Using artificial intelligence for personal protective equipment guidance for healthcare workers in the COVID-19 pandemic and beyond[J]. *Commun Dis Intell* (2018), 2022, 46: 46. DOI: 10.33321/cdi.2022.46.51.
- [19] Kim MS, Park B, Sippel GJ, et al. Comparative analysis of personal protective equipment nonadherence detection: computer vision versus human observers[J]. *J Am Med Inform Assoc*, 2025, 32(1): 163-171. DOI: 10.1093/jamia/ocae262.
- [20] 傅恩琴, 干铁儿, 胡守慈, 等. 基于计算机视觉的血液透析操作感染防控行为监测系统的设计[J]. 中国消毒学杂志, 2023, 40(7): 554-556. DOI: 10.11726/j.issn.1001-7658.2023.07.022.
- [21] Khan ZH, Siddique A, Lee CW. Robotics utilization for healthcare digitization in global COVID-19 management[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(11): 3819. DOI: 10.3390/ijerph17113819.
- [22] Naik N, Hameed BMZ, Sooriyaperakasam N, et al. Transforming healthcare through a digital revolution: a review of digital healthcare technologies and solutions[J]. *Front Digit Health*, 2022, 4: 919985. DOI: 10.3389/fgth.2022.919985.
- [23] Marra AR, Moura DF, Paes AT, et al. Measuring rates of hand hygiene adherence in the intensive care setting: a comparative study of direct observation, product usage, and electronic counting devices[J]. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 2010, 31(8): 796-801. DOI: 10.1086/653999.
- [24] Yang L, Li H, Ren Y, et al. Development and evaluation of an ultra-wide bandwidth based electronic hand hygiene monitoring system[J]. *Am J Infect Contr*, 2023, 51(3): 313-318. DOI: 10.1016/j.ajic.2022.07.008.
- [25] Hong H, Shin W, Oh J, et al. Standard for the quantification of a sterilization effect using an artificial intelligence disinfection robot[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(23): 7776. DOI: 10.3390/s21237776.
- [26] Liu JY, Dickter JK. Nosocomial infections[J]. *Gastrointest Endosc Clin N Am*, 2020, 30(4): 637-652. DOI: 10.1016/j.giec.2020.06.001.
- [27] 王晓晔. 独立清洁单元消毒模式在重症监护病房医院感染防控中的应用研究[D]. 芜湖: 皖南医学院, 2017.
- [28] Guo HL, Zhao GJ, Ling XW, et al. Using competing risk and multistate model to estimate the impact of nosocomial infection on length of stay and mortality in burn patients in SouthEast China[J]. *BMJ Open*, 2019, 8(11): e020527. DOI: 10.1136/bmjopen-2017-020527.
- [29] 曾妃, 封秀琴, 赵锐祎, 等. 群体大面积烧爆复合伤患者单元化感染防控的实践及成效[J]. 中华急危重症护理杂志, 2021, 2(2): 123-126. DOI: 10.3761/j.issn.2096-7446.2021.02.005.
- [30] Meng M, Sorber M, Herzog A, et al. Technological innovations in infection control: a rapid review of the acceptance of behavior monitoring systems and their contribution to the improvement of hand hygiene[J]. *Am J Infect Control*, 2019, 47(4): 439-447. DOI: 10.1016/j.ajic.2018.10.012.
- [31] Chen XX, Wang XM, Zhang K, et al. Recent advances and clinical applications of deep learning in medical image analysis[J]. *Med Image Anal*, 2022, 79: 102444. DOI: 10.1016/j.media.2022.102444.
- [32] Sapiński T, Kamińska D, Pelikant A, et al. Emotion recognition from skeletal movements[J]. *Entropy (Basel)*, 2019, 21(7): 646. DOI: 10.3390/e21070646.
- [33] Duong MT, Rauschecker AM, Rudie JD, et al. Artificial intelligence for precision education in radiology[J]. *Br J Radiol*, 2019, 92(1103): 20190389. DOI: 10.1259/bjr.20190389.

(收稿日期: 2024-08-07)

(本文编辑: 姜宇婷)