

人工智能在感染伤口管理中的应用进展

彭雨馨¹, 付光蕾²

(1.暨南大学 护理学院, 广东 广州 510632; 2.暨南大学附属第一医院 感染科, 广东 广州 510630)

伤口感染是指微生物入侵伤口并达到一定水平后引起患者局部和或全身反应, 并导致局部组织损伤和伤口延迟愈合^[1]。数据显示, 外科伤口感染的发生率可达 1.2%~23.6%^[2], 外伤性伤口感染率为 26.0%^[3], 全球慢性伤口的感染率为 78.2%^[4]。研究^[5]表明, 伤口发生感染可导致伤口延迟愈合, 使患者生活质量下降, 并给家庭和社会带来严重的经济负担。因此, 对感染伤口进行及时有效的管理至关重要。人工智能作为新兴技术, 其在医学领域上的应用已得到大众认可, 本文通过对机器视觉、可穿戴传感技术、机器人三大人工智能领域在感染伤口管理中的应用进行综述, 分析现阶段研究存在的挑战并提出展望, 以期对感染伤口的智能化护理提供相关参考。

1 机器视觉在感染伤口管理中的应用

机器视觉是人工智能核心领域之一, 指通过机器视觉产品代替人眼对研究目标进行测量和判断^[6]。基于机器视觉技术的人工智能在感染伤口中的应用主要体现于感染伤口早期识别、伤口评估、检测以及伤口数据管理。

1.1 感染伤口早期识别 感染伤口早期症状不明显, 肉眼难以识别, 延迟就诊可能会导致严重的伤口并发症。因此自动分析伤口当前状态并预测伤口是否存在感染趋势十分重要。Hsu 等^[7]通过运用机器视觉技术提出了一种基于边缘和颜色信息的伤口图像分割算法, 用于提取外科术后伤口图片特征, 对伤口进行分类, 其准确率为 89.04%, 可用于感染伤口早期识别。而 Schollemann 等^[8]则是将机器视觉技术与热数据相结合, 对伤口图像进行分割并自动化测量伤口部位的各种热参数, 制定伤口感染概率指数, 识别伤口是否存在感染迹象, 并在轻度至中度 C 反应蛋白升高的亚组中发现感染与非感染伤口之间感染概率指数存在显著差异, 但该研究的样本量较小, 需进一步扩大样本量来验证其效能。运用机器视觉技术能帮助医护人员早期有效识别感染伤口,

采取干预措施, 促进伤口愈合。

1.2 伤口评估 伤口评估是开展有效的伤口管理的前提和保障, 是为患者科学制定全面、安全、合理的治疗和护理方案的关键步骤, 在伤口愈合中发挥重要作用^[8]。临床常使用伤口测量尺评估伤口面积, 结合视觉观察判断是否存在感染迹象, 但该方法易受参照物的影响, 面积测量不准确^[9]。依托于机器视觉的人工智能可以弥补传统伤口评估存在的不足, 测量局部伤口特征, 评估伤口情况, 辅助临床诊疗。Pena 等^[10]运用机器视觉技术设计了一款名为 Wound Vue 智能系统设备, 该设备可重建糖尿病足 3D 模型并生成一致的数据, 但 Wound Vue 摄像机无法评估伤口的受损部分, 且设备的购买和维护成本花费高, 不利于推广使用。而 NDKare 则是一款基于机器视觉研发的软件应用程序, 该程序可以借助智能手机摄像头对伤口进行 2D 测量, 并通过 20 s 的视频平移生成伤口 3D 模型^[11]。研究^[11]通过使用 NDKare 应用程序测量 115 个糖尿病溃疡相关伤口的面积、深度和体积, 并将其性能与 Visitrak 平面测量系统和 Wound Vue 摄像机的性能进行比较, 其结果展现出良好的一致性。目前, 基于机器视觉的伤口评估智能设备越来越多, 但尚未形成统一的测量标准与方法^[12], 成本费用尚不明确, 若要应用于临床, 还需反复验证其准确性、稳定性、操作性、实用性以及经济性等多方面因素。

1.3 感染伤口检测 传统的伤口感染检测多依据于临床医生视觉观察来判断伤口是否感染, 结合细菌培养来确定结果, 其过程繁琐, 耗费时间^[13], 且临床评估无法在无体征和症状的情况下检测到高细菌载量或感染^[14]。机器视觉技术可以完成人眼无法实现的任务。Hurley 等^[9]利用实时细菌荧光成像设备, 通过内源性自发荧光可视化存在的潜在有害水平的细菌, 形成荧光图片, 确定有无细菌的存在。大多数革兰氏阳性和阴性细菌、需氧菌和厌氧菌中度至重度定植的伤口中呈现红色荧光, 而当存在铜绿假单胞菌时可见青色荧光。Armstrong 等^[14]使用机器视觉技术对 138 例糖尿病足溃疡的事后多中心临床试验分析, 研究了荧光成像在检测高负荷伤口中生物膜包裹和浮游细菌方面的作用, 结果显示, 84.2% 的溃疡在创面周边区域包含细菌高负荷。基

【收稿日期】 2023-04-10 【修回日期】 2023-07-10
【基金项目】 暨南大学教学改革研究项目(JG2021115)
【作者简介】 彭雨馨, 硕士在读, 电话: 020-38680029
【通信作者】 付光蕾, 电话: 020-38680029

于机器视觉的荧光成像技术可以有效地检测伤口处的细菌负荷,可作为感染伤口治疗和护理的辅助技术,但目前的设备只能检测特定菌种。

1.4 感染伤口数据管理 感染伤口在治疗过程中需要多次评估,因此会产生大量的伤口图片及伤口信息等不同类型的数据资料。既往的伤口数据管理方法是将患者的伤口评估结果进行书面记录,建立相应文件夹,将每次的评估照片放入对应的文件夹内,该方法不仅繁琐且易造成资料缺乏完整性和时效性^[15]。基于机器视觉的智能化伤口数据管理技术的出现不仅克服了传统方法上的不足,同时更加精准。Barakat-johnson 等^[16]在澳大利亚卫生服务机构中,通过使用基于机器视觉研发的人工智能应用程序对患者进行伤口评估和管理,其研究结果显示,使用人工智能应用程序可以改善伤口信息的采集以及护理记录的一致性。Kai 等^[17]则是通过将智能眼镜与伤口护理应用软件相结合,设计了一款包括语音指令和眨眼指令的应用程序,实现对伤口数据进行管理。基于智能眼镜的文档编制系统在绩效期望、行为意向和满意度方面优于现有文档编制流程,并且相比于手持式设备,该智能眼镜可以完成伤口记录过程,解放医护人员的双手,但该研究内容只调查了医护人员的使用情况,缺乏对患者体验的评估。

2 可穿戴传感技术在感染伤口管理中的应用

可穿戴传感技术是指整合传感、电化学、无线通信等平台,以构建便携性、微型化的目标信号技术,通过穿戴或以皮肤贴片等形式,实现定时或连续动态的目标信息获取^[18]。目前基于可穿戴传感技术的人工智能被广泛应用于感染伤口的治疗和监测。

2.1 感染伤口治疗

2.1.1 智能微针 2022 年最新伤口感染临床实践国际共识^[1]指出,适当的使用局部抗菌药在预防和治疗伤口感染中发挥着重要作用,但常规用药方法难以穿透伤口生物膜,达到治疗效果。对此,Xu 等^[19]研究了一种装有氯霉素和对明胶酶敏感的明胶纳米颗粒的智能微针贴片,该微针应用于感染部位后快速溶解,使纳米颗粒暴露于常驻微生物产生的明胶酶,并分解释放氯霉素至生物膜生长活跃区域。与传统的给药方式相比,智能抗菌微针不仅表现出较小的脱靶毒性,且有良好的治疗效果。而 Ullah 等^[20]则研发了一种具有 pH 响应聚合物涂层的智能微针,该微针可突破坏死组织屏障和生物膜,根据伤口中的 pH 水平智能释放药物并将其扩散到伤口区域。该设备拥有涂层聚合物的柔韧性和生物相容性,制造方法简单廉价,具有增强伤口感染治疗

效果的潜力。基于可穿戴传感技术的智能微针在向伤口生物膜用药方面展现出良好的研究前景^[21],但目前大部分设备的研发是由医务人员和技术人员完成,建议患者参与到设备的研发与设计中,满足患者的需求,使智能微针更好地应用于临床。

2.1.2 智能化伤口敷料 传统的伤口敷料在伤口护理中无法准确评估伤口环境,且频繁更换易对伤口产生二次损伤。智能化伤口敷料是指将可穿戴传感器与伤口敷料相结合,并备有药物输送系统,不仅可以避免频繁更换敷料而达到控制药物释放的效果,且能动态监测伤口情况,为伤口治疗决策提供必要信息^[22]。Pan 等^[23]根据通过预期识别感染的伤口(接近 37℃)和正常皮肤(在 30~35℃ 的范围内)之间的温度差异设计了一款水凝胶,载有抗菌剂,可以实现药物控制释放,因其具有防污和触发释放药物的双重功能,对抗伤口感染有良好作用。而 Zhou 等^[24]制备出细菌响应性智能伤口敷料,该敷料可释放荧光素和抗微生物剂,从而显示颜色变化以及按需抗菌作用,对由链球菌引起的感染伤口具有杀菌活性。体外和体内研究均显示,该合成伤口敷料能够提供感染的视觉警告以及杀灭耐甲氧西林金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌。但是目前大多智能敷料只是在动物实验中得到了验证,未来还需要通过大规模临床试验进一步检验其效能。

2.2 感染伤口监测 感染伤口愈合过程缓慢,可穿戴传感技术可以实时监测伤口愈合情况,预防伤口感染。Thi 等^[25]报道了一种由喷墨打印的电容压力传感器,该传感器可以监测敷料粘附在皮肤表面的牢固程度,测量患者行走时踝关节的运动幅度以及脚底施加在地面上的压力,从而保证伤口得到有效治疗,预防伤口感染。而 Cavallo 等^[26]设计了一款双层微纤维管状传感支架,该支架作为可穿戴传感器,监测伤口 pH 值,从而监测患者伤口溃疡愈合情况。以上此类设备虽然展现出良好的性能,但大多数只能针对伤口某一特定指标进行监测,无法实现伤口数据的全面化监测,未来研究应开发能全面监测伤口数据的智能化传感设备,以促进感染伤口的有效管理。

3 机器人在感染伤口管理中的应用

机器人是将智能视觉、语言处理、路径规划等人工智能技术相结合的重要应用领域。随着人工智能与医学的不断交融,医疗机器人在感染伤口的管理中也展现出良好的应用前景。Filko 等^[27]结合机器视觉技术研发了一种由机器人驱动的慢性伤口三维重建系统,该机器人可以根据指示移动位置进行伤口扫描,构建静脉溃疡伤口模型、压疮伤口模型,但

机器人从静止位置到记录伤口所能实现的记录姿态数量有限。Da 等^[28]报道了一种聊天机器人,可以指导家庭或初级保健机构使用伤口敷料,使初级护士、患者及其家属受益,并有助于减少伤口相关并发症。而 Choi 等^[29]学者则是研发了一种能自主移动的生物混合微型机器人,可以通过无创穿透血凝块并有效输送氧气和清除细胞因子来加速糖尿病慢性伤口的愈合,但该研究只在动物实验中得到验证,并未进行临床试验。将机器人运用于感染伤口护理领域中,不仅能缓解医护人员负担,也能改善患者就医体验。

4 人工智能在感染伤口管理中应用的挑战与展望

4.1 制定伤口采集及收费标准,建立伤口护理数据库 人工智能的应用依托于所获取的大量数据,但在临床上由于数据采集缺乏统一指南和标准^[30],造成伤口数据获取困难。同时各医院的智能化设备的规格质量不统一,伤口成像质量差异大,为数据的解读带来困扰^[31]。再者人工智能相关设备费用高昂、审批周期长,削弱了医院和患者的使用积极性^[32]。智能化设备的费用成本是其实用性和可及性的主要决定因素^[9],因此难以建立完整的伤口护理数据库,实现伤口数据的有效共享。对此,感染伤口专家应与人工智能专家深入交流,共同制定伤口数据采集指南或共识,规范其操作和流程,积极推动伤口护理数据库的建立,为未来进一步研发感染伤口智能化工具提供基础。此外,政府应颁布相关规章制度,明确操作人员资质、设备规格、软件类型等内容,阐明医疗费用成本及收费标准或考虑将其纳入医疗保险范畴。

4.2 保障个人信息安全,实现数据有效共享 人工智能收集患者大量个人信息,并进行数据共享;但在共享过程可能产生数据安全问题,造成患者个人健康信息被泄露、窃取和篡改的风险,严重者会导致医疗安全事故,因此患者的个人信息安全必须得到维护^[32]。对此,各医疗机构应建立数据安全管理体系,对系统和数据进行定期检测,保障数据安全。美国、欧洲、日本等国已有相关法律法规保护个人数据安全^[33],虽然国内已出台《国家健康医疗大数据标准、安全和服务管理办法》,但我国智能化医疗事业目前尚处于起步阶段,因此在保障个人信息安全的前提下实现数据共享并不断创新仍是一大挑战。

4.3 优化算法和功能,保证数据真实公平 算法是人工智能的核心要素,其存在的“黑盒”机制却尚未解决,同时由于算法偏见的存在,使得人工智能的可信性和安全性存在风险^[34-35]。其次,大多数智能化伤口设备只能对单一指标或类别进行分析,可靠性

相对不足^[18]。因此,研究人员应积极优化和提升其算法和功能,充分考虑智能化设备临床实用性及兼容性,扩大监测及检测范围,实现智能化功能多方面整合。医护人员应具备主动识别算法偏见的意识和能力,避免人为偏见,保证数据的真实性和公平性,维护患者健康。

4.4 发展多学科团队合作,促进人工智能扎根基层医疗 我国人工智能发展尚处于起步阶段,且集中于发达地区,基层医疗机构由于缺乏设备及人才,难以建立完整的智能化感染伤口管理体系。感染伤口专家应与皮肤科、感染科、伤口造口专科、内分泌科、营养科等专业人才合作组建医学伤口护理团队,并加强与计算机、信息工程等非医学科的合作,形成优质智能化伤口护理团队,借助移动健康和互联网平台,形成多地区团队合作,以多学科团队合作带动多方合作,开展远程护理工作,让人工智能扎根基层医疗单位,促进基层智能化伤口护理事业的发展。

5 小结

人工智能在感染伤口管理中的应用改善了传统感染伤口护理方面的不足,减轻了医护工作者的负担,满足了患者需求,展现出良好的发展前景;但其在伤口采集及收费、信息安全、算法和功能以及基层发展等方面有待进一步改善及加强。未来建议国内学者加强合作交流,积极开展人工智能在感染伤口预防、诊断、治疗、管理、预后等多方面的研究,同时考虑其经济学评价,将人工智能应用于感染伤口的远程护理工作中,促进伤口愈合,缓解基层医疗资源压力。

【关键词】 人工智能;感染伤口;机器视觉;可穿戴传感技术;机器人

doi:10.3969/j.issn.2097-1826.2023.12.021

【中图分类号】 R472 【文献标识码】 A

【文章编号】 2097-1826(2023)12-0085-04

【参考文献】

- [1] SWANSON T, OUSEY K, HAESLER E, et al. IWII wound infection in clinical practice consensus document; 2022 update[J]. J Wound Care, 2022, 31(Sup12): S10-S21.
- [2] 中华医学会外科学分会外科感染与重症医学学组, 中国医师协会外科医师分会肠瘘外科医师专业委员会, 中国手术部位感染预防指南[J]. 中华胃肠外科杂志, 2019, 22(4): 301-314.
- [3] PETFIELD J L, LEWANDOWSKI L R, STEWART L, et al. IDCRP combat-related extremity wound infection research[J]. Mil Med, 2022, 187(Suppl 2): 25-33.
- [4] MALONE M, BJARNSHOLT T, MCBAIN A J, et al. The prevalence of biofilms in chronic wounds: a systematic review and Meta-analysis of published data[J]. J Wound Care, 2017, 26(1): 20-25.
- [5] SCHOLLEMAN F, KUNCZIK J, DOHMEIER H, et al. Infec-

- tion probability index; implementation of an automated chronic wound infection marker[J/OL].[2023-03-20].<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8745914/>. DOI: 10.3390/jcm11010169.
- [6] 于起峰,卢荣胜,刘晓利,等.“机器视觉技术及应用”专题前言[J].激光与光电子学进展,2022,59(14):3-4.
- [7] HSU J T, CHEN Y W, HO T W, et al. Chronic wound assessment and infection detection method[J/OL].[2023-03-20]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8745914/>. DOI:10.1186/s12911-019-0813-0.
- [8] 王延峰,杨巧红,刘安康.人工智能在慢性伤口评估和治疗中的应用[J].护士进修杂志,2022,37(15):1393-1396.
- [9] HURLEY C M, MCCLUSKY P, SUGRUE R M, et al. Efficacy of a bacterial fluorescence imaging device in an outpatient wound care clinic: a pilot study[J]. J Wound Care, 2019, 28(7): 438-443.
- [10] PENA G, KUANG B, SZPAK Z, et al. Evaluation of a novel three-dimensional wound measurement device for assessment of diabetic foot ulcers[J]. Adv Wound Care, 2020, 9(11): 623-631.
- [11] KUANG B, PENA G, SZPAK Z, et al. Assessment of a smart-phone-based application for diabetic foot ulcer measurement[J]. Wound Repair Regen, 2021, 29(3): 460-465.
- [12] 赵楠,周秋红,许景灿,等.糖尿病足溃疡物理维度测量工具和技术的范围综述[J].解放军护理杂志,2021,38(11):69-72.
- [13] LI S, RENICK P, SENKOWSKY J, et al. Diagnostics for wound infections[J]. Adv Wound Care, 2020, 10(6): 317-327.
- [14] ARMSTRONG D G, EDMONDS M E, SERENA T E. Point-of-care fluorescence imaging reveals extent of bacterial load in diabetic foot ulcers[J]. Int Wound J, 2023, 20(2): 554-566.
- [15] 陈佳丽,宁宁,李佩芳.智能化伤口评估和伤口数据管理现状及研究进展[J].中华现代护理杂志,2019(16):1981-1984.
- [16] BARAKAT-JOHNSON M, JONES A, BURGER M, et al. Reshaping wound care: evaluation of an artificial intelligence app to improve wound assessment and management amid the COVID-19 pandemic[J]. Int Wound J, 2022, 19(6): 1561-1577.
- [17] KAI K, MANUEL W, HELMUT K. Digital transformation in health care: augmented reality for hands-free service innovation[J]. Inf Syst Front, 2020(22): 1419-1431.
- [18] 刘睿宁,陈太菊,刘宏杰,等.可穿戴传感技术在检验医学中的应用与挑战[J].重庆医科大学学报,2022,47(8):877-882.
- [19] XU J, DANEHY R, CAI H, et al. Microneedle patch-mediated treatment of bacterial biofilms[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(16): 14640-14646.
- [20] ULLAH A, JANG M, KHAN H, et al. Microneedle array with a pH-responsive polymer coating and its application in smart drug delivery for wound healing[J/OL].[2023-03-20]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400521010091?via%3Dihub>. DOI:10.1016/j.snb.2021.130441.
- [21] PERMANA A D, MIR M, UTOMO E, et al. Bacterially sensitive nanoparticle-based dissolving microneedles of doxycycline for enhanced treatment of bacterial biofilm skin infection: a proof of concept study[J/OL].[2023-03-20]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7168771/>. DOI: 10.1016/j.ijpx.2020.100047.
- [22] DERAKHSHANDEH H, KASHAF S S, AGHABAGLOU F, et al. Smart bandages: the future of wound care[J]. Trends Biotechnol, 2018, 36(12): 1259-1274.
- [23] PAN F, ZHANG S, ALTENRIED S, et al. Advanced antifouling and antibacterial hydrogels enabled by controlled thermo-responses of a biocompatible polymer composite[J]. Biomater Sci, 2022, 10(21): 6146-6159.
- [24] ZHOU J, YAO D, QIAN Z, et al. Bacteria-responsive intelligent wound dressing: simultaneous in situ detection and inhibition of bacterial infection for accelerated wound healing[J/OL].[2023-03-20]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961218300279?via%3Dihub>. DOI:10.1016/j.biomaterials.2018.01.024.
- [25] THI N N D, MATTANA G, THU V T, et al. A simple flexible printed capacitive pressure sensor for chronic wound monitoring[J/OL].[2023-03-20]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424722001285?via%3Dihub>. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113490.
- [26] CAVALLO A, LOSI P, BUSCEMI M, et al. Biocompatible organic electrochemical transistor on polymeric scaffold for wound healing monitoring[J/OL].[2023-03-20]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-8585/ac84ec>. DOI: 10.1088/2058-8585/ac84ec.
- [27] FILKO D, MARIJANOVIĆ D, NYARKO E K. Automatic robot-driven 3D reconstruction system for chronic wounds[J/OL].[2023-03-20]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8703929/>. DOI:10.3390/s21248308.
- [28] DA SILVA LIMA ROQUE G, ROQUE DE SOUZA R, ARAUJO DO NASCIMENTO J W, et al. Content validation and usability of a chatbot of guidelines for wound dressing[J/OL].[2023-03-20]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138650562100099X?via%3Dihub>. DOI: 10.1016/j.ijmedinf.2021.104473.
- [29] CHOI H, KIM B, JEONG S H, et al. Microalgae-based biohybrid microrobot for accelerated diabetic wound healing[J/OL].[2023-03-20]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/smll.202204617>. DOI:10.1002/smll.202204617.
- [30] HOWELL R S, LIU H H, KHAN A A, et al. Development of a method for clinical evaluation of artificial intelligence-based digital wound assessment tools[J/OL].[2023-03-20]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8134996/>. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2021.7234.
- [31] 冯建峰,王拥军,徐涛,等.全维度数据与智能诊疗的前沿与挑战——第232期“双清论坛”学术综述[J].中国科学基金,2021,35(1):73-80.
- [32] 杜妍莹,董鼎辉,马锋,等.人工智能在护理领域的应用进展[J].解放军护理杂志,2019,36(4):58-61.
- [33] 周新怡,余红雨,苏瑾,等.远程医疗在慢性伤口护理中的应用进展[J].护理研究,2022,36(7):1186-1189.
- [34] 吴琼,杨宝晨,郭娜,等.人工智能大数据时代医学数据保护的思考[J].人工智能,2022(1):54-61.
- [35] PLOUG T, HOLM S. The right to a second opinion on artificial intelligence diagnosis—remedying the inadequacy of a risk-based regulation[J]. Bioethics, 2023, 37(3): 303-311.

(本文编辑:王园园)