

DOI:10.16781/j.0258-879x.2020.03.0243

· 专题报道 ·

人工智能在脊柱畸形诊疗中的应用及展望

陈 锴¹, 蔡腾广², 王 晨³, 白玉树^{1*}, 李 明^{1*}

1. 海军军医大学(第二军医大学)长海医院骨科, 上海 200433

2. 海军军医大学(第二军医大学)长海医院儿科, 上海 200433

3. 海军军医大学(第二军医大学)长海医院营养科, 上海 200433

[摘要] 随着人工智能的发展, 医疗健康领域成为其最重要、最有潜力的应用领域之一。脊柱畸形的诊治是脊柱外科领域的研究热点, 人工智能在该疾病的筛查、诊断、手术规划与实施、预后、康复中逐渐发挥不可或缺的作用。然而, 目前人工智能在脊柱畸形诊疗中的应用尚处于初步阶段, 仍有诸多问题亟待解决。本文就人工智能在脊柱畸形的筛查、诊断、手术规划及实施、预后、康复中的研究进展进行综述, 并展望未来发展方向。

[关键词] 人工智能; 脊柱畸形; 外科手术; 辅助诊断; 医疗器械

[中图分类号] R 682.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2020)03-0243-05

Artificial intelligence in diagnosis and treatment of spinal deformity: application and prospect

CHEN Kai¹, CAI Teng-guang², WANG Chen³, BAI Yu-shu^{1*}, LI Ming^{1*}

1. Department of Orthopaedics, Changhai Hospital, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

2. Department of Pediatrics, Changhai Hospital, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

3. Department of Nutriology, Changhai Hospital, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

[Abstract] With the development of artificial intelligence (AI), medical health has become one of the most important and potential application fields of AI. The diagnosis and treatment of spinal deformity is a research focus of spinal surgery departments. AI plays an indispensable role in the screening, diagnosis, surgical planning and implementation, prognosis and rehabilitation of spinal deformity. However, AI use in spinal deformity field is still at the initial stage, and many problems still need to be solved. This review sums up the research progress of AI in the screening, diagnosis, surgical planning and implementation, prognosis and rehabilitation of spinal deformity, and explores the future research direction.

[Key words] artificial intelligence; spinal deformity; operative surgical procedures; auxiliary diagnosis; medical instruments

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2020, 41(3): 243-247]

人工智能是通过计算机程序呈现人类智能的技术, 一般是对智能主体即可观察周围环境并作出行动以达成目标的系统进行研究与设计。目前人工智能已被应用于多个领域, 包括搜索、数学优化和逻辑推演、仿生学、认知心理学及基于概率论和经济学的算法等。在医学领域中, 人工智能的应用为疾病诊疗带来了极大便利, 如文献报道可利用人工智能大数据识别皮肤病^[1], 以及利用人工智能对儿科疾病进行初级诊断鉴别^[2]。

脊柱外科是骨科学领域的重要分支, 相关疾病由于常影响患者的外观与功能而备受关注。脊柱畸形的诊治是脊柱外科的研究热点, 其因与脊髓神经密切相关, 处置有一定难度。脊柱在形态学上有其独特特点, 有一定规律可循, 这些特征为人工智能的介入提供了切入点^[3]。在脊柱畸形的诊治过程中, 人工智能对于X线片、CT、MRI影像的解读, 脊柱节段的识别, 高难度脊柱手术矢状位生理曲度的规划、术中精准置入螺钉、更为精细的截

[收稿日期] 2019-10-29 **[接受日期]** 2020-02-13

[基金项目] 国家自然科学基金(81972035)。Supported by National Natural Science Foundation of China (81972035).

[作者简介] 陈 锴, 硕士生。E-mail: spine_kai@smmu.edu.cn

*通信作者(Corresponding authors). Tel: 021-31161681, E-mail: spinebaiys@163.com; Tel: 021-31161700, E-mail: limingch@21cn.com

骨,甚至重症患者的术后辅助康复治疗均提供了极大的便捷。

1 人工智能在脊柱畸形筛查与诊断中的应用

目前,人工智能针对脊柱形态学^[4]、生物力学^[5]的识别分析技术已日趋成熟,人工智能辅助精准诊疗也将成为可能。已有研究报道在人工智能的辅助下患者可以减少对社会服务的依赖,例如在脊柱侧凸畸形的筛查中, Lee等^[6]提出了基于机器深度学习的筛选法,即通过神经网络系统如卷积神经网络、循环神经网络等探查患者的脊柱形态,这一方法能有效观察椎体的轮廓、局部骨质异常、椎管内结构及测量侧凸的角度、椎体的旋转程度、顶椎偏距、端椎节段等参数,较真实地反映了脊柱畸形的严重程度^[7-11],为治疗提供了直观信息。对于相对较罕见但严重影响青少年身心健康的青少年特发性脊柱侧凸,有学者提出了基于动态集成选择法的人工智能系统,利用随机森林算法对上述脊柱参数进行回归建模,针对脊柱的最大曲率、最佳拟合平面、Cobb角、轴向扭转程度进行深度集成计算,从而评估脊柱侧凸的分型,为早期脊柱侧凸的筛查提供了依据^[12-13]。这些辅助技术的出现都极大地帮助了脊柱外科医师准确把握患者病情,提高了确诊率。

2 人工智能在脊柱畸形矫形手术规划及实施中的应用

针对脊柱畸形,目前最常用的手术技术是置入椎弓根、侧块螺钉、S₂骶髂螺钉(sacral-2 alar iliac, S₂AI)。随着学者对脊柱整体平衡的认识,医师行手术治疗时不再仅考虑局部,维持脊柱整体平衡、脊柱的生理弧度都成了术者行脊柱矫形术时考虑的范畴。人工智能的出现可以帮助术者更深入地认识脊柱的这些参数。

2.1 手术规划 脊柱畸形矫形手术规划是一项庞大的工程,以脊柱侧凸为例,矫形手术的目的是防止畸形进展、改善外观并尽可能减少融合节段。现今已有人工智能程序可以在术前采集Cobb角、椎体旋转度、骨龄等信息,可令术者更清晰地认识患者的疾病状态。Surgimap是欧洲提出的一个脊柱参数测量软件,该软件可根据X线片辅助测量患者术前的影像学参数,与一般测量软件不同

的是, Surgimap的人工智能向导组件可以自动识别X线片中的椎体节段,无须手动标定,极大地帮助初学者提高阅片效率^[14]。同样,部分圆背畸形患者因严重的脊柱后凸需行截骨治疗,有学者提出可以通过计算机软件进行规划确定不同部位的截骨级别,为术者提供切实可行的手术方案。例如 Hetherington等^[15]设计了一套脊柱水平识别(spine level identification, SLIDE)系统,该系统结合了人工智能技术和增强现实技术,能较好地对脊柱进行扫描与重建,为术式的选择提供了可循的证据。

2.2 手术实施 脊柱畸形矫形手术切口长、创伤大,术中人为因素造成的主观失误也始终是一大难题。机器人辅助手术克服了现有手术程序的局限性^[16],尤其是第3代机器人手术系统^[17],可通过智能识别术者的手部细微运动,消除手动错位、用力过猛、非自主震动等操作性失误,保留必要的位移、配重与运动速度,然后将处理后的动作同步至患者,使手术的精确性和安全性都得到了极大提升,同时也减少了术者体力与精力的消耗,缩短了手术时间。此外,脊柱畸形的手术操作多烦琐、复杂,如最常见的椎弓根螺钉置入技术,该术式对术者要求极高,稍有不慎即可损伤血管、脊髓、神经根,甚至可损伤前方大动脉,导致严重后果。基于人工智能的连续型手术机器人具备很强的仿生能力,可在任意部位产生柔性变形,避障能力强,能很好地适应脊柱周围环境,具备优异的潜在应用价值。

随着手术方式多样化,为达到手术损伤最小的要求及减少射线对人体的辐射,经皮椎弓根螺钉、超声椎弓根定位都已被开展。目前除了应用较广泛的O型臂导航、人工导航技术外,新兴的人工智能手术机器人也为精准置钉,尤其是胸椎的置钉提供了极大便捷。同样,为适应野战外科等恶劣条件而衍生的人工智能技术,通过声控反馈置钉开路器为手术提供了有效保障^[18]。对于术中可能出现的其他情况,人工智能也可发挥作用,例如人工神经网络可以有效地模拟脊柱手术中颅内压的变化^[19],为预防手术并发症提供了可行途径。

2.3 手术培训与模拟 人工智能有助于年轻医师更好地了解手术学习阶段,可使年轻医师更容易、简便地熟悉脊柱矫形手术的操作方法。机器人辅助手术系统显著提高了术者的操作水平,能够帮助年轻医师尽快上手,熟悉并掌握矫形手术的流程与步

骤。对于脊柱矫形手术学习的进修阶段, 澳大利亚学者 Forestier 等^[20] 推荐了一种动态时间规整算法, 可预测腰椎间盘切除、颈椎间盘前路融合等手术中的下一步操作, 为手术助手配合主刀医师提供辨证预测而利于双方配合, 同时极大地缩短了年轻医师在脊柱手术中的学习曲线长度。

3 人工智能在脊柱畸形手术预后与康复中的发展前沿

脊柱是机体重要的承重结构, 畸形脊柱的受力方式无论是在静止还是运动时均与生理情况相异, 所以其病变过程往往呈进展性而非自限性, 即使经过手术治疗, 若未能坚持合理的疗养护理, 畸形复发率、新发率很高, 因此, 大多数脊柱畸形患者须经常随访。部分严重的脊柱畸形患者术后容易发生椎体形变、神经血管损毁等并发症, 可能导致脊柱及其邻近器官永久性失能, 此类患者的生活质量往往很差, 这也是现代康复医学研究面临的难题之一, 而人工智能为指导脊柱畸形预后提供了许多可行的新思路。

3.1 人工智能在脊柱畸形中的作业疗法 目前已能够通过人工智能软件分析脊柱畸形患者术前与术后的 X 线片^[21]、CT^[22]、MRI^[9,11,23] 等影像学资料, 性别、年龄、BMI 等统计学资料, 以及肌肉质量、本体感觉、步态分析等其他辅助检查资料, 预测患者治疗后脊柱矢状位生理曲度的恢复状态^[24-26], 从而指导医师判断术后患者佩戴支具的数量、方式、时长, 并及时调整最佳的治疗方案。在术后康复性功能训练中, 移动虚拟健身指导应用 Keep 等应用程序被引入人工智能技术^[27], 通过基于飞行时间 (time of flight, TOF) 的深度摄像头监测用户的身体数据及锻炼时的运动过程, 实时反馈指导以纠正动作, 为用户提供个体化的训练计划, 也为纠正青少年特发性脊柱侧凸患者术后高低肩与长短腿问题开拓了一种新的改善方式。

在脊柱治疗的硬件设备方面, 人工智能的发展也日新月异。目前在术后疗养过程中使用了一种智能脊柱牵引器, 该牵引器从脊柱疾病的保守治疗角度考虑, 将数字比例-积分-微分 (proportional integral differential, PID) 增量式算法和人工智能中的“模糊控制理论”运用于人体脊柱牵引力的实时闭环控制过程中, 并使用彩色液晶模块显示曲线

图形和牵引力数值, 并及时调整以获得更好的脊柱牵引疗效, 实际应用也较直观和方便^[28]。张凯等^[29] 机械工程师为脊柱畸形术后的康复训练设计了智能脊柱理疗床, 其在执行程序机制中融入了智能分析法与反馈学习机制, 通过机械动力学自动分析系统 (automatic dynamic analysis of mechanical system, ADAMS) 进行了动力学仿真, 工作状态接近人体正常的脊柱活动状态, 并利用通用有限元分析软件 ABAQUS 对关键零件进行了分析与优化设计, 可为脊柱畸形患者的康复性功能锻炼提供个性化训练模式, 方便、有效, 安全、可靠。

3.2 人工智能在脊柱畸形中的物理疗法 对于椎体变形及脊柱严重病变导致的术后功能无法恢复等难以避免的后遗症, 人工智能辅助代替设备可发挥重要作用。

人工智能可穿戴设备是一种通过软件支持、数据交互及云端交互实现强大功能的介于消费电子产品和医疗器械之间、具有健康监护功能的辅助硬件设备。这一技术领域主要探索和利用了人机智能协同作用的原理, 创造了能直接穿在身上或整合到用户的衣服或配件。随着科学技术和人工智能的兴起和发展, 可穿戴技术的研发逐渐成为康复医学领域的热点。可穿戴技术具有微型化、智能化和便捷化特点, 在脊柱畸形术后的神经康复、骨科康复、脊髓损伤康复及老年退行性疾病康复等领域都有越来越广泛的研究与应用。

例如针对重度脊柱畸形并发脊髓损伤患者下肢功能障碍研发的一种可穿戴式外骨骼机器人设备, 有机融合了生物智能和人工智能 2 种智能形式, 通过互适应学习促进人体下肢与机械骨架相互适应, 从而改善患者下肢功能, 促使脊髓损伤患者站起来, 在定义模式下行走, 甚至在被动关节活动度的基础上爬楼梯。另外, 其可通过外骨骼传感系统在皮肤表面探查到大脑传出的、微弱的肌肉运动信号, 利用信号编解码原理判断佩戴者的运动意图, 进而控制外骨骼机器人模拟完成相应的动作。此外, 其外骨骼可以通过输入定量运动刺激实现定量检测和评价手段, 为佩戴者提供更科学的行走模式。通过传感器采集人体运动过程中关节的角度和角速度, 能够较好地根据实际环境要求调整行走过程中的步态, 建立科学的步态规划, 有助于改善患者的下肢功能障碍。

脊柱畸形患者术后为保护经过矫正的椎骨,很长一段时间内不能自由活动,以免脊柱二次受损,平时应当静卧,外出时要佩戴支具,而佩戴支具和长期卧床可能会引发一些并发症如压疮等。此时使用可穿戴式智能服装可以通过衣服上的电极,温和地冲击身体的特定部位以增加血流量,可极大降低压疮风险。此类产品还有可穿戴式智能鞋和可穿戴式外骨骼手等,它们都能显著改善患者的异常运动模式和肢体功能,为高骨龄、四肢骨失去发育潜力的脊柱畸形患者带来了福音。

4 人工智能在脊柱畸形诊疗中的展望

人工智能基于多元神经网络的深度学习,需要对充分的理论基础与大样本的标准数据进行分析与学习。目前人工智能的发展仍处于初步阶段,其操作系统尚不稳健,远期效果有待确认。由于目前对于疾病的认识仍较片面,在疾病诊治方面,人工智能仍有误诊、漏诊现象存在,且其治疗结果并非100%有效。尽管已有诸多分型与理论作为支撑,但对于更细致、更进一步的模拟与规划仍存在许多细节有待优化^[30]。例如脊柱畸形伴发或并存其他非相关疾病时,人工智能并不能预测其可能对机体造成的影响,必须引入更多学科的数据模块才能完善这一功能;人工智能可以大幅度地降低复杂手术意外的发生率,但对于已经出现的突发状况尚没有很好的应对措施,这也需引入相关的算法解决;人工智能高昂的费用也使许多患者望而却步,限制了其实际应用价值,所以后续产品在研发设计时应从科研型过渡到经济型。此外,人工智能医疗在为诊治脊柱畸形创造机遇的同时带来了许多法律和伦理问题,而这些因素限制了人工智能在脊柱畸形诊疗中的应用。鉴于此,人工智能技术发展较为迅速的欧美国家纷纷出台了相应的政策,规范了人工智能医疗的使用原则^[31]。而国内尚未有人工智能医疗企业获批医疗器械许可证,各项标准和规范也仍在讨论中,真正自动诊疗的实现任重道远^[32]。

但不可否认的是,人工智能的发展为医师与患者都带来了福音,不仅可以为首诊提供极高精确性的认知,减少当今社会尤其是中国医患资源不对等的矛盾,同时手术的规划也为非脊柱专科医师提供了更好、更快学习的参考与福利。在人工智能辅助下,医师不再需要很长的学习曲线及诸多失败的经

验教训,进而为更多的患者减少疾病的痛苦及手术本身带来的不确定性伤害。相关人性化的预后治疗也为患者提供了更舒适、更个体化的治疗服务。未来的产品若能作为功能插件径直安装至医师工作站平台,或直接捆绑设备厂商进行功能升级,将促使人工智能融入临床路径,从而形成一个完整的治疗体系,成为很好的服务模式,这也是人工智能医疗发展的短期目标之一。

总体而言,人工智能对脊柱畸形诊疗的影响极其明显,多学科交叉已成为当今医学发展的主流,尤其是工科、计算机与脊柱外科的结合将成为未来脊柱畸形诊疗发展的趋势。

[参考文献]

- [1] LI C X, SHEN C B, XUE K, SHEN X, JING Y, WANG Z Y, et al. Artificial intelligence in dermatology: past, present, and future[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2019, 132: 2017-2020.
- [2] LIANG H, TSUI B Y, NI H, VALENTIM C C S, BAXTER S L, LIU G, et al. Evaluation and accurate diagnoses of pediatric diseases using artificial intelligence[J]. *Nat Med*, 2019, 25: 433-438.
- [3] GALBUSERA F, CASAROLI G, BASSANI T. Artificial intelligence and machine learning in spine research[J/OL]. *JOR Spine*, 2019, 2: e1044. doi: 10.1002/jsp2.1044.
- [4] 庞骄阳,赵岩,肖宇龙,辛大奇. 3D 打印技术在脊柱外科的应用[J]. *中国组织工程研究*, 2016, 20: 577-582.
- [5] 彭凡,姜锦鹏,廖振华,刘伟强. 脊柱生物力学信号智能分析系统的研究[J]. *北京生物医学工程*, 2013, 32: 559-564.
- [6] LEE J G, JUN S, CHO Y W, LEE H, KIM G B, SEO J B, et al. Deep learning in medical imaging: general overview[J]. *Korean J Radiol*, 2017, 18: 570-584.
- [7] ZHANG J, LOU E, LE L H, HILL D L, RASO J V, WANG Y. Automatic Cobb measurement of scoliosis based on fuzzy Hough Transform with vertebral shape prior[J]. *J Digit Imaging*, 2009, 22: 463-472.
- [8] RAMADAN A, CHOLEWICKI J, RADCLIFFE C J, POPOVICH J M Jr, REEVES N P, CHOI J. Reliability of assessing postural control during seated balancing using a physical human-robot interaction[J]. *J Biomech*, 2017, 64: 198-205.
- [9] OKTAY A B, AKGUL Y S. Localization of the lumbar discs using machine learning and exact probabilistic inference[J]. *Med Image Comput Comput Assist Interv*, 2011, 14(Pt 3): 158-165.
- [10] EGGER J, KAPUR T, DUKATZ T, KOLODZIEJ M, ZUKIĆ D, FREISLEBEN B, et al. Square-cut: a segmentation

- algorithm on the basis of a rectangle shape[J/OL]. PLoS One, 2012, 7: e31064. doi: 10.1371/journal.pone.0031064.
- [11] SCHWARZENBERG R, FREISLEBEN B, NIMSKY C, EGGER J. Cube-cut: vertebral body segmentation in MRI-data through cubic-shaped divergences[J/OL]. PLoS One, 2014, 9: e93389. doi: 10.1371/journal.pone.0093389.
- [12] MENON K V, KUMAR D, THOMAS T. Experiments with a novel content-based image retrieval software: can we eliminate classification systems in adolescent idiopathic scoliosis?[J]. Global Spine J, 2014, 4: 13-20.
- [13] GARCÍA-CANO E, ARÁMBULA COSÍO F, DUONG L, BELLEFLEUR C, ROY-BEAUDRY M, JONCAS J, et al. Dynamic ensemble selection of learner-descriptor classifiers to assess curve types in adolescent idiopathic scoliosis[J]. Med Biol Eng Comput, 2018, 56: 2221-2231.
- [14] AKBAR M, TERRAN J, AMES C P, LAFAGE V, SCHWAB F. Use of Surgimap spine in sagittal plane analysis, osteotomy planning, and correction calculation[J]. Neurosurg Clin N Am, 2013, 24: 163-172.
- [15] HETHERINGTON J, LESSOWAY V, GUNKA V, ABOLMAESUMI P, ROHLING R. SLIDE: automatic spine level identification system using a deep convolutional neural network[J]. Int J Comput Ass Rad, 2017, 12: 1189-1198.
- [16] 韩应超, 谭军. 机器人在脊柱外科手术中的研究进展[J]. 中国矫形外科杂志, 2012, 20: 1861-1864.
- [17] 于研, 吴洋春, 程黎明. 机器人辅助脊柱微创手术的历史演变与前景展望[J]. 2013, 13: 103-105.
- [18] SUESS O, SCHOMACHER M. Control of pedicle screw placement with an electrical conductivity measurement device: initial evaluation in the thoracic and lumbar spine[J/OL]. Adv Med, 2016, 2016: 4296294. doi: 10.1155/2016/4296294.
- [19] WATAD A, BRAGAZZI NL, BACIGALUPPI S, AMITAL H, WATAD S, SHARIF K, et al. Artificial neural networks can be effectively used to model changes of intracranial pressure (ICP) during spinal surgery using different non invasive ICP surrogate estimators[J/OL]. J Neurosurg Sci, 2018. doi: 10.23736/S0390-5616.18.04299-6.
- [20] FORESTIER G, PETITJEAN F, RIFFAUD L, JANNIN P. Automatic matching of surgeries to predict surgeons' next actions[J]. Artif Intell Med, 2017, 81: 3-11.
- [21] RUHAN Sa, OWENS W, WIEGAND R, STUDIN M, CAPOFERRI D, BAROOHA K, et al. Intervertebral disc detection in X-ray images using faster R-CNN[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2017, 2017: 564-567.
- [22] BURNS J E, YAO J, SUMMERS R M. Vertebral body compression fractures and bone density: automated detection and classification on CT images[J]. Radiology, 2017, 284: 788-797.
- [23] JAMALUDIN A, LOOTUS M, KADIR T, ZISSERMAN A, URBAN J, BATTIÉ M C, et al; Genodisc Consortium. ISSLS PRIZE IN BIOENGINEERING SCIENCE 2017: Automation of reading of radiological features from magnetic resonance images (MRIs) of the lumbar spine without human intervention is comparable with an expert radiologist[J]. Eur Spine J, 2017, 26: 1374-1383.
- [24] ZHANG J, LOCKHART T E, SOANGRA R. Classifying lower extremity muscle fatigue during walking using machine learning and inertial sensors[J]. Ann Biomed Eng, 2014, 42: 600-612.
- [25] LAFAGE R, PESENTI S, LAFAGE V, SCHWAB F J. Self-learning computers for surgical planning and prediction of postoperative alignment[J]. Eur Spine J, 2018, 27(Suppl 1): 123-128.
- [26] HADDAS R, BELANGER T. Clinical gait analysis on a patient undergoing surgical correction of kyphosis from severe ankylosing spondylitis[J/OL]. Int J Spine Surg, 2017, 11: 18. doi: 10.14444/4018.
- [27] 陶瑞媛, 张春华. 人工智能时代下健身类APP计步功能的效度研究[C]// 第十一届全国体育科学大会论文摘要汇编. [出版地不详]. 2019: 3.
- [28] 杨旭明, 俞仲毅, 程建华. 基于数字PID增量式算法带彩色液晶模块的脊柱牵引器的研制[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 12: 3245-3248.
- [29] 张凯, 何非, 李东波. 智能脊柱理疗设备摆动机构设计与分析[J]. 机械设计与制造工程, 2015, 44: 24-28.
- [30] 王海洲, 王冠. 基于深度学习的人工智能医疗应用与存在的问题[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2019, 31: 118-121.
- [31] WINFIELD A F T, JIROTKA M. Ethical governance is essential to building trust in robotics and artificial intelligence systems[J/OL]. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 2018, 376: 20180085. doi: 10.1098/rsta.2018.0085.
- [32] 曹晖, 顾佳毅. 人工智能医疗给外科医生带来的挑战、机遇与思考[J]. 中国实用外科杂志, 2018, 38: 28-33.

[本文编辑] 杨亚红