高兴. 基于深度学习的前交叉韧带损伤研究进展[J]. 智能计算机与应用,2026,16(1):124-128. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24033103

基于深度学习的前交叉韧带损伤研究进展

高 兴

(上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘 要: 人工智能(AI)和深度学习(DL)在医学领域的变革性影响,得益于数据聚合和深度学习算法的飞速进步。随着 AI 在医疗保健领域的广泛应用,其在骨科手术领域的多方面已产生了显著学术影响。该综述的重点在于,探讨前交叉韧带(ACL)重建手术之前、期间和之后,基于 AI 工具的综合临床相关性文献。概述了目前 AI 在术前管理中的应用及未来前景,包括风险预测、诊断,以及术后护理和康复等方面,此外,还介绍了 AI 工具在教育和培训环境中的应用。随着应用于 ACL 损伤治疗的人工智能工具研究数量的指数级增长,其在未来临床实践中有望产生深远影响,这一点已逐渐受到骨科医生的广泛重视,讨论的结果也进一步证实了这一趋势。

关键词: 人工智能; 前交叉韧带; 深度学习; 膝伤; 诊断

中图分类号: TP399 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-2163(2026)01-0124-05

Progress in anterior cruciate ligament injury based on deep learning

GAO Xing

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The transformative impact of Artificial Intelligence (AI) and Deep Learning (DL) in the medical field is due to rapid advances in data aggregation and deep learning algorithms. With the widespread application of AI in the healthcare field, it has made a significant academic impact in various aspects of orthopedic surgery. The review focuses on exploring the comprehensive clinical relevant literature based on AI tools, before, during and after Anterior Cruciate Ligament (ACL) reconstruction surgery, the current application and future prospects of AI in preoperative management, including risk prediction, diagnosis, and postoperative care and rehabilitation, are outlined. In addition, the application of AI tools in educational and training settings is introduced. With the exponential growth in the number of AI tool studies applied to ACL injury therapy, it is expected to have a profound impact in future clinical practice, which has gradually been widely valued by orthopedist, and the results of the discussion further confirm this trend.

Key words: Artificial Intelligence; anterior cruciate ligament; deep learning; knee injury; diagnosis

0 引 言

近年来,骨科手术相关的智能技术发展在 2 个方面得到了主要应用:将人工智能(AI)集成到诊断和治疗骨科疾病的决策支持系统中,以及在外科手术中采用手术机器人[1]。人工智能的起源可以追溯到 1956 年,当时约翰·麦卡锡教授首次提出了这个概念。从那时起,人工智能的概念经历了革命性的演变,进而衍生了可以复制人类神经元细胞功能的深度学习(DL)和进化网络。数据聚合和深度学习算法的突破性进步使得人工智能和机器学习(ML)有望能够成为彻底改变医学领域的技术工具。

近期,有关将人工智能技术与骨科手术及运动医学相结合的研究工作,已引起广大骨科医生的高度关注。这些应用一方面可为运动员受伤风险评估、患者影像数据分析及患者结果报告综合评估等方面提供有力支持,另一方面还能全面提升患者的就医体验[2]。

骨科运动病理学中,膝盖损伤占据运动伤害的比重近半,其中前交叉韧带(ACL)撕裂居于首位,占比高达 78%。ACL 重建手术虽在手术技术、移植物选择、固定装置及康复方案等方面有待完善,但其在确保手术安全、减少外科医生操作可重复性、提升患者满意度及术后效果等方面仍被普遍认可。在 ACL 损伤的治疗领域,人工智能(AI)与机器学习(ML)技术展现出显著提高诊断精度、预测 ACL 损

作者简介: 高 兴(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向:生物医学工程研究。Email:965224044@qq.com。

收稿日期: 2024-03-31

伤风险及优化疼痛管理与康复方案的巨大潜力。然而，这些技术的应用潜力尚未得到充分开发。本文综述旨在系统分析 ACL 重建手术全过程中应用基于 AI 工具的临床相关性文献，重点关注 AI、ML 及深度学习（DL）的运用，并阐述三者概念差异。这些技术在骨科领域已构建多种应用模型，如随机森林模型、支持向量机、多层感知器、卷积神经网络（CNN）、交替决策树及递归神经网络等。

在 ACL 损伤的治疗中，AI 和 ML 的应用正在改变人们对疾病的认知和处理方式。这些技术不仅可以帮助医生更准确地诊断 ACL 损伤，还能预测患者的康复进程和可能的风险。例如，通过深度学习算法，可以训练模型识别 MRI 图像中的细微病变，从而提前发现 ACL 损伤。此外，机器学习模型还能根据患者的历史数据预测其康复过程中的难点和挑战，为医生和患者提供更有针对性的康复建议。

综上所述，AI 和 ML 在 ACL 损伤治疗中的应用为人们提供了新的视角和工具，有望提高疾病诊断的准确性，优化康复方案，改善患者的生活质量。未来，必将涌现更多关于这一领域的研究和实践成果。

1　深度学习在前交叉韧带损伤预测中的应用

得益于人工智能和深度学习技术的持续推动，预测 ACL 损伤的算法已取得了显著进展。Pedoia 等学者[3]研发了一种基于三维磁共振成像（MRI）技术的形状统计模型，该模型能够精准提取并比较患者的胫骨和股骨形态，且无需考虑是否患有前交叉韧带损伤。据广泛的研究结果显示，特定的形态特征，如髁间宽度和胫骨后斜度，与 ACL 损伤风险之间存在强烈的关联性。这种形状统计模型在测量这些关键特征方面表现出色，能够为医生提供复杂 3D 成像表面的详尽描述，进而为临床决策提供有力支持。

Johnson 等学者[4]研发了一种基于 DL 的系统，旨在作为运动员工作负荷监控与膝关节损伤风险评估的早期预警机制。其核心目标在于精确捕捉实时三维（3D）膝关节运动数据。该系统采用预训练的 CNN 模型，当运动员执行走路、跑步和侧步等 3 种与运动相关的活动时，通过标记动作进行实时捕捉。通过对这些数据的综合分析，可以评估与前交叉韧带损伤相关的 3D 膝关节运动。据研发者所述，这一基于 DL 的系统目前仅作为在运动比赛中实时评估运动员膝盖损伤风险的技术初步。未来，该技术有望为运动员的健康管理和运动损伤预防提供科学基础和实施依据。

Taborri 等学者[5]研发了一种依托人工智能技术的量化评估方法，旨在评估运动员前交叉韧带（ACL）损伤的风险。该方法通过集成惯性传感器与光电设备，精准测量运动员在跳跃后的腿部稳定性、活动能力以及收缩能力。此外，还运用了落地错误评分系统，该系统与 ACL 损伤风险预测具有高度相关性，从而有效确定了运动员的潜在危险系数。

Tamimi 等学者[6]通过运用一组关键的膝关节形态特征数据，借助机器学习监督模型，成功地开发出一种用于预测原发性 ACL 损伤风险的模型。在手术前，采用了 MRI 扫描技术，精确测量了胫骨内外侧的前后长度、骨斜率以及内外侧半月板的斜率等多个关键参数。通过运用 Matlab R2019b 软件平台，进一步开发出基于人工智能技术的预测工具，并构建了相应的预测模型。经过验证，该 AI 预测模型在检测原发性 ACL 损伤方面的准确率超过了 90%，展现出极高的可靠性和实用性。

2　深度学习在前交叉韧带损伤诊断中的应用

半月板、前交叉韧带及其他韧带的损伤极为常见，膝关节 MRI 作为常用的诊断手段，在评估这些损伤中发挥着关键作用。近年来，人工智能、尤其是深度学习技术，已受到广泛关注与研究，旨在提升放射科医生在临床实践中的诊断能力[7]。鉴于膝关节 MRI 检查的高频率、图像质量上乘、临床相关性明显、解剖结构直观、定位标准化以及损伤类型明确等特点，多数深度学习算法均聚焦于膝关节 MRI 图像的内部紊乱识别与描述[8]。在诊断过程中，专家的临床检查至关重要，用于评估膝关节的稳定性。其中，Lachman 试验和 Pivot Shift 试验是诊断前交叉韧带完全撕裂的常用临床方法，具备高度的敏感性和特异性。除确认前交叉韧带损伤外，MRI 还能确定损伤类型，为手术决策及并发膝关节损伤的诊断提供重要依据。

Bien 等学者[9]在 2018 年开展了一项研究，其主要目标是开发一款名为 MRNet 的深度卷积神经网络模型，旨在评估膝关节的 MRI 检查。该模型着重关注的是检测各类膝关节损伤，包括前交叉韧带撕裂的情况。该研究使用了包含 1 370 个膝关节 MRI 图像的数据集，涵盖了矢状面 T2 加权、冠状面 T1 加权和轴向 PD 加权 MRI 图像。经过训练和验证，MRNet 模型在诊断前交叉韧带撕裂方面有不错的性能表现，其受试者工作特征曲线下面积（AUC）

值高达 97%,显示出较高的准确性。研究进一步发现,该模型在检测异常情况方面与放射科医生相当,当临床专家在模型的辅助下,对于 ACL 撕裂方面的特异性识别有了显著提升。同时,借助深度学习算法的辅助,放射科医生的敏感度提高了 5%。综上所述,该研究表明深度学习模型在提高临床专家评估医学影像方面的表现具有积极作用,有助于进一步提高诊断准确性。这为医学影像诊断领域的发展提供了新的思路和方法。

Liu 等学者[10]于 2019 年进行了一项研究,该研究旨在探讨在膝关节 MRI 检测中,运用基于 DL 的自动化手段来识别前交叉韧带撕裂的可行性。此项研究以关节镜检查结果作为评估的参考标准。研究中采用了 3-Tesla (T) MRI 和 t2 加权图像,结果显示,该自动化方法展现出了与临床放射科医生相近的诊断性能。具体来说,该方法的敏感性和特异性均达到了 0.96,与临床放射科医生的诊断表现(敏感性:0.96~0.98;特异性:0.90~0.98)无显著差异。此外,采用的 CNN 模型在总体诊断准确率上也表现出色,AUC 值高达 98%。综上结果表明,基于 DL 的自动化方法在膝关节 MRI 检测前交叉韧带撕裂方面具有较高的准确性和可行性。

在同一年内,其他研究亦对 CNN 模型在诊断全层 ACL 撕裂方面的应用进行了评估。Richardson[11]的研究通过采用脂肪饱和(FS)和非脂肪饱和(NFS)条件下的矢状图像,深入探讨了 CNN 模型替代临床医生进行诊断的可行性。研究中的结果显示,NFS 和 FS 的 AUC 值分别达到了 99.8%和 99.9%,均显示出优越的敏感性和特异性。值得一提的是,FS 条件下的敏感性在统计学上显著优于 NFS。另一方面,Peter 等学者[12]进行的研究则着重在运动损伤中利用 DL 技术对完全前交叉韧带撕裂进行 MRI 检测的效果。该研究采用了特定的网络架构,并应用了 5 层动态补丁采样算法。测试集的准确率超过了 96%,充分证明了定制的三维 DL 方法在 MRI 扫描中检测完整 ACL 撕裂的有效性。

在 2020 年,有关将 CNN 模型应用于 ACL 损伤诊断的研究逐渐增多,并取得了显著的成果。Zhang 等学者[13]采用 1.5 T 和 3.0 T 的二维矢状质子密度加权谱衰减反演恢复序列,构建并测试了基于 3D DenseNet 架构的 CNN 模型,同时与 VGG16 和 ResNet 两种算法进行了比较。研究结果显示,该 3D DL 架构的灵敏度达到 98%,特异性为 94%,准确率为 96%,相较于单独的 ResNet(95%)和 VGG16(86%)具有更好的表现。另一项由 Germann 等学者进行的研究,则详细描述了自动识别 ACL 撕裂的定制方法,并通过冠状面和矢状面脂肪抑制的流体敏感 MRI 图像进行了验证,关节镜手术被用作参考标准。在统一的内部数据集(包含 1.5 T 和 3.0 T 的 MRI 扫描)上进行的测试中,CNN 模型表现出极高的准确性,灵敏度为 99%,特异性为 94%,AUC 值达到了 97%。这些研究结果表明,CNN 模型在 ACL 损伤诊断中具有广阔的应用前景。

在此之前,多数 CNN 模型聚焦于 ACL 是否完整或撕裂的二分类问题。但在 2020 年,Namiri 等学者[14]提出了一种多类别 CNN 模型,通过更加全面的方法,将 ACL 损伤划分为 4 个不同等级:完整、部分厚度撕裂、全层撕裂以及重建后的 ACL 移植物。该模型在识别 ACL 移植物方面的准确率极高,灵敏度范围为 97%~100%,特异性达到了 100%。对于完整的 ACL,CNN 模型的灵敏度介于 89%~93%之间,特异性则在 88%~90%之间。当面对全层前交叉韧带撕裂时,该模型的敏感性为 76%~82%,特异性则保持在 94%~100%之间。

自 2021 年起,在针对 MRI 诊断 ACL 损伤的研究中,采用自定义架构的 CNN 模型呈现出迅猛的增长态势。目前,已开发出多种深度学习(DL)模型,涵盖 VGG16、VGG19、U-Net、AdaBoost、XGBoost、Xception、MRPyrNet、Inception ResNet - v2、RadImageNet 以及 Inception-v3 DTL 等。Awan 等学者[15]提出了一种独特的 14 层 ResNet-14 配置方法,能够在 6 个不同方向上处理数据。此方法巧妙地结合了类平衡与数据增强技术,从而实现了高效的数据处理。实验结果显示,对于完整 ACL、部分撕裂和完全撕裂的 AUC 值分别高达 98%、97%和 99.9%,显示出极高的诊断准确性。

另一项由 Li 等学者[16]开展的研究,重点强调了基于 DL 的 MRI 矢状面检测在 ACL 损伤诊断中的卓越性能。该方法在灵敏度、特异性和准确性方面均表现出色,具体数值分别为 96.78%、90.62%和 92.17%。这些结果与关节镜检查结果相当,且无明显差异,进一步验证了该方法的可靠性和实用性。

近期,算法算力逐渐普及至更广泛的人群。Minamoto 等学者[17]致力于研发一种专门用于检测 ACL 断裂的算法,该算法充分利用了近 20 000 个 MRI 扫描构成的大型数据集。经过验证,该算法展现出卓越的性能,其 AUC 值高达 0.939,同时保持了 87%的灵敏度和 91%的特异性。值得一提的是,

该算法在针对不同国家患者进行的测试中，其 AUC 值分别为 0.962 和 0.922，均显示出强大的稳定性和可靠性。这一研究成果为 ACL 断裂的检测提供了新的有效手段。

3　深度学习在前交叉韧带损伤术后护理与康复中的应用

经过深入研究和广泛应用，ML 与 AI 在 ACL 重建（ACLR）术后护理及康复领域正逐渐凸显其不可或缺的重要性。应用时通过精准分析个体数据，为定制化和精细化治疗方案提供了有力支持，进一步提升了患者康复效果[18]。

术后康复在恢复运动能力上发挥着关键作用，尤其对于运动员，亦普遍适用于接受 ACL 重建手术的患者群体。不仅有助于肌肉的再生和预防再次受伤，还促进了心理层面的恢复，使运动员在运动中重建信心，安全且有效地取得佳绩[19]。在重返赛场的过程中，可以通过特定的参数来记录与评估一些训练活动的表现。Corban 等学者[20]运用动作捕捉系统（Microsoft Kinect V2）对垂直下落跳跃（DVJ）动作进行了研究。研究显示，在 DVJ 过程中，冠状角峰值的增加和矢状角峰值的减少与非接触性 ACL 损伤的高风险存在关联。Daggett 等学者[21]则回顾性地研究了一种运动捕捉系统，通过分析算法得出的评分，为 ACL 重建术后患者的活动能力、姿态和准备程度提供了客观的评价。一种创新的 3D 动作捕捉系统（DARI motion，Overland Park，KS，USA）已经获得了美国食品和药物管理局（FDA）的批准，用于收集每个身体动作的生物力学参数。研究结果表明，评估多种生物特征变量对于避免单纯依赖代偿机制至关重要，并突显了非侵入性运动捕捉技术在提高进展评估的客观性和频率方面的潜力，从而为实现更具针对性和有效性的康复方法提供了可能。然而，由于缺乏统一的指导原则或客观的评估方法，此项研究也凸显了在监测康复进展方面所面临的挑战。

尽管众多研究已经深入探讨了运动模式与运动表现对损伤风险的影响[22]，然而，现有的指南仍不足以清晰界定运动缺陷或正常运动范围。值得一提的是，可访问的动作捕捉系统已成为在恢复比赛阶段大规模筛查 ACL 再次受伤风险的实用且经济的工具。同时，该系统还有潜力与 ML 和 AI 系统相结合，进一步提升评估的准确性和效率。

Martin 等学者[23]运用无监督机器学习技术对丹麦与挪威的前交叉韧带登记数据进行了深入分析，旨在揭示患者群体的异质性。研究采用 K-prototypes 聚类算法，对完整的前交叉韧带登记数据进行了细致剖析。结果显示，存在 5 个差异化的患者群体，每个群体的前交叉韧带重建手术再修复率呈现显著差异。值得注意的是，通过患者的年龄、移植物选择及术前运动评分等关键指标，便能将患者大致归类至这 5 个群体之一。一旦这些发现得到外部验证，这些分类将能在临床实践中用于迅速评估患者的风险水平。此项研究的突出创新点在于利用无监督 ML 技术识别前交叉韧带重建手术患者的不同群体，有望协助医生更精准地预测患者是否需要再次接受前交叉韧带重建手术。此外，该研究为临床医生提供了一种实用的风险评估工具，对于优化治疗方案和提高手术成功率具有显著价值。

4　深度学习在医师培训中的应用

计算机辅助手术的重要性日益凸显。不仅改变了外科医生所需技能的要求，同时也促进了创新教学方法的发展。特别值得关注的是，虚拟现实（VR）模拟器为外科医生提供了一个安全、多样且高度仿真的操作环境，旨在帮助医生提升手术技能和专业知识水平[24]。然而，要充分发挥这些模拟器的教育潜力，就必须赋予其自动评估操作性能并提供即时反馈的能力。在这一领域，深度学习的应用已成为推动技术革新的核心力量。

当前，外科培训领域普遍认为 VR 模拟器具有举足轻重的地位，其终极目标在于提升患者的护理质量。针对外科及教育领域的实际需求，现已研发出一种算法，具备自动分割关节镜框架的功能，为外科医生提供了额外的上下文感知能力。U-NET 算法作为一种专为生物医学图像分割设计的 CNN 模型，能够高效处理关节镜视频片段，将其作为输入后，可实时生成描绘外科医生在手术过程中观察到的解剖结构的分割图像[25]。

5　结束语

在前交叉韧带撕裂的治疗过程中，人工智能工具在提升诊断质量、精确预测损伤风险以及制定术后康复方案等方面展现出了显著的应用价值。尤其在 ACL 损伤诊断领域，通过深度学习的广泛运用，AI 图像辅助诊断系统在多参数 MRI 分析处理方面的优势得到了充分体现，这不仅为临床决策提供了有力支持，还极大地减轻了医生的工作负担，提高了

工作效率,并有效降低了误诊率。此外,机器学习和人工智能技术在康复领域的应用,使得高度个性化和动态化的康复方法成为可能。机器学习所具备的持续学习能力,有助于不断优化预测和建议,进而改善患者的长期康复效果。目前,关于人工智能工具在前交叉韧带撕裂治疗方面的研究正呈现出迅猛的增长态势,预示着其在未来临床应用中将发挥更加重要的作用,并越来越受到骨科医生的高度关注和重视。

参考文献

[1] 韩晓光, 朱小龙, 姜宇桢, 等. 人工智能与机器人辅助医学发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 43-54.

[2] 赵璇, 徐俊杰, 边智琦, 等. 手术机器人结合 5G 在运动医学中的应用研究[J]. 中国数字医学, 2022, 17(6): 20-25.

[3] PEDOIA V, LANSDOWN D, ZAID M, et al. Three-dimensional MRI-based statistical shape model and application to a cohort of knees with acute ACL injury[J]. Osteoarthritis Cartilage, 2015, 23(10): 1695-1703.

[4] JOHNSON W, MIAN A, LLOYD D, et al. On-field player workload exposure and knee injury risk monitoring via deep learning[J]. Journal of Biomechanics, 2019, 93: 185-193.

[5] TABORRI J, MOLINARO L, SANTOSPAGNUOLO A, et al. A machine-learning approach to measure the anterior cruciate ligament injury risk in female basketball players[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(9): 3141.

[6] TAMIMI I, BALLESTEROS J, LARA A, et al. A prediction model for primary anterior cruciate ligament injury using artificial intelligence[J]. Orthopaedic Journal of Sports Medicine, 2021, 9(9): 23259671211027543.

[7] 陈冲, 陈俊, 夏黎明. 人工智能促进医学影像临床应用与研究[J]. 放射学实践, 2024, 39(1): 12-16.

[8] 庾广文, 谢俊杰, 梁嘉健, 等. 深度学习对膝骨关节炎 MRI 图像智能分割和测量分析的作用及意义[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(33): 5382-5387.

[9] BIEN N, RAJPURKAR P, BALL R, et al. Deep-learning-assisted diagnosis for knee magnetic resonance imaging: Development and retrospective validation of MRNet[J]. PLOS Medicine, 2018, 15(11): e1002699.

[10] LIU Fang, GUAN Bochen, ZHOU Zhaoye, et al. Fully automated diagnosis of anterior cruciate ligament tears on knee MR images by using deep learning[J]. Radiology-Artificial Intelligence, 2019, 1(3): 180091.

[11] RICHARDSON M. MR protocol optimization with deep learning: A proof of concept[J]. Current Problems in Diagnostic Radiology, 2021, 50(2): 168-174.

[12] PETER D, TONY T, RASIEJ M. Deep learning for detection of complete anterior cruciate ligament tear[J]. Journal of Digital Imaging, 2019, 32(6): 980-986.

[13] ZHANG Lingyan, LI Mifang, ZHOU Yujia, et al. Deep learning approach for anterior cruciate ligament lesion detection: Evaluation of diagnostic performance using arthroscopy as the reference standard[J]. Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2020(6): 1745-1752.

[14] NAMIRI N, FLAMENT I, ASTUTO B, et al. Deep learning for hierarchical severity staging of anterior cruciate ligament injuries from MRI[J]. Radiology-Artificial Intelligence, 2020, 2(4): e190207.

[15] AWAN M, RAHIM M, SALIM N, et al. Efficient detection of knee anterior cruciate ligament from magnetic resonance imaging using deep learning approach[J]. Diagnostics (Basel), 2021, 11(1): 105.

[16] LI Zijian, REN Shiyou, ZHOU Ri, et al. Deep learning-based magnetic resonance imaging image features for diagnosis of anterior cruciate ligament injury[J]. Journal of Healthcare Engineering, 2021, 2021: 4076175.

[17] MINAMOTO Y, AKAGI R, MAKI S, et al. Automated detection of anterior cruciate ligament tears using a deep convolutional neural network[J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2022, 23(1): 577.

[18] 温雅婷, 潘咏薇, 徐云, 等. 智能负重机器人在前交叉韧带重建患者康复训练的应用[J]. 护理学杂志, 2022, 37(24): 75-78.

[19] 宋金凤, 范丹丹, 刘泽键, 等. 膝关节前交叉韧带重建术后康复治疗进展[J]. 中国老年保健医学, 2023, 21(4): 3-8.

[20] CORBAN J, KARATZAS N, ZHAO Yongting, et al. Using an affordable motion capture system to evaluate the prognostic value of drop vertical jump parameters for noncontact ACL injury[J]. American Journal of Sports Medicine, 2023, 51(4): 1059-1066.

[21] DAGGETT M, WITTE K, CABARKAPA D, et al. Evidence-based data models for return-to-play criteria after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Healthcare (Basel), 2022, 10(5): 929.

[22] 仇嘉宇, 王聪, 赵金忠. 膝关节体内运动评估在前交叉韧带损伤重建中的应用[J]. 国际骨科学杂志, 2021, 42(3): 129-134.

[23] MARTIN R, WASTVEDT S, PAREEK A, et al. Predicting anterior cruciate ligament reconstruction revision: A machine learning analysis utilizing the Norwegian knee ligament register[J]. The Journal of Bone and Joint Surgery, 2022, 104(2): 145-153.

[24] 毛宁波, 张煜, 侯雨潇等. 扩展现实技术在骨科手术实践及教学培训中的应用研究进展[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2021, 14(10): 890-896.

[25] JONMOHAMADI Y, TAKEDA Y, LIU Fengbei, et al. Automatic segmentation of multiple structures in knee arthroscopy using deep learning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 51853-51861.