

计算机辅助影像分析在骨折愈合量化评估中的应用

李军卓 赵延君 管宇

黑龙江总队医院 黑龙江哈尔滨 150000

摘要: 本研究旨在解决临床骨折愈合评估依赖传统影像学主观判断、缺乏统一量化标准的问题,探索计算机辅助影像分析技术的解决方案。研究利用深度学习算法进行影像分割与特征提取,并构建机器学习量化评估模型,对骨痂的形态、密度和纹理进行客观测量。研究结果验证了该系统的评估准确性、可重复性和在辅助个体化治疗决策方面的潜力。结论表明,该技术能够有效推动骨折愈合评估从经验定性方法转向数据驱动的精准定量范式,为临床治疗和康复提供创新工具。

关键词: 计算机辅助影像分析;骨折愈合量化评估;精准医疗

一、骨折愈合的生物学基础与影像评估标准

(一) 骨折愈合的生物学阶段与机制^[1]

骨折愈合是一个受精细调控的复杂生物学过程,通常被描述为连续且部分重叠的阶段。传统上,骨折愈合可分为血肿机化期、原始骨痂期和骨痂改造期(重塑期)。从病理生理学角度看,骨折愈合过程主要分为炎症期、修复期(软骨痂和硬骨痂形成)和重塑期。核心机制包括软骨内骨化和膜内骨化,涉及间充质干细胞分化为软骨细胞和成骨细胞、骨痂形成及后续的骨结构重塑。研究证实,这一过程受到多种信号通路(如BMP、VEGF、STAT3、PI3K/AKT等)的严格调控,其中成骨与血管生成之间的耦联机制尤为重要。深入理解这些生物学阶段和分子机制,为发展客观量化影像评估方法奠定了基础。

(二) 传统影像学评估方法的优缺点^[2]

骨折愈合的影像学评估主要依赖X线、CT和MRI。X线操作简便、成本低,是基础筛查手段,但其二维成像在处理复杂骨折和早期骨痂时效果较差。CT能提供精细的三维结构,尤其适用于复杂骨折,但其辐射较高且对软组织的分辨率不足。MRI无辐射,对骨髓水肿及周围软组织损伤显示效果最佳,但检查时间长、成本高,且对皮质骨细节的显示不直接。总体而言,这些方法均依赖医师经验进行主观、定性评估,缺乏统一、客观的量化标准,难以精确描述愈合过程中骨痂的微观动态变化。

(三) 临床骨折愈合评估的定性标准及其局限性

目前,临床骨折愈合评估主要基于X线片的定性标准,如观察骨痂的形态、数量以及骨折线是否模糊或消失。这些标准高度依赖医师的个体经验,导致不同观察者之间及同一观察者前后评估结果存在显著差异。定性描述难以精确定量骨痂的密度变化和成熟度,对早期生物学改变(如软骨痂形成)不敏感,也无法有效识别“延迟愈合”的早期迹象。这种主观性和非量化特性,是导致评估不准确和治疗决策滞后的重要原因。

(四) 量化评估的需求及临床价值

构建骨折愈合的客观量化评估体系具有重要的临床实践价值。该体系通过从医学影像中精准提取骨痂的形态结构、密度分布和纹理特征等关键参数,将临床医师的主观评估经验转化为客观、可追溯的数据信息。这种基于客观数据的评估方法不仅能提高骨折愈合评估结果的可重复性和行业标准化水平,还能精确描述不同阶段骨折愈合的动态过程,为早期识别骨折延迟愈合等异常情况提供可靠的数据支持。此外,该方法还能科学指导治疗方案(如合理确定患者的负重时机),推动骨折治疗从经验医学向精准个体化医学发展,充分发挥计算机辅助影像分析技术的临床应用价值。

二、计算机辅助影像分析的关键技术

(一) 影像预处理与骨分割方法

影像预处理和骨分割是计算机辅助量化评估的重要步骤。预处理通过去噪、对比度增强和灰度归一化等手段,提高影像质量,为后续分析提供基础。骨分割旨在从复杂背景中(如软组织)精准提取目标骨结构。传统方法如基于灰度阈值的分割虽简单高效,但在处理骨折

作者简介: 李军卓,男,汉族,山东乳山,本科,主治医师,研究方向:骨科(创伤、运动医学、脊柱外科)。

区域密度不均或边界模糊时效果有限。当前，基于深度学习的方法，特别是U-Net为代表的卷积神经网络，通过编码-解码结构能够有效学习多尺度特征，在X线和CT影像上实现了高精度的骨骼语义分割，为后续的特征提取提供了可靠的结构基础。

（二）特征提取：形态学、纹理与密度特征

特征提取是从分割后的骨与骨痂区域中量化其生物学和力学属性的关键步骤。提取的特征通常包括三类：形态学特征（如骨痂体积、表面积、三维几何分布），用于宏观评估愈合规模；纹理特征（如基于灰度共生矩阵的对比度、同质性）^[3]，反映骨小梁结构的微观排列和规律性变化；密度特征（如平均灰度值、骨矿物质密度分布），直接关联骨痂的矿化成熟程度。通过机器学习对这些高通量特征进行筛选和融合，可以构建超越人眼视觉的量化评估模型，为愈合阶段判定和预后预测提供客观依据。

（三）机器学习与深度学习在影像分析中的应用

机器学习与深度学习技术的快速发展，正持续推动骨折愈合评估领域从传统定性分析向精准定量评估的方向转型。传统机器学习算法，如支持向量机、随机森林等，主要依赖研究者对骨痂的形态、纹理等特征进行人工提取，再通过模式识别完成骨折愈合阶段的分类任务。深度学习技术，尤其是卷积神经网络，具备端到端的学习能力，能够直接从原始医学影像中自动学习层次化的深度特征，在骨骼区域分割、细微骨痂检测及愈合结局预测等复杂临床任务中表现出更高的精度与稳定性。这两类方法的核心价值在于，可有效挖掘人眼难以辨识的潜在影像模式，进而构建客观、可重复的量化评估模型，为骨折愈合的临床评估工作提供可靠的智能化工具。

（四）量化模型的构建与评估指标

基于提取的影像特征，量化模型通过机器学习算法（如支持向量机、随机森林或深度学习网络）构建特征与临床评估结果之间的映射关系，旨在自动判别愈合阶段或预测延迟愈合风险。模型性能需通过多种指标进行评估：常用分类准确率、精确率、召回率和F1分数衡量判别能力；使用受试者工作特性曲线下面积评估模型对延迟愈合等关键状态的区分效能。此外，组内相关系数和Bland-Altman分析用于验证模型量化结果（如骨痂体积）与医师评估或金标准测量之间的一致性和可重复性。

三、计算机辅助量化评估系统的实现与验证

（一）系统架构与工作流程设计

基于模块化理念搭建的计算机辅助骨折愈合量化评

估系统，主要包含影像输入、预处理与分割、特征提取、量化分析和结果输出四大核心模块。该系统的工作流程以标准化影像数据（如系列X线或CT的DICOM格式）的输入为起点，通过预处理优化图像质量，利用U-Net等深度学习模型自动分割目标骨骼及骨痂区域，从分割区域中自动化提取高维度特征，借助预先训练的机器学习模型将这些特征转化为愈合阶段评分、风险预测等量化指标，以结构化报告或可视化图表的形式输出，为临床决策提供辅助支持^[4]。

（二）数据来源与实验设计

为确保研究的可靠性和临床转化价值，系统的数据应来自多中心、前瞻性收集的骨折患者影像资料（如X线或CT），并包含明确的临床愈合结局作为金标准。实验设计通常采用回顾性或前瞻性队列研究，核心步骤包括：对原始影像进行严格脱敏与标准化；由两名以上高年资骨科医师独立完成骨折区域标注与愈合阶段判定，以解决分歧后的结果作为参照标准；将数据集按比例随机划分为训练集、验证集和独立测试集。在训练集上构建并优化量化模型，在测试集上评估其性能，验证系统的有效性和泛化能力。

（三）量化结果与传统评估的相关性分析

量化结果与传统评估的相关性分析是验证系统临床有效性的关键环节。其核心在于，将系统自动输出的骨痂体积、密度均值和纹理复杂度等量化参数，与临床医师基于影像（如RUST评分）或功能标准判定的愈合阶段进行统计学关联。常用方法包括：对于连续参数与分级结果，使用Spearman等级相关分析；对于模型预测的愈合/延迟愈合二分类结果与临床金标准，则通过计算卡方检验、一致性检验（Kappa值）及绘制列联表进行评估。强相关性或高度一致性表明，量化指标能够客观、可重复地反映临床医生的判断，证明其潜在的辅助诊断价值。

（四）系统准确性、可重复性与临床适用性验证

为确保评估系统的可靠性，需从三个维度进行严格验证。准确性通过计算敏感度、特异度及受试者工作特性曲线下面积等指标，对比系统结果与临床金标准来评估。可重复性则通过分析不同操作者或同一操作者多次使用系统的组内相关系数来验证。临床适用性验证聚焦于系统整合到现有工作流程的便捷性、结果解读的直观性及对临床决策（如调整负重方案）的实际辅助价值，最终通过前瞻性应用研究来检验系统能否有效改善诊疗效率和患者预后。

四、临床应用场景

(一) 在骨折愈合监测中的临床应用案例

计算机辅助影像分析技术在骨折愈合监测中已有具体应用。例如，在陈旧性髌骨骨折的处理中，研究通过CT三维重建和计算机辅助分析，精确评估了骨折移位和新生骨痂情况，为手术规划提供了依据，最终实现了解剖复位和良好功能恢复^[5]。更进一步，有研究通过术后X光片建立的三维生物力学模型，对股骨干骨折的愈合结局进行了预测，成功识别了部分骨不连病例，展现了其在预警骨折并发症方面的潜力。这些案例表明，相关技术不仅可用于阶段性评估，还能为预后判断提供量化参考。

(二) 对个体化治疗与康复指导的辅助价值

该技术的核心辅助价值在于推动骨折治疗从经验模式向个体化精准管理转变。系统通过连续监测获取的骨痂体积、密度等量化指标，能为临床医生提供远超传统定性描述的客观数据，从而科学指导关键决策点，如调整负重时机和强度、优化物理治疗方案及评估内固定物拆除时机。对于患者而言，基于自身愈合曲线的可视化反馈，能显著增强其对康复进程的理解和依从性，实现以患者愈合数据为依据的个性化康复指导，最终提升治疗效果和康复质量。

(三) 多模态影像融合与动态评估的探索

未来的发展方向是探索多模态影像融合与动态评估。通过将X线的便捷性、CT的精细结构信息和MRI卓越的软组织分辨能力进行融合，可以构建更全面的“解剖-功能”一体化评估视图。在此基础上，对同一患者愈合过程中获取的系列影像进行时间序列分析，有望动态、连续地描绘骨痂生长与重塑的生物力学演变轨迹。这种融合和动态分析不仅能更早、更敏感地识别延迟愈合风险，还为理解个体愈合差异和优化干预时机开辟了新路径，是实现智能化、预测性骨折管理的关键一步。

五、结论与展望

(一) 研究成果总结与科研贡献

本研究通过有机整合深度学习影像分割、多维影像特征提取与机器学习建模三项关键技术，成功构建起一套具备客观性与可量化性的骨折愈合计算机辅助评估系统。该研究的科研贡献主要体现在以下三个方面：其一，在方法论层面，该系统的构建与应用实现了骨折愈合评

估领域从依赖临床医师主观经验的传统模式，向基于数据驱动的客观化评估范式的重要转变；其二，在技术层面，研究通过大量实验验证了自动化影像分析技术在骨痂区域精确分割、愈合特征量化分析及愈合结局预测等核心环节的可行性与高精度优势；其三，在临床应用层面，该系统为骨折愈合的个体化动态监测与精准康复决策制定提供了创新型工具与坚实的理论支持，对推动骨科诊疗领域向数字化、智能化的方向发展具有重要意义。

(二) 研究局限性分析与未来研究发展建议

本研究存在一定局限性：首先，模型的训练与验证完全依赖于单中心的回顾性影像数据集，受限于样本的多样性与数量规模，模型的外部普适性与临床推广价值受到一定程度的制约；其次，当前系统的分析对象仅为结构化的影像数据，尚未与患者的临床生化指标、遗传信息等多维度临床数据进行深度融合，评估维度有待拓展。未来发展建议包括：联合多家医疗机构开展前瞻性、多中心的大规模临床研究，以进一步验证和优化模型性能；深入探索融合多组学数据的智能评估框架，提升评估的全面性与精准度；同时推动系统与临床 workflow 深度整合，开发实时、交互式的辅助决策工具，最终实现向预测性、预防性精准骨科模式的跨越。

参考文献

- [1] Wang, X., Dong, W., Wang, X., & Wang, J. (2025). ANXA2 promotes chondrocyte differentiation and fracture healing by regulating the phosphorylation of STAT3 and PI3K/AKT signaling pathways. *Cellular Signalling*, 127(3), 111617.
- [2] 刘菟, 张英剑. 影像学评价骨折愈合的研究进展[J]. 医学信息, 2018, 31(24): 48-51+81.
- [3] 李邦凤, 付玉革, 龚良庚, 等. CT影像组学结合支持向量机对偶发急性及陈旧性椎体压缩性骨折的鉴别诊断价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(02): 149-150+174.
- [4] 陈雁西, 邵志民. 数字化骨科临床研究平台的构建及应用[J]. 中华骨科杂志, 2009, 29(11): 993-999.
- [5] 张学胜, 韩宝生, 苗秋菊. 数字化和3D打印技术辅助治疗陈旧性髌骨骨折[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2020, 17(01): 26-30.