

论著·临床研究

利用深度算法构建高频肌骨超声诊断痛风性关节炎掌指关节病变的人工智能系统及验证

樊向斌, 郑兰兰, 孙 婕, 姚晶晶

(平煤神马医疗集团总医院超声诊断科, 河南 平顶山 467000)

[摘要] **目的** 利用深度算法构建高频肌骨超声诊断痛风性关节炎掌指关节病变的人工智能系统, 并验证该系统的诊断效能。**方法** 回顾性收集 2017 年 2 月至 2023 年 12 月在该院行超声检查的 410 例痛风性关节炎患者的手部高频肌骨超声图像, 并按照 7:3 的比例将其分为训练集($n=287$)和验证集($n=123$)。利用深度算法构建诊断痛风性关节炎掌指关节病变的人工智能系统, 应用训练集进行深度算法训练。以掌指关节滑液偏振光检查阳性为判断标准, 比较低资历、高资历超声医生与人工智能系统对验证集痛风性关节炎掌指关节病变的诊断效能。**结果** 410 例痛风性关节炎患者中有 343 例存在掌指关节病变, 发生率为 83.66%。人工智能系统诊断验证集患者掌指关节病变的灵敏度、特异度、准确度、受试者工作特征曲线下面积(AUC)分别为 85.29%、85.71%、85.37%、0.855。高资历超声医生诊断验证集患者掌指关节病变的灵敏度、准确度均高于低资历超声医生, 差异均有统计学意义($P<0.05$)。人工智能系统诊断验证集患者掌指关节病变的灵敏度、准确度均高于低资历超声医生, 准确度低于高资历超声医生, 差异均有统计学意义($P<0.05$), 灵敏度与高资历超声医生比较, 差异无统计学意义($P>0.05$)。**结论** 利用深度算法构建的人工智能系统对患者中痛风性关节炎高频肌骨超声图像中掌指关节病变的诊断效能良好, 且相较于低资历超声医生的诊断价值更高。

[关键词] 深度算法; 高频肌骨超声; 痛风性关节炎; 掌指关节病变; 人工智能

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2024.24.011 中图法分类号:R445.1

文章编号:1009-5519(2024)24-4193-04

文献标识码:A

Development and validation of an artificial intelligence system based on deep algorithms
for diagnosing metacarpophalangeal joint lesions in gouty arthritis using
high-frequency musculoskeletal ultrasound

FAN Xiangbin, ZHENG Lanlan, SUN Jie, YAO Jingjing

(Department of Ultrasonic Diagnosis, Pingmei Shenma Medical Group General
Hospital, Pingdingshan, Henan 467000, China)

[Abstract] **Objective** To develop an artificial intelligence (AI) system based on deep algorithms for diagnosing metacarpophalangeal (MCP) joint lesions in gouty arthritis using high-frequency musculoskeletal ultrasound and to validate its diagnostic performance. **Methods** High-frequency musculoskeletal ultrasound images of the hands of 410 patients with gouty arthritis who underwent ultrasonography in our hospital from February 2017 to December 2023 were retrospectively collected and divided into a training set ($n=287$) and a validation set ($n=123$) in a 7:3 ratio. An AI system for diagnosing MCP joint lesions in gouty arthritis was developed using deep algorithms and trained with the training set. With positive polarized light examination of MCP joint synovial fluid as the diagnostic criterion, the diagnostic performance of junior and senior ultrasound physicians and the AI system for MCP joint lesions in gouty arthritis in the validation set was compared. **Results** Among the 410 patients with gouty arthritis, 343 had MCP joint lesions, with an incidence rate of 83.66%. The sensitivity, specificity, accuracy, and area under the receiver operating characteristic curve (AUC) of the AI system for diagnosing MCP joint lesions in the validation set were 85.29%, 85.71%, 85.37%, and 0.855, respectively. The sensitivity and accuracy of the senior ultrasound physicians in diagnosing MCP joint lesions in the validation set were higher than those of the junior ultrasound physicians, with statistically significant differences ($P<0.05$). The sensitivity and accuracy of the AI system in diagnosing

MCP joint lesions in the validation set were higher than those of the junior ultrasound physicians but lower than those of the senior ultrasound physicians, with statistically significant differences ($P < 0.05$). However, there was no statistically significant difference in sensitivity between the AI system and the senior ultrasound physicians ($P > 0.05$). **Conclusion** The AI system developed using deep algorithms has good diagnostic performance for MCP joint lesions in high-frequency musculoskeletal ultrasound images of patients with gouty arthritis and provides higher diagnostic value compared to junior ultrasound physicians.

[Key words] Deep algorithms; High-frequency musculoskeletal ultrasound; Gouty arthritis; Metacarpophalangeal joint lesions; Artificial intelligence

痛风性关节炎是一种常见的无菌性关节炎,主要由尿酸盐在关节组织中沉积所致,以关节处疼痛、红肿、发热等为主要表现,且具有病程长、易复发、受累关节多等特点^[1]。痛风性关节炎会造成全身多处关节病变,其中掌指关节是痛风性关节炎患者常见累及关节之一,由于其病变部位在手部关节,发病时可造成患者手部疼痛、手指屈伸困难等,且随着病情进展可出现手部关节变性、功能损失等,进而严重影响患者日常生活^[2]。因此,对痛风性关节炎掌指关节病变早诊断、早治疗,对缓解患者症状、控制疾病进展、降低疾病危害具有重要意义。目前,随着医学影像技术的不断发展,超声检查已成为痛风性关节炎患者病变部位诊断的常用技术,其中高频肌骨超声能显示出清晰的组织层次,与其他影像学技术相比,其在关节囊、肌肉、肌腱等组织方面的分辨率较高,有利于医生对关节部位疾病进行准确判断,且具有操作简单、费用低、可重复性强等特点,被大多数临床患者及医生所接受^[3]。但高频肌骨超声检查的准确性受超声设备性能及检查医生经验影响较大,具有一定的主观性,使得高频肌骨超声对痛风性关节炎,尤其是掌指关节等小关节病变诊断的准确度较低。深度算法是一种基于人工智能的学习算法,可模拟人脑进行识别及诊断,已在图像识别、物体检测等领域广泛使用^[4-6]。鉴于此,本研究利用深度算法构建高频肌骨超声诊断痛风性关节炎掌指关节病变的人工智能系统,并验证该系统的诊断效能,以期为临床痛风性关节炎掌指关节病变的筛查及诊断提供新思路,具体报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集 2017 年 2 月至 2023 年 12 月在本院行超声检查的 410 例痛风性关节炎患者手部高频肌骨超声图像。患者年龄 32~68 岁,平均(49.70±8.49)岁;男 307 例,女 103 例;痛风病程 1~21 年,平均(10.30±1.76)年。纳入标准:(1)患者病历资料完整,符合痛风性关节炎诊断标准^[7];(2)患者年龄大于 18 岁;(3)患者均行掌指关节滑液偏振光检查,明确有无掌指关节病变。排除标准:(1)图像质量

不佳,关节部位显示不清。(2)由其他因素导致的手部畸形;(3)合并类风湿性关节炎、骨关节炎等其他关节疾病。本研究已经过本院伦理委员会审批(审批号:院准字 2024 年第 010 号)。

1.2 方法

1.2.1 超声检查 采用 GE-LOGIQ-E9 超声诊断仪(生产厂家:General Electric Company),探头频率 12 MHz,对患者进行肌骨超声检查;指导患者在自然、放松状态下在检查台上平放双手,将超声探头置于患者自述存在疼痛、红肿、发热的手掌关节处并进行横向及纵向检查,观察患者关节周围肌腱及周围情况,并保持探头不动采集超声图像。

1.2.2 人工智能系统构建

1.2.2.1 图像分类 将收集的 410 例痛风性关节炎患者手部高频肌骨超声图像按照 7:3 的比例分为训练集($n=287$)、验证集($n=123$),其中训练集图像用于人工智能系统深度学习算法训练,验证集图像用于评估超声医生及与人工智能系统的诊断效能。

1.2.2.2 人工智能系统建立 (1)采用 Labelme 开源软件提取超声图像中的掌指关节为感兴趣区(ROI),并对图像进行旋转、缩放、裁剪等操作,最终将图像调整为 224×224 像素输入卷积神经网络。(2)将预处理后的训练集图像传入装载 Mask-RCNN-RseNext101 分割模型的卷积神经网络,提取每张图像的特征图,并采用 Mask-RCNN 中的 RPN 联合 RseNext101 网络根据特征图生成可能的候选区域。(3)在 ROI-Align 层将特征图及生成的候选区域进行池化,设置池化核为 3×3,步长为 2×2,对图像特征进一步汇总、统一化。(4)将池化后的特征区域通过全连接层整合图像特征,对目标区域定位,分类出掌指关节区域,并使用 Softmax 分类器输出超声图像是否发生掌指关节病变。(5)使用 ImageNet 数据集基础上进行优化训练,使用 Adadelta 优化函数,设置初始学习率为 0.005,系统训练时批尺寸设置为 14,训练迭代次数设置为 300 周期(训练过程中记录每个周期训练结束时的正确率,当连续 10 个周期未达到最佳正确率时,认为系统正确率不再提高,可停止训

练)。

1.2.3 图像分析

1.2.3.1 人工智能系统诊断 将图像输入建立的人工智能系统中,该系统首先对超声图像进行特征提取,定位出掌指关节位置进行分割,并进一步分析出图像中的掌指关节是否存在掌指关节病变,并直接输出图像诊断结果。

1.2.3.2 超声医生诊断 由 1 位 5 年工作经验的低资历超声医生和 1 位 10 年工作经验的高资历超声医生分别独立对图像进行诊断,根据掌指关节的超声表现判断图像中是否为病变掌指关节。

1.3 统计学处理 采用 SPSS 25.0 统计学软件进行数据分析,计数资料以率或构成比进行描述,采用 χ^2 检验,若任一理论频数(T)为 $1 \sim < 5$ 需对检验校正;应用受试者工作特征(ROC)曲线评价人工智能系统及超声医生对痛风性关节炎掌指关节病变的诊断效能,采用灵敏度、特异度、曲线下面积(AUC)等作为评价效能指标。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 人工智能系统的诊断结果 410 例痛风性关节炎患者中经掌指关节滑液偏振光检查有 343 例存在掌指关节病变,发生率为 83.66%,其中训练集 287 例痛风性关节炎患者中有 241 例存在掌指关节病变,验证集 123 例痛风性关节炎患者中有 102 例存在掌指关节病变。人工智能系统诊断验证集患者掌指关节病变的灵敏度、特异度、准确度、AUC 分别为 85.29% (87/102)、85.71% (18/21)、85.37% (105/123)、0.855[95%可信区间(95%CI):0.780~0.912],见图 1。

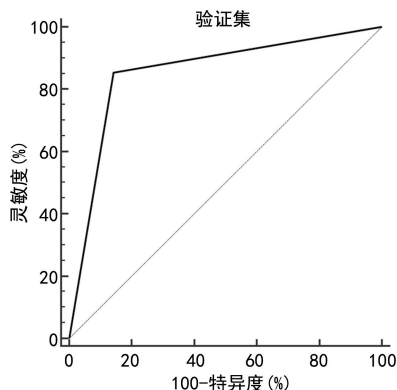


图 1 人工智能系统对验证集患者掌指关节病变诊断的 ROC 曲线

2.2 人工智能系统与不同资历超声医生对验证集患者掌指关节病变诊断结果比较 高资历超声医生诊断验证集患者掌指关节病变的灵敏度、准确度均高于低资历超声医生,差异均有统计学意义($P < 0.05$);高、低资历超声医生诊断结果特异度比较,差异无统

计学意义($P > 0.05$)。人工智能系统诊断验证集患者掌指关节病变的灵敏度、准确度均高于低资历超声医生,准确度低于高资历超声医生,差异均有统计学意义($P < 0.05$),灵敏度与高资历超声医生比较,差异无统计学意义($P > 0.05$)。见表 1。

表 1 人工智能与不同资历超声医生对验证集患者掌指关节病变诊断结果比较 [% (n/n)]

组别	灵敏度	特异度	准确度
低资历超声医生	73.53(75/102) ^a	76.19(16/21)	73.98(91/123) ^b
高资历超声医生	93.14(95/102)	95.24(20/21)	93.50(115/123) ^c
人工智能系统	85.29(87/102)	85.71(18/21)	85.37(105/123)
χ^2_1	14.118	1.750	17.196
P_1	<0.001	0.186	<0.001

注: χ^2_1, P_1 为低资历医生与高资历医生比较;与人工智能系统比较。 $\chi^2 = 4.317, ^a P = 0.038; \chi^2 = 4.920, ^b P = 0.027; \chi^2 = 4.301, ^c P = 0.038$ 。

3 讨论

近年来,随着人们生活水平的不断提高,痛风性关节炎的发病率逐年上升,且呈年轻化趋势^[8]。痛风性关节炎多以第一跖趾关节为首发部位,且随着病情的进展,会逐渐延伸至踝部、膝关节、手腕、指关节等部位,其中掌指关节作为执行手部各种活动的重要关节,此处病变对患者日常生活影响极大^[9]。痛风性关节炎的“金标准”是检查病变关节腔内容物中是否存在单钠尿酸盐结晶,但此种方法操作难度大,且具有创伤性,在患者初步诊断中的应用较少,而高频肌骨超声检测简单、无创,且能精细分辨关节周围肌肉、浅表神经结构等,已广泛应用于痛风累及关节病变的诊断,但存在一定的漏诊、误诊率^[10-11]。目前,基于深度算法的新一代人工智能系统已在医学影像领域逐渐显现出优势。已有研究报道,人工智能超声诊断系统对结节、骨整合现象的诊断价值良好^[12-13],故本研究利用深度算法构建高频肌骨超声诊断痛风性关节炎掌指关节病变的人工智能系统,旨在为临床诊断提供新方法。

本研究结果显示,人工智能系统诊断验证集患者掌指关节病变的灵敏度、特异度、准确度、AUC 分别为 85.29%、85.71%、85.37%、0.855,说明利用深度算法构建的人工智能系统诊断痛风性关节炎患者高频肌骨超声中掌指关节病变的效能良好。LEE 等^[14]研究结果显示,基于深度算法构建的人工智能自动检测系统诊断颞下颌关节紊乱病患者椎间盘前移位的效能优异,本研究结果与其相似。分析原因可能为本研究通过 Labelme 软件将掌指关节图像进行勾画,并利用深度算法学习和分析掌指关节特征区域,以此搭

建能自动分割、分类掌指关节的人工智能系统。该系统能减少高频肌骨超声图像中掌指关节周围肌腱、神经、组织等干扰,使系统中的分类模块能集中于掌指关节工作,进而有效诊断痛风性关节炎掌指关节病变。但本研究人工智能系统在诊断痛风性关节炎掌指关节病变时仍会出现漏诊、误诊现象,可能由于部分患者病变较轻,使得超声图像中双轨征、聚集体等特征不明显,人工智能系统难以对其进行识别;或是部分痛风性关节炎患者在高频率肌骨超声检查前已进行降尿酸药物治疗,使得病变部位尿酸盐结晶的超声图像减弱甚至消失。

本研究中,高资历超声医生诊断验证集患者掌指关节病变的灵敏度、准确度均高于低资历超声医生,而人工智能系统诊断验证集患者掌指关节病变的灵敏度、准确度均高于低资历超声医生,准确度低于高资历超声医生,说明利用深度算法构建的人工智能系统诊断痛风性关节炎患者高频肌骨超声图像中掌指关节病变的诊断效能高于低资历超声医生,但仍与高资历超声医生存在差距。已有大量研究报道,与影像学医生相比,人工智能系统对病症的诊断效能更高^[15-17]。人工智能系统可自动识别和分类输入超声图像,进而减少了人工操作及医生经验不足所带来的误差,且可适应不同品牌、型号的超声诊断仪输出的图像,另人工智能系统的自主学习特性使其在诊断过程中可同时通过自动学习不断输入的超声图像特征来进一步提高诊断准确性,而医学影像诊断是一项高强度的技术性工作,对医生工作经验及精力要求较高,使得部分工作经验较少的超声医生在进行大量超声诊断时易出现误诊、漏诊现象。但本研究构建的人工智能系统的诊断效能仍低于高资历超声医生,可能与高资历超声医生丰富的临床经验及专业知识会帮助其准确诊断超声特征不明显的掌指关节病变患者有关,而人工智能仅通过超声图像中的特征区域对患者进行诊断,可能会出现漏诊、误诊;另本研究收集的痛风性关节炎患者高频肌骨超声图像较少,使得构建的人工智能系统缺乏大数据训练,诊断效能有限。故在后续研究中需进一步扩大样本量并开展多中心试验来训练人工智能系统,以期能进一步提高该系统对痛风性关节炎掌指关节病变的诊断效能。

综上所述,本研究利用深度算法构建的人工智能系统诊断痛风性关节炎患者高频肌骨超声图像中掌指关节病变的诊断效能良好,且诊断价值高于低资历超声医生,建议临床可结合本研究人工智能系统来提高痛风性关节炎掌指关节病变的诊断效率。

参考文献

[1] XU H L, ZHANG B H, CHEN Y X, et al. Type

II collagen facilitates gouty arthritis by regulating MSU crystallisation and inflammatory cell recruitment[J]. *Ann Rheum Dis*, 2023, 82(3): 416-427.

- [2] HUANG Z F, LI Z Q, XIAO J W, et al. Dual-energy computed tomography for the diagnosis of acute gouty arthritis[J]. *Curr Med Imaging*, 2022, 18(3): 305-311.
- [3] ZHENG W, LU P, JIANG D, et al. An ultrasonographic study of gouty arthritis: Synovitis and its relationship to clinical symptoms: A retrospective analysis [J]. *Health Sci Rep*, 2023, 6(6): e1312.
- [4] CHANDRA S S, BRAN LORENZANA M, LIU X W, et al. Deep learning in magnetic resonance image reconstruction[J]. *J Med Imaging Radiat Oncol*, 2021, 65(5): 564-577.
- [5] NOVAKOVSKY G, DEXTER N, LIBBRECHT M W, et al. Obtaining genetics insights from deep learning via explainable artificial intelligence[J]. *Nat Rev Genet*, 2023, 24(2): 125-137.
- [6] ANTEBY R, HORESH N, SOFFER S, et al. Deep learning visual analysis in laparoscopic surgery: A systematic review and diagnostic test accuracy meta-analysis[J]. *Surg Endosc*, 2021, 35(4): 1521-1533.
- [7] 中华医学会风湿病学分会. 2016 中国痛风诊疗指南[J]. *中华内科杂志*, 2016, 55(11): 892-899.
- [8] KOTO R, NAKAJIMA A, HORIUCHI H, et al. Factors associated with achieving target serum uric acid level and occurrence of gouty arthritis: A retrospective observational study of Japanese health insurance claims data[J]. *Pharmacoepidemiol Drug Saf*, 2021, 30(2): 157-168.
- [9] NHI L H H, MINH L H N, TIEU T M, et al. Role of Dual-Energy computed tomography in the identification of monosodium urate deposition in gout patients: A comprehensive analysis of 828 joints according to structural joint damage[J]. *Cureus*, 2021, 13(11): e19930.
- [10] ANUGU A, MONASTERO R, PENTYALA S, et al. Clinical validation of rapid gout detection method and kit[J]. *Methods Protoc*, 2021, 4(4): 69.
- [11] XIE Y S, LI L, LUO R Q, et al. Diagnostic efficacy of joint ultrasonography, (下转第 4201 页)

- maximum plasma concentration of esomeprazole on intragastric pH [J]. *Eur J Clin Pharmacol*, 2002, 58(7):453-458.
- [20] KROMER W, KRÜGER U, HUBER R, et al. Differences in pH-dependent activation rates of substituted benzimidazoles and biological in vitro correlates [J]. *Pharmacology*, 1998, 56(2):57-70.
- [21] ABE K, IRIE K, NAKANISHI H, et al. Crystal structures of the gastric proton pump [J]. *Nature*, 2018, 556(7700):214-218.
- [22] SAKURAI Y, MORI Y, OKAMOTO H, et al. Acid-inhibitory effects of vonoprazan 20 mg compared with esomeprazole 20 mg or rabeprazole 10 mg in healthy adult male subjects—a randomised open-label cross-over study [J]. *Aliment Pharmacol Ther*, 2015, 42(6):719-730.
- [23] ECHIZEN H. The first-in-class potassium-competitive acid blocker, vonoprazan fumarate: pharmacokinetic and pharmacodynamic considerations [J]. *Clin Pharmacokinet*, 2016, 55(4):409-418.
- [24] SUE S, SHIBATA W T U, SASAKI T, et al. Randomized trial of vonoprazan-based versus proton-pump inhibitor-based third-line triple therapy with sitafloxacin for *Helicobacter pylori* [J]. *J Gastroenterol Hepatol*, 2019, 34(4):686-692.
- [25] TANABE H, YOSHINO K, ANDO K, et al. Vonoprazan-based triple therapy is non-inferior to susceptibility-guided proton pump inhibitor-based triple therapy for *Helicobacter pylori* eradication [J]. *Ann Clin Microbiol Antimicrob*, 2018, 17(1):29.
- [26] MURAKAMI K, SAKURAI Y, SHIINO M, et al. Vonoprazan, a novel potassium-competitive acid blocker, as a component of first-line and second-line triple therapy for *Helicobacter pylori* eradication: a phase III, randomised, double-blind study [J]. *Gut*, 2016, 65(9):1439-1446.
- [27] DONG S Q, SINGH T P, WEI X, et al. Review: a Japanese population-based meta-analysis of vonoprazan versus PPI for *Helicobacter pylori* eradication therapy: is superiority an illusion? [J]. *Helicobacter*, 2017, 22(6).
- [28] FURUTA T, YAMADE M, KAGAMI T K A, et al. Dual therapy with vonoprazan and amoxicillin is as effective as triple therapy with vonoprazan, amoxicillin and clarithromycin for eradication of *Helicobacter pylori* [J]. *Digestion*, 2020, 101(6):743-751.

(收稿日期:2024-02-15 修回日期:2024-10-23)

(上接第 4196 页)

- dual-energy computed tomography and minimally invasive arthroscopy on knee gouty arthritis, a comparative study [J]. *Br J Radiol*, 2021, 94(1121):20200493.
- [12] PENG S, LIU Y H, LV W M, et al. Deep learning-based artificial intelligence model to assist thyroid nodule diagnosis and management: a multicentre diagnostic study [J]. *LANCET DIGITAL HEALTH*, 2021, 3(4):e250-e259.
- [13] KWAK Y, NGUYEN V H, HÉRIVEAUX Y, et al. Ultrasonic assessment of osseointegration phenomena at the bone-implant interface using convolutional neural network [J]. *J Acoust Soc Am*, 2021, 149(6):4337.
- [14] LEE Y H, WON J H, KIM S, et al. Advantages of deep learning with convolutional neural network in detecting disc displacement of the temporomandibular joint in magnetic resonance imaging [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1):11352.
- [15] BEDRIKOVETSKI S, DUDI-VENKATA N N, KROON H M, et al. Artificial intelligence for pre-operative lymph node staging in colorectal cancer: A systematic review and meta-analysis [J]. *BMC Cancer*, 2021, 21(1):1058.
- [16] 张凌烟, 杨川, 卓育敏, 等. 基于深度学习提高经直肠超声诊断前列腺癌效能的研究 [J]. *中华超声影像学杂志*, 2022, 31(1):43-49.
- [17] LAN C C, HSIEH M S, HSIAO J K, et al. Deep learning-based artificial intelligence improves accuracy of error-prone lung nodules [J]. *Int J Med Sci*, 2022, 19(3):490-498.

(收稿日期:2024-05-14 修回日期:2024-10-31)