

基于卷积神经网络的X线片下肢关节角度识别算法

刘静妮¹, 盛玉武¹, 赵长秀¹, 牛存良², 黄国源², 许长栋¹, 赵姗姗¹, 陈彬¹

1. 武威市人民医院放射科, 甘肃 武威 733000; 2. 武威市人民医院骨科, 甘肃 武威 733000

【摘要】提出一种基于卷积神经网络的X线片下肢关节角度识别算法,首先在X线片中使用Yolov5目标检测模型来识别特定类别的感兴趣区域,并使用U-Net模型进行热图回归来识别关键特征点,最后进行下肢关节角度的计算。研究结果表明,本文提出的算法相比于之前的算法精度更高,结果准确可靠,为临床研究和实践提供参考。

【关键词】卷积神经网络;目标检测;特征点定位;下肢力线

【中图分类号】R318;TP18

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)08-0996-04

Lower limb joint angle calculation algorithm based on convolutional neural network in X-ray films

LIU Jingni¹, SHENG Yuwu¹, ZHAO Changxiu¹, NIU Cunliang², HUANG Guoyuan², XU Changdong¹, ZHAO Shanshan¹, CHEN Bin¹

1. Department of Radiology, Wuwei People's Hospital, Wuwei 733000, China; 2. Department of Orthopedics, Wuwei People's Hospital, Wuwei 733000, China

Abstract: A convolutional neural network-based algorithm is proposed for calculating lower limb joint angle in X-ray films. After identifying the region of interest of a specific category in X-ray films through Yolov5 object detection model, U-Net model is used to perform heat map regression for identifying the key feature points, and then the lower limb joint angle is calculated. The results show that the proposed algorithm has higher accuracy than the previous algorithms and can obtain accurate and reliable results, providing references for clinical research and practice.

Keywords: convolutional neural network; object detection; feature point localization; lower limb power line

前言

一般的下肢关节角度常指代髌膝踝角(同时也称下肢力线),它是下肢X线片上股骨机械轴与胫骨机械轴的夹角,其中股骨头中心采用股骨头的圆心,膝关节中心采用股骨髁间窝顶点的中点,踝关节中心采用距骨的中点^[1-2]。下肢关节角度在膝关节内外侧室间的负荷比例分配中起着重要作用^[3]。在中性对齐的膝关节中,日常活动中60%~70%的膝关节力通过内侧腔室,而在内翻(角度大于0°)和外翻(角度小于0°)膝关节中,力分别不成比例地通过内侧腔室和外侧腔室^[4]。因此,下肢关节角度是评估下肢状态的重要指标,它不仅与膝关节骨性关节炎的风险相

关,还在截骨术、膝关节置换术等膝关节重建手术的术前规划和术后评估中有广泛应用^[5]。

由于缺乏对下肢关节关键点坐标位置的精确定义,导致不同医师在测量时存在相较于的差异^[6],并且加上测量时的误差影响,由于手术过程中遇到的各种各样的原因(如髌关节和踝关节软组织数量的实质性差异),因此通常在实践中测量下肢关节角度是相当有挑战性的任务^[7]。此外就算上述可靠性问题都可排查,但是在人工测量时,需要有经验的放射科医生或骨科医生识别髌关节、膝关节和踝关节的坐标位置,这在临床上也是很难办到的^[8-10]。因此为了解决上述痛点,一种可以自动测量X线片下肢关节角度的算法被提出来,本文将Yolo模型^[11]和U-Net模型^[12]相结合,有助于准确而快速地检测下肢X线片中的髌关节、膝关节和踝关节中心。

1 方法

为了验证本文方法的有效性,收集从2000年~2022年间接接受全膝关节置换术1947名患者的下肢X

【收稿日期】2024-02-26

【基金项目】甘肃省武威市科技计划项目(WW23B02SF056)

【作者简介】刘静妮,硕士研究生,主治医师,研究方向:骨关节疾病影像诊断,E-mail: liujn1222@163.com

【通信作者】陈彬,主治医师,研究方向:骨关节疾病影像诊断,E-mail: 15379332288@139.com

线片。患者平均年龄 68 岁,57% 为女性。首先用边界框标注 X 线片^[13],以定义髌关节、膝关节和踝关节,并将其分为 8 类:左髌、右髌、带植入物的左膝关节、不带植入物的左膝关节、带植入物的右膝关节、不带植入物的右膝关节、左脚踝和右脚踝^[14]。使用 YOLOv5 模型^[15],以 4:1 的比例将数据集分为训练集和测试集^[16]。随后,在 1 947 张 X 线片中随机选择 947 张,组织 3 名经验丰富的放射科医生进行手动标注。对于带假体的膝关节,标记胫骨内外侧边缘和胫骨假体中心^[17-18],如图 1 所示。将数据集进一步分为训练集(604 张)、验证集(155 张)和测试集(188 张),以对模型进行学习和评估,所提方法的整体流程图如图 2 所示。

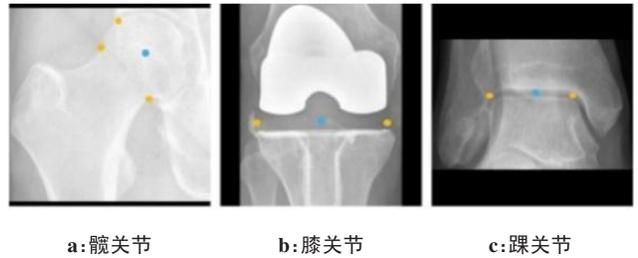


图 1 对 X 线片的标注示意图

Figure 1 Schematic diagram of X-ray film labeling

蓝点表示感兴趣区域的标注,黄点用于计算归一化误差值

对于关键点的检测,借鉴类似于人脸特征点的检测方法^[19],应用 U-Net 模型^[20]对热图进行回归,并

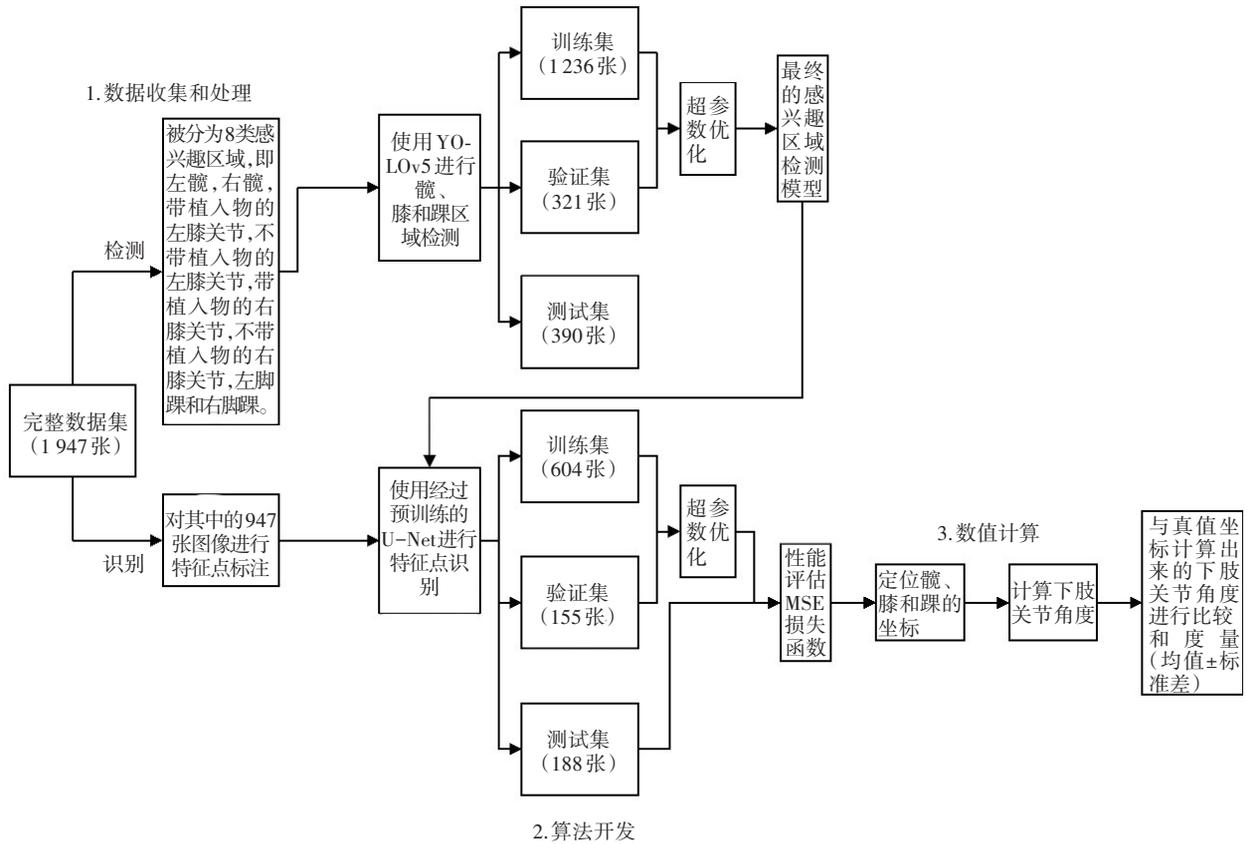


图 2 整体框架图

Figure 2 Overall framework

使用具有特定 sigma 值的高斯核^[21],将每个关键点用热图表示。在热图预测过程中,采用均方误差(Mean Square Error, MSE)作为损失函数^[22]。较小的 MSE 损失意味着预测的热图更接近标记的热图,代表更好的预测结果。其类别的数量对应分割任务中的通道数量,如 3 个关键点便有 3 个热图。

在关键点检测过程中,针对髌关节、膝关节和踝

关节分别定义归一化误差值作为关键点检测的评价指标^[23]:

$$NE = \frac{\sqrt{|P_{x,y}| - |L_{x,y}|}}{D} \quad (1)$$

其中,NE 表示预测与标注标签之间的距离归一化为髌关节股骨头直径、膝关节宽度和踝关节宽度。为了计算髌关节的 NE 值,使用一个圆来匹配股骨头,

此时的 D 为该圆的直径。为了计算膝关节的NE值,在胫骨髁的内外侧边缘上标记两个点,此时的 D 为这两个点之间的距离。为了计算踝关节的NE值,在距骨上缘内外侧缘分别标记两点,此时的 D 为这两点之间的距离。

2 实验与结果

2.1 实验设置

本文使用5个64 GB内存的Titan X集群而成的高性能服务器来对模型进行学习和推理,所有实现皆基于PyTorch框架^[24]。网络结构中的超参数是在进行大量的交叉验证实验后进行设置的,对于U-Net模型,其Epoch值为32,批处理大小为2,并且使用学习率为0.001的Adam优化器^[25]。当使用高斯函数计算热图时,以步长为5尝试从5~30的不同sigma值,得出的结论是sigma值为20是最好的。为了从热图中提取特定的坐标,选择对应于25个坐标的25个最高概率,对这25个坐标的均值进行计算。对3种不同的均值(加权均值、调和均值和几何均值)进行比较后发现加权平均值表现最好。

2.2 实验结果与分析

通过对测试集中的性能数据进行分析,验证本文方法的有效性和准确性。通过与以往方法的对比可以看出,本文方法在关键点检测和关节角度预测方面表现优异,能够在较小的误差范围内实现高精度的测量。通过分析数据发现,髌关节、膝关节和踝关节的归一化误差值分别为0.17、0.11和0.18,显示出算法在不同关节位置上的稳定性和一致性。在下肢关节角度预测方面,标记的关节角度均值为 $0.62^\circ \pm 2.56^\circ$,预测的关节角度均值为 $-0.77^\circ \pm 2.74^\circ$,两者间的误差绝对值为 0.67° ,表明算法在大部分情况下都能精确预测关节角度。这些结果表明,本文提出的自动测量算法具有较高的准确性。图3a中的角度差为 0.01° ,图3b中的角度差为 0.04° ,图3c中的角度差为 0.02° 。对于其余的1000张未标注的下肢X线片,使用训练好的模型来预测各关节角度。结果显示,预测中仅有17个异常值,这些异常值由放射科医生手动检查,并通过模型进行自动排除。

表1展示本文方法与以往基于深度学习的方法^[10,12]的对比结果。文献[10]的方法通过定义下肢X线片上的9个点来确定下肢关节角度,采用两阶段方法:首先检测出感兴趣区域,然后应用深度学习方法直接回归坐标预测特征点位置,结果显示82.3%的X线片真值与预测值之间的下肢关节角度差异小于 1.5° 。文献[12]利用热图回归预测528例儿童患者下肢X线片上的特征点,但存在将右膝中心错误预测为

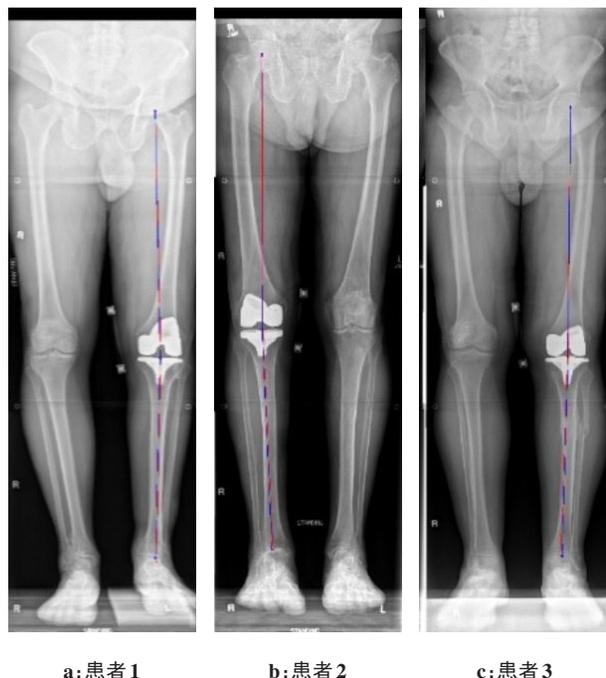


图3 对X线片的下肢关节角度识别的示意图

Figure 3 Schematic diagram of lower limb joint angle recognition in X-ray films

蓝点是标签,红点是预测

左膝中心的问题。与上述方法不同,本文提出一个两阶段方法:首先提取感兴趣区域,其次利用高斯核将坐标转换到热图中,再通过预测热图并将其转换回坐标以获得更精确的位置。与文献[10]方法相比,本文方法对是否做过全膝关节置换手术的患者皆有效,提高了方法的应用范围。与文献[12]相比,首先通过提取感兴趣区域再预测关键点,本文方法解决了预测离群点的问题,如将右踝关节中心预测为左踝关节中心的问题。此外,本文方法与以往方法的样本容量略有不同,以往方法通常使用250至500张X线片,而本文研究使用了1947张X线片,有效降低过拟合的风险,增强模型的泛化能力。

表1 本文方法与以往基于深度学习的方法对比结果($\bar{x} \pm s$)

Table 1 Comparison of the proposed method and the previous methods based on deep learning ($Mean \pm SD$)

方法	标记人员	下肢关节角度
文献[10]	1名未知科室医师	左: $0.67^\circ \pm 0.42^\circ$; 右: $0.54^\circ \pm 0.49^\circ$
文献[12]	1名放射科医师	$0.94^\circ \pm 0.84^\circ$
本文方法	3名放射科医师	$0.67^\circ \pm 0.84^\circ$

从表1可知,与文献[10]和文献[12]相比,本文方法得到的下肢关节角度误差与文献[10]的方法表

现相近,且明显低于文献[12]的方法,而本文方法研究的样本容量要明显多于文献[10,12]方法,因此本文方法在精确度和可靠性上具有明显优势。此外,本文方法由3名放射科医师标记数据,进一步提高了结果的可信度和一致性。综上所述,本文方法在下肢关节角度测量中表现出色,具有广泛的应用前景。这些数据充分证明,本文提出的方法在关键点检测和关节角度预测上的性能优于以往的方法,尤其是在处理较大样本量时依然能够保持高精度,显示出其在实际应用中的潜力和可靠性。

3 结论

为了对下肢力线进行自动测量,本文提出一种基于卷积神经网络的X线片下肢关节角度识别算法。首先在X线片中使用YOLOv5目标检测模型来识别特定类别的感兴趣区域,并使用U-Net模型进行热图回归来识别关键特征点,最后进行下肢关节角度的计算。综上所述,基于机器学习的方法可以高效而准确地预测下肢X线片的关节角度,此工具使大规模研究项目变得可行,如果与放射学软件相集成,将有望在临床中应用。在未来的工作中,将致力于细化热图转换为坐标的过程,因为对于不同大小的热图,固定最高概率的数量可能不是很好,这是未来的研究方向之一。

【参考文献】

- [1] Kemler E, Valkenberg H, Verhagen E. More people more active, but there is a counter site. Novice athletes are at highest risk of injury in a large population-based retrospective cross-sectional study[J]. *BMJ Open Sport Exerc Med*, 2022, 8(1): e001255.
- [2] Arakgi ME, Getgood A. Mechanical malalignment of the knee joint: how and when to address[M]//LaPrade RF, Chahla J. *Evidence-Based Management of Complex Knee Injuries*. Philadelphia: Elsevier, 2022: 66-76.
- [3] Musa AE, Grimmig O, Sonke J. Aortic valve in black: a case of aortic valve ochronosis[J]. *World J Cardiovasc Surg*, 2022, 12(6): 128-134.
- [4] Nuñez JH, Mora L, Carbonell C, et al. Is routine blood typing and screening necessary before primary total hip or knee arthroplasty in the 21st century?[J]. *Transfusion*, 2022, 62(2): 316-323.
- [5] Radhakrishnan GT, Magan A, Kayani B, et al. Return to sport after unicompartmental knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis[J]. *Orthop J Sports Med*, 2022, 10(3): 23259671221079285.
- [6] Secrist ES, Rowe T, Li KK, et al. Variability of sagittal plane proximal tibial morphology and its effect on stem placement in total knee arthroplasty[J]. *Arthroplast Today*, 2021, 13: 55-61.
- [7] Kim S, Oh HS, Lee M, et al. Effect of postoperative femoral neck shaft angle on femoral head sphericity following proximal femoral osteotomy in Legg-Calve-Perthes disease[J]. *J Pediatr Orthop*, 2022, 42(8): 432-438.
- [8] 司丙奇,王志武,姜萍萍,等.基于改进YOLOv5网络的内窥镜息肉检测[J]. *中国新通信*, 2022, 24(11): 123-128.
- [9] 袁甜,程红阳,陈云虹,等.基于U-net网络的肺部CT图像分割算法[J]. *自动化与仪器仪表*, 2017(6): 59-61.
- [10] Yuan T, Cheng HY, Chen YH, et al. Lung CT image segmentation algorithm based on U-net network[J]. *Automation & Instrumentation*, 2017(6): 59-61.
- [11] Schwarz GM, Simon S, Mitterer JA, et al. Artificial intelligence enables reliable and standardized measurements of implant alignment in long leg radiographs with total knee arthroplasties[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30(8): 2538-2547.
- [12] Eckstein F, Chaudhari AS, Fuerst D, et al. Detection of differences in longitudinal cartilage thickness loss using a deep-learning automated segmentation algorithm: data from the foundation for the national institutes of health biomarkers study of the osteoarthritis initiative[J]. *Arthritis Care Res (Hoboken)*, 2022, 74(6): 929-936.
- [13] Chou PH, Jou THT, Wu HT, et al. Ground truth generalizability affects performance of the artificial intelligence model in automated vertebral fracture detection on plain lateral radiographs of the spine[J]. *Spine J*, 2022, 22(4): 511-523.
- [14] Anil U, Lin C, Bieganowski T, et al. Design and evaluation of a 3D printed mechanical balancer for soft tissue balancing in total knee replacement[J]. *Knee*, 2023, 44: 118-129.
- [15] Tokgoz E, Levitt S, Sosa D, et al. Biomechanics of total knee arthroplasty [M]//Tokgoz E, Levitt S, Sosa D, et al. *Total Knee Arthroplasty: A Review of Medical and Biomedical Engineering and Science Concepts*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023: 119-154.
- [16] Wang JF, Wang XH, Sun B, et al. 3D-printed patient-specific instrumentation decreases the variability of patellar height in total knee arthroplasty[J]. *Front Surg*, 2023, 9: 954517.
- [17] Jung HJ, Kang MW, Lee JH, et al. Learning curve of robot-assisted total knee arthroplasty and its effects on implant position in Asian patients: a prospective study[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24(1): 332.
- [18] Zhang ZH, Qi YS, Wei BG, et al. Application strategy of finite element analysis in artificial knee arthroplasty[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, 11: 1127289.
- [19] Vale J, Pinto LV, Barros B, et al. Total knee arthroplasty coronal alignment and tibial base stress-a new numerical evaluation[J]. *Porto Biomed J*, 2023, 8(2): e208.
- [20] Lorenz A, Winter A, Mederake M, et al. Changes in femoral rollback and rotation with increasing coupling in knee arthroplasty-a biomechanical in-vitro study[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24(1): 341.
- [21] Bori E, Innocenti B. Biomechanical analysis of femoral stem features in hinged revision TKA with valgus or varus deformity: a comparative finite elements study[J]. *Appl Sci*, 2023, 13(4): 2738.
- [22] Akbarzadeh A, Fallah E, Hashemi SA, et al. Total knee arthroplasty with non-stemmed tibial components among obese patients: clinical and radiologic evaluation and review of literature [J]. *Bull Emerg Trauma*, 2023, 11(2): 69-74.
- [23] Zahra T, Abdelwahed B. 3D designing and imaging process of the human knee joint: a review [M]//Nochehdehi AR, Nemavhola F, Thomas S, et al. *Cartilage Tissue and Knee Joint Biomechanics*. Amsterdam: Academic Press, 2024: 231-242.
- [24] Armillotta N, Bori E, Innocenti B. Finite element analysis of malposition in bi-unicompartmental knee arthroplasty[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2023, 143(6): 3447-3455.
- [25] León-Muñoz VJ, Moya-Angeler J, López-López M, et al. Integration of square fiducial markers in patient-specific instrumentation and their applicability in knee surgery[J]. *J Pers Med*, 2023, 13(5): 727.
- [26] Castellari G, Bori E, Rapallo L, et al. Biomechanical analysis of different levels of constraint in TKA during daily activities [J]. *Arthroplasty*, 2023, 5(1): 3.

(编辑:陈丽霞)