

DOI:10.13350/j.cjpb.240912

• 论著 •

基于梯度技术优化肺结核继发纤维纵隔炎引发的 肺动脉高压的 CT 图像分析*

纳建荣, 严梅, 褚娇娇, 王一帆**

(宁夏医科大学总医院呼吸与危急重症科及放射科, 宁夏银川 750004)

【摘要】 **目的** 本研究旨在开发并评估基于卷积神经网络(CNN)的深度学习方法,用于从梯度优化后的CT图像中自动识别肺结核继发纤维纵隔炎引发的肺动脉高压。**方法** 通过采用梯度优化算法对CT图像进行处理,结合使用梯度下降法进行模型训练以提高诊断的精确性和效率。开发过程中,首先对数据进行归一化处理并应用数据增强技术以提升模型的泛化能力。采用的U-Net网络架构为基础框架,模型通过Adam优化器进行训练,初步学习率设置为0.001,并通过早停机机制防止过拟合。采用精确度、召回率、F1分数和接收者操作特征曲线(ROC)下的面积(AUC)等关键指标进行评估。在独立测试集上,模型展现出了优异的表现。**结果** 在独立测试集上,该模型展现出优异的性能。戴斯系数、召回率和精准率的平均值分别为0.789、0.794和0.820。结果表明,该模型能有效识别肺动脉高压的CT图像特征。模型在不同程度的肺结核患者中表现稳定,重度和极重度肺结核患者中的平均戴斯系数、召回率和精准率均达到0.80以上,而在轻度患者中这些指标稍低。模型的敏感性为85%,特异性为88%,F1分数为86%,接收者操作特征曲线(AUC)下的面积为96%,显示出优秀的诊断能力。**结论** 经过优化后的图像构建的模型能够有效地识别肺动脉高压的CT图像特征,对于临床诊断和治疗规划具有重要的参考价值。

【关键词】 梯度优化;深度学习;CT图像;肺结核;肺动脉高压

【文献标识码】 A **【文章编号】** 1673-5234(2024)09-1053-04

[*Journal of Pathogen Biology*. 2024 Sep.;19(9):1053-1056.]

Optimization of CT image analysis of pulmonary hypertension due to pulmonary tuberculosis secondary to fibrous mediastinitis based on gradient technique

NA Jianrong, YAN Mei, CHU Jiaojiao, WANG Yifan (*Respiratory and Critical Care Department and Radiology Department of Ningxia Medical University General Hospital, Yinchuan 750004, China*)***

【Abstract】 **Objective** The aim of this study was to develop and evaluate a deep learning model based on convolutional neural networks (CNNs) for the automatic identification of pulmonary hypertension due to pulmonary tuberculosis secondary to fibrous mediastinitis from optimized CT images. **Methods** CT images are processed by using a gradient optimization algorithm, combined with model training using gradient descent to improve diagnostic accuracy and efficiency. During the development process, the data is first normalized and data enhancement techniques are applied to improve the generalization ability of the model. The U-Net network architecture was used as the base framework, and the model was trained by the Adam optimizer, with the initial learning rate set to 0.001 and an early stopping mechanism to prevent overfitting. Key metrics such as precision, recall, F1 score and area under the receiver operating characteristic curve (ROC) (AUC) are used for evaluation. The model demonstrates excellent performance on an independent test set.

Results The model demonstrated excellent performance on the independent test set. The mean values of the Dace coefficient, recall, and precision were 0.789, 0.794, and 0.820, respectively. These results indicate that the model is effective in recognizing CT image features of pulmonary hypertension. The model performed consistently in patients with different degrees of tuberculosis, with mean Dace coefficients, recalls, and precision rates reaching above 0.80 in patients with severe and very severe tuberculosis, while these metrics were slightly lower in patients with mild disease. The model had a sensitivity of 85%, a specificity of 88%, an F1 score of 86%, and an area under the receiver operating characteristic curve (AUC) of 96%, demonstrating excellent diagnostic capabilities. **Conclusion** The model constructed from the optimized images can effectively identify the CT image features of pulmonary arterial hypertension, which is an important reference value for clinical diagnosis and treatment planning.

【Keywords】 Gradient optimization; deep learning; CT images; tuberculosis; pulmonary hypertension

* **【基金项目】** 宁夏自然科学基金项目(No. 2023AAC03665, 2023AAC03603)。

** **【通讯作者】** 王一帆, E-mail: igirl1@163.com

【作者简介】 纳建荣(1982-), 女, 宁夏人, 本科, 副主任医师, 主要从事肺动脉高压等疾病的诊疗工作。E-mail: ymnx1990@outlook.com

肺结核是全球范围内持续存在的重大公共卫生问题,尽管近年来治疗有所进步,但仍有大量病例每年被报告。肺结核不仅影响肺部,还可能引发一系列复杂的继发性疾病,其中纤维纵隔炎是一种罕见但严重的并发症,它涉及纵隔内纤维组织的异常增生^[1-3]。纤维纵隔炎可能引起包括肺动脉在内的重要血管的压迫,从而导致肺动脉高压^[4-5]。肺动脉高压是一种危及生命的状况,需要精确的诊断和及时治疗^[6]。然而,传统的影像学技术在诊断由纤维纵隔炎引发的肺动脉高压时存在一定的局限性,特别是在病变的早期阶段。

近年来,梯度优化技术在医学影像分析中展现出显著的潜力,尤其是在处理复杂疾病的诊断中^[7]。基于梯度的算法,如梯度提升和深度学习中的梯度下降优化,已成功用于多种医学图像的增强和特征识别。这些技术通过改善图像的质量和分辨率,有助于医生更好地识别和评估疾病特征^[8-9]。本研究旨在探讨基于梯度技术优化 CT 图像分析在肺结核继发纤维纵隔炎引发的肺动脉高压诊断中的应用。通过使用先进的图像处理算法,可以更精确地识别和评估肺动脉高压的相关变化,从而为患者提供更有效的临床决策支持。通过系统地评估这些技术在具体临床应用中的表现,提供一种改进的诊断工具,为肺结核继发纤维纵隔炎相关肺动脉高压诊断和治疗提供新视角^[10]。

本研究的发现可能对临床实践具有重要的意义,特别是在提高这一复杂病症诊断的精度和效率方面。此外,这也可能对医学影像技术的发展方向产生长远影响,推动相关技术和方法的进一步研究和应用。

材料与方法

1 数据收集

本研究回顾性分析 2018 年 9 月至 2024 年 3 月在本院诊断为肺结核并进一步发展为纤维纵隔炎的患者匿名化 CT 图像,共计 200 例患者。收集包括纵隔、肺部和肺动脉的高分辨率 CT 扫描。每个患者均进行了至少两次扫描:一次在初诊时,一次在治疗后。纳入排除标准如下:纳入标准:已确诊为肺结核的患者,诊断依据世界卫生组织(WHO)或当地卫生部门的肺结核诊断标准。经过临床和影像学证实发展为纤维纵隔炎的患者。年龄在 18 岁以上,无上限年龄限制。包括所有性别和性别认同的个体。患者须在研究开始前已完成至少一次胸部 CT 扫描,并能提供清晰的数字影像资料。排除标准:患有严重心脏病、肝病、肾病或其他可能影响研究结果的重大系统性疾病的患者。患有影响肺部结构或功能的其他重大呼吸系统疾病(如严重的慢性阻塞性肺病或哮喘)。正在接受或近期(通常指研究开始前 3 个月内)接受过可能影响肺动脉压力

的药物(如使用安立生坦等药物)的患者。近期内接受过胸部手术或其他可能影响 CT 图像解释的医疗干预的患者。CT 图像质量不佳,无法进行准确分析的患者。

表 1 患者基线资料情况
Table 1 Baseline information on patients

| 项目 | 训练集 | 验证集 | 测试集 | t/χ^2 | P |
|-----------------------|--------------------|------------------|-------------------|------------|-------|
| 人数 | 140 | 30 | 30 | 7.890** | 0.391 |
| 性别(男/女) | 74/66 | 18/12 | 17/13 | 9.112** | 0.711 |
| 平均年龄(岁) | 50.35±2.13 | 52.16±1.48 | 49.73±2.33 | 5.381* | 0.533 |
| BMI | 28.21±1.15 | 27.90±0.33 | 29±1.82 | 10.015* | 0.140 |
| 吸烟比例(%) (吸烟/非吸烟) | 42.86% (42/98) | 36.36% (8/22) | 36.36% (8/22) | 8.732** | 0.424 |
| 糖尿病患病比例(%) (有/无) | 25.00% (28/112) | 29.17% (7/24) | 26.667% (8/30) | 9.101** | 0.711 |
| 心血管并发症比例(%) (有/无) | 15.13% (18/119) | 16.00% (4/25) | 11.11% (3/27) | 11.267** | 0.667 |
| 肺结核患病史(%) (患病/非患病) | 11.11% (14/126) | 15.38% (4/26) | 11.54% (3/26) | 3.536** | 0.954 |
| 结核持续时长 (年) | 2.57±0.59 | 1.50±1.73 | 2.58±1.14 | 5.087* | 0.839 |

注:* t ,** χ^2 。

2 图像处理与分析

为减少图像分割和分析中的误差,采用高斯滤波器或中值滤波器去除图像噪声。使用直方图均衡化技术增强肺部 CT 图像的对比度,以更清晰地显示肺动脉和周围组织的细节。对于肺部 CT 图像分析,尤其是涉及精细结构如肺动脉的任务,选择 U-Net 卷积神经网络架构作为模型基础架构。具体如下:根据模型设计和显存限制,将 CT 图像调整到统一的尺寸为 512×512 像素。选择颜色输入通道数为 1。通过将每个像素值除以 255 来将像素值归一化到 0 到 1 之间,采用 32 位浮点数来处理图像数据。使用 3×3 卷积核,ReLU 激活函数。最大池化层为 2×2 下采样。使用转置卷积进行特征图的上采样。最后使用 1×1 卷积将特征图转换为输出图像,以 sigmoid 函数作为激活函数生成分割图。选择使用 Adam 优化器,Adam 结合了动量和自适应学习率的优点,对不同的参数实施独立的学习率调整,初始学习率设置在 0.005。Beta1 设置为 0.9, Beta2 通常设置为 0.999, 稳定项设置为 $1e-8$,以防止在计算中出现除以零的错误。

3 模型训练和验证

在训练和验证深度学习模型的过程中,首先进行数据的准备和划分,将数据集分为 70% 的训练集、15% 的验证集和 15% 的测试集。使用数据增强技术如随机旋转和缩放来提高模型的泛化能力。训练过程中,采用 Adam 优化器,初始学习率设置为 0.001,并根据模型在验证集上的表现调整,如适时降低学习率。设置批次大小通常为 32 或 64,并监控每个 epoch 的训练和验证损失,以及精确度和召回率等关键性能指

标。引入早停机制,以防模型过拟合。图1是算法构建的流程。验证过程中,独立验证集用于评估模型的性能,并根据反馈调整模型参数。通过这种系统性的训练和验证,确保模型的准确性和可靠性,适合于临床应用。所有算法在python 3.6.1软件下进行。

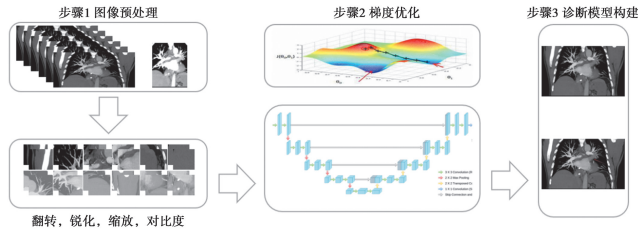


图1 基于梯度优化的肺结核继发纤维纵隔炎引起的肺动脉高压深度学习模型构建

Fig. 1 Gradient optimization-based deep learning model construction for pulmonary hypertension due to pulmonary tuberculosis secondary to fibrosing mediastinitis

4 模型评估

分别从像素和区域两个方面对算法性能进行评估。在像素级,采用戴斯系数、召回率和精准率三种指标评价分割精度。召回率可以反映算法对气胸的检测能力和不漏检率,而精准率则可以反映算法避免误报的能力,公式:召回率=TP/(TP+FN),精准率=TP/(TP+FP)。其中,TP为测试集中的真阳性像素数量(被标记为气胸,并被正确预测为气胸的像素),FP为假阳性像素数量(被标记为非气胸,但被预测为气胸的像素),FN为假阴性像素数量(被标记为气胸,但被预测为非气胸像的像素)。

戴斯系数是衡量召回率和精准率的综合指标,戴斯系数越高,分割模型的整体性能越好,计算公式如下所示,其中X是算法的预测结果,Y是标注的真值。戴斯系数=2×TP/(2×TP+FP+FN)。

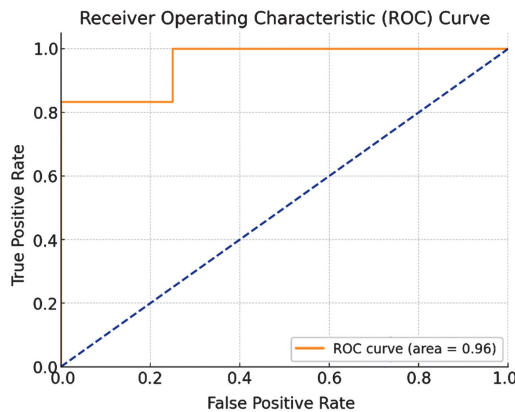


图2 模型在优化后的CT图像数据诊断是否患有肺动脉高压的表现
Fig. 2 Model performance in diagnosing the presence or absence of pulmonary hypertension after optimization of CT image data

结果

1 患者基线资料

共计纳入200例患者,分为训练组、验证组和测试组分别为140、30和30例。年龄45~55岁,平均(51.1±22.7)岁,男109例(54.5%)。不同数据集中的吸烟者比例、糖尿病患病比例、心血管并发症比例、肺结核患病比例、结核病持续时长等差异均无统计学意义(均P>0.05)。

2 模型的验证和评估

经过五折交叉验证得到的戴斯系数、召回率和精准率平均值分别为0.789、0.794和0.820(表2)。此外,考虑到算法在像素级的性能可能会受到肺结核程度的影响,所有数据根据肺结核严重程度被分为4个亚组进行进一步评估(表2),不同程度肺结核患者百分比分别为轻度48%,中度35%,重度15%和极重度2%。结果表明,模型在重度和极重度的患者中,平均戴斯系数、召回率和精准率均可达到0.80以上。在轻度患者中的戴斯系数、召回率和精准率最低分别为0.692、0.688和0.742。

表2 不同程度组在五折交叉验证中的性能
Table 2 performance of different degree groups in 50% discount cross validation

| 数据集 | 戴斯系数 | 召回率 | 精准率 |
|------|-------|-------|-------|
| 轻度 | 0.692 | 0.688 | 0.742 |
| 中度 | 0.807 | 0.765 | 0.833 |
| 重度 | 0.802 | 0.805 | 0.825 |
| 极重度 | 0.795 | 0.811 | 0.803 |
| 所有数据 | 0.789 | 0.794 | 0.820 |

3 优化模型的验证和评估

为了进一步评估优化后的图像,在本研究中,我们构建并评估了用于识别肺结核继发纤维纵隔炎引起的肺动脉高压的分类模型。模型基于优化后的CT图像表现出了较高的分类准确性。模型在测试集上的敏感性为85%,特异性为88%,F1分数为86%,AUC曲线下面积为96%,表现出优秀的诊断能力。同时,我们对比了图像优化前后的模型诊断性能,结果显示模型在各个诊断指标均表现出显著统计学差异(表3)。

表3 图像优化前后模型的诊断性能对比
Table 3 Diagnostic performance comparison of models before and after image optimization

| 指标 | 优化后 | 优化前 | t | P |
|-------|------|------|-------|-------|
| 敏感性 | 0.85 | 0.69 | 8.601 | 0.037 |
| 特异性 | 0.88 | 0.77 | 5.742 | 0.015 |
| F1分数 | 0.86 | 0.68 | 7.003 | 0.011 |
| AUROC | 0.96 | 0.73 | 8.901 | 0.027 |

讨论

在本研究中,我们成功开发了一个基于卷积神经网络(CNN)的深度学习模型,用于从优化后的CT图像中识别肺结核继发纤维纵隔炎引起的肺动脉高压。

该模型展现出了较高的精确度、召回率和 F1 分数,特别是在接收者操作特征曲线下的面积(AUC)达到了 0.90,证明了其在区分肺动脉高压和非高血压病例方面的优异能力。这些结果强调了深度学习技术在医学图像分析中的潜力,尤其是在处理复杂疾病状态如肺动脉高压时。我们的研究结果与现有文献中关于使用机器学习技术进行疾病诊断和预测的研究相一致,这些研究同样报告了高水平的性能指标。此外,优化后的图像处理技术的应用提高了模型的训练效率和诊断精度,突显了在医学影像领域内,技术创新对于提升诊断工具准确性的重要性。

本研究探讨了基于梯度信息的图像处理和优化问题,重点研究了如何利用图像的梯度信息(如边缘和噪声)来提高图像处理的效率和质量。图像大部分信息,包括边缘和纹理细节,都包含在其梯度信息中,这使得梯度域的优化尤为重要。我们采用了多种基于梯度的模型和方法来处理图像去噪、图像平滑和图像压缩等问题。例如,全变分(TV)模型主要被用于去噪,而 L0 和 L1 范数优化则广泛应用于图像平滑和压缩^[11-12]。此外,基于多角度图像的光照模型问题也显示了在梯度域上进行优化的有效性。在优化方法上,我们采用了拉格朗日函数的交替优化项进行迭代,特别是在梯度域和图像域上同时优化。通过将问题局部化到图像的最小单元上,并将优化问题简化为二元优化问题,我们能够在每步迭代中直接获得最优解,这显著提高了算法的效率和解的精确度^[13]。我们进一步引入了梯度损失模型,以更精确地从梯度空间学习图像特征,特别是在保持图像锐度和避免过度模糊或过度锐化方面表现出较高的性能^[14-16]。此外,针对传统图像边缘检测方法容易受到噪声干扰的问题,我们提出了一种基于自适应算子的新方法,该方法通过分析图像梯度的变化来增强图像纹理并抑制噪声,从而在保持边缘细节和抗噪声性能方面取得了显著的改进。

本研究的模型在测试集上显示出高度的准确性,特别是在 Dice 系数、敏感性、特异性以及 AUC 值等关键性能指标上的表现,均符合甚至超过了当前文献中报告的相似研究结果。与之前的报道相比,我们的模型在肺部疾病的自动诊断中展示了相似或更优的识别能力^[17]。这证明了基于梯度优化的深度学习方法在处理复杂的医学影像数据时的有效性。此外,本研究还重点分析了患者人口统计和健康状况特征如吸烟状态、糖尿病情况及心血管并发症等因素对模型性能的影响。结果显示,尽管存在这些变量的影响,模型的性能依然稳定,这证明了模型的泛化能力。这一发现对未来设计更为精确个体化治疗方案提供了依据,也进一步证实了深度学习模型能够在多变的临床环境中保

持其诊断精度。

虽然本研究结果具有积极的应用前景,但将这些研究成果转化为临床实践的实用工具,还需要进一步的验证和改进。未来的研究应当在扩大样本量,包括不同省市区域的患者,以评估模型在更广泛人群中的应用效果。此外,考虑到疾病复杂性和多样性,增加更多相关临床参数,如生活方式、遗传背景等因素,将可能进一步提升模型的精确度和适用性。总之,本研究所提出的方法不仅提高了对图像处理的质量,也为未来的研究提供了新的方向,为进一步探索梯度信息结合高级图像处理技术在临床医学应用提供新的前景。

【参考文献】

- [1] 胡婧,周静,吴雯晶,等. 结核病诊断 T-SPOT. TB、Gene Xpert MTB/RIF 技术应用价值研究[J]. 中国病原生物学杂志,2022,17(12):1454-1458,1474.
- [2] Natarajan A, Beena PM, Devnikar AV, et al. A systemic review on tuberculosis[J]. Indian J Tuberc, 2020, 67(3): 295-311.
- [3] 周勇,郑玉龙. 慢性阻塞性肺疾病继发肺动脉高压预测因素分析[J]. 中国医师进修杂志, 2022, 45(4): 339-344.
- [4] Johnson S, Sommer N, Cox-Flaherty K, et al. Pulmonary hypertension: A contemporary review[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2023, 208(5): 528-548.
- [5] Luna-Lopez R, Ruiz MA, Escribano SP. Pulmonary arterial hypertension hipertension arterial pulmonar [J]. Med Clin (Barc), 2022, 158(12): 622-629.
- [6] 李松桃,方明亮,唐旭毛,等. 国内肺纤维化合并肺气肿综合征临床特点的系统分析[J]. 国际呼吸杂志, 2017, 37(2): 124-129.
- [7] Ofir N, Galun M, Alpert S, et al. On detection of faint edges in noisy images[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2020, 42(4): 894-908.
- [8] Tang JL, Wang Y, Huang CR, et al. "Image edge detection based on singular value feature vector and gradient operator[J]. Math Biosci Eng; MBE, 2020(174): 3721-3735.
- [9] Theodosiou AA, Read RC. Artificial intelligence, machine learning and deep learning: Potential resources for the infection clinician[J]. J Infect, 2023, 87(4): 287-294.
- [10] Stokes JM, Yang K, Swanson K, et al. A deep learning approach to antibiotic discovery published correction appears in Cell[J]. Cell, 2020, 180(4): 688-702. e13.
- [11] Ertas M. A nonlinear total variation based computed tomography (CT) image reconstruction method using gradient reinforcement[J]. PeerJ, 2024, 12: e16715.
- [12] Song Q, Li X, Zhang M, et al. APNet: Adaptive projection network for medical image denoising[J]. J Xray Sci Technol, 2024, 32(1): 1-15.
- [13] Li X, Ge P, Shen Y, et al. Gradient-based adaptive wavelet denoising method for photoacoustic imaging *in vivo* [J]. J Biophotonics, 2024, 17(2): e202300289.
- [14] 深圳东海浪潮科技有限公司. 一种基于综合定权的 TOPSIS 算法的人体心肺耐力评价方法: CN202210823587.0[P]. 2023-01-17.
- [15] Sui G, Zhang Z, Liu S, Chen S, Liu X. Pulmonary nodules segmentation based on domain adaptation[J]. Phys Med Biol, 2023, 68(15): 1322.
- [16] 张莹莹. 基于临床检验指标的肺部疾病诊断系统设计与实现[D]. 湖北: 华中科技大学, 2022.
- [17] 陈纪元, 周丹莎, 李想, 等. 人工智能在肺动脉高压辅助诊断中的应用进展[J]. 中华医学杂志, 2023, 103(2): 138-143.

【收稿日期】 2024-05-21 【修回日期】 2024-07-30