

基于多尺度图像特征提取的棉花品级自动分类方法

王东¹, 高颖², 王铭¹, 吕炎³

(1. 中华人民共和国青岛海关, 山东 青岛 266001; 2. 青岛科技大学 数据科学学院, 山东 青岛 266061; 3. 室兰工业大学 工学研究科, 北海道 室兰 0508585)

摘要:针对人工检验棉花品级存在稳定性和一致性差、易受外界因素影响等问题,提出一种基于多尺度图像特征提取的轻量化棉花品级自动分类方法——多尺度主成分分析网络(MS-PCANet)。该方法在传统PCANet的基础上引入3层卷积结构,通过逐层递减的卷积核大小和滤波器数量,实现从全局到局部的多尺度特征提取,并利用端到端的联合训练机制优化特征提取与分类性能;在公开分类数据集以及标准盒与非标准盒棉花数据集上开展性能评估,并与PCANet、MobileNetV2、ResNet-18等模型进行对比实验。结果表明,MS-PCANet在标准盒数据集上的分类准确率为99.2%,在非标准盒数据集上的准确率为83.8%,综合准确率为84.2%;且在保持较低参数量(2.5 M)和推理时间(9.7 ms)的同时,分类性能明显优于传统轻量化模型PCANet。研究结果为棉花品级自动分类提供了一种高效、稳定且适应性强的解决方案。

关键词:棉花品级分类;轻量化模型;多尺度卷积;视觉特征提取;主成分分析

中图分类号:TP 391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2025)05-0412-05

Cotton Grade Automatic Classification Method Based on Multi-Scale Image Feature Extraction

WANG Dong¹, GAO Ying², WANG Ming¹, LYU Yan³

(1. Qingdao Customs District P. R. China, Qingdao 266001, China; 2. School of Data Science, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 3. Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Muroran 0508585, Japan)

Abstract: To address the issues of poor stability, low consistency, and susceptibility to external factors in manual cotton grading, a lightweight cotton grade automatic classification method based on multi-scale image feature extraction, namely multi-scale principal component analysis network (MS-PCANet) was proposed. Based on the traditional PCANet, this method introduces a three-layer convolutional structure that achieves multi-scale feature extraction from global to local details by progressively reducing the size of convolutional kernels and the number of filters. An end-to-end joint training mechanism was employed to optimize both feature extraction and classification performance. Performance evaluations were conducted on publicly available classification datasets as well as standard and non-standard box cotton datasets, with comparative experiments carried out against models such as PCANet, MobileNetV2, and ResNet-18. The results demonstrate that MS-PCANet achieves a classification accuracy of 99.2% on the standard box dataset, 83.8% on the non-standard box dataset, and an overall accuracy of 84.2%. While maintaining low parameter count (2.5 M) and short inference time (9.7 ms), its classification performance significantly outperforms the traditional lightweight model PCANet. The study provided an effective, stable, and highly adaptable solution for automated cotton grading classification.

Key words: cotton grade classification, lightweight model, multi-scale convolution, visual feature extraction, principal component analysis

收稿日期:2025-08-11; 修订日期:2025-09-25。

基金项目:海关总署科技项目(2024HK052);青岛海关科技项目(SK201732)。

作者简介:王东(1976—),男,高级工程师,硕士。主要研究方向为进出口商品智能检验检测。

Email:sdciqwangdong@163.com

棉花是我国重要的战略物资和纺织工业的主要原料。对棉花品级检验、分类的结果,直接影响其市场价格和后续加工质量。目前,常用的检验方式有人工评级和仪器检验两种^[1]。

人工评级中,经验丰富的工作人员根据实物标准或样品,对棉花的色征、杂质和轧工进行综合评定。但该方法存在评级人员的培养周期较长、检测结果受外界因素影响大、评级结果一致性差、检验效率低等问题。仪器检验主要采用大容量纤维测试仪,目前使用较多的是乌斯特公司生产的测试仪,但该设备价格昂贵,且仅可检验棉花品级中的色征和杂质,无法评定轧工。

随着人工智能技术的发展,棉花品级的自动化检验、分类开始受到关注。LIEBERMAN M A 等^[2]首次提出利用神经网络聚类的方法对棉花杂质进行分类。XU B 等^[3]通过棉花颜色和几何特征描述杂质,构建模糊推理系统。DUCKETT K 等^[4]提出将颜色光谱分析与图像分析相结合的研究方法,并基于 CIE Lab 颜色空间进行颜色评定。张婷等^[5]将距离度量学习应用于棉花品级自动分类中。李晓慧等^[6]基于卷积神经网络设立了一套棉花轧工质量分级系统。武伟伟等^[7]提出一种基于注意力机制的细粒度棉花颜色分级检验方法。夏彬等^[8]设计了一种基于机器视觉的棉花轧工质量检测系统,通过低角度照明和图像纹理分析,实现轧工质量等级判定。白恩龙等^[9]设计了一种基于机器视觉的棉花颜色检测方案,通过图像预处理、颜色空间转换和 k 均值聚类,实现棉花颜色等级判定。王中璞等^[10]提出了一种基于改进 MobileNetV2 的棉花颜色分级检测方法,通过特征融合和嵌入卷积块注意力机制,提升检测结果的准确率。

文中为实现进口棉花色征、杂质和轧工 3 项目的综合自动评级,在分析梳理相关研究的基础上,提出基于多尺度图像特征提取的轻量化棉花品级自动分类方法——多尺度主成分分析网络(multi-scale principal component analysis net, MS-PCANet),并通过实验数据进行比较和验证,判定其分类能力。

1 图像特征提取与分类模型

1.1 主成分分析网络

主成分分析(principal component analysis, PCA)是一种经典的降维方法,其通过线性变换提取数据中方差最大的主成分,去除相关性较小的信息,从而减少数据维度并提升计算效率。然而,PCA

的线性计算难以捕捉图像数据中像素间的非线性关系,可能导致重要的结构信息丢失。此外,PCA 聚焦于数据的全局特征,容易将图像中的局部特征(如杂质)视为噪声而忽略,且该方法对数据格式有严格要求,仅适用于矩阵形式的计算。

CHAN T H 等^[11]基于 PCA 提出主成分分析网络(principal component analysis net, PCANet),这是一种用于图像特征提取的轻量级深度网络。PCANet 通过滑动窗口提取图像局部特征,对提取出的图像局部特征块进行 PCA 变换,并利用主成分作为滤波器进行卷积操作。这种设计减少了网络的参数量,同时克服了 PCA 对数据分布的限制。

PCANet 凭借简洁高效的架构,在小型数据集和资源受限场景中表现优异。然而,PCANet 仅采用两层卷积结构,难以充分捕捉多尺度特征,尤其在处理复杂图像数据时存在一定局限性。

1.2 多尺度主成分分析网络

棉花的外观品级主要从色征、杂质和轧工 3 方面进行检验。色征包括颜色和光泽;杂质泛指混入样品中的非纤维物质和附着在棉籽、籽屑上的棉纤维和籽棉等;轧工指轧花机加工后皮棉中纤维分布的均匀程度及棉结丝素、白星的含有程度。针对这些复杂的视觉特征,文中提出 MS-PCANet 模型。该模型保留了 PCANet 的核心设计思想,同时在多层次特征提取、上下文信息建模和特征聚合方法上进行优化,从而实现棉花品级的自动分类。

MS-PCANet 模型结构如图 1 所示。由图 1 可见,模型第 1 层采用 7×7 的大卷积核和 16 个滤波器,提取图像的全局特征(如棉花的色征);第 2 层采用 5×5 的中尺度卷积核和 8 个滤波器,提取纹理和中尺度特征(如大块索丝);第 3 层采用 3×3 的小卷积核和 4 个滤波器,捕捉细粒度的局部特征(如小块杂质)。卷积核尺寸逐层递减,可以实现从全局到局部的多尺度特征提取,提取的特征经过直方图编码和展平处理后,通过全连接层映射得到最终分类结果。

MS-PCANet 的 3 层卷积操作可形式化为

$$\begin{cases} F_1^{(k)} = I \times P_1^{(k)}, P_1^{(k)} \in \mathbf{R}^{7 \times 7}, k = 1, \dots, 16; \\ F_2^{(l)} = \sigma[F_1^{(k)} \times P_2^{(l)}], P_2^{(l)} \in \mathbf{R}^{5 \times 5}, k = 1, \dots, 8; \\ F_3^{(m)} = \sigma[F_2^{(l)} \times P_3^{(m)}], P_3^{(m)} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}, m = 1, \dots, 4. \end{cases}$$

式中: I 为输入图像的像素集合,维度为 $H \times W$, $I \in \mathbf{R}^{H \times W}$; k, l, m 为滤波器及特征图的索引; $F_1^{(k)}, F_2^{(l)}, F_3^{(m)}$ 分别为第 1, 2, 3 层输出的第 k, l, m 个特征图; $P_1^{(k)}, P_2^{(l)}, P_3^{(m)}$ 分别为通过 PCA 计算得到的第 1, 2, 3 层使用的第 k, l, m 个卷积滤波器; $\sigma(\cdot)$ 为非线

性激活; × 为卷积运算。

此外,与传统 PCANet 专用于特征提取不同,MS-PCANet 在网络设计中直接引入全连接层作为分类层,构建了一个完整的端到端网络架构。特征层和分类层可以通过联合训练的方式同步优化,从而自动调整特征提取方式,以更好地适配分类任务。这种联合训练机制能够有效提升模型的性能,减少过拟合的风险。

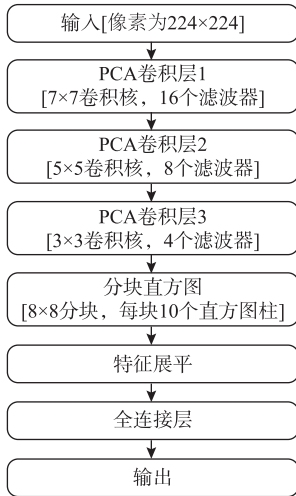


图 1 MS-PCANet 模型结构

Fig. 1 Structure of MS-PCANet model

2 实验部分

2.1 材料

2.1.1 原料 美国进口陆地白棉样品,品级包括 Good Middling、Strict Middling、Middling、Strict Low Middling、Low Middling、Strict Good Ordinary、Good Ordinary 等,图像数据采集时每个品级的样品不少于 300 g。

2.1.2 仪器 自制棉花图像采集设备,具体包括: A5501CG20 型工业相机,浙江华睿科技股份有限公司制造;标准光源对色灯箱(带 D65 光源),市售。

2.2 数据来源

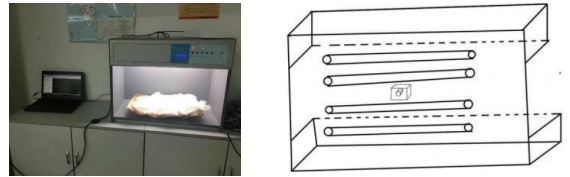
2.2.1 模型性能验证数据集 为验证 MS-PCANet 的性能,文中在公开数据集 CIFAR-10 上进行分类测试。CIFAR-10 包含 10 个类别,每类有 5 000 张训练图像和 1 000 张测试图像,是广泛使用的基准数据集。

2.2.2 棉花品级分类数据集 实验采用标准盒数据集和非标准盒数据集进行混合验证。标准盒数据集包含来自棉花检验实验室的 3 010 张大小为 224 × 224 的图像,共 7 个等级,每级 430 张;非标准

盒数据集包含基于自动采集设备采集的 7 000 张实际样本图像,共 7 个等级,每级 1 000 张。合并后的混合数据集共 10 010 张图像,按 8:1:1 的比例划分为训练集、验证集和测试集,充分涵盖了标准和非标准场景,以验证模型在不同条件下的适用性。

2.3 方法

2.3.1 棉花图像数据采集设备的设计 笔者团队自行设计了棉花图像采集专用设备:采用标准光源对色灯箱作为标准光源,采用工业相机作为图像采集工具,确保图像采集环境和人工评级环境的一致。棉花图像采集设备如图 2 所示。由图 2(a)可见,标准灯箱内放置 D65 标准光源,箱体底部放置待测棉花样品。工业相机通过 USB 3.0 接口与笔记本电脑连接,实时显示采集的图像及分析结果。由图 2(b)可见,灯箱顶部装有 4 根灯管,中心安装工业相机。



(a) 整体实验装置

(b) 灯箱顶部示意

图 2 棉花图像采集设备

Fig. 2 Cotton image acquisition equipment

2.3.2 图像预处理 采用自行开发的图像采集软件采集样本图像。所有样本图像经统一预处理:①将图像裁剪像素为 224 × 224 的标准尺寸,并保存为无损 BMP 格式,以保持原始色彩与纹理特征;②为提升模型泛化能力,采用旋转、平移、尺度缩放及高斯噪声等数据增强操作,扩充数据量。

针对棉花纤维方向随机性的问题,采用方向对齐与极坐标变换相结合的方法,通过极坐标变换与视角归一化处理,将不同角度采集的图像映射至统一标准空间。

2.3.3 模型性能验证 实验设置如下:批量大小(batch size)为 32,初始学习率为 0.001,采用 Adam 优化器,学习率使用指数衰减策略,训练总轮数(epoch)为 50 轮,加入提前停止设置,保存最优模型。

为全面评估模型性能,将 MS-PCANet 与传统 PCANet、轻量化模型 MobileNetV2 以及经典小型网络 ResNet-18 进行对比,分别从分类准确率、参数量以及推理时间 3 个维度,衡量各模型在分类任务中的分类能力与计算效率。

2.3.4 棉花品级分类 训练过程中,设置批量大

小为32,初始学习率为0.001,采用Adam优化器,学习率使用指数衰减策略,训练总轮数为100轮。

实验选取传统PCANet、轻量化网络MobileNetV2以及经典小型网络ResNet-18作为对比模型,以全面评估MS-PCANet在棉花品级分类任务中的性能。采用分类准确率作为主要评价指标,同时统计模型的参数量和单张图像的推理时间,平衡分类能力与计算效率。

3 结果与讨论

3.1 模型性能验证结果

各模型在不同数据集上的实验结果见表1。由表1可见,MS-PCANet在公开数据集CIFAR-10上的分类准确率显著高于PCANet,验证了多尺度特征提取模块的有效性。尽管MS-PCANet增加了一层卷积,但其参数量和推理时间的增加幅度有限,保持了较好的轻量化特性。

与基线模型PCANet相比,MS-PCANet在仅增加30万个参数和0.8ms推理时间的情况下,分类准确率提升了3.7%,证明了模型改进的有效性。尽管MS-PCANet的最终准确率与MobileNetV2和ResNet-18相比存在一定差距,但在计算效率上展现出显著优势。与深层网络ResNet-18相比,虽然ResNet-18获得了最高的分类准确率,但是其参数量是MS-PCANet的7.8倍,推理时间是MS-PCANet的2.5倍,巨大的资源消耗使其在计算资源受限的嵌入式或移动设备上难以部署。

结果表明,MS-PCANet在通用图像分类任务中具备良好的基础性能和轻量化优势,可以在保证较

高分类准确率的同时,最大限度地保持模型的轻量化与高速性,更加适用于对计算资源和实时性有严格要求的场景。

表1 不同模型在CIFAR-10数据集上的实验结果

Tab.1 Experimental results of different models on the CIFAR-10 dataset

模型	分类准确率/%	参数量/万个	推理时间/ms
PCANet	85.6	120	5.3
MS-PCANet	89.3	150	6.1
MobileNetV2	92.3	230	8.1
ResNet-18 ^[18]	93.4	1 170	15.3

3.2 棉花品级分类结果

采用不同模型进行棉花品级分类的结果见表2。由表2可见,MS-PCANet的综合准确率达84.2%,较PCANet有所提升,验证了MS-PCANet在标准盒和非标准盒数据中的适应性。

在标准盒数据中,MS-PCANet准确率为99.2%,接近ResNet-18的最高值99.6%,证明了模型的性能上限。在非标准盒数据中,MS-PCANet凭借多尺度特征提取,准确率达到83.8%,显著优于PCANet基线模型,表现出对复杂背景和光照变化的鲁棒性。

尽管MobileNetV2比MS-PCANet的综合准确率略高,但MS-PCANet的参数量较MobileNetV2减少了26.47%,推理时间缩短了2.9ms,体现了性能与资源消耗的良好平衡。整体而言,MS-PCANet在准确率、轻量化设计和推理效率之间具有优异的协调性,可以为棉花品级分类提供较为高效的解决方案。

表2 不同模型进行棉花品级分类的结果

Tab.2 Experimental results of different models on the cotton grade classification

模型	标准盒准确率/%	非标准盒准确率/%	综合准确率/%	参数量/万个	推理时间/ms
PCANet	96.4	77.3	81.0	210	8.5
MS-PCANet	99.2	83.8	84.2	250	9.7
MobileNetV2	99.1	84.6	86.4	340	12.6
ResNet-18	99.6	86.0	87.9	1 170	18.3

4 结语

文中从棉花品级的色征、杂质和轧工3个角度出发,提出了一种基于多尺度特征提取的轻量化棉

花品级自动分类方法——MS-PCANet。通过分析棉花的图像特征和评级标准,将全局特征和局部特征结合,实现了多尺度特征提取。此外,MS-PCANet通过将卷积结构和全连接层结合,形成一个完整的网络,共享梯度协同优化,使提取的特

征更符合分类目标的要求,从而在轻量化的同时实现高性能分类。MS-PCANet 在标准盒和非标准盒数据集上的分类准确率分别达到 99.2% 和 83.8%,综合准确率为 84.2%,且在性能与资源消耗之间实现了良好的平衡。

由于条件限制,文中仅研究了模型对进口美国棉花的适用性。下一步将重点研究模型对其他品种棉花的适用性,并与更多模型进行比对,验证模型的有效性。此外,将持续改进模型,进一步增强模型的特征提取和分类能力,不断提升泛化性能。

参考文献:

- [1] 吴友日, 金肖克, 冯建强, 等. 基于高光谱成像技术的棉花杂质检测[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(11): 46-54.
WU Youri, JIN Xiaoke, FENG Jianqiang, et al. Cotton impurity detection based on hyperspectral imaging technology[J]. Advanced Textile Technology, 2024, 32(11): 46-54. (in Chinese)
- [2] LIEBERMAN M A, PATIL R B. Clustering and neural networks to categorize cotton trash [J]. Optical Engineering, 1994, 33(5): 1642.
- [3] XU B, DALE D S, HUANG Y, et al. Cotton color classification by fuzzy logic [J]. Textile Research Journal, 2002, 72(6): 504-509.
- [4] DUCKETT K, ZAPLETALOVA T, CHENG L, et al. Color grading of cotton part I: spectral and color image analysis [J]. Textile Research Journal, 1999, 69(11): 876-886.
- [5] 张婷, 高颖, 王东, 等. 基于距离度量学习的棉花品级分类方法研究[J]. 中国棉花, 2018, 45(8): 12-19.
ZHANG Ting, GAO Ying, WANG Dong, et al. Research on cotton grading based on distance metric learning [J]. China Cotton, 2018, 45(8): 12-19. (in Chinese)
- [6] 李晓慧, 曹仲庆, 陈智勇, 等. 基于卷积神经网络的棉花轧工质量分级系统研究[J]. 中国纤检, 2021(6): 124-126.
LI Xiaohui, CAO Zhongqing, CHEN Zhiyong, et al. Research on cotton rolling quality classification system based on convolutional neural network [J]. China Fiber Inspection, 2021(6): 124-126. (in Chinese)
- [7] 武伟伟, 唐继春, 唐广翼. 基于注意力机制的细粒度棉花颜色级检验方法研究[J]. 中国纤检, 2023(5): 74-78.
WU Weiwei, TANG Jichun, TANG Guangyi. Study on the color level test method of fine-grained cotton based on attention mechanism [J]. China Fiber Inspection, 2023(5): 74-78. (in Chinese)
- [8] 夏彬, 史书伟, 张若宇, 等. 棉花轧工质量机器视觉检测系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 189-197.
XIA Bin, SHI Shuwei, ZHANG Ruoyu, et al. Design and test of machine vision inspection system for cotton preparation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 189-197. (in Chinese)
- [9] 白恩龙, 张周强, 郭忠超, 等. 基于机器视觉的棉花颜色检测方法[J]. 纺织学报, 2024, 45(3): 36-43.
BAI Enlong, ZHANG Zhouqiang, GUO Zhongchao, et al. Cotton color detection method based on machine vision [J]. Journal of Textile Research, 2024, 45(3): 36-43. (in Chinese)
- [10] 王中璞, 吴正香, 尤美路, 等. 基于改进 MobileNetV2 的棉花颜色分级检测[J]. 棉纺织技术, 2024, 52(6): 15-21.
WANG Zhongpu, WU Zhengxiang, YOU Meilu, et al. Cotton color grade detection based on improved MobileNetV2 [J]. Cotton Textile Technology, 2024, 52(6): 15-21. (in Chinese)
- [11] CHAN T H, JIA K, GAO S H, et al. PCANet: a simple deep learning baseline for image classification? [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 5017-5032. (责任编辑:张雪)
- (上接第 411 页)
- [26] 罗玉鑫. 中国古典绘画的光影表现[D]. 北京: 中国艺术研究院, 2023.
- [27] MOON P, SPENCER D E. Geometric formulation of classical color harmony [J]. Journal of the Optical Society of America, 1944, 34(1): 46.
- [28] 张幂, 陈庆, 刘肖健. 基于交互式遗传算法的布艺沙发 CMF 情感化设计研究[J]. 包装工程, 2023, 44(16): 79-88.
ZHANG Mi, CHEN Qing, LIU Xiaojian. Emotional design of fabric sofa CMF based on interactive genetic algorithm [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(16): 79-88. (in Chinese)
- [29] 刘炯宙, 李基拓, 陆国栋. 色彩语义驱动的产品交互式遗传配色设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(5): 669-676.
LIU Jiongzhou, LI Jituo, LU Guodong. Color scheme design through color semantic and interactive genetic algorithm [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2012, 24(5): 669-676. (in Chinese)
- [30] 杨延璞, 雷紫荆, 兰晨昕, 等. 群体共识驱动的文化创意产品交互式配色设计方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(5): 1097-1104.
YANG Yanpu, LEI Zijing, LAN Chenxin, et al. Research on interactive color design method of cultural creative product driven by group consensus [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(5): 1097-1104. (in Chinese)
- [31] 王晓天, 刘文波, 王雨薇, 等. 基于网络模型的《朝元图》服饰色彩分析与应用 [J]. 现代纺织技术, 2024, 32(10): 125-134.
WANG Xiaotian, LIU Wenbo, WANG Yuwei, et al. Color analysis and application of costumes in *Chaoyuan Painting* based on the network model [J]. Advanced Textile Technology, 2024, 32(10): 125-134. (in Chinese) (责任编辑:张雪)