

基于低秩分解的 织物疵点检测方法研究

李春雷 / 著

JIYU DIZHI FENJIE DE ZHIWU CIDIAN JIANCE FANGFA YANJIU



非外借

中国纺织出版社有限公司

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

基于低秩分解的 织物疵点检测方法研究

李春雷 / 著

JIYU DIZHI FENJIE DE ZHIWU CIDIAN JIANCE FANGFA YANJIU



中国纺织出版社有限公司

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

内 容 提 要

本书共分为 12 章。第 1 章为绪论部分,第 2 章对低秩稀疏分解理论进行介绍,第 3 至第 12 章阐述了基于低秩分解的织物疵点检测方法。

本书可作为计算机、信号与信息处理、控制工程等专业的研究生或博士生的教材或参考书,也可作为纺织图像处理、目标检测、机器视觉等领域技术人员和研究人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

基于低秩分解的织物疵点检测方法研究/李春雷著. --北京:中国纺织出版社有限公司, 2019. 10

ISBN 978-7-5180-6631-5

I. ①基… II. ①李… III. ①织疵—质量检验—研究
IV. ①TS101.97

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 190283 号

责任编辑:范雨昕 责任校对:王花妮 责任印制:何建

中国纺织出版社有限公司出版发行

地址:北京市朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码:100124

销售电话:010—67004422 传真:010—87155801

<http://www.c-textilep.com>

E-mail:faxing@c-textilep.com

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 <http://weibo.com/2119887771>

北京虎彩文化传播有限公司印刷 各地新华书店经销

2019 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

开本:710×1000 1/16 印张:12.75

字数:204 千字 定价:88.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社图书营销中心调换

前 言

我国工业增加值和总量都已经位居全球领先地位,是世界工业制造大国。2015年,我国工业产值达到90.39万亿元,占到世界总产值的22%,其中,布匹产量达到了892亿米,玻璃产量为6.3亿重量箱,钢材产量为11.2亿吨。然而,表面缺陷对这些产品的质量有着直接影响,使企业承担了巨大的经济负担和信誉风险。因此,工业产品表面的缺陷检测识别作为产品质量控制的重要环节,在生产过程中占有举足轻重的地位。

织物缺陷,常称为疵点,是指在纺织生产过程中,由各种不利因素导致的产品外观上的缺陷。从纤维原料到成品织物,一般需经过纺纱、织造、印染等多道工序,在各加工环节中均可能产生疵点。例如,仅在织造过程中,就可能出现异纱、并经、并纬、断纬、缺纬、纬缩、织造破洞等多达40余种疵点。织物疵点种类多样、尺度多变,且背景纹理较为复杂,织物表面柔性大、易变形,因此,相对于其他工业产品,纺织过程中织物表面疵点的检测识别已成为一个难题,具有重要的科学研究与应用价值。该项目的研究成果也可为其他工业产品表面缺陷的检测识别提供参考解决思路。

低秩分解模型与人类视觉系统的低秩稀疏性相吻合,通过将图像特征矩阵分解为低秩矩阵和稀疏矩阵,实现目标与背景的有效分离。织物图像纹理复杂多样,背景高度冗余且疵点显著稀疏,因此织物疵点检测相对自然图像中的目标检测更好地符合了低秩分解模型。因此,基于低秩分解的织物疵点检测方法研究成为研究的热点,有望解决复杂纹理背景下的织物疵点检测问题。

目前,图像处理、模式识别等方面的书籍在国内外均有正式出版,但未见织物疵点检测这一具体应用方面的书籍出版。因此我们撰写本书的目的,一方面使更多的人了解该领域,满足从事纺织图像检测研究、开发和应用的有关人员

的需求;另一方面总结整理了我们近几年该方向的研究成果,与读者相互学习和讨论,共同促进纺织图像检测等研究的发展。

本书共分为 12 章。第 1 章为绪论部分,简要介绍了本书研究内容的背景与意义,并对相关研究方法进行了综述;第 2 章对低秩稀疏分解理论进行介绍;第 3 章主要研究基于 Gabor 滤波器和低秩分解的织物疵点检测算法;第 4 章主要研究基于 HOG 和低秩分解的织物疵点检测算法;第 5 章主要研究基于 GHOG 和低秩分解的模式织物疵点检测算法;第 6 章主要研究基于生物建模特征提取及低秩表示的织物疵点检测算法;第 7 章主要研究基于多通道特征矩阵联合低秩表示的织物疵点检测算法;第 8 章主要研究基于多通道特征和张量低秩分解的织物疵点检测算法;第 9 章主要研究基于级联低秩分解的织物疵点检测算法;第 10 章主要研究基于特征融合和 TV-RPCA 的织物疵点检测算法;第 11 章主要研究基于深度特征和 NTV-RPCA 的织物疵点检测算法;第 12 章主要研究基于深度—低阶特征和 NTV-NRPCA 织物疵点检测算法。

本书由中原工学院电子信息学院李春雷撰写,作者多年来一直从事纺织图像智能检测与分析方面的研究工作。本书是作者多年从事织物疵点检测研究成果的结晶。在研究工作中,得到国家自然科学基金项目(No. U1804157, 61772576)、河南省高校科技创新人才项目(17HASTIT019)、河南省科技创新杰出青年项目(184100510002)、中原工学院交叉学科团队项目、中原工学院学术专著出版基金的支持,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

李春雷

2019 年 7 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 本书的主要工作及研究成果	8
1.4 总结与展望	11
1.4.1 工作总结	11
1.4.2 工作展望	12
第 2 章 低秩稀疏矩阵分解理论基础	13
2.1 低秩稀疏矩阵分解数学基础	14
2.2 低秩表示	15
2.3 对低秩分解的优化求解方法	16
2.4 织物图像秩分析	17
2.5 本章小结	18
第 3 章 基于 Gabor 滤波器和低秩分解的织物疵点检测算法	19
3.1 Gabor 滤波器特征提取	19
3.2 模型构建及优化求解	21
3.2.1 低秩模型构建	21
3.2.2 模型的优化求解	21
3.3 疵点分布图生成及分割	26
3.4 实验结果及分析	26
3.5 本章小结	29

第4章 基于HOG和低秩分解的织物疵点检测算法	30
4.1 算法的提出及应用方法	30
4.1.1 预处理	30
4.1.2 特征提取	31
4.1.3 基于低秩分解的疵点分布图生成	32
4.1.4 疵点分布图分割	34
4.2 实验结果及分析	34
4.3 本章小结	38
第5章 基于GHOG和低秩分解的模式织物疵点检测算法	39
5.1 所提算法	40
5.1.1 GHOG特征提取	40
5.1.2 低秩模型构建	42
5.1.3 模型的优化求解	44
5.1.4 疵点分布图生成及分割	46
5.2 实验结果与分析	47
5.2.1 定性的结果	47
5.2.2 定量的结果	54
5.3 本章小结	55
第6章 基于生物建模特征提取及低秩表示的织物疵点检测算法	56
6.1 基于生物视觉的图像特征提取方法	57
6.2 低秩表示模型构建	61
6.3 模型的优化求解	62
6.4 疵点分布图生成及分割	64
6.5 实验结果及分析	64
6.5.1 定性的结果	65

6.5.2 定量的结果	71
6.6 本章小结	72
第7章 基于多通道特征矩阵联合低秩表示的织物疵点检测算法	73
7.1 二阶多通道特征提取	74
7.1.1 二阶梯度图计算	74
7.1.2 基于P型神经节细胞编码方式的特征提取	75
7.1.3 多通道特征矩阵生成	77
7.2 联合低秩表示模型的构建	77
7.2.1 模型构建	77
7.2.2 优化过程	80
7.3 显著图生成与分割	82
7.4 实验结果及分析	83
7.4.1 定性分析	83
7.4.2 定量分析	88
7.5 本章小结	90
第8章 基于多通道特征和张量低秩分解的织物疵点检测算法	91
8.1 张量符号和基本定义	92
8.2 所提算法	95
8.2.1 二阶多通道特征提取	96
8.2.2 TRPCA 模型构建	96
8.2.3 优化过程	96
8.2.4 显著图生成和分割	98
8.3 实验结果及分析	98
8.3.1 定性分析	99
8.3.2 定量分析	103
8.4 本章小结	104

第 9 章 基于级联低秩分解的织物疵点检测算法	105
9.1 所提算法	105
9.1.1 图像分割和特征提取	106
9.1.2 级联低秩分解模型构建	109
9.1.3 模型优化	109
9.1.4 显著图生成与分割	111
9.2 实验结果与分析	111
9.2.1 定性分析	112
9.2.2 定量分析	116
9.3 本章小结	117
第 10 章 基于特征融合和 TV-RPCA 的织物疵点检测算法	118
10.1 基于典型相关分析的特征提取	119
10.2 基于全变差正则项的 RPCA 模型的构建及求解	123
10.2.1 模型的构建	123
10.2.2 模型的求解	125
10.3 显著图生成与分割	130
10.4 实验结果及分析	130
10.4.1 特征维数的选取	131
10.4.2 融合策略的选取	132
10.4.3 全变差正则项的选取	134
10.4.4 与现有方法的比较	137
10.5 本章小结	139
第 11 章 基于深度特征和 NTV-RPCA 的织物疵点检测算法	140
11.1 层次性深度特征提取	141
11.2 基于非凸全变差正则项的 RPCA 模型的构建及求解	143

11.2.1 模型的建立	143
11.2.2 模型的求解	146
11.3 显著图生成	153
11.4 显著图融合	153
11.5 显著图二值化	154
11.6 实验结果及分析	155
11.6.1 多层次深度特征对比	155
11.6.2 非凸全变差的对比	157
11.6.3 与现有方法的比较	160
11.7 本章小结	162
 第 12 章 基于深度—低阶特征和 NTV-NRPCA 织物疵点检测算法	164
12.1 深度—低阶特征提取	165
12.2 基于非凸全变差正则项的非凸 RPCA 模型的构建及求解	167
12.2.1 模型的建立	167
12.2.2 模型的求解	170
12.3 显著图生成	175
12.4 分割图生成	176
12.5 实验结果及分析	176
12.5.1 深度—低阶特征的对比	177
12.5.2 非凸 RPCA 模型的对比	178
12.5.3 与现有方法的比较	180
12.6 本章小结	182
 参考文献	183

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

我国自古是丝纺织、棉纺织大国,纺织业一直在国民经济生产中占有重要地位,特别是从改革开放以来,中国纺织业得到了迅猛的发展。现今,中国在全球纺织业中占据着龙头地位。2017年,中国化纤产量达到4919.55万吨,占世界比重达70%以上。规模以上企业服装产量287.81亿件,相当于为全球每人提供6.89件衣服。随着社会的发展,人们对纺织品的使用性能和档次的要求越来越高,已经不仅局限于纺织品耐用、舒适,还要求外觀光洁、无疵点,疵点的出现会大大影响纺织品的价值,因此织物疵点检测在纺织品生产制造过程中是不可或缺的环节。该方向的研究已经引起纺织领域专家学者的广泛关注,也是纺织智能制造的关键内容,并纳入《纺织工业“十三五”发展规划》中,规划明确指出:借助于计算机图像、图形等核心技术,实现纺织品加工过程的智能检测分析、控制等,实现纺织加工工艺的智能化,发展纺织服装产业信息化、数字化、智能化,为建立2025纺织服装智造高效优质加工体系提供保障。

织物相对其他工业产品,具有种类繁多、纹理复杂且疵点形态多样性等特点,因此从复杂纹理的织物图像中检测形态多样的疵点是一个难题,该问题的解决也有利于对其他工业产品表面缺陷检测提供解决思路,具有重要的应用价值。该问题的解决也有利于对其他工业产品表面缺陷检测提供解决思路,具有重要的应用研究价值。

目前,大多数生产线的疵点检测工作都是由人工操作的,工作人员难免会

产生失误和身体疲劳,从而造成误检和漏检的情况。此外,现在纺织工业生产速度可以达到 $120\text{m}/\text{min}$,而即使是熟练的检验工人也只能检测到 $15 \sim 20\text{m}/\text{min}$,采用人类视觉检测将大大降低纺织业的自动化程度。机器视觉技术能够在缺陷检测中提供客观、稳定、可靠的性能,因此成为研究热点。目前,Shelton web-SPECTOR、Barco Vision 的 Cyclops、EVS I-TEX2000、MQT 等多台验布机已成功应用于纺织生产过程中。然而,现有的系统只能用于表面纹理简单的特定面料类型,自适应不高。因此,有必要进一步研究织物疵点的检测方法。

结合织物图像背景纹理的不同特点,现有的疵点检测方法可大致分为两种,一种是针对不含图案纹理的非织物图像,包括基于统计的方法、基于频谱分析的方法、基于模型的方法和基于字典学习的方法等,这些方法对具有平纹和斜纹织物图像有较好的检测性能,但由于模式织物的背景纹理复杂,上述方法不能直接应用于模式织物疵点的检测;另一种是针对含有图案纹理的织物图像,包括黄金图像减法(GIS)、图像分解法和基于基元的方法等,然而这些复杂的模式织物疵点检测方法大多采用模板匹配技术对疵点进行定位,它们是在监督下执行的,检测精度取决于精确的对准和选择合适的模板。

近些年来,受压缩感知和稀疏表示理论的发展和推动,利用低秩和稀疏矩阵分解模型对目标进行检测日渐兴起。低秩分解模型以恢复矩阵潜在的低秩分量为目标,可将数据矩阵分解为跨越多个低秩子空间的冗余部分和偏离低秩结构的稀疏部分。因此,该模型能够同时恢复矩阵的低维子空间并检测异常点,已成功应用于目标检测、分割和去噪等领域。尽管织物图像背景纹理多样,疵点类型复杂多变,但其整体上还是由特定图案重复叠加构成,具有高度的视觉冗余性,通常可以认为背景处于低秩子空间中,而其中的疵点往往只占图像中的小部区域,打破了局部的低秩性,通常可以认为疵点是显著稀疏的,这一现象很好地符合低秩分解模型。

然而,如果直接对织物图像进行低秩分解,存在以下问题:

(1)受采集设备及光照的影响,织物图像存在光照不均、噪声等,低秩分解后,稀疏部分含有较多的噪声。

(2)纹理复杂的模式织物图像,由于模式复杂多变,图像像素矩阵本身并不符合低秩性。

因此,需要对织物图像进行分块,然后提取织物图像块特征。每一个图像块特征作为矩阵的一列,组合所有的图像块构造织物图像特征矩阵。由于织物图像整体上是重复一致的,正常的图像块多次重复出现,具有低秩性。而疵点图像块是稀疏的。通过低秩分解技术,可以将正常图像块和疵点图像块进行分离。该类方法性能主要依赖于图像块特征的有效表征,有效的特征描述方法可以使正常图像更相关,疵点图像块更偏离正常图像块;另外构建有效的模型及快速有效的求解方法也能提高疵点检测的精度与速度。因此,本书所研究的方向侧重于织物图像的有效表征、模型构建及求解。

1.2 国内外研究现状

在织物图像疵点检测问题中,织物疵点图像根据背景纹理可分为两类:平纹和斜纹图像、模式织物图像。其中平纹织物的经纱和纬纱以一上一下的规律交织。也就是经纬纱每隔一根纱就交错一次,所以交织点最多,纱线屈曲点最多,使织物坚牢、耐磨、硬挺、平整,但弹性较小,光泽一般。平纹织物密度不可能太高,较为轻薄,耐磨性较好,透气性较好。斜纹织物一个完全组织至少要有三根经纱和三根纬纱相互交织,在织物表面由连续的组织点构成斜向纹路。斜纹组织是由经浮长线或纬浮长线构成织物表面并呈现斜纹的外观效应。斜纹织物的经纬纱交织的次数比平纹少,使经纬纱之间的孔隙较小,纱线可以排列得较密,从而织物比较致密厚实。由于斜纹和平纹图像无复杂的结构组织,图像正常,背景简单,疵点相对突出,从疵点检测角度上,相对比较容易,具体如图1.1所示,其中第一行为平纹图像;第二行为斜纹图像。模式织物在编织过程中,按照不同的模式(基元)重复编织而成,具体图像如图1.1第三行所示。由于图像中基元大小、形状可变,因此该类织物图像的疵点检测具有一定的难度。

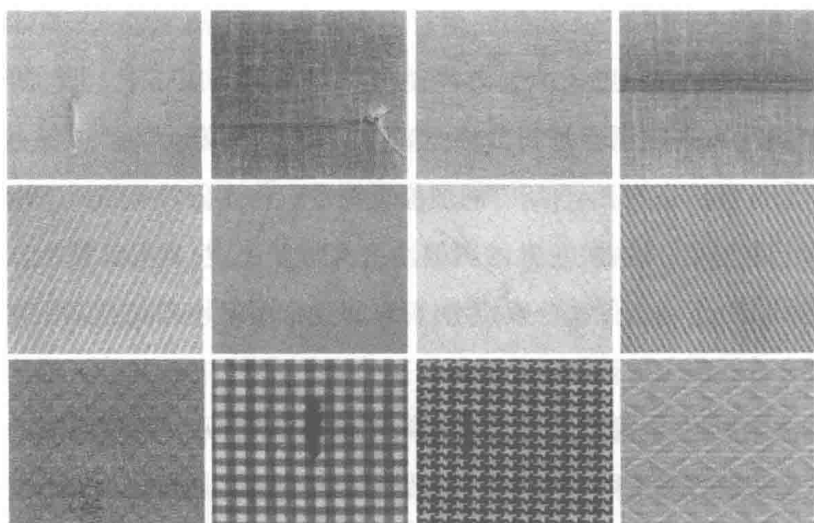


图 1.1 织物图像

(第一行为平纹图像 第二行为斜纹图像 第三行为模式织物图像)

针对平纹或斜纹织物等非模式织物图像,有基于统计的方法、谱分析方法、基于模型的方法和基于字典学习的方法这四大类。空域统计分析方法主要思想是将待测图像分割成具有明显统计纹理特征的图像块,占据图像大部分的非缺陷图像块具有相同的统计属性,而统计属性不同的图像块将被标记为缺陷区域,包括直方图特性分析^[1]、形态学方法^[2]、分形方法^[3]、局部对比度增强^[4-5]等。该类方法的检测结果依赖于所选窗口大小及判别阈值,且很难检测到面积较小的疵点。另外,该方法不能有效反映图像的整体特性,受噪声影响较大。

基于频谱分析的方法主要通过将待测图像转换为频域,然后通过计算滤波器响应的能量来检测缺陷。典型的包括:Lucia Bissi 等^[6]将 Gabor 滤波器与 PCA 相结合用于均匀结构织物疵点检测;Park Y 等^[7]提出了一种邻域差分滤波(Neighborhood difference filtering, NDF)方法,该方法能有效地将前景缺陷从背景中分离出来,该滤波器是通过比较相邻区域的光强来构造的;Yapi 等^[8]采用冗余轮廓线变换(Redundant contour transformation, RCT)对织物进行检测。然而,频谱分析方法的性能很大程度上取决于滤波器组的选择和缺陷的形状。

模型方法假定正常织物纹理符合特定的模型分布,通过学习进行模型参数

估计,然后采用假设检验方法判断测试织物图像是否符合正常纹理模型,从而进行疵点检测。已有模型包括: Gauss - Markov 随机场模型^[9]、高斯混合模型^[10-11]等。Susan 等^[10]采用双模高斯混合模型计算的非广泛熵作为缺陷检测的正则性指标; Allili 等^[12]提出了一种新的织物疵点检测框架,该框架采用基于轮廓线的统计建模,使用有限混合的广义高斯分布。该类方法能够有效描述织物图像的纹理特性,在复杂织物纹理图像上取得了不错的检测效果,但算法实现过程复杂且计算量大,在线学习困难,并且检测面积较小的疵点能力不足。

基于字典学习方法通过自身或训练图像学习出字典集,然后采用稀疏表示方法重构正常织物图像,通过与测试图像做差,突出疵点区域^[13-14];或者通过构建字典集作为投影矩阵实现降维,再采用 SVDD (Support vector domain description) 判别或特征比对进行疵点检测^[15]。该类方法如果通过自身训练字典集,重构图像仍存在部分疵点,检测效果不理想;如果采用正常织物图像训练集进行字典学习,则降低了算法的自适应性。Tong 等^[14]在学习子字典的基础上,提出了一种非局部集中稀疏表示模型来更好地估计输入图像的无缺陷版本。然而,字典的选择影响了正常织物纹理恢复的准确性,进而影响检测模型的虚警率。此外,由于小缺陷很难消除,稀疏编码模型会影响检测率。

人类视觉系统能够迅速地从复杂的背景中发现疵点区域。因此,基于人类视觉感知机制的疵点检测具有很好的研究价值。基于视觉显著性模型的织物疵点检测方法已引起了相关学者的关注,文献^[16]对织物图像提取的特征图进行小波变换,通过“中心—周围”对比生成不同子带图像的差分子图,然后融合生成最终的显著图,经分割定位出疵点区域。文献^[17]首先通过底层特征比对生成视觉显著图,然后引入疵点分布稀疏这一先验提高检测效果。本书作者分别提出了基于纹理差异的视觉显著性模型^[18],基于纹理及上下文分析的视觉显著性模型^[19],基于局部统计与整体分析的视觉显著性模型^[20],基于稀疏表示及字典学习的视觉显著性模型^[21-22]等,并已将提出模型用到了织物疵点检测中。然而,现有基于视觉显著性模型的织物疵点检测虽然利用了显著性模型,但具体技术如特征提取、显著度计算仍沿用了传统模式识别的思路。

上述方法对某些平纹和斜纹织物图像具有较高的检测精度。然而,由于模式织物图像的多样性和复杂性,这些针对平纹和斜纹织物图像设计的方法不能直接推广到花纹织物缺陷检测中。近年来,有学者对模式织物疵点检测开展了研究,方法包括纹理滤波及 K 均值聚类(Texture filtering and K -means clustering, TFKMC)方法、小波预处理黄金图像减法(Wavelet preprocessing golden image subtraction, WGIS)、黄金图像减法(Golden image subtraction, GIS)^[23]、基于基元的方法^[24-25]和Elo评分法等方法。

Hamdi等^[26]提出的纹理滤波及 K 均值聚类TFKMC方法,首先构造了一个具有合适窗口大小的标准差滤波,然后将图像按照织物图像周期模块的大小划分为均匀小块,然后求每个测试块与所有块均值的平方差分,最后将差异输入 K -means聚类中,则划分的均匀块可被判定为疵点块或非疵点块。但是,此方法的性能对所选窗口大小很敏感。

Ngan等^[27]提出的小波预处理黄金图像减法(WGIS),首先选取尺寸大于织物纹理重复元素尺寸的无缺陷窗口,然后将该窗口逐像素移动到无缺陷样本图像上,最后对模板图像和测试图像进行相减,从而检测疵点。但该方法同样对滑动窗的尺寸敏感,并且计算量大。

基于基元的方法^[24-25]由Ngan等提出,它假设图案纹理可以划分为多个块,然后利用基元的对称性计算移动减法的能量及其在不同基元的方差,通过计算这些值在无疵点织物上的分布,可以确定区分疵点和非疵点的阈值。但是这种方法无法检测到尺寸小于重复单元的缺陷。

Jing等提出的^[23]黄金图像减法(GIS),首先利用传统遗传算法(Genetic algorithm, GA)从无缺陷的织物图像中选择最优的Gabor滤波器参数,然后用得到的Gabor滤波器对待测织物图像进行滤波,同时采用黄金图像减法(GIS)计算参考织物图像与待测图像之间的差异,最后通过训练大量无疵点的花纹织物样本,得到一个阈值,将疵点从正常背景中分割出来。然而,当缺少额外的无疵点的织物图像,该方法无法实施,缺乏自适应性。

Tsang等提出Elo评分法(ER)^[28],也就是对待测图像中的图像块进行公平

匹配。首先将测试图像划分为标准尺寸的图像块,其次用 Elo 点矩阵更新各分块之间的匹配,最后根据计算出的匹配分数将图像块划分为疵点块或非疵点块。然而,该方法的性能依赖于分块大小和随机定位分区的数量,鲁棒性不高。不管是针对模式织物图像的方法,还是非模式织物图像的方法,它们对某些特定的织物图像已经达到了不错的检测效果,它们的图像表征方法还停留在基于统计分析及频谱分析层面,这些单一的传统特征提取方法很难对织物图像复杂多样的纹理结构进行有效的表征,并且显著度计算模型上,并没有很好地结合织物图像的特点。

Wright J 等^[29]提出低秩分解模型,该模型与人类视觉系统的低秩稀疏性相吻合,通过将图像特征矩阵分解为低秩矩阵和稀疏矩阵,实现目标与背景的有效分离,已在显著性检测中得到了广泛的应用,中科院自动化所胡卫明研究组^[30]、西安电子科技大学焦李成研究组^[31]、南京理工大学杨健研究组^[32-33]、上海交通大学刘允才研究组^[34]、北京交通大学郎丛妍研究组^[35]、美国西北大学 X. F. Shen 研究组^[36]等已将低秩分解用于视觉显著性检测中,采用加速近邻梯度法(Accelerated proximal gradient, APG)^[37]、增广拉格朗日乘子法(Augmented lagrange multipliers, ALM)^[38]和交替方向法(Alternating direction method of multipliers, ADMM)^[39]等进行求解,在自然图像上取得了很好的检测结果。织物图像纹理复杂多样,背景高度冗余且疵点显著稀疏,因此织物疵点检测相对自然图像中的目标检测更好地符合了低秩分解模型。

Cao 等^[40]利用低秩表示进行建模,然后采用最小均方回归进行背景与疵点的分离,最后采用先验信息进一步提高了检测效率。Li 等^[41]基于低秩表示进行疵点检测。该方法通过基于特征值分解及块矩阵方法提升了求解效率和精度。Qizi 等^[42]提出了一种基于纹理先验和低秩表示的织物疵点检测方法。该方法首先通过估计纹理先验信息,从而构建先验图,然后基于先验图,进行加权低秩表示分解,从而定位出疵点区域。Cao 等^[43]通过联合低秩和稀疏矩阵恢复进行疵点检测。该方法设计了具有噪声项的主成分分析模型,并通过先验信息提升检测精度。Ng 等^[44]将全变差引入低秩表示中,减少了分解后的噪声,提升