



适用于花式纱线外观质量检测的复合自动对焦算法

张建鹏^a, 郑华岩^a, 徐 云^a, 张建新^b

(浙江理工大学, a. 信息科学与工程学院; b. 机械工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 针对采用机器视觉进行花式纱线外观质量检测时存在的对焦模糊、对焦耗时等问题,提出了一种粗对焦与精对焦相结合的复合自动对焦算法。首先,采用 OTSU 灰度阈值分割法进行纱线主体检测,进而选择对焦窗口;其次,对 Tenengrad 清晰度评价函数进行改进,并将改进后的 Tenengrad 清晰度评价函数以及 Laplacian 清晰度评价函数分别作为粗对焦和精对焦阶段的清晰度评价函数;再次,对离焦和正焦阶段的纱线图像进行不同次数的下采样,提高清晰度评价函数在离焦处的灵敏度;最后,提出了一种基于图像下采样的爬山法,利用该算法获得纱线图像清晰度评价函数的最大值,从而获取花式纱线的清晰图像。实验结果表明,提出的花式纱线外观质量检测的复合自动对焦算法对焦准确,对焦平均时间约为 1.231 s。该方法具备对焦速度快、精度高等优势,也可应用于纺织品瑕疵检测、电子元器件外观检测等其他视觉检测系统。

关键词: 花式纱线;自动对焦;清晰度评价函数;改进的 Tenengrad 函数;爬山法;外观质量检测

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2025) 01-0105-08

引文格式: 张建鹏,郑华岩,徐云,等. 适用于花式纱线外观质量检测的复合自动对焦算法[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2025,53(1):105-112.

Reference Format: ZHANG Jianpeng, ZHENG Huayan, XU Yun, et al. Composite auto-focus algorithm applicable to appearance quality detection of fancy yarns[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(1): 105-112.

Composite auto-focus algorithm applicable to appearance quality detection of fancy yarns

ZHANG Jianpeng^a, ZHENG Huayan^a, XU Yun^a, ZHANG Jianxin^b

(a. School of Information Science and Engineering; b. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of blurred focusing and time-consuming focusing in using machine vision for appearance quality detection of fancy yarns, a composite auto focusing algorithm combining coarse focusing and fine focusing is proposed. Firstly, the detection of the yarn body is achieved using the OTSU gray-scale threshold segmentation method, and the focusing window is selected. Secondly, the Tenengrad sharpness evaluation function is improved, and the improved Tenengrad and Laplacian functions are used as the sharpness evaluation functions in the coarse focusing and fine focusing stages, respectively. Thirdly, different times of downsampling are performed at different stages of image defocusing and focusing to improve the sensitivity of the sharpness evaluation function at the defocusing position. Finally, a mountain climbing method based on image downsampling is proposed to obtain the maximum value of yarn image sharpness evaluation function, so as to obtain the fancy yarns' clear image. Experiment results show that the proposed auto focusing algorithm for fancy yarns' appearance quality detection can focus accurately and the average focusing time is about 1.231 s. This method has the advantages of fast focusing speed and high precision, and can be applied to other visual detection systems

收稿日期: 2024-08-03 网络出版日期: 2024-11-01
基金项目: 国家自然科学基金项目(62203393); 浙江省自然科学基金项目(LQ20F030019); 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C01188)
作者简介: 张建鹏(2000—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事机器视觉方面的研究。
通信作者: 徐 云, E-mail: ntxuyun@126.com

such as textile defect detection and appearance detection of electronic components.

Key words: fancy yarns; auto focusing; sharpness evaluation function; improved Tenengrad function; mountain climbing method; appearance quality detection

0 引言

随着纺纱生产工艺的提升,花式纱线因其具有形式多样、色泽丰富、结构别致等特征而广泛应用于服装、家居等纺织产业。为保障纱线的生产品质,必须对生产过程中纱线的外观进行检测和评估;因此,纱线外观质量检测对花式纱线的质量提升具有重要意义。

纱线外观质量检测主要包括目测法^[1]、光电式检测法^[2]、电容式检测法^[3]和机器视觉检测法^[4]等。目测法、光电式检测法和电容式检测法无法满足花式纱线实时检测的需求,因而机器视觉检测法受到了国内外研究学者的青睐^[5-8]。然而,机器视觉检测法的检测精度主要受成像质量的影响。在图像采集过程中,纱线图像质量受到采集距离和景深等影响,因而采集的图像往往较为模糊;同时,生产过程中纱线和视觉传感器的相对位置存在微小变化,此时需重新调整焦距以获得最佳清晰度的纱线图像。因此,通过引入自动对焦算法来优化检测来实现纱线外观质量的高精度检测,是提升花式纱线织物质量的关键问题。

目前研究者已提出了多种自动对焦算法。徐鹏等^[9]采用 Tenengrad 算子和八方向的 Sobel 算子分别作为粗对焦、精对焦阶段的清晰度评价函数,提出了一种机械臂搭载相机的自动对焦方案,然而该方案中粗对焦和精对焦阶段的切换机制复杂,且对机械臂的运动精度要求高;Li 等^[10]提出了一种基于分数傅里叶变换幅值差的清晰度评价函数,从空域和频域提取图像信息,使得清晰度评价函数具有较好的准确性和鲁棒性,在同轴多距离衍射成像中实现了自动对焦,提高了成像的清晰度,然而该方法中分数傅里叶变换的计算复杂度限制了系统实时自动对焦的应用;Zhang 等^[11]提出了一种基于感兴趣区域(Region of interest, ROI)的聚焦方法,利用多中值滤波和直方图均衡化对图像去噪,采用选择性搜索和反向传播神经网络组成的多 ROI 聚焦窗口进行自动聚焦,对焦精度为 93.7%,平均对焦时间约 11.89 s,然而该系统对焦时间长,无法适用于实时性要求高的场景;Wang 等^[12]设计了一种多视角的纱线图像采集装置,通过软件调整相机参数进行自动对焦,实现了不同视角下的纱线图像信息采集,然而该系统中多视角的切换使相机参数调整耗时时间

长;Xu 等^[13]提出了一种适用于散焦场景中的纱线图像处理方法,采用知识增强的深度学习模型,根据纱线和散焦模糊度的先验知识构建去模糊神经网络,实现了纱线图像的去模糊,为纱线外观质量检测提供更准确的输入,然而该方法中深度学习模型的训练和推理计算量大、耗时长。

现有自动对焦算法在特定场景下虽然取得一定的成效,但是对于花式纱线外观质量检测而言存在实时性、准确性和计算资源方面的挑战。为了提高花式纱线外观质量检测的精度,本文提出了一种粗对焦与精对焦相结合的复合自动对焦算法。首先,利用纱线主体检测技术,选择花式纱线对焦窗口。其次,改进 Tenengrad 函数,并将改进的 Tenengrad 函数和 Laplacian 函数分别作为粗对焦和精对焦阶段的清晰度评价函数。再次,在粗对焦阶段,利用改进的 Tenengrad 函数计算图像的清晰度评价函数值,采用基于图像下采样的爬山法寻找清晰度评价函数的峰值;在精对焦阶段,使用 Laplacian 函数计算图像的清晰度评价函数值,利用爬山法算法进一步寻找更精确的图像清晰度评价函数的峰值。最后,通过自主构建的花式纱线数据集进行实验,以评估复合自动对焦算法的准确性和计算速度。本文提出的复合自动对焦算法,能够解决基于机器视觉的花式纱线外观质量检测的问题,为促进纺织行业中花式纱线质量的实时检测提供支持。

1 算法设计

本文提出的复合自动对焦算法流程图如图 1 所示,主要包括三个部分:对焦窗口选择、清晰度评价函数改进和复合自动对焦。

算法主要分为以下几个步骤:

步骤 1:输入花式纱线图像并选择对焦窗口。

步骤 2:判断图像是否需要为粗对焦。如果是,那么对图像进行一次下采样,利用改进的 Tenengrad 函数进行清晰度评价;否则,进入步骤 4 的精对焦。

步骤 3:判断当前清晰度评价函数值是否大于上次的清晰度评价函数值。如果是,那么回到步骤 1,输入新图像,并进行处理;否则,进入步骤 4 进行精对焦。

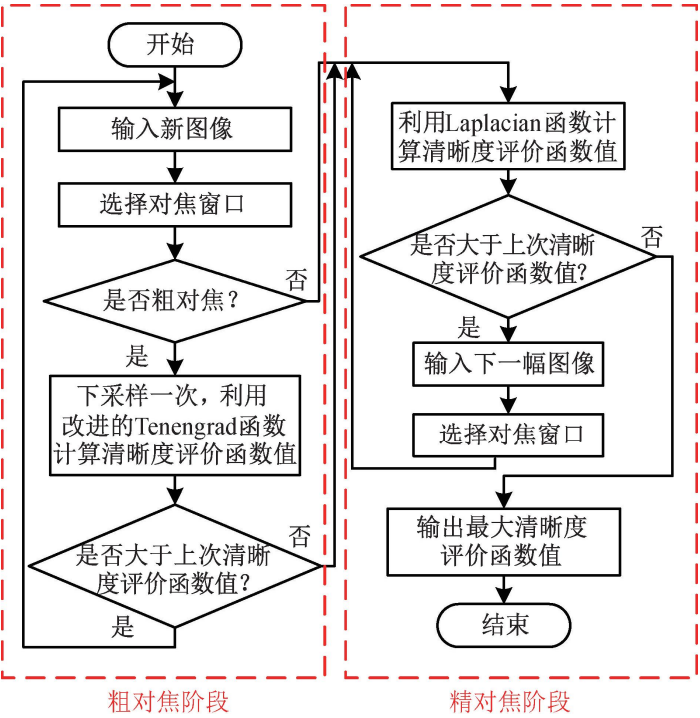


图 1 复合自动对焦算法流程图

步骤 4:利用 Laplacian 函数计算当前图像的清晰度评价函数值。判断清晰度评价函数值是否大于上次的清晰度评价函数值。如果是,那么输入下一幅图像,并选择对焦窗口,重回步骤 4,利用 Laplacian 函数计算图像清晰度评价函数值;否则,输出最大清晰度评价函数值,结束对焦。

1.1 对焦窗口选择

传统对焦窗口一般选择固定位置,主要有中央区域对焦窗口选择法、多区域对焦窗口选择法等^[14]。中央区域对焦窗口选择法选取图像正中心某一特定大小的区域为对焦窗口,默认为拍摄视场

的中心,只要视场中心处于正焦状态,则认为对焦完成。多区域对焦窗口选择法选取图像中的多个子区域为对焦窗口,利用多个子区域共同评价当前图像的对焦程度,主要评价方法有黄金分割法和倒 T 字型法^[15]。

在生产过程中,花式纱线传动时的卷绕和晃动,会使拍摄图像出现倾斜;若采用中央区域对焦窗口选择法将导致对焦失败,示例图像如图 2 所示。

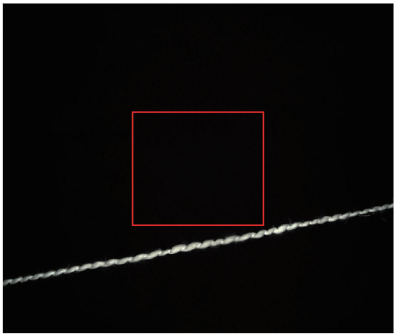


图 2 中央区域对焦窗口示例

花式纱线主体具有规则的轮廓边缘,且主体与背景灰度差异较大。基于上述特征开展纱线主体检测,可以较为准确地实现花式纱线图像中对焦窗口的选择。离焦状态下纱线的对焦窗口选择过程示意图如图 3 所示,其中:离焦状态下的纱线如图 3(a)所示;基于 OTSU 灰度阈值分割法实现的纱线主体如图 3(b)所示;寻找纱线主体的最大轮廓,并计算最小外接矩形,结果如图 3(c)所示;以该最小外接矩形的中心为中心,将对焦窗口统一设置为 1024×128 像素,选择的纱线对焦窗口如图 3(d)所示,以该对焦窗口开展后续对焦算法的研究。

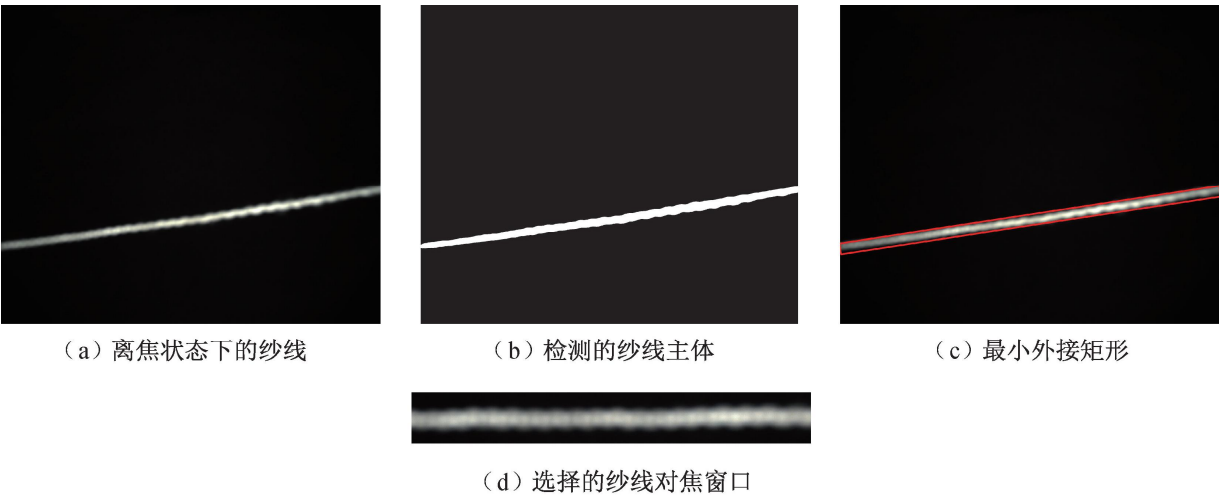


图 3 对焦窗口选择过程示意图

1.2 清晰度评价函数改进

1.2.1 传统清晰度评价函数

传统清晰度评价函数可以分为空域函数、频域函数、信息熵函数以及统计学函数等^[16]。理想的清

晰度评价函数应该具有单峰性、无偏性、稳定性、灵敏性等特点。常用的图像清晰度评价函数有灰度差分绝对值之和函数 (Sum of modulus of gray difference, SMD)、Bernner 函数、Laplacian 函数、

Variance 函数、Tenengrad 函数、Vollath 函数等。

假设图像的清晰度评价函数的量化值为 F , 常见的清晰度评价函数可用式(1)~(10)表示。

a) SMD 函数。函数表达式为:

$$F = \sum_x \sum_y (|f(x, y) - f(x, y-1)| + |f(x, y) - f(x+1, y)|) \quad (1)$$

其中: $f(x, y)$ 为图像中某个像素点的灰度值。

b) Brenner 函数。函数表达式为:

$$F = \sum_x \sum_y (|f(x+k, y) - f(x, y)|)^2 \quad (2)$$

c) Laplacian 函数。函数表达式为:

$$F = \sum_x \sum_y [L(x, y)]^2 \quad (3)$$

其中: $L(x, y)$ 是像素点 (x, y) 处灰度值与 Laplacian 算子的卷积。

d) Variance 函数。函数表达式为:

$$F = \sum_x \sum_y |f(x, y) - \mu|^2 \quad (4)$$

其中: μ 为整幅图像的平均灰度值。

e) Tenengrad 函数。Tenengrad 函数主要利用 Sobel 算子计算图像的水平方向和垂直方向的梯度来体现图像清晰度评价结果, 其函数表达式为:

$$F = \sum_x \sum_y [G(x, y)]^2, G(x, y) > Q \quad (5)$$

其中: Q 为给定的边缘检测阈值, $G(x, y)$ 为像素点 (x, y) 处灰度值与 Sobel 算子的卷积。

$G(x, y)$ 可用式(6)计算:

$$G(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \quad (6)$$

$$G_x(x, y) = f(x, y) \otimes \mathbf{g}_x(x, y) \quad (7)$$

其中: $G_x(x, y)$ 和 $G_y(x, y)$ 分别表示以像素点 (x, y) 为中心的窗口中的像素值与 $\mathbf{g}_x(x, y)$ 和 $\mathbf{g}_y(x, y)$ 的卷积, 即:

$$G_y(x, y) = f(x, y) \otimes \mathbf{g}_y(x, y) \quad (8)$$

$\mathbf{g}_x(x, y)$ 和 $\mathbf{g}_y(x, y)$ 分别是用来检测水平边缘和垂直边缘的结构模板, 即:

$$\begin{cases} \mathbf{g}_x(x, y) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{g}_y(x, y) = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

f) Vollath 函数。函数表达式为:

$$F = \sum_x \sum_y f(x, y) \cdot f(x+1, y) - M \cdot N \cdot \mu^2 \quad (10)$$

其中: M 和 N 分别为图像的宽和高, μ 为整幅图像的平均灰度值。

1.2.2 改进的清晰度评价函数

在评估图像清晰度时, 关键在于量化图像中相邻像素间特征值的变化程度, 这一变化常通过梯度信息来捕捉, 以反映图像的离焦状态。不同清晰度评价函数采用了不同的梯度算子策略, Brenner 函数和 Vollath 函数的梯度算子方向为 x 轴, SMD 函数、Laplacian 函数和 Tenengrad 函数的梯度方向为 x 轴和 y 轴两个方向。相对而言, 常用清晰度评价函数梯度算子的方向单一, 仅在对应梯度算子的方向上有较高的灵敏度。

对焦窗口内的花式纱线, 主体条干与背景存在显著的灰度变化, 但水平方向的变化不明显。因此, 本文在 Tenengrad 函数的基础上, 去除水平方向的梯度算子, 增加右对角线和左对角线方向的梯度算子, 并用梯度值的绝对值来替代梯度幅值, 从而在精度允许范围内, 提高函数的计算速度。像素点 (x, y) 处梯度的计算公式为:

$$G'(x, y) = |G_y(x, y)| + |G_r(x, y)| + |G_l(x, y)| \quad (11)$$

其中: $G_r(x, y)$ 和 $G_l(x, y)$ 表示图像点 (x, y) 处像素值与新卷积核的卷积, $\mathbf{g}_r(x, y)$ 和 $\mathbf{g}_l(x, y)$ 分别为右对角线和左对角线的算子模板。 $G_r(x, y)$ 和 $G_l(x, y)$ 可用式(12)表示:

$$\begin{aligned} G_r(x, y) &= f(x, y) \otimes \mathbf{g}_r(x, y), \\ G_l(x, y) &= f(x, y) \otimes \mathbf{g}_l(x, y) \end{aligned} \quad (12)$$

$\mathbf{g}_r(x, y)$ 和 $\mathbf{g}_l(x, y)$ 可用式(13)表示:

$$\begin{cases} \mathbf{g}_r(x, y) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{g}_l(x, y) = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

此时, 改进的 Tenengrad 清晰度评价函数可表示为:

$$F_{\text{improved}} = \sum_x \sum_y [G'(x, y)]^2, G'(x, y) > Q \quad (14)$$

1.3 复合自动对焦

为了提高自动对焦过程中的准确性和计算速度, 本文提出了一种基于图像下采样的爬山法算法。传统的爬山算法在搜索图像清晰度评价函数最大值时, 直接对全分辨率图像进行操作, 这在图像数据量

较大时计算量很大,影响对焦速度。复合自动对焦算法包含了粗对焦和精对焦两个阶段。粗对焦阶段,图像处于离焦状态,利用下采样删除图像的偶数行和偶数列,将图像像素点数减少至原来的 1/4,提高对焦算法的实时性。这种下采样方法不仅保留了图像的主要结构信息,还显著增强了相邻图像清晰度评价函数值之间的差异,使得爬山算法的搜索方向更加准确,收敛速度更快。精对焦阶段,使用 Laplacian 函数进行精对焦,不再使用下采样技术,但仍然利用爬山法算法的基本思想,不断比较当前图像与相邻图像的清晰度评价函数值来逼近最大值,从而获取花式纱线的清晰图像。

2 实验及结果分析

本文搭建了花式纱线外观质量检测系统样机,样机照片如图 4 所示。选用海康威视 MV-CH050-10UC 面阵 CCD,分辨率 2448×2048 像素,像元尺寸 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,标准 C 接口。搭配海康威视 MVL-MF0828M-8MP 镜头,焦距 8 mm,距离纱线 110 mm。利用双通道 60 W 光源控制器控制正面环形光源。

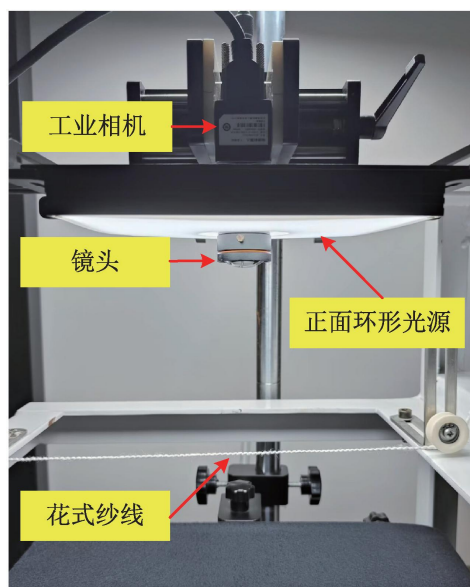


图 4 花式纱线外观质量检测系统样机照片

采用市场上常见的花式纱线构建数据集,具体包括大肚纱、雪尼尔纱、竹节纱等花式纱线。针对拍摄的花式纱线的正面图像进行处理和实验。计算机配置:CPU, AMD Ryzen 7 7735 H; 16 GiB 内存; Windows 11 操作系统。对焦算法代码运行环境为 Python 3.9,运用 OpenCV 函数库,对拍摄的花式纱线图像进行灰度处理和对焦窗口选择。

2.1 清晰度评价函数的性能指标

本文采用清晰度比率、极大值点个数、陡峭度、

灵敏度以及算法运算时间等 5 个定量指标来评估清晰度评价函数的性能^[17]。

a) 清晰度比率。清晰度比率 R 是清晰度评价函数最大值和最小值的比率,表示清晰度评价函数对离焦图像和正焦图像的整体分辨能力。 R 值越大,离焦图像和正焦图像的清晰度差异大,清晰度评价函数的分辨能力更强,其计算公式为:

$$R = \frac{F_{\max}}{F_{\min}} \quad (15)$$

其中: F_{\max} 表示清晰度评价函数的最大值, F_{\min} 表示清晰度评价函数的最小值。

b) 极大值点个数。极大值点个数 N 是图像清晰度评价函数值曲线的全局最大值和局部极大值个数,用来评价清晰度评价函数的单峰性。

c) 灵敏度。灵敏度 S 是清晰度评价函数在最大值 F_{\max} 附近的变化程度。 S 值越大,清晰度评价函数的灵敏度更高,反之灵敏度较低。其计算公式为:

$$S = \frac{F_{\max} - F_{\max+\alpha}}{F_{\max}} \quad (16)$$

其中: $F_{\max+\alpha}$ 表示清晰度评价函数在最大值 F_{\max} 附近偏移量为 α 处的值。

d) 陡峭度。陡峭度 K 是衡量清晰度评价函数在正焦图像与离焦图像之间分辨能力的一个指标,当清晰度评价函数出现清晰度比率相同的情况时,可以通过陡峭度 K 来进一步区分图像的清晰度差异。陡峭度 K 值越大,清晰度评价函数值在正焦图像附近变化更大,更能表达清晰度评价函数值曲线的形态变化,其计算公式为:

$$K_l = \frac{F_{\max} - F_{\max-\alpha}}{\alpha} \quad (17)$$

$$K_r = \frac{F_{\max} - F_{\max+\alpha}}{\alpha} \quad (18)$$

$$K = \frac{K_l + K_r}{2} = \frac{2F_{\max} - F_{\max-\alpha} - F_{\max+\alpha}}{2\alpha} \quad (19)$$

其中: K_l 表示左陡峭度, K_r 表示右陡峭度。

e) 算法运算时间。算法运算时间 T 是衡量单幅图像清晰度评价函数算法效率的一个重要指标。 T 值越小,表明清晰度评价函数的运算速度快,反之越慢。

2.2 复合自动对焦算法的性能实验

2.2.1 对焦窗口选择实验

选用 3 种花式纱线,将其置于视觉图像采集区域。图 5 给出了采集的 3 种花式纱线图像示例,尺寸均为 2448×2048 像素。

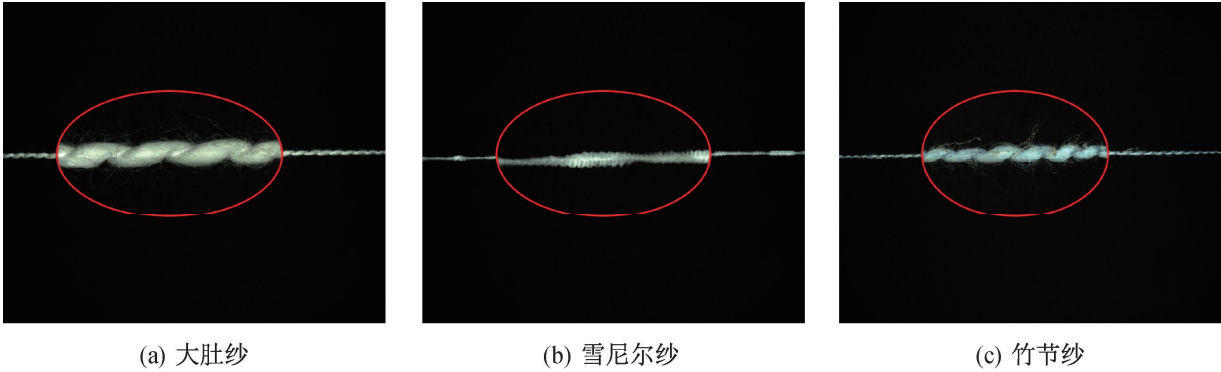


图 5 采集的花式纱线图像示例

实验时,按照固定步距调节相机的对焦环位置,针对每种花式纱线,系统地采集了离焦、正焦、离焦的连续图像序列,每次序列包含 32 幅图像,其中正焦图像均精确定位在第 24 幅。

为了精确设定对焦窗口区域,基于 OTSU 灰度阈值分割法,对每种花式纱线的第 1 幅离焦的图像进行处理,获得花式纱线的主体,并识

别出纱线主体的最大轮廓。依据此轮廓定义一个对焦窗口,并将其应用于所有图像的对焦。图 6 给出了 3 组对焦窗口选择后的不同焦距阶段的花式纱线图像。从图 6 可以看出,对焦窗口选择后,能够较好地实现花式纱线主体轮廓的捕获,为后续对焦算法的实现提供了坚实的基础。

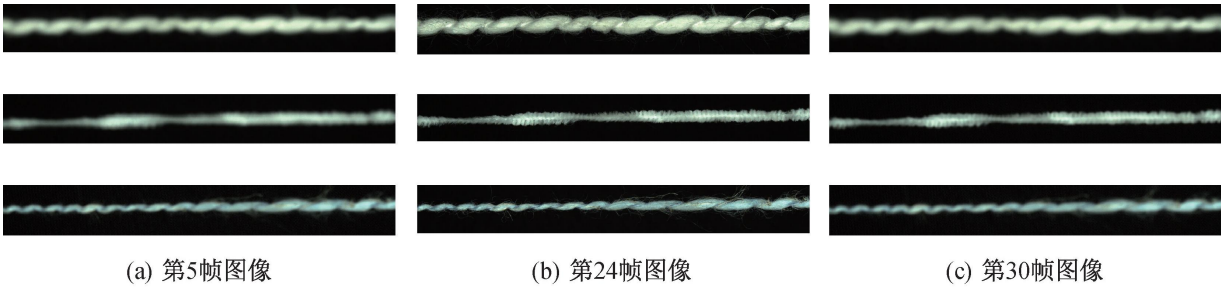


图 6 对焦窗口选择后的花式纱线图像

采用 6 种传统清晰度评价函数以及改进的 Tenengrad 清晰评价函数,分别计算对焦区窗口选择前后各图像序列的清晰度评价函数值,并进行归

一化处理。以大肚纱为例,归一化后的清晰度评价函数值曲线如图 7 所示。

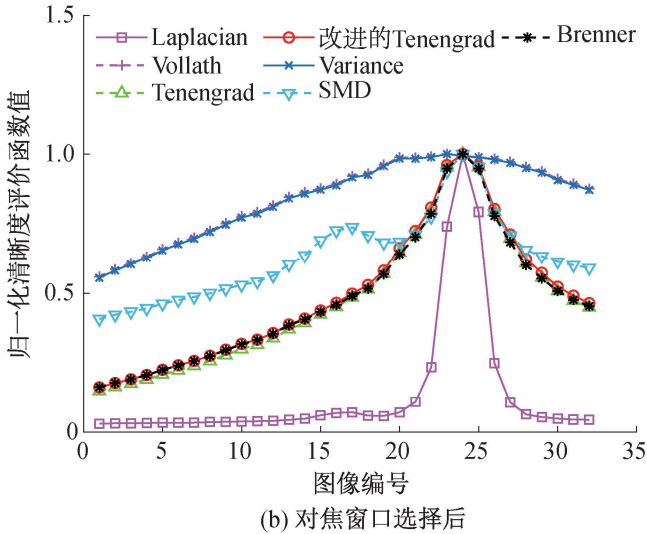
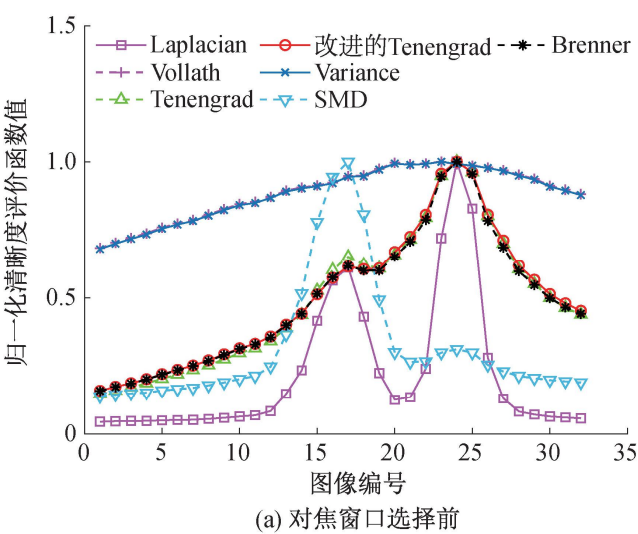


图 7 归一化后的清晰度评价函数值曲线

图 7(a)给出了对焦窗口选择前的清晰度评价函数值曲线,此时花式纱线图像在整幅图像中的占比较小,导致背景或无关区域的噪声显著影响了清晰度评价函数值。SMD、Laplacian 及 Tenengrad 等清晰度评价函数值曲线在第 17 幅图像附近出现了

次高峰,主要是由于在离焦状态下图像中的边缘会变得模糊,但模糊的边缘仍然可能包含一定的高频或噪声成分,这些成分在清晰度评价函数算子的作用下可能会被错误地识别为边缘。该次高峰将会导致对焦失败。Vollath 和 Variance 清晰度评价函数

在第 24 幅图像处归一化后的清晰度评价函数值分别为 0.991、0.992,在第 23 幅图像处归一化后的清晰度评价函数值为 1,极大值点没有对应正焦位置。Brenne、Laplacian、Tenengrad 以及改进的 Tenengrad 清晰度评价函数值曲线在第 24 幅图像处归一化后的清晰度评价函数值为 1,极大值点都对应实际正焦位置。但是,Tenengrad 的清晰度评价函数值曲线在第 17 幅图像附近出现次高峰,而改进的 Tenengrad 清晰度评价函数值曲线更为平滑,有效抑制了次高峰现象,表明改进的 Tenengrad 清晰度评价函数能够提高抗噪能力,实现清晰度的准确评价。

图 7(b)给出了对焦窗口选择后的清晰度评价函数值曲线,此时花式纱线图像在整幅图像中的占比较大,背景无关区域减少,依靠像素灰度差变化的清晰度评价函数能更好地判断正焦图像。SMD 清晰度评价函数值曲线在第 17 幅图像附近出现了次高峰,不满足单峰性。Variance 和 Vollath 清晰度评价函数值曲线在离焦和正焦处变化缓慢、灵敏度低,在第 24 幅图像处归一化后的清晰度评价函数值分别为 0.993、0.994,并且在第 23 幅图像处归一化后的清晰度评价函数值为 1,无法判断最清晰的图像;Tenengrad、改进的 Tenengrad、Laplacian、SMD、Brenner 清晰度评价函数值曲线在第 24 幅正焦图像处,归一化后的清晰度评价函数值均为 1,具有良好的无偏性。在离焦、正焦处,Tenengrad、改进的 Tenengrad 和 Brenner 清晰度评价函数值曲线变化趋势基本一致,具有灵敏性和单峰性;Laplacian 清晰度评价函数值曲线在正焦处附近曲线变化剧烈,离焦处曲线变化平缓,具有单峰性以及灵敏性。

上述实验表明,对焦窗口的选择能够显著提高图像清晰度评价函数的准确性,进而提升自动对焦算法的性能。

2.2.2 复合自动对焦算法性能实验

针对图 7(b)中对焦窗口选择后的清晰度评价函数值曲线做定量分析,设距离正焦位置两帧处图像的清晰度评价函数值为 $F_{\max+\alpha}$,即 $\alpha=2$ 。将 α 设置得小一些可以减少性能指标对远离正焦位置处图像变化的敏感度,降低误判的风险;而且自动对焦算法的目的是找到清晰度评价函数值曲线的极大值,因此选择在正焦附近进行性能指标的评估。对应的清晰度比率 R 、极大值点个数 N 、陡峭度 K 、灵敏度 S 和单幅图像清晰度评价函数运算时间 T 等指标如表 1 所示。

表 1 不同清晰度评价函数值曲线的指标

清晰度评价函数	R	N	K	S	T/ms
Laplacian	32.940	2	0.757	0.750	3.531
改进的 Tenengrad	6.667	1	0.205	0.204	5.799
Tenengrad	6.111	1	0.194	0.196	8.713
Vollath	1.789	2	0.012	0.011	46.188
Variance	1.800	2	0.014	0.011	46.469
Bernner	0.164	1	0.217	0.220	94.719
SMD	2.451	2	0.218	0.212	233.125

从表 1 可以看出,Laplacian 清晰度评价函数有 4 个指标值取得最优,在正焦处附近效率最高,但在离焦处的第 2 帧图像出现了曲线次高峰,因而 Laplacian 清晰度评价函数值曲线有 2 个极大值点,并且曲线变化平缓,灵敏度不高。相较于传统的 Tenengrad 清晰度评价函数,改进的 Tenengrad 清晰度评价函数在离焦处效率更高,清晰度比率 R 、陡峭度 K 和灵敏度 S 分别提高了 9.09%、5.67%和 4.08%,并且运算速度更快,算法运算时间缩短了 33.44%,4 项性能指标都优于 Tenengrad 清晰度评价函数。此外,结合图 7(b)可以看出,改进的 Tenengrad 清晰度评价函数具有更宽的对焦范围。因此,粗对焦阶段,选择改进的 Tenengrad 清晰度评价函数更优。Laplacian 清晰度评价函数在正焦处附近的灵敏度远高于其他函数,与图 7(b)中的变化趋势吻合。因此,精对焦阶段,选择 Laplacian 清晰度评价函数更优。


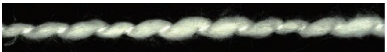

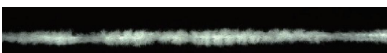

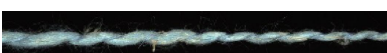
2.3 花式纱线外观质量检测的复合自动对焦算法实验

为评估提出的对焦算法的性能与效率,选取大肚纱、雪尼尔纱及竹节纱等 3 种花式纱线作为检测对象,对其进行了复合自动对焦算法的实验。

采用固定步距的方式逆时针旋转镜头对焦环,模拟对焦过程中的连续调整过程。每次旋转后,采集 32 幅图像的序列,以覆盖离焦、正焦、离焦的完整过程。为增加实验的多样性和可靠性,移动纱线的水平位置,共收集了不同位置下的 6 组花式纱线图像。利用本文提出的复合自动对焦算法,在个人计算机上进行复合自动对焦算法实验,其中 6 组复合自动对焦算法的清晰度评价函数值和对焦时间见表 2。

从表 2 可以看出,6 组实验均能够较快地找到具有最大清晰度评价函数值的图像,复合自动对焦平均时间约为 1.231 s。

表 2 复合自动对焦算法实验结果

花式纱线	正焦图像	清晰度评价函数值	对焦时间/s
大肚纱		200.503	1.267
		254.966	1.211
雪尼尔纱		133.308	1.192
		172.200	1.274
竹节纱		305.632	1.188
		546.860	1.257

3 结 论

基于机器视觉的花式纱线外观质量检测存在对焦模糊、对焦耗时等问题,针对这些问题,本文提出了一种粗对焦与精对焦相结合的复合自动对焦算法。实验结果表明,提出的花式纱线外观质量检测的复合自动对焦算法的对焦平均时间约为 1.231 s,算法对焦时间短、对焦精度高,在基于机器视觉的花式纱线检测中具有较大的优势,可为花式纱线的外观质量检测提供重要的技术支撑。

本文提出的复合自动对焦算法对清晰度评价函数进行了改进,综合了对焦窗口内花式纱线的特征,因此在花式纱线外观质量检测时展现出较好的自动对焦优势。然而,对于不同纹理特征的检测对象而言,该算法的泛化能力仍然有待进一步优化。

参考文献:

[1] 秦浩杰, 张昊, 周文聪, 等. 光电式断纱检测系统的研制[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(4): 209-213.

[2] 王延蒙, 付晓艳, 张朝彪. 基于线阵 CCD 的纱线常发性疵点检测研究[J]. 纺织器材, 2022, 49(6): 5-8.

[3] 阮丽, 孙荣基, 刘基宏, 等. 基于赛络新型花式纱的纺制及性能分析[J]. 丝绸, 2021, 58(4): 20-23.

[4] Haleem N, Bustreo M, Del Bue A. A computer vision based online quality control system for textile yarns[J]. Computers in Industry, 2021, 133: 103550.

[5] Wang L, Lu Y C, Pan R R, et al. Evaluation of yarn appearance on a blackboard based on image processing [J]. Textile Research Journal, 2021, 91(19/20): 2263-2271.

[6] 邓中民, 于东洋, 胡灏东, 等. 纱线毛羽路径匹配追踪检测[J].

纺织学报, 2022, 43(9): 101-106.

[7] 李忠健, 董龙, 倪海云, 等. 基于散焦信息的纱线毛羽三维测量与验证[J]. 丝绸, 2021, 58(6): 41-47.

[8] 郭波, 吕文涛, 余序宜, 等. 基于改进 YOLOv5 模型的织物疵点检测算法[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(5): 755-763.

[9] 徐鹏, 罗福源, 徐阳, 等. 碳纤维钢针置换装置的自动对焦策略研究[J]. 计量与测试技术, 2023, 50(7): 16-20.

[10] Li Z Y, Zhou X Y, Wang Y R, et al. Flexible and universal autofocus based on amplitude difference of fractional Fourier transform[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 175: 107991.

[11] Zhang C W, Jia D Y, Wu N K, et al. Autofocus method based on multi regions of interest window for cervical smear images [J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(13): 18783-18805.

[12] Wang W D, Xin B J, Deng N, et al. Objective evaluation on yarn hairiness detection based on multi-view imaging and processing method[J]. Measurement, 2019, 148: 106905.

[13] Xu C Q, Wang J L, Tao J, et al. A knowledge augmented image deblurring method with deep learning for *in situ* quality detection of yarn production [J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(13): 4220-4236.

[14] Liu Z Y, Qiu S F, Cai H Y, et al. Enhancing autofocus in non-mydratric fundus photography: A fast and robust approach with adaptive window and path-optimized search[J]. Applied Sciences, 2023, 14(1): 286.

[15] 汪路涵, 巩岩, 张艳微, 等. 人眼自动对焦及瞳孔中心自动对准系统[J]. 光学学报, 2023, 43(5): 111-119.

[16] Ojdanic D, Zelinskyi D, Naverschnigg C, et al. High-speed telescope autofocus for UAV detection and tracking[J]. Optics Express, 2024, 32(5): 7147-7157.

[17] 潘宏亮, 孙金霞, 韩希珍. 图像清晰度评价与变步长融合调焦方法[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(1): 20220342.