

基于ORB改进的图像匹配套准系统

赵梓平, 徐长波

北京印刷学院信息工程学院, 北京

收稿日期: 2024年12月16日; 录用日期: 2025年1月8日; 发布日期: 2025年1月20日

摘要

为了解决当前国内市场中多色套印技术在曲面丝网印刷中的精确对准难题, 研究提出了一种基于ORB图像匹配算法的多色套印系统, 该系统结合了几何约束和RANSAC筛选算法, 使传统曲面丝网印刷不再局限于单色制品, 满足了市场对高质量、多色印刷日益增长的需求。通过实验验证了系统的有效性, 结果表明匹配正确率超过95%, 处理速度达26帧/秒, 色板套印精度控制在 ± 0.03 毫米以内。这种方法显著提升了复杂多色图案在曲面物体上的印刷质量和精度, 具备广泛的应用前景。

关键词

曲面丝网印刷, 多色套印, 图像匹配, ORB算法, RANSAC筛选

Image Matching and Registration System Based on Improved ORB

Ziping Zhao, Changbo Xu

School of Information Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

Received: Dec. 16th, 2024; accepted: Jan. 8th, 2025; published: Jan. 20th, 2025

Abstract

To address the challenges of precise alignment in multi-color overprinting for curved surface screen printing in the domestic market, this study proposes a multi-color overprinting system based on the ORB image matching algorithm, incorporating geometric constraints and the RANSAC filtering algorithm. This approach extends traditional curved surface screen printing beyond single-color applications, meeting the increasing market demand for high-quality, multi-color printing. Experimental results verify the system's effectiveness, demonstrating a matching accuracy rate exceeding 95%, a processing speed of 26 frames per second, and an overprinting accuracy within ± 0.03 mm. This method significantly enhances the print quality and precision of complex multi-color patterns

on curved objects, with broad application potential.

Keywords

Curved Surface Screen Printing, Multi-Color Overprinting, Image Matching, ORB Algorithm, RANSAC Filtering

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 結论

全球印刷行业正在经历数字化转型, 传统印刷方式面临挑战。尽管如此, 丝网印刷在某些特定领域(如包装、装饰和电子印刷[1])仍然占据重要地位。然而, 当前大多数曲面丝网印刷制品仍停留在单色印刷阶段, 无法满足市场对高质量、多色印刷的需求。随着消费市场的不断升级和消费者对产品外观要求的提高, 多色曲面丝网印刷的需求急剧增加[2]。为了满足这一需求, 开发一套廉价、高精度、高效率的多色套印[3]系统显得尤为迫切。

在多色曲面丝网印刷中转印技术[4]具有重要应用, 能够有效解决精确对准和多色套印的难题。常见的转印技术包括热转印[5]和水转印[6]等。这些技术各有优缺点, 适用于不同的材料和印刷对象。但是转印技术的实现往往依赖于大型的自动化设备, 其价格昂贵、依赖进口、维护成本高、回本周期慢, 并不适用于我国广大的中小型印刷企业, 因此解决这一问题关键还在于套印技术[7]。

而在曲面丝网印刷中实现多色套印面临着一系列挑战。多色套印要求各色版之间的精确对准, 稍有偏差就会导致图案失真、色差和重影等问题。曲面的复杂形状和多变的印刷条件增加了这一难度。一般情况下, 高精度印刷要求误差控制在 ± 0.1 毫米以内, 而在一些高端应用中, 误差需要控制在 ± 0.05 毫米以内[8]。

2. 研究现状

在国内, 虽然曲面丝网印刷技术已得到一定发展, 但在多色套印方面的研究和应用仍较为有限。目前国际上大多是引用机器视觉来实现的对准。通过捕捉和分析印刷过程中每个步骤的图像, 机器视觉系统能够实时检测和校正任何偏差, 确保各色版之间的精确对准, 其中最核心的工作就是图像匹配算法的支持。

从 20 世纪 60 年代的基础理论研究起步, 主要集中在图像处理和模式识别的基本算法上; 80 年代随着计算机技术的飞速进步, 图像处理能力和硬件性能大幅提升, 机器视觉开始在工业检测和机器人导航等领域应用。直至目前常用的算法有 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [9] 算法, SURF (Speeded-Up Robust Features) [10] 算法, 它是 SIFT 的加速版本, 使用积分图和 Hessian 矩阵加速特征点检测与描述。ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) [11] 算法, 专为提高特征检测和描述速度设计。ORB 基于快速的 FAST 角点检测和 BRIEF 特征描述方法, 解决了 SIFT 和 SURF 的计算瓶颈。它在资源受限的实时应用中表现出色, 虽然对尺度变化的鲁棒性较弱, 但其计算速度快且易于实现, 成为实时图像处理的常用算法。基于这些算法使机器视觉技术在多色套印中的应用前景广阔, 通过自动对准误差检测等功能, 显著提高了多色曲面丝网印刷的精度和效率。

3. 图像匹配算法的比较与实现

在上文研究现状中提到的 SIFT、SURF 以及 ORB 算法是现在最常用的图像匹配, 这些算法都是通过特征提取获得的关键特征点来进行匹配。匹配过程需要考虑图像的旋转、缩放和透视变换, 以确保各色版的特征点能够准确对应。如下图 1 分别是 SIFT、SURF 以及 ORB 算法进行图像匹配的结果。

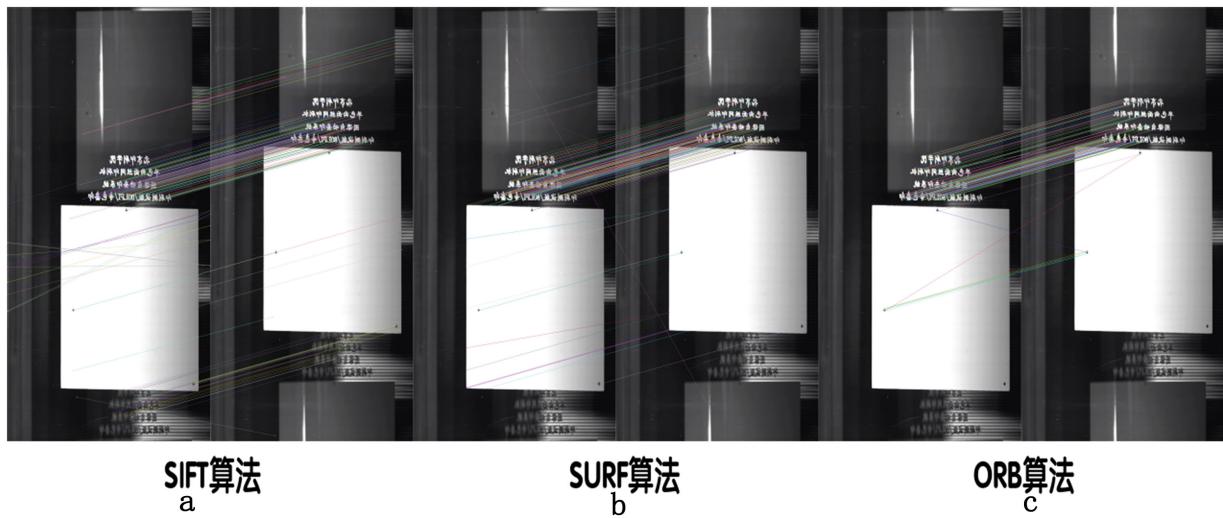


Figure 1. Comparison results of SIFT, SURF, and ORB algorithms

图 1. SIFT、SURF、ORB 算法比较结果

由上述实验数据可知, SIFT 算法能够处理图像旋转, 对特征点描述精度较高, 但是比较慢, 计算资源消耗大。SURF 比 SIFT 快, 计算效率更高, 对缩放和旋转保持性具有鲁棒性, 其特征点描述的准确度不如 SIFT。ORB 比 SIFT 和 SURF 更快, 适合实时应用, 对图像旋转缩放有鲁棒性, 但是相比于 SIFT 和 SURF, 特征点描述的精确度相对较低, 鲁棒性不如 SIFT 和 SURF。因此本系统将在 ORB 算法的基础上, 引入几何约束与 RANSAC 筛选方法[12], 既可以继承 ORB 算法的高速性, 实现系统的实时检测, 又可以显著提升匹配结果的准确性和鲁棒性。在 ORB 算法中引入几何约束与 RANSAC 筛选的主要步骤以及相关过程如下。

3.1. ORB 特征点检测与描述符生成

使用 ORB 算法检测图像中的关键点, FAST (Features from Accelerated Segment Test) 作为关键点检测器[13]。FAST 算法通过在像素邻域内比较中心像素和周围像素的灰度值, 判断是否为角点。为了提高精度和消除冗余, ORB 在多尺度金字塔中检测关键点, 并通过 Harris 角点[14]响应值来排序, 保留响应值最大的关键点。对每个关键点, 在其邻域内计算质心, 公式如式(1)所示。其中, $I(x, y)$ 是像素点 (x, y) 的灰度值, P 是关键点邻域的像素集合。之后并为每个关键点生成带有方向性的 BRIEF 描述符(Des), 使用描述符进行初步的特征点匹配。对于每个关键点, 在其邻域内取固定数量的像素对 (p_i, q_i) , 如果 $I(p_i) < I(q_i)$, 则对应位置的置为 1, 否则置为 0。整个描述符是一个二进制向量, 公式如式(2)所示, 其中 n 是描述符的长度, 通常为 256。描述符生成的便是 ORB 的匹配结果, 下图 2 中的 a 是 ORB 生成的 100 个匹配结果。

$$C_x = \sum_{(x, y) \in P} x \cdot I(x, y), \quad C_y = \sum_{(x, y) \in P} y \cdot I(x, y) \quad (1)$$

$$Des = \begin{bmatrix} 1 & \text{if } I(p_1) < I(q_1) \\ 1 & \text{if } I(p_2) < I(q_2) \\ \dots \\ 1 & \text{if } I(p_n) < I(q_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.2. 几何约束筛选

初步匹配的结果中, 可能包含一些不符合几何约束的匹配点对。常用的几何约束有欧氏距离约束和对称性约束。欧氏距离约束可以过滤掉在图像平面中距离过远的匹配点对, 假设初步匹配的点对为 (p_i, q_i) , 则可以通过公式(3)计算欧氏距离, 如果距离 $d(p_i, q_i)$ 超过预设阈值, 则视为错误匹配。对称性约束是指双向匹配(正向和反向)应保持一致, 即如果图像 A 中的点 p_i 匹配到图像 B 中的 q_i , 那么在反向匹配中, 图像 B 中的 q_i 也应匹配回图像 A 中的 p_i [15]。

$$d(p_i, q_i) = \sqrt{(x_{p_i} - x_{q_i})^2 + (y_{p_i} - y_{q_i})^2} \quad (3)$$

3.3. RANSAC 筛选

RANSAC 用于从匹配点集中去除异常点。该算法随机选取一部分匹配点来估计模型(通常是单应性矩阵或基本矩阵), 然后验证剩余点是否符合该模型。在系统中使用的是单应性矩阵, 其在处理图像对齐(例如拼接)时, 通常假设两幅图像之间存在单应性变换。对于图像中的点 p 和点 q , 单应性变换公式为式(4), 其中 H 是 3×3 的单应性矩阵, λ 是尺度因子。

$$\lambda \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

RANSAC 过程: 随机选择一小部分匹配点对, 估计单应性矩阵 H , 对于其他匹配点, 使用估计的 H 计算变换后的坐标, 验证它们是否符合模型。误差定义为 E , 如下公式(5), 其中 (x'_q, y'_q) 是通过 H 变换后的坐标。判断误差是否在预设的容忍范围内, 如果误差小, 则认为该点为内点。重复以上步骤直到找到满足最多内点的模型[16]。在加入几何约束筛选和 RANSAC 筛选之后就得到了新的匹配图像, 如下图 2 中的 b 所示。

$$E = \sqrt{(x_q - x'_q)^2 + (y_q - y'_q)^2} \quad (5)$$

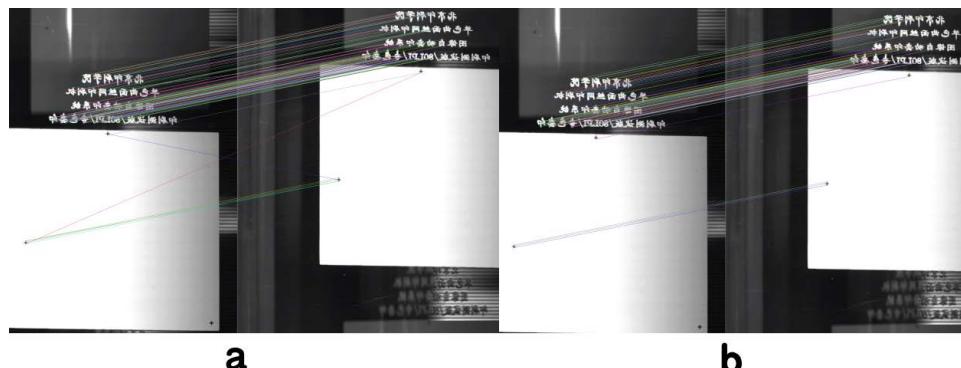


Figure 2. ORB with geometric constraints and RANSAC for filtering match results
图 2. ORB 与 ORB 引入几何约束和 RANSAC 筛选匹配结果

4. 多色智能丝网印刷系统概括

多色智能丝网印刷系统包括软件和硬件系统两部分。软件系统部分基本可以实现用户交互界面, 采集和处理图像, 接收和发送数据, 实时显示印刷状态以及承印物图像等功能。硬件系统部分包括印刷机、单片机、伺服电机、线阵相机、USB 相机、光源、光电传感器等[17]。该系统不仅可以实现高效的图像套印, 还可以将图像套印精度控制在 ± 0.03 毫米, 降低工人工作强度的同时还可以增加产品竞争力。多色智能丝网印刷系统的套准过程如下图 3 所示。

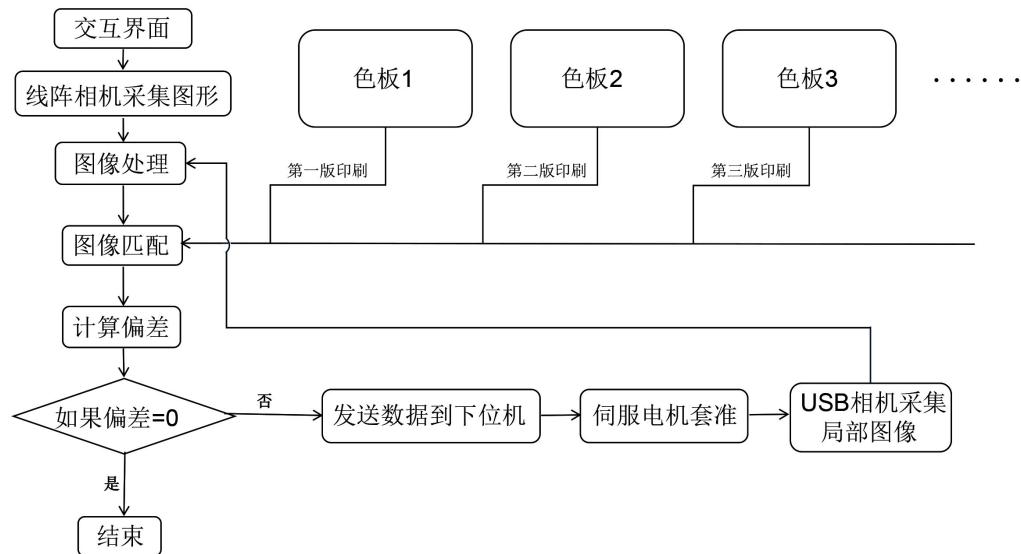


Figure 3. Workflow of the multi-color intelligent screen printing system
图 3. 多色智能丝网印刷系统工作流程

5. 实验平台

硬件系统的设计目的是和曲面印刷机相配合, 实现承印物的正常图像采集, 印刷状态的实时监测, 以及与上位机建立通信, 并控制伺服电机带动承印物完成套印配准。还要实现人工上料后的承印物固定, 印刷台的位移等功能。整个硬件系统主要由线阵相机及镜头、USB 相机及镜头、条形光源、单片机、伺服电机和曲面丝网印刷机等组成, 如下图 4 所示。主要硬件组成参数如下表 1 所示。

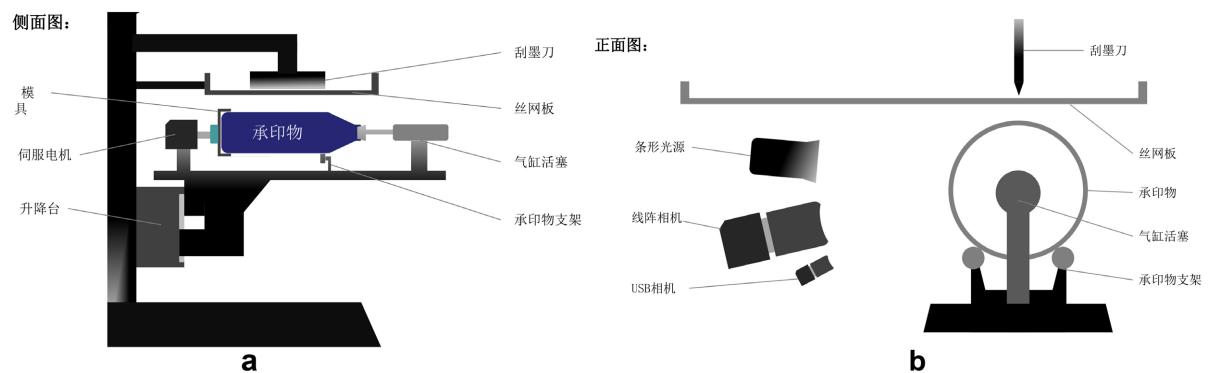


Figure 4. Diagram of the hardware system composition
图 4. 硬件系统组成示意图

Table 1. Main hardware composition parameters
表 1. 主要硬件组成参数

实验平台组成	参数信息
线阵相机	镜头: 35 mm F2.8; 传感器: 线扫 COMS; 像素: 4096; 接口: 千兆以太网; 线速: 26 kHz
USB 相机	镜头: 70 mm F4.0; 传感器: OV5693 (1/4) CMOS; 分辨率: 1920*1080; 接口: USB 2.0; 帧速: 30 帧/秒
光源	波长: 6500~7500 K; 尺寸: 250*30*18 mm; 功率: 10 W
单片机	型号: Arduino uno R3; 微控制器: ATmega328 P; 数字 I/O 引脚: 14 (其中 6 个提供 PWM 输出); 时钟速度: 16 MHz;
伺服电机	功率: 200 W; 额定转矩: 0.64 NM; 脉冲: 13 万脉冲/圈; 编码器: 17 位
单色曲面丝网印刷机	电源: 220 V 交流; 行程: 300 mm; 驱动: 气动; 印刷速度: 240 个/H

6. 实验结果

第一个色板印刷是不需要进行套印的, 因此在第一色版印刷之后, 通过线阵相机扫描得到第一色版印刷后的图像作为基准图像, 如下图 5 左侧图像所示, 而基准图像中的图案位置就是下次色板印刷的位置。在第二色板印刷时, 需要工人手动上料, 上料后是随机位置, 如下图 5 右侧图像所示, 因此要根据基准图像进行套准。



Figure 5. Reference image of the first color plate (left) and the image to be aligned (right)
图 5. 第一色板基准图像(左)与待套准图像(右)

使用改进后的 ORB 算法对两幅图像进行图像匹配, 设置获得 200 个特征点匹配结果, 成功率达到 99.5%, 匹配结果如下图 6 所示。本文中的图像像素行差为 460 像素, 通过将像素行差转换为伺服电机的脉冲完成第一次校准。之后 USB 相机介入和伺服电机配合不断校准, 直至像素行差等于 0。随后进行第二色板的印刷, 第二色板套印结果如下图 7 所示。

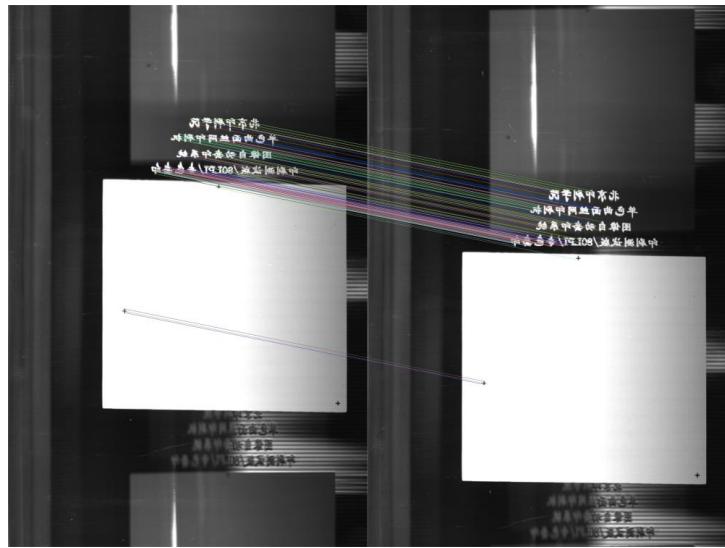


Figure 6. Matching results (200 matching samples)

图 6. 匹配结果(200 个匹配样本)

实验对象为一组图像(两幅位移图像), 分别用 SIFT、SURF、ORB 以及改进后的 ORB + 筛选四种算法进行匹配实验, 实验匹配结果如下表 2 所示。

Table 2. Algorithm comparison results

表 2. 算法比较结果

算法	匹配数量(个)	准确率	平均匹配时间(个/毫秒)
SIFT	200	96.5%	1200
SURF	200	90.0%	800
ORB	200	81.0%	150
ORB + 筛选	200	99.5%	210

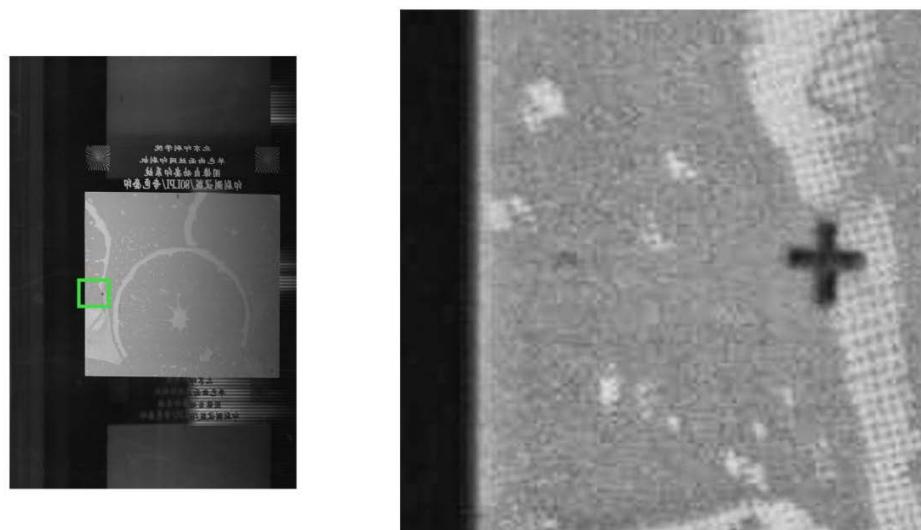


Figure 7. Registration results

图 7. 套印结果

7. 总结

本文采用了机器视觉的方式实现了丝网印刷多色套印。通过线阵相机、USB 相机以及伺服电机组成的视觉定位系统, 使曲面套印的精度达到了 ± 0.03 毫米。在图像匹配算法上, 本文提出了在 ORB 算法中引入几何约束与 RANSAC 筛选, 在继承其快速匹配优点的同时, 使其图像匹配的正确率在本实验中达到了 99.5%。最终在实际印刷中性能稳定, 整体印刷效率符合工厂需求。

参考文献

- [1] 江唯, 张淑洁, 张丽, 等. 电子纺织品制备用丝网印刷技术的研究进展[J]. 棉纺织技术, 2024, 52(5): 8-14.
- [2] 王贤洵, 乡碧云, 王昌佑. 曲面印刷装备的现状及发展趋向[J]. 机电工程技术, 2014, 43(2): 1-3.
- [3] 张锡福. 基于机器视觉的套印对准技术研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- [4] 江丰邑. 数码转印各类工艺应用与优劣势[J]. 丝网印刷, 2023(2): 30-36.
- [5] 闫素斋. 热转印技术[J]. 丝网印刷, 2001(6): 13-17.
- [6] 水转印工艺特点和操作技术[J]. 网印工业, 2020(3): 33-37.
- [7] 洪桂香. 发展新型丝印设备开创丝网印刷新时代[J]. 印刷质量与标准化, 2015, 206(7): 10-15.
- [8] 中国印刷总公司. CY/T 5-1999 平版印刷品质量要求及检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [9] 李欣, 焦立男, 柳有权, 等. 一种基于改进 SIFT 的视频稳像方法[J]. 计算机与现代化, 2024(6): 43-50.
- [10] 许勇强. 基于 SURF 算法的无人机测绘影像匹配方法[J]. 江西测绘, 2024(2): 36-38.
- [11] 田丹, 陈钰坤. 基于改进 ORB 算法的遥感图像匹配[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2024, 36(1): 34-39, 85.
- [12] 邹方星, 范百兴, 陈哲. 基于 RANSAC 算法的工业机器人运动学参数标定[J]. 测绘工程, 2024, 33(4): 9-15.
- [13] Rosten, E., Porter, R. and Drummond, T. (2010) Faster and Better: A Machine Learning Approach to Corner Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **32**, 105-119. <https://doi.org/10.1109/tpami.2008.275>
- [14] 尚明珠, 王克朝. 基于多尺度 Harris 角点检测的图像配准算法[J]. 电光与控制, 2024, 31(1): 28-32.
- [15] 李淮周, 王帅军, 王宏, 等. 基于自适应几何约束 ORB 的红外双目测距方法[J]. 红外技术, 2024, 46(7): 831-837.
- [16] 冯宝凤, 杨剑锋, 严可, 等. 融合 RANSAC 与 GMS 图像特征的匹配算法[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(9): 74-79.
- [17] 李婧. 凹版印刷多色套准控制系统设计[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 277-281.