

基于高斯混合模型的线序识别算法

李兴民^{1,2}, 赵河明^{1,2}, 晏永^{1*}

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 高端装备可靠性技术山西省重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 针对印刷电路板线序识别故障检测抗干扰能力弱和实时性低等问题, 提出了一种基于高斯混合模型的自适应线序识别检测算法。通过图像采集和图像预处理得到高质量图像; 利用高斯金字塔模板匹配算法实现对颜色特征区域的快速定位, 提取线束所有像素点的颜色特征; 利用基于期望最大化算法的高斯混合模型的无监督学习算法进行线序颜色分类。实验结果表明, 系统线束定位速度平均耗时9.7 ms, 颜色分类实验耗时13.6 ms, 符合工业检测的实时性要求。该系统可以实现线束快速自适应定位, 线序颜色识别准确, 检测抗外界干扰能力强。

关键词: 装备可靠性; 线序检测; 金字塔模板匹配; 特征提取; 高斯混合模型

中图分类号: TJ06; TP202.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025073

引用格式: 李兴民, 赵河明, 晏永. 基于高斯混合模型的线序识别算法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(5): 573-580.

LI Xingmin, ZHAO Heming, YAN Yong. Line order recognition algorithm based on Gaussian mixture model[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(5): 573-580.

Line Order Recognition Algorithm Based on Gaussian Mixture Model

LI Xingmin^{1,2}, ZHAO Heming^{1,2}, YAN Yong^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Key Laboratory of High-End Equipment Reliability Technology, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To address the problems of weak anti-interference capability and low real-time performance in PCB board wire sequence identification and fault detection, an adaptive wire sequence identification and detection algorithm based on the Gaussian mixture model is proposed. High-quality images are obtained through image acquisition and image preprocessing; the Gaussian pyramid template matching algorithm is used to achieve rapid positioning of color feature regions and extract the color features of all pixel points of the wire harness; the unsupervised learning algorithm based on the Gaussian mixture model with the EM algorithm is applied for wire sequence color classification. The experimental results show that the average time consumed for the wire harness positioning of the system is 9.7 ms, and the time consumed for the color classification experiment is 13.6 ms, which meets the real-time requirements of industrial detection. The designed system can realize rapid and adaptive positioning of the wire harness, accurately identify the color of the wire sequence, and accurately distinguish faulty wire harnesses.

Key words: equipment reliability; line order detection; pyramid template matching; feature extraction; Gaussian mixture model(GMM)

收稿日期: 2024-12-10

基金项目: 中北大学高端装备可靠性技术山西省重点实验室研究基金资助项目(446-110103)

作者简介: 李兴民(1980-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事可靠性技术研究。E-mail: 48802955@qq.com。

* 通信作者: 晏永(1987-), 男, 副教授, 博士, 主要从事工业机器视觉研究。E-mail: lzyanyong@foxmail.com。

0 引言

印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)作为电子核心产业,影响集成电路、新能源汽车和数字经济等新兴领域行业的快速发展。在军事航空领域,军用PCB广泛应用于装甲车辆、导弹、无人机等方面。据Prismark数据显示,2023年我国PCB产值为377.94亿美元,占全球PCB产值的54.37%^[1]。如果不同颜色线束的安插顺序发生了错误,即有缺陷的装备进入下游的生产线,轻则影响产品正常使用,重则会导致连接该设备的整体电子系统产生破坏,进而危害人员安全,造成经济损失^[2]。军用装备、安全领域、医疗设备等高端设备需要高度可靠性和稳定性,正确的线序排列是装备得到保障的关键。传统彩色线束的检测与识别通过人工视觉来进行判别,极易出现错检和漏检现象,在降低彩色线束的检测效率同时,又会带来过多不可靠因素^[3]。

机器视觉技术近些年的快速发展,可替代人类视觉对相关待测目标进行有效和快速的检测^[4]。Shi等^[5]利用Otsu法和Sobel算子对线束颜色进行阈值处理和边缘检测,在黑色背景图像中对线束定位,固定区域待检测线束利用颜色空间模型及其对应的颜色公式和配色算法与模板线束的图像进行匹配对比。Ghidoni等^[6]针对导线表面高亮和不同绝缘涂层在颜色识别中存在较大误差的问题,设计了背景减影自动调整公差算法,提高了线束颜色识别准确性。吴宗胜等^[7]使用颜色聚合向量计算各导线的颜色聚合向量特征判别颜色。张相胜等^[8]将边缘信息作为输入计算图像轮廓的Hu矩,根据匹配值越大产品轮廓越不相似的原则,筛选出端子形变的线束。Le等^[9]采用颜色结构相似度指数度量对模板样本与测试样本的对比度进行比较对线序颜色匹配。Nguyen等^[10]使用Mask-RCNN检测线束轮廓,实现3D环境中自动检测并引导机器人手臂执行装配任务。

高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)由于对复杂背景有较强的适应性和抗干扰能力,可以多个模态精确量化学物,近些年应用到机器视觉分类场合^[11]。Zhang等^[12]基于GMM对左右对称光栅结构光图像融合后提取交叉点进行分割,最终得到核燃料芯块端面缺陷区域。Nandi等^[13]采用GMM从芒果的图像中估计不同的特征参数,以预测成熟度水平。

由于照度变化会对分类器的识别正确率产生影

响^[14],本文通过正交投影拍摄搭建了一套线序采集与识别系统,采用偏振镜片和中值滤波分别有效解决字符或污点和局部高亮对模板匹配和颜色识别的影响,通过高斯金字塔模板匹配快速提取线束区域。采用GMM进行颜色分类,通过一组手动分类的训练样本,衍生出一个分类器,自动将未知的数据样本分配给预定义的类。通过期望最大化(expectation Maximization, EM)无监督机器学习算法推算出线束颜色属于的类^[15]。本系统不仅可以对常见颜色进行分类,还可以对色差小的颜色进行分类^[16]。

1 总体方案设计

1.1 系统平台硬件设计

系统平台从光学相机选型、打光方式设计、拍摄方式设计来降低光照强度对实验的影响,硬件部分主要包括工业相机、镜头、光源等。图像采集装置实时采集图像,并将图像实时传输至图像处理单元进行图像预处理,去除部分干扰,处理过的图像通过预设的线序识别算法判断线序是否与标准模板匹配。

根据本系统的实时性需求,线束连接器线序检测采用CCD面阵相机。由于模板匹配方法对平移和光照敏感,须建立合适的光学环境^[17]。不合理的布光方式可能会使拍摄出来的图像失真,因为光源散发的光在排线表面绝缘材料上产生了反射,会减少可以测量的颜色电线面积^[18]。故选取迈德威视BOT-C1600-GE-T与16mm的定焦镜头搭配使用,相机和镜头具体参数见表1和表2。在350mm的工作距离下拍摄PCB板线束图片,确立了使用4分区环形光源采用垂直照明的方式作为线序检测系统的照明方案,并采集了若干图像,且达到了较为不错的效果。

表1 相机参数

Tab.1 Camera parameters

型号	像素	接口	镜头接口
BOT-C1600-GE-T	1600万	GigE	C-Mount

表2 镜头主要参数

Tab.2 Len parameters

型号	光圈范围	焦距/mm	接口	成像器
MVL-HV1050M-6MP	1.6~16	35	C-Mount	1/1.8

最终确定正交投影拍摄,尽可能保证图像数据的真实性^[19],实验开始前,需保证环形LED灯、相机镜头、PCB检测区域的中心在一条直线上,且垂直于桌面。同时,调整相机支架与环形

灯的距离,使得成像图片中没有拍摄设备的阴影。硬件系统结构如图 1 所示。

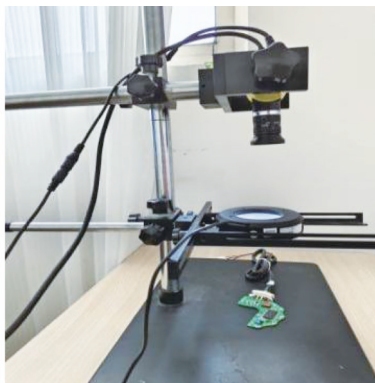


图 1 试验台实物图

Fig. 1 Test bench physical picture

1.2 系统平台算法设计

基于 GMM 的 PCB 线序自适应识别方法

如下:

1) 线束图像预处理。采用光学元件偏振镜和中值滤波对采集到的图像进行预处理,减少颜色识别干扰,提高样本质量,增加后续识别精度。

2) 模板匹配。首先,输入模板图像,构建模板金字塔,提取各层模板边缘,计算梯度方向及幅值;其次,将样本图像与模板图像进行金字塔逐层匹配;最后,通过金字塔底层重叠筛选,输出线束关注区域。

3) 高斯分类器。利用高斯分类器实现对模板线束颜色的分类,创建颜色查找表,后续可以快速地颜色查找与匹配。

4) 线序识别。待检测线束通过预处理自适应定位,得到颜色特征区域,通过分类器判别颜色类型,与模板颜色进行对比,颜色不匹配则线序有误,输出错误线束。具体流程如图 2 所示。

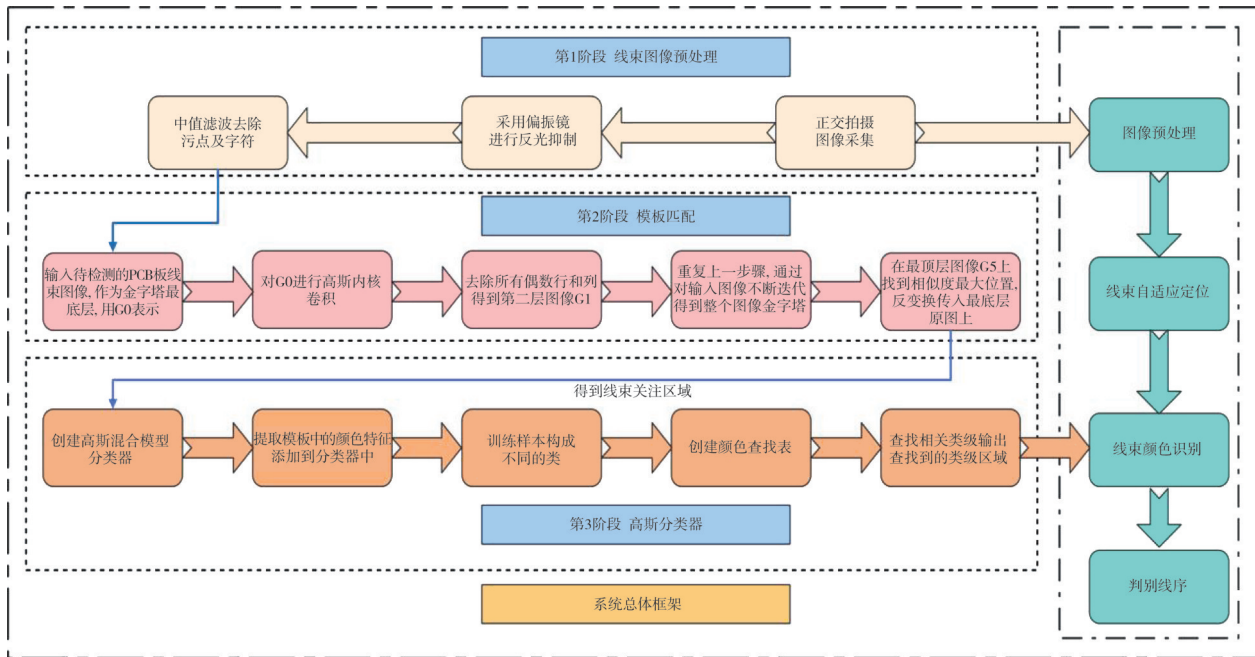


图 2 系统算法框架图

Fig. 2 Framework diagram of system algorithm

2 PCB 板线束图像自适应提取

2.1 图像预处理

由于排线表面的绝缘材质一般是塑胶的,工业相机两侧的侧面 LED 光源照射在线束表面会发生反光现象,导致最终成像的线束图像表面局部区域像素点的像素值发生波动^[20]。同时,线束表面覆盖有字符和污点,会影响后续排线颜色特征提取。

2.1.1 反光抑制

PCB 板线束反射图像结果中存在的反光现象,一部分是由于绝缘材料的无序反射,另一部分是由于 PCB 电路板引入产生的镜面反射。该现象会导致图像部分区域异常变亮,丢失该区域原始的细节信息。光在发生镜面反射后为不完全偏振光,因此会形成“炫光”,需利用偏振原理对反射噪声进行抑制消除。本文在镜头下端安装偏振镜,通过旋转偏振镜来阻隔反射偏振光线,即可实现反光的抑制和消除^[21],实验效果如图 3 所示。

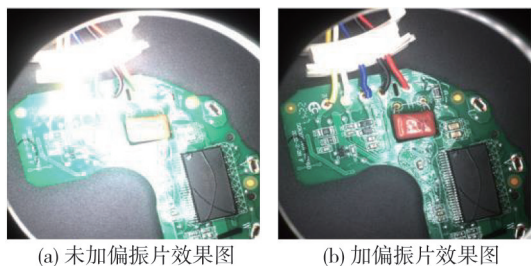


图3 反光抑制对比图

Fig. 3 Reflective suppression comparison

2.1.2 中值滤波

线束上的脏污和字符会对颜色识别算法造成干扰。中值滤波算法的核心原理是把数字图像中一点的像素值用该点一个邻域中的所有点像素值的中值代替^[22], 这样就将图像中一些孤立的噪声点使其像素与邻近像素值一样, 也就达到了消除图像中椒盐噪声的目的。本文分别选取了 5×5 、 9×9 、 11×11 、 13×13 的4种中值滤波器窗口对线束上污点和字符进行了实验。图4(a)~(d)为针对排线上有字符情况的线束在不同中值滤波器模板下的滤波结果图。

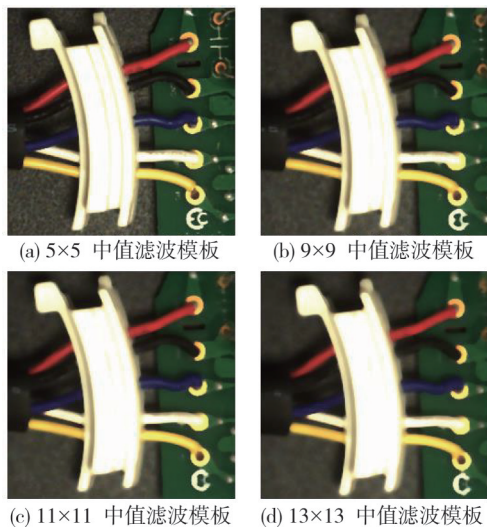


图4 不同尺寸中值滤波器窗口去噪效果

Fig. 4 Different size mid-value filter window remove noise effect

由图4可以看出, 对线束图像采用 11×11 中值滤波器窗口进行实验后对线束上污点和字符的滤除效果较好。

2.2 线束自适应定位

2.2.1 模板匹配

线束定位通过模板匹配实现, 现有多种模板匹配方式: 基于灰度值的模板匹配算法^[23]是利用相似度进行匹配, 即计算模板与图像之间差值的绝对值的总和或所有差值的平方和; 基于边缘点的模板匹配算法是依据距离变换原理^[24]; 基于形状的模板匹

配算法^[25]通过计算梯度向量的最小内积和来确定最佳的匹配位置。基于灰度值的模板匹配易受光照变化影响, 在图像存在遮挡、部分隐藏、信息缺失、混乱等情况时不能正确找到目标物体; 基于边缘的匹配算法因为要提取边缘信息, 使得其只适用于光照变化较小的情况; 基于形状的模板匹配算法在出现非线性光照等影响的情况下, 显示出非常高的识别率, 鲁棒性和可靠性都比较优越。

2.2.2 基于高斯金字塔的模板匹配

基于形状的模板匹配算法以物体边缘的梯度相关性为匹配标准, 提取兴趣区区域内的边缘特征, 生成多层级的图像金字塔模型, 接着在图像金字塔层自上而下逐层搜索模板图像, 直至搜索到底层或者确定的匹配结果为止。

图像金字塔是将图像进行多尺度表达的一种方式, 采用分层搜索实现较快的搜索策略。高斯金字塔通过高斯平滑和亚像素采样获得采样图像, 即通过对第 i 层高斯金字塔进行平滑和亚采样就可以获得 $i+1$ 层高斯图像。构建高斯金字塔具体执行步骤如下:

1) 图像金字塔最底层为待检测的PCB板线束表面图像原图, 用 G_0 表示。

2) 对 G_0 进行高斯核卷积, 使用 5×5 高斯核, 即

$$w(m, n) = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 14 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

3) 将高斯低通滤波后图像的所有偶数行和偶数列删除得到第二层图像 G_1 , G_{i+1} 层高斯金字塔图像位于点 (x, y) 的计算公式为

$$G_{i+1}(x, y) =$$

$$\sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_i(2x+m, 2y+n) \quad (2)$$

4) 重复步骤3), 通过对输入图像 G_i 不断迭代得到整个图像金字塔, 如图5所示, 迭代图像 G_{i+1} 的大小为 G_i 的 $1/4$, 分辨率是 G_i 的 $1/2$, 对其分析时计算量显著降低。

5) 金字塔取5层, 在最顶层 G_5 图像上找到相似度最大位置, 然后反变换传入最底层原图上, 找到最佳匹配位置, 得到线束颜色的定位图, 如图5所示。

目标图像如图6所示, 其在某一层金字塔中与标准图像进行良好匹配时, 即匹配的相关性超过预设的阈值, 则认为匹配成功, 匹配过程可以停止; 同

理,如果构建的高斯金字塔已到达最底层,而模板在整个过程中没有找到合适的匹配位置,则说明给定的图像中没有找到模板,匹配过程停止。

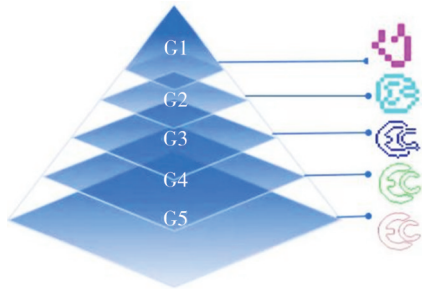


图 5 高斯金字塔示意图

Fig. 5 Gauss pyramid schematic diagram

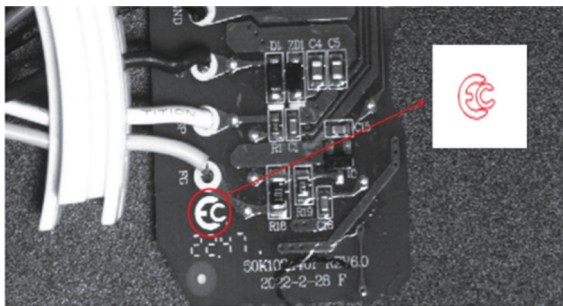


图 6 目标图像待匹配图

Fig. 6 Gauss pyramid schematic diagram

3 线束颜色识别算法

3.1 GMM

高斯分布即正态分布,从统计学角度,高斯模型能够很好地描述样本的分布情况^[26]。在颜色特征中,线束的每个像素点颜色特征都是独立的,当样本足够多时,根据中心极限定理,这些样本分布趋于高斯分布。

GMM是一种描述PCB线束图像簇分布的概率模型,其中,每个簇都假设服从高斯分布。对于混合模型,数据 x_i 的概率分布 $P(x_i)$ 由所有 J 个高斯聚类的加权和给出,如式(3)和式(4)所示。

$$P(x_i) = \sum_{j=1}^J \alpha_j N_j(x_i | \mu_j, \Sigma_j), \quad (3)$$

$$N_j(x_i | \mu_j, \Sigma_j) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{D}{2}} |\Sigma_j|^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{(x_i - \mu_j)^T \Sigma_j^{-1} (x_i - \mu_j)}{2}\right), \quad (4)$$

式中: $N_j(x_i | \mu_j, \Sigma_j)$ 为GMM中的第 j 个高斯分布概率密度函数; Σ_j 为第 j 个高斯的协方差矩阵,表示 3×3 的协方差矩阵,用于描述颜色特征的分布范围; μ_j

表示第 j 个高斯分量的均值向量,由3个通道的平均红色值、平均绿色值和平均蓝色值构成; α_j 为系数,表示第 j 个高斯的权重, $0 \leq \alpha_j \leq 1, \sum_{j=1}^J \alpha_j = 1$;以R、G、B分量构成特征向量 (r, g, b) ,则 $D=3$ 。

3.2 EM算法

EM算法^[27-29]是一种无监督机器学习技术,可以利用已知的每个特征向量属于的类别,通过最大似然估计求出各类的高斯模型参数。作为对参数的最可能估计,EM算法的收敛性很大程度上取决于其初始参数。利用EM算法进行迭代更新GMM参数的方法如下:

- 1) 取参数的初始值开始迭代;
- 2) E步:依据当前模型参数,计算分模型对观测数据的响应度;
- 3) M步:计算新一轮迭代的模型参数,GMM的3个参数的递归公式分别为

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^n P(j | x_i, \mu_j, \Sigma_j) x_i}{\sum_{i=1}^n P(j | x_i, \mu_j, \Sigma_j)}, \quad k = 1, 2, \dots, 5, \quad (5)$$

$$\Sigma_j = \frac{\sum_{i=1}^n P(j | x_i, \mu_j, \Sigma_j) (x_i - \mu_j)(x_i - \mu_j)^T}{\sum_{i=1}^n P(j | x_i, \mu_j, \Sigma_j)}, \quad k = 1, 2, \dots, 5, \quad (6)$$

$$\alpha_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P(j | x_i, \mu_j, \Sigma_j), \quad k = 1, 2, \dots, 5; \quad (7)$$

- 4) 重复步骤2)和步骤3),直到GMM参数收敛为止,从而找到不同颜色相对应的聚类,完成对线束颜色的分类。

4 实验与分析

通过前期实验准备,本文实验步骤如下:

- 1) 选取特殊符号作为模板,该符号符合有方向 and 数目唯一的条件,如图7(a)所示;
- 2) 手动选取线束颜色特征区域,得到模板与特征区域相对关系,如图7(b)所示;
- 3) 待检测图像与标准图像进行基于高斯金字塔的模板匹配,若模板匹配成功,则输出线束特征区域,如图7(c)所示;
- 4) 创建一个GMM分类器(创建训练对象),在三维图形中,创建一个用查找5种类级的GMM,如图7(d)所示;

5) 将类级的图形区域添加到GMM分类器中(抓取训练图形);

6) 训练类级区域(训练);

7) 创建颜色查找表(Look Up Table, LUT), 将训练好的GMM关联其中, 以实现基于GMM的快速颜色查找, LUT^[30]可以根据输入数据地址快速查找对应的输出端, 建立LUT可以快速提升

计算速度;

8) 在图形中采用GMM查找相关类级(定位), 使用LUT在图像中搜索相关类级, 输出所有查找到的类级区域;

9) 输出所有错误线束, 在错误颜色线束上打NG标签, 如图7(e)所示。

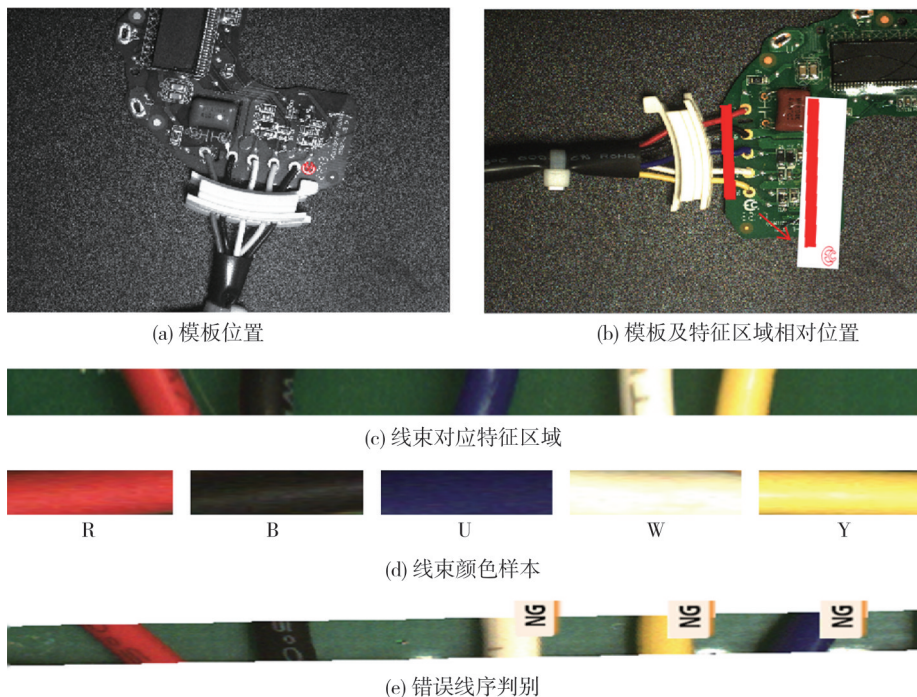


图7 实验流程图

Fig. 7 Experimental flow chart

将所采集到的线束图像中的所有像素点的颜色特征结合成一个GMM。将线束颜色分为五类: 红色(R)、黑色(B)、蓝色(U)、白色(W)、黄色(Y), 如图7(d)所示。

将每一类特征(R、B、U、W和Y)单独加入分类器输入后, 构建融合特征的多类GMM。对所有类别进行似然估计计算, 然后假设最大的值作为测试阶段的输出类。将 j 类的GMM模型参数表示为向量 θ_j , n 为样本个数。根据贝叶斯理论, 线束颜色属于第 j 类的后验概率可用式(8)和式(9)表示。

$$P(\theta_j|x_i) = \frac{P(x_i|\theta_j)P(\theta_j)}{P(x_i)} = \frac{P(x_i|\theta_j)P(\theta_j)}{\sum_{j=1}^j P(x_i|\theta_j)P(\theta_j)}, \quad (8)$$

$$P(x_i|\theta_j) = \prod_{i=1}^n (x_i|\theta_j). \quad (9)$$

$P(x_i|\theta_j)$ 表示在第 j 个颜色下的 x_i ($i=1,$

$2, \dots, n$)条件概率, 通过计算 $P(x_i|\theta_j)$ 得到最大后验概率, 最终分类结果用式(10)表示。

$$k = \arg \max P(x_i|\theta_j), \quad (10)$$

式中: k 为第 j 类对应于最大概率值的最终结果。

读取以上GMM迭代更新之后得到的GMM的参数进行像素分类, 利用分类器算法模型对线束颜色进行模型训练; 将线束区域图像输入模型训练之后的分类器算法模型, 通过分类器算法模型对线束区域图像进行板线颜色识别; 将颜色识别结果与颜色顺序模板进行匹配, 如果匹配成功, 则线束焊接顺序无误, 反之, 则板线连接顺序错误, 到此完成了PCB板线序识别。

在模板匹配后进行颜色识别, 并将从左往右的颜色信息生成颜色序列对比正确颜色序列。若输出颜色序列无误则进行下一个PCB线序检测; 反之, 若有误则输出错误线束位置, 并出发报警机制提示产品有误, 提升检测速度及准确性。

PCB线束位置判别结果如表 3 所示。

表 3 PCB线束位置判别结果

Tab. 3 Results of PCB harness position discrimination

序号	是否找到模板	正确颜色序列	输出颜色序列	错误线束位置(自左往右)	是否触发报警
1	是	RBUWY	RBUWY	无	否
2	是	RBUWY	RBUWY	无	否
3	是	RBUWY	RBUWY	无	否
4	是	RBUWY	RBUWY	无	否
5	是	RBUWY	RBUWY	无	否
6	是	RBUWY	RBWYU	3,4,5	是
7	是	RBUWY	RBUWY	无	否
8	是	RBUWY	RBUWY	无	否
9	是	RBUWY	RBUWY	无	否
10	是	RBUWY	RBUWY	无	否
11	是	RBUWY	RBUWY	无	否
⋮	⋮	⋮	⋮	无	否
27	是	RBUWY	RBUWY	无	否
28	是	RBUWY	RBUWY	无	否
29	是	RBUWY	RBUWY	无	否
30	是	RBUWY	RBUWY	无	否

实验结果表明,系统线束定位速度平均耗时 9.7 ms,颜色分类实验耗时 13.6 ms,总计处理时间 23.3 ms。在正常形式引线前提下及光线合理的环境中,颜色识别的准确率 100%、故障线束的判别准确率 100%。

5 结 论

本文在搭建图像采集处理系统时,采用偏振片进行反光抑制,有效解决了光照强度对实验的影响,通过滤波预处理可以对线束污点及字符进行有效去除,简化了后续识别算法。

基于高斯金字塔的模板匹配自顶向下的搜索策略可以显著减少计算量,并提高了线序自动识别精确度和检测实时性。

本文基于 GMM 图像分类方法,有效地增加了图像检测处理效率以及颜色识别的准确性,可在军事、航空航天和医疗设备等领域具有一定的应用推广性和普遍适用性。

参考文献:

[1] 张家亮. 2023 年全球线路板市场总结及未来发展趋势[J]. 印制电路资讯, 2024(2): 22-28.
ZHANG Jialiang. Summary and future development trend of global circuit board market in 2023[J]. Printed Circuit Board Information, 2024(2): 22-28. (in Chinese)

[2] 王粲. 一种汽车线束检测系统的研究与设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.

[3] 李小宝, 陆永华, 周利华, 等. 基于机器视觉的电子线束产品尺寸检测方法[J]. 测试技术学报, 2024, 38(3): 289-297.

LIXiaobao, LU Yonghua, ZHOU Lihua, et al. A method for measuring the size of electronic wiring harness products based on machine vision[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(3): 289-297. (in Chinese)

[4] PALANI S, NATARAJAN U, CHELLAMALAI M. On-line prediction of micro-turning multi-response variables by machine vision system using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)[J]. Machine Vision and Applications, 2013, 24(1): 19-32.

[5] SHI G M, JIAN W. Wiring harness assembly detection system based on image processing technology[C]//2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011: 2397-2400.

[6] GHIDONI S, FINOTTO M, MENEGATTI E. Automatic color inspection for colored wires in electric cables[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 12(2): 596-607.

[7] 吴宗胜, 薛茹. 基于颜色聚合向量的线序检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(6): 182-185.
WU Zongsheng, XUE Ru. A line order detected method based on color coherence vector [J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(6): 182-185. (in Chinese)

[8] 张相胜, 焦鹏, 潘丰. 基于机器视觉的汽车线束压接缺陷检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2020(3): 73-77.
ZHANG Xiangsheng, JIAO Peng, PAN Feng. Defect detection system design for automobile wiring harness crimping using machine vision[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(3): 73-77. (in Chinese)

[9] LE M H, HOANG V D, NGO V T. Electrical colored

- wires inspection algorithm for automatic connector producing machines[C]//2016 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), 2016: 1-4.
- [10] NGUYEN T P, YOON J. A novel vision-based method for 3D profile extraction of wire harness in robotized assembly process[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 61: 365-374.
- [11] 刘阳, 丁奉龙, 刘英, 等. 基于高斯混合模型的青梅表面缺陷检测识别技术[J]. *林业工程学报*, 2020, 5(4): 139-144.
LIU Yang, DING Fenglong, LIU Ying, et al. Detection and recognition technology of green plum surface defects based on Gaussian mixture model[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2020, 5(4): 139-144. (in Chinese).
- [12] ZHANG B, LIU M, TIAN Y, et al. Defect inspection system of nuclear fuel pellet end faces based on machine vision [J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2020, 57(6): 617-623.
- [13] NANDI C S, TUDU B, KOLEY C. Machine vision based techniques for automatic mango fruit sorting and grading based on maturity level and size[M]//*Sensing Technology: Current Status and Future Trends II*. Cham: Springer International Publishing, 2013: 27-46.
- [14] 王家臣, 李良晖, 杨胜利. 不同照度下煤矸图像灰度及纹理特征提取的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(11): 3051-3061.
WANG Jiachen, LI Lianghui, YANG Shengli. Experimental study on gray and texture features extraction of coal and gangue image under different illumination [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(11): 3051-3061. (in Chinese).
- [15] SCHAEFER G, ZÁVIŠEK M, NAKASHIMA T. Thermography based breast cancer analysis using statistical features and fuzzy classification[J]. *Pattern Recognition*, 2009, 42(6): 1133-1137.
- [16] CHEN H, CUI Y, LI S, et al. An improved GMM-based algorithm with optimal multi-color subspaces for color difference classification of solar cells [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2018, 31(4): 503-513.
- [17] DUAN W, KUESTER F, GAUDIOT J L, et al. Automatic object and image alignment using Fourier Descriptors[J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(9): 1196-1206.
- [18] 王天怡, 王鑫, 曹兴强, 等. 基于机器视觉的内层包装缺陷检测光源的优化[J]. *包装工程*, 2019, 40(17): 174-181.
WANG Tianyi, WANG Xin, CAO Xingqiang, et al. Optimization of light source for defect detection of inner packaging paper based on machine vision[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(17): 174-181. (in Chinese)
- [19] 杨子晴, 杨健, 熊吴越. 基于改进分水岭算法的堆积态再生混合粗骨料图像分析[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(8): 1691-1698.
YANG Ziqing, YANG Jian, XIONG Wuyue. Practical method for identifying morphological information of recycled coarse aggregate bulk based on watershed algorithm[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(8): 1691-1698. (in Chinese)
- [20] 魏友华, 何雪梅, 徐霞, 等. 一种自适应图像预处理方法研究与应用[J]. *现代电子技术*, 2022, 45(7): 53-57.
WEI Youhua, HE Xuemei, XU Xia, et al. Research and application of adaptive image preprocessing method [J]. *Modern Electronics Technique*, 2022, 45(7): 53-57. (in Chinese)
- [21] 涂碧海, 洪津, 姚萍萍, 等. 多角度偏振成像仪偏振探测性能与检测[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 117-129.
TU Bihai, HONG Jin, YAO Pingping, et al. Polarization detection performance of directional polarimetric camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 117-129. (in Chinese)
- [22] 李文静, 张虎山, 焦键. 基于HALCON的贴片IC焊接缺陷检测算法研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(8): 244-248.
LI Wenjing, ZHANG Hushan, JIAO Jian. Welding defect detection algorithm for chip IC based on HALCON[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(8): 244-248. (in Chinese)
- [23] 任楷飞, 孟令军, 顾泽凌. 基于灰度值金字塔算法的零件识别系统设计[J]. *中国测试*, 2018, 44(7): 83-87.
REN Kaifei, MENG Lingjun, GU Zeling. System design of part identification based on gray value pyramid algorithm[J]. *China Measurement & Test*, 2018, 44(7): 83-87. (in Chinese)
- [24] 苏娟, 徐青松, 刘刚. 一种基于边缘匹配的前视红外目标识别算法[J]. *兵工学报*, 2012, 33(3): 271-277.
SU Juan, XU Qingsong, LIU Gang. A forward looking infrared target recognition algorithm based on edge matching[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(3): 271-277. (in Chinese)
- [25] WANG J, BAI X, YOU X, et al. Shape matching and classification using height functions [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33(2): 134-143.