

基于互相关模板匹配算法的片式电子元器件自动检测与应用

王红彬¹, 王伟伟¹, 杨松翰², 朱义杰^{1,2}, 孙毅¹, 邹宜桢², 成建宏^{1,2}

(1. 贵州航天计量测试技术研究所, 贵阳 550009; 2. 贵州省基础零部件及装备质量检测与评价全省重点实验室, 贵阳 550009)

摘要: 针对传统片式电子元器件人工检测效率低、误检率高等问题, 提出了一种基于互相关模板匹配算法的片式电子元器件自动检测方法。该系统利用互相关模板匹配算法, 并结合四轴机械手视觉引导和底拍二次定位技术, 实现了元器件的高效识别与精准抓取, 并创新性地开发了旋转中心标定算法, 有效补偿真空吸嘴同轴度误差。系统可兼容片式钽电容、0402封装瓷介电容器及SOD-323表贴二极管等器件, 达到0.008 5 mm的定位精度。经实验验证, 单次识别100只元器件耗时仅68 ms, 正反面及极性识别准确率达100%。旋转中心标定使同轴度误差从0.4 mm降至0.008 mm, 器件损伤率和抛料率分别控制在0.01%与0.02%, 放料成功率为99.98%。相较传统人工检测, 该系统检测效率提升5倍以上, 为电子元器件自动检测提供了高精度、高可靠性的技术解决方案, 推动了机器视觉在工业检测领域的应用创新。

关键词: 片式元器件; 机器视觉; 图像处理技术; 相机标定; 定位抓取; 互相关模板匹配算法
中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Automatic Detection and Application of Chip Electronic Components Based on Normalized Cross-Correlation Algorithm

WANG Hongbin¹, WANG Weiwei¹, YANG Songhan², ZHU Yijie^{1,2}, SUN Yi¹,
ZOU Yizhen², CHENG Jianhong^{1,2}

(1. Institute of Guizhou Aerospace Measuring and Testing Technology, Guiyang 550009, China; 2. Guizhou Provincial Key Laboratory for Basic Components and Equipment Quality Inspection and Evaluation, Guiyang 550009, China)

Abstract: To address the issues of low efficiency and high error rate associated with traditional manual inspection methods for chip electronic components, this paper proposes an automatic detection method and system based on the normalized cross-correlation algorithm. The proposed system integrates the normalized cross-correlation algorithm with a vision-guided four-axis robotic arm and a secondary bottom-view positioning technique to achieve efficient recognition and precise grasping of components. Additionally, an innovative rotational center calibration algorithm is developed to effectively compensate for coaxiality errors in vacuum nozzles. The system is compatible with various types of electronic components, including chip tantalum capacitors, ceramic capacitors in 0402 packages, and SOD-323 surface-mounted diodes, achieving a positioning accuracy of 0.008 5 mm. Experimental results demonstrate that identifying 100

components takes only 68 ms, with a 100% accuracy rate for orientation and polarity recognition. The rotational center calibration reduces coaxiality errors from 0.4 mm to 0.008 mm, component damage and rejection rates are reduced to 0.01% and 0.02%, respectively, and the successful placement rate reaches 99.98%. Compared with the traditional manual inspection, the system increases detection efficiency by over five times, providing a high-precision and high-reliability technical solution for automatic inspection of electronic components and significantly advancing the application of machine vision technology in industrial inspection.

Key words: chip components; machine vision; image processing technology; camera calibration; positioning grabbing; normalized cross-correlation algorithm

引言

片式电子元器件作为现代工业领域中应用最为广泛且不可或缺的基础元件之一,凭借其出色的密封性、微小的体积、稳定的电性能、高度的可靠性、长久的寿命、较高的电容量以及卓越的存储性能,在航天、航空、电子、船舶及通讯等多个领域,尤其是在有严格可靠性要求的军用电子设备中^[1]发挥着举足轻重的作用。这些领域对片式电子元器件的性能和质量要求极高。因此,在使用之前对其进行全面且严格的可靠性测试显得尤为重要。

然而,传统的元器件可靠性测试方法主要依赖于人工操作,其过程往往包括通过肉眼观察元器件外观、利用特制夹具对正面朝上的元器件进行抓取以及将其置于测试治具上进行检测。这种方法不仅劳动强度大、效率低,而且在对表面光滑、体积微小的片式元器件进行检测时,由于视觉疲劳和操作误差,容易导致漏检、元器件损伤或错误放置等问题,从而给测试结果带来不确定性。更为关键的是,这一过程缺乏统一、量化的标准,使得检测结果在很大程度上依赖于操作者的主观判断,难以满足对高精度、高可靠性检测的要求。

随着自动化技术和机器视觉技术的不断进步,电子元器件的自动化检测已成为一种不可逆转的发展趋势。现有研究中,如何在复杂光照和动态背景下提取鲁棒且区分度高的图像特征,如何构建精确的图像坐标与机械手操作坐标之间的映射模型,以及如何优化模板匹配与定位算法,以实现微小元器件的高效识别和准确抓取,已成为亟待解决的问题^[2-3]。上述问题不仅涉及图像处理、模式识别和机器人控制等多学科交叉的理论挑战,同时也对实际系统的稳定性和可靠性提出了新的技术要求。在民用检测领域,虽然采用螺旋振动和移动模组的自动化测试方法可实现大批量检测^[4-6],但其高损伤率和抛料率依然制约着系统的应用^[7-8];而在军用检测中,由于检测批次较小,传统人工检测依然占据主导地位。因此,开发一种既能替代传统人工检测、降低漏检和误检风险,又能兼顾高效自动化操作的新型检测方法,不仅对于提升元器件检测效率具有重要意义,也可为智能制造领域提供新的理论依据和应用挑战。

基于此,本文针对片式电子元器件自动检测现状,结合电子元器件特有属性,创新性地提出了一种基于互相关模板匹配(Normalized cross-correlation, NCC)算法的片式电子元器件自动检测方法。该方法通过采集元器件图像并进行预处理,建立像素坐标与机械手坐标映射机制,构建片式元器件模板图像,研究视觉定位算法,引入四轴机械手、柔性振动盘等硬件,采用视觉引导四轴机械手,结合底拍二次定位模块,实现器件的精确定位和自动抓取。同时,为进一步提升抓取精度,降低真空吸嘴装配过程引入的同轴度误差,开发了真空吸嘴旋转中心标定算法。基于所提检测方法,开发一套基于互相关模板匹配算法的片式电子元器件自动检测系统,该系统可实现从元器件识别到测试的全流程自动化,极大地提高了测试效率,消

除机械结构动作对器件的损伤风险,降低器件的损伤率和抛料率,充分实现机器视觉技术在片式电子元器件自动检测上的应用。不仅有望解决当前元器件可靠性测试中存在的问题,还为片式电子元器件的质量控制提供了强有力的技术支持,具有重要的理论和实际意义。

1 基于互相关模板匹配算法的片式电子元器件自动检测算法

1.1 片式电子元器件自动检测流程

片式电子元器件自动检测流程如图1所示。首先,采集片式电子元器件图像,对图像进行预处理,构建二值模板图像并将其旋转至水平方向。其次,基于互相关模板匹配算法,获取元器件图像坐标和偏转角度。此外,对系统进行 N 点标定,建立图像坐标与机械手坐标的映射机制,对真空吸嘴进行旋转中心标定,以获取真空吸嘴旋转角度与坐标偏差补偿机制,从而获取标定文件,根据标定文件,将图像坐标和偏转角度转换为机械手坐标和角度,即可引导机械手定位抓取。最终,设计并研制片式电子元器件全自动检测系统,从而实现片式电子元器件全自动检测。

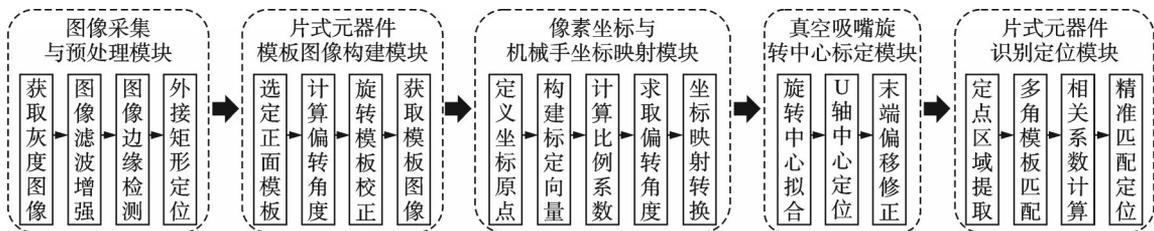


图1 片式电子元器件自动检测流程图

Fig.1 Flow chart of automatic detection of chip electronic components

1.2 片式电子元器件图像采集与预处理

外界光照环境的变化对采集到的图像质量会有较大影响,从而对图像识别的难度及图像识别效果也会产生较大影响^[9-10],本文使用的是海康工业相机,型号为MC-CE200-10GM,分辨率为 $5\,472 \times 3\,648$,最大帧率19.2帧/s,使用GigE数据接口,可采集到清晰的片式电容器图像。图2为图像采集与预处理过程示意图,具体的步骤如下:

(1)使用CCD工业相机采集片式元器件RGB图像,并转为灰度图像。
 (2)为消除噪声和杂点、平滑图像,对图像进行线性滤波。
 (3)增强图像对比度,有效保留片式元器件边缘轮廓及其他特征信息,弱化背景,经实验,卷积核 $\text{kernel}=3$ 时效果最好。

(4)使用Canny算子对增强后的图像进行边缘检测,获取片式元器件二值化图像。

(5)对二值化图像进行形态学运算,先进行腐蚀操作,去除白色细微杂点,随后进行膨胀操作,形成闭合轮廓。

(6)寻找所有片式元器件连通域;对于连通域的面积 S ,设置极大值 S_{\max} 和极小值 S_{\min} ,当连通域面积 $S \notin [S_{\min}, S_{\max}]$ 时,有可能是杂点、侧面朝上或反面朝上的电容,删除该连通域。同理,对于轮廓长度 C ,设置极大值 C_{\max} 和极小值 C_{\min} ,当连通域轮廓长度 $C \notin [C_{\min}, C_{\max}]$ 时,则该轮廓不闭合,应该剔除。

(7)绘制目标片式元器件可倾斜的最小外接矩形,根据外接矩形,可获取片式元器件的中心点坐标 $P_i(x_i, y_i)$ 和正方向偏转角度 $\alpha_i (i=1, 2, \dots, n, n$ 为正面朝上的片式元器件数量)。

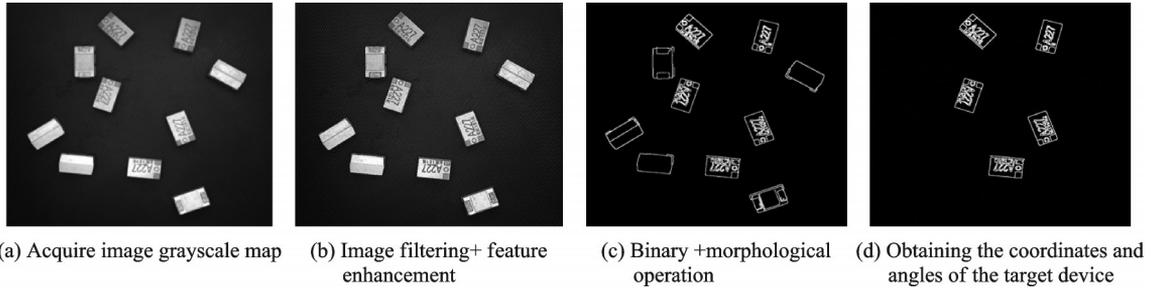


图2 图像采集与预处理

Fig.2 Image acquisition and preprocessing

1.3 像素坐标与机械手坐标映射机制

建立像素坐标系与机械手坐标系之间的映射机制^[11-13],可将任意像素坐标系下的坐标和角度转化为机械手坐标系下的坐标和角度。像素坐标系与机械手坐标系映射机制示意如图3(a)所示。

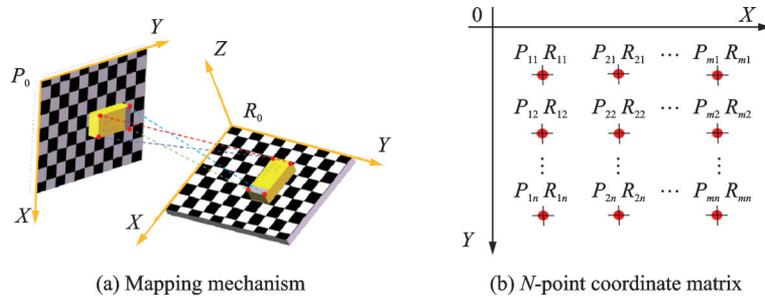


图3 像素坐标与机械手坐标映射机制

Fig.3 Mapping mechanism between pixel coordinates and manipulator coordinates

建立像素坐标系到机械手坐标系的转换关系,本文称像素坐标系为 P 坐标系,机械手坐标系为 R 坐标系,如图3(b)所示。转换流程如下:

(1) 设 P 坐标系的原点为 P_0 , R 坐标系的原点为 R_0 ;

(2) 设点 P_a 在 P 坐标系内的横坐标为 $P_{a \cdot x}$, 纵坐标为 $P_{a \cdot y}$, 设点 P_a 在 R 坐标系内的横坐标为 $R_{a \cdot x}$, 纵坐标为 $R_{a \cdot y}$ 。

(3) 计算两点 P_a 和 P_b 在 R 坐标系中的距离与 P_a 、 P_b 两点在 P 坐标系中的距离之间的比例系数 k , 以及两个坐标系之间的偏转角度 $\Delta\theta$ 。采用9点标定法对相机标定,求得 P 坐标系下的9个向量和 R 坐标系下的9个向量。计算过程为

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{12 \cdot x} = P_{2 \cdot x} - P_{1 \cdot x} \\ P_{12 \cdot y} = P_{2 \cdot y} - P_{1 \cdot y} \\ P_{23 \cdot x} = P_{3 \cdot x} - P_{2 \cdot x} \\ P_{23 \cdot y} = P_{3 \cdot y} - P_{2 \cdot y} \\ \vdots \\ R_{98 \cdot x} = R_{9 \cdot x} - R_{8 \cdot x} \\ R_{98 \cdot y} = R_{9 \cdot y} - R_{8 \cdot y} \\ R_{91 \cdot x} = R_{1 \cdot x} - R_{9 \cdot x} \\ R_{91 \cdot y} = R_{1 \cdot y} - R_{9 \cdot y} \end{array} \right. \quad (1)$$

(4)根据9个向量,求得比例系数 k_i 为

$$k_i = \frac{\sqrt{R_{ij} \cdot x^2 + R_{ij} \cdot y^2}}{\sqrt{P_{ij} \cdot x^2 + P_{ij} \cdot y^2}} \quad (2)$$

式中: $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}, j = (i + 1) \% 9$ 。取9个比例系数的平均值作为 k ,即

$$k = \frac{\sum_{i=1}^9 k_i}{9} \quad (3)$$

(5)由式(4)求得9个偏转角 θ_i 为

$$\theta_i = \theta_{ir} - \theta_{ip} \quad (4)$$

式中: θ_{ir} 为向量相对于 R 坐标系中 X 轴的偏转角, θ_{ip} 为向量相对于 P 坐标系中 X 轴的偏转角。 θ_{ir} 和 θ_{ip} 分别为

$$\begin{cases} \theta_{ir} = \arctan((R_j \cdot y - R_i \cdot y), (R_j \cdot x - R_i \cdot x)) \\ \theta_{ip} = \arctan((P_j \cdot y - P_i \cdot y), (P_j \cdot x - P_i \cdot x)) \end{cases} \quad (5)$$

求出 θ_i 后,取9个偏转角的平均值作为 $\Delta\theta$,即

$$\Delta\theta = \frac{\sum_{i=1}^9 \theta_i}{9} \quad (6)$$

至此,在像素坐标系任意取一点 P_t ,均可根据 k 和 θ 求得该点在 R 坐标系内的坐标,即

$$\begin{cases} R_t \cdot x = k \sqrt{P_{1t} \cdot x^2 + P_{1t} \cdot y^2} \cos(\theta_n + \theta) + R_1 \cdot x \\ R_t \cdot y = k \sqrt{P_{1t} \cdot x^2 + P_{1t} \cdot y^2} \sin(\theta_n + \theta) + R_1 \cdot y \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\theta_n = \arctan(P_{1t} \cdot y, P_{1t} \cdot x)$ 。

(6)如图3(b)所示为 $m \times n$ 个点对应的像素坐标和机械手坐标,根据 P_{11} 、 P_{1n} 、 P_{m1} 、 P_{mn} 四个对角点坐标可自动获取中间所有像素点坐标。

对于标定板 X 方向,像素坐标的步进偏差为

$$\begin{cases} X_x = \frac{(x_{1n} - x_{11}) + (x_{mn} - x_{m1})}{2(n - 1)} \\ X_y = \frac{(y_{1n} - y_{11}) + (y_{mn} - y_{m1})}{2(n - 1)} \end{cases} \quad (8)$$

对于标定板 Y 方向,像素坐标的步进偏差为

$$\begin{cases} Y_x = \frac{(x_{m1} - x_{11}) + (x_{mn} - x_{m1})}{2(m - 1)} \\ Y_y = \frac{(y_{m1} - y_{11}) + (y_{mn} - y_{m1})}{2(m - 1)} \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_{11} 、 x_{1n} 、 x_{m1} 以及 x_{mn} 分别代表 P_{11} 、 P_{1n} 、 P_{m1} 、 P_{mn} 四个对角点的横坐标, y_{11} 、 y_{1n} 、 y_{m1} 以及 y_{mn} 分别代表 P_{11} 、 P_{1n} 、 P_{m1} 、 P_{mn} 四个对角点的纵坐标。对于任意规格为 $m \times n$ 的标定板,可根据式(8,9),只需人为对准矩阵4个对角点,即可自动补充其余角点坐标,极大程度简化标定流程,避免人为对准所有角点导致误差积累,从而提高标定精度。

1.4 真空吸嘴旋转中心标定算法

视觉引导机械手抓取场景下,物料具有多种姿态,机械手的末端工具中心与真空吸嘴的旋转中心不重合,若真空吸嘴中心就是机械手执行末端法兰盘的中心,则无需进行旋转中心标定,仅需进行9点标定即可。目前研制的电子元器件自动检测装备,使用的真空吸嘴与执行末端法兰进行同心安装,经测量,同轴度误差约为0.4 mm,如图4所示,不满足小尺寸器件抓取精度要求,须对真空吸嘴进行旋转中心标定。

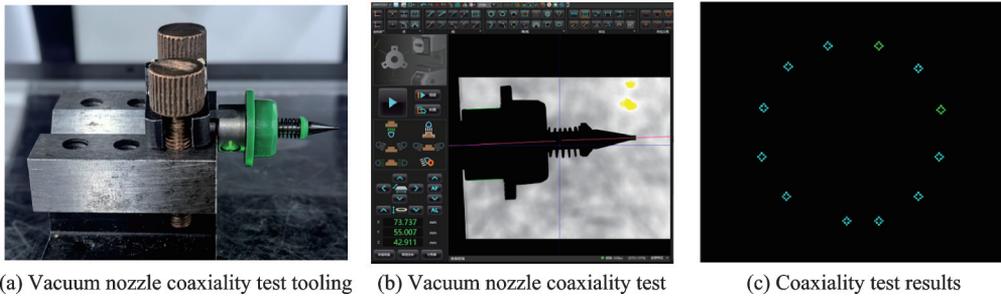


图4 真空吸嘴同轴度误差测试

Fig.4 Coaxiality error test of vacuum nozzle

(1) 机械手旋转中心坐标拟合

对机械手进行旋转中心标定的前提是完成机械手手眼标定(9点标定)^[14-15],如图5(a)所示,通过旋转机械手法兰盘(U轴中心)的中心旋转出3个位置,通过3个特征点B,计算出经过特征点的一个圆,其圆心是法兰盘中心(U轴中心)在相机坐标系中的像素坐标。根据1.3节中的标定关系矩阵homMat2D,计算圆心的机械坐标。如图5(b)所示,三点的中心只是在像素坐标系里U轴的中心,当将像素转为机械坐标时,矩阵homMat2D里的信息就是法兰盘中心到特征点的关系,从而计算法兰盘到特征点机械坐标的距离。

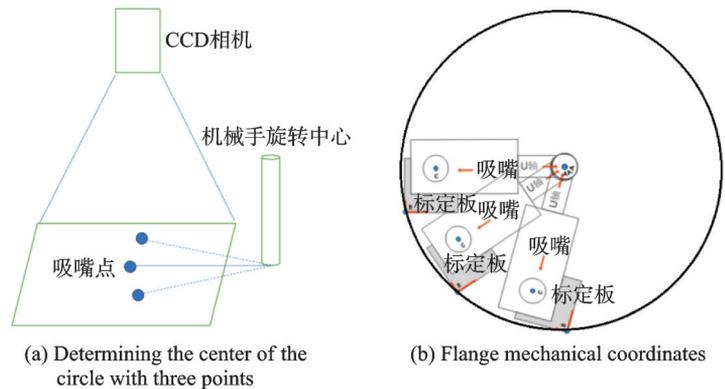


图5 旋转中心标定示意图

Fig.5 Schematic diagram of rotation center calibration

(2) 计算机械手U轴旋转中心位置

如图6所示,计算机械手U轴中心位置(旋转中心)可通过以下几个步骤实现。

- ① 计算两点之间的距离: d 为 $A(x_1, y_1)$ 和 $B(x_2, y_2)$ 之间的距离;
- ② 计算圆的半径: 使用公式 $R = \frac{d}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$ 计算圆的半径, 其中 θ 需要转换为弧度来使用;
- ③ 计算中点: 中点 D 的坐标是 A 和 B 坐标的平均值;
- ④ 计算垂直于 AB 的单位向量: 找到与 AB 垂直的单位向量;

⑤计算圆心的距离:中心到圆心的

距离为 $\sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$;

⑥计算圆心的两个可能坐标:根据单位向量方向,计算圆心可能的位置。

(3)计算机械手执行末端偏移量

最重要的一步,计算机械手执行末端偏移量,通过计算机械手U轴中心位置的机械坐标,法兰盘中心(U轴中心)机械坐标减去3点定圆的圆心机械坐标,求出固定偏差值,该固定偏差就是法兰盘到特征点机械坐标的距离,然后使用该偏差值更新第一次标定时的4组像素与机械坐标数据,重新标定即可。

以下是计算机械手执行末端偏移量的步骤:已知旋转中心坐标和旋转半径R

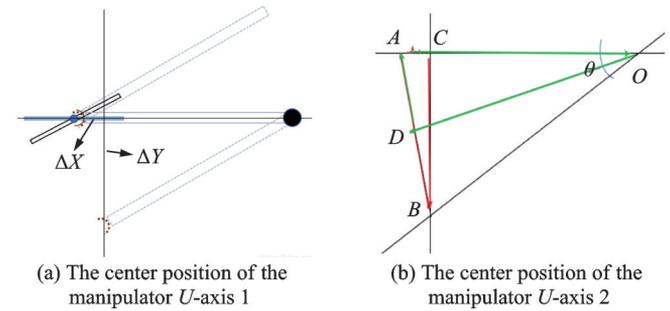


图6 机械手U轴中心位置示意图

Fig.6 Schematic diagram of the center position of the manipulator U-axis

$$R = L_{OB} = L_{OA} \tag{10}$$

假设

$$\Delta X = L_{AC} \tag{11}$$

$$\Delta Y = L_{BC} \tag{12}$$

由于 $\triangle BAC$ 和 $\triangle OAB$ 为相似三角形,可根据角度 θ 计算出偏移量 ΔX 和 ΔY 。

$$\Delta X = 2R \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \tag{13}$$

1.5 片式元器件模板图像构建

如图7所示,构建模板采用基于尺度不变特征变换(Scale invariant feature transform, SIFT)进行特征提取^[16],构建模板具体分为两个步骤:

(1)在CCD工业相机采集的片式元器件原图上,任意框选一只正面朝上的片式元器件作为模板图像,使用图像采集与预处理中的步骤获取片式元器件正方向偏转角度 θ 。

(2)旋转模板。为降低后期模板匹配的计算量,须将模板图像旋转至水平方向。若矩形框选的片式元器件正方向偏转角度为 θ ,经分析,可将模板图像分别旋转 $(90^\circ - \theta)$ 、 $(180^\circ - \theta)$ 、 $(270^\circ - \theta)$ 、 $(360^\circ - \theta)$,选择旋转至水平方向的片式元器件图像即可。

1.6 片式元器件视觉识别定位算法

构建完模板图像之后,需要获取定点匹配区域,可降低匹配次数,提高识别效率^[17]。使用CCD工业相机采集片式元器件源图像^[18-19],使用图像采集与预处理步骤获取每个正面朝上的片式元器件的中心点坐标 $P_i(x_i, y_i)$ 。以点 $P_i(x_i, y_i)$ 为中心点,以构建好的模板图像的对角线长度为边长,可框选出每个正面朝上片式元器件的目标匹配区域 Q_i 。

多角度定点模板匹配,即初步模板匹配,由前序步骤获得的每个片式元器件的定点匹配区域 Q_i ,假设某个定点匹配区域 Q_i 中片式元器件的正方向偏转角度为 α ,经分析,将水平方向的模板图像分别旋转 α 、 $(90^\circ + \alpha)$ 、 $(180^\circ + \alpha)$ 、 $(270^\circ + \alpha)$ 后,得到4个不同偏转角度的匹配模板 $T_r(r=1, 2, 3, 4)$,使用互相关模板匹配算法将 T_r 与匹配区域 Q_i 进行匹配^[20-21],可获得4个匹配分数 $G_r(r=1, 2, 3, 4)$,取相关系数最大时模板图像的旋转角度,即为该目标元器件的初步中心点坐标和偏转角度 θ_r 。

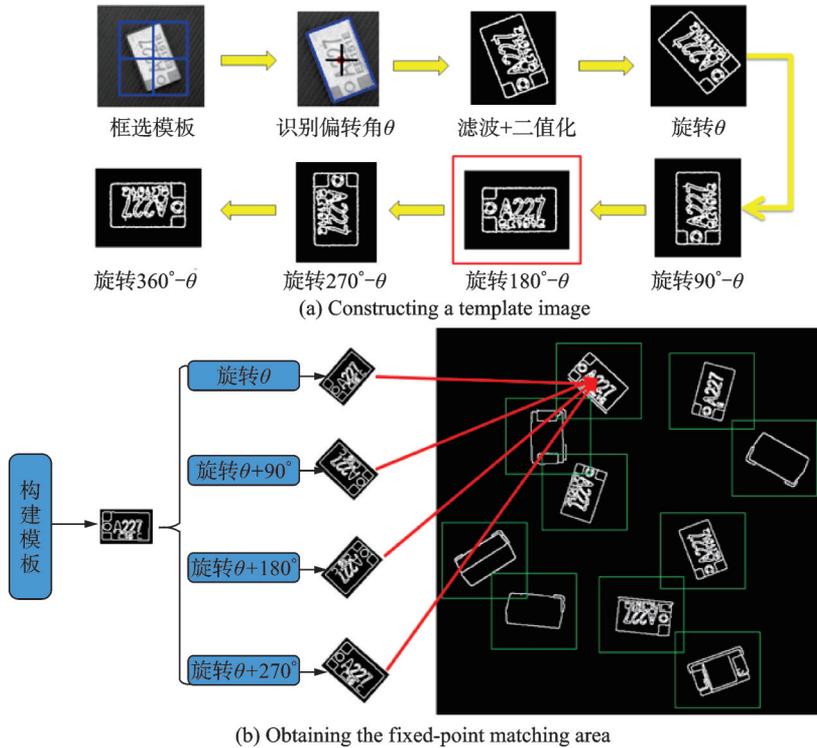


图7 构建模板图像流程图

Fig.7 Flow chart of constructing a template image

$R(x, y)$ 表示互相关模板匹配算法得到的匹配相关系数,其计算公式为

$$R(x, y) = \frac{K(x, y)}{W(x, y) \cdot H(x, y)} \tag{14}$$

其中 $K(x, y)$ 、 $W(x, y)$ 、 $H(x, y)$ 的计算分别为

$$K(x, y) = \frac{1}{w \cdot h} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h (T_{x,y}(i, j) - T_{x,y})(I(i, j) - I) \tag{15}$$

$$W(x, y) = \sqrt{\frac{1}{w \cdot h} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h (T_{x,y}(i, j) - \bar{T}_{x,y})^2} \tag{16}$$

$$H(x, y) = \sqrt{\frac{1}{w \cdot h} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h (I(i, j) - \bar{I})^2} \tag{17}$$

式中: $w \cdot h$ 为模板图像中像素点的数量, $K(x, y)$ 表示模板图像灰度值的方差, $W(x, y)$ 表示模板图像的平均灰度值, $H(x, y)$ 为在点 (x, y) 位置上与模板重合区域的灰度平均值。

最后,结合初步匹配结果,对图像执行精准模板匹配:以特定角度步长 $\Delta\theta$ 对 θ 进行搜索匹配,当相关系数最大时,对应的偏转角与坐标即为最优抓取位置,从而实现片式元器件的高精度定位。基于互相关模板匹配算法,多种规格片式电子元器件(包括钽电容器、瓷介电容器及SOD表贴器件等)的视觉识别定位效果如图8所示。

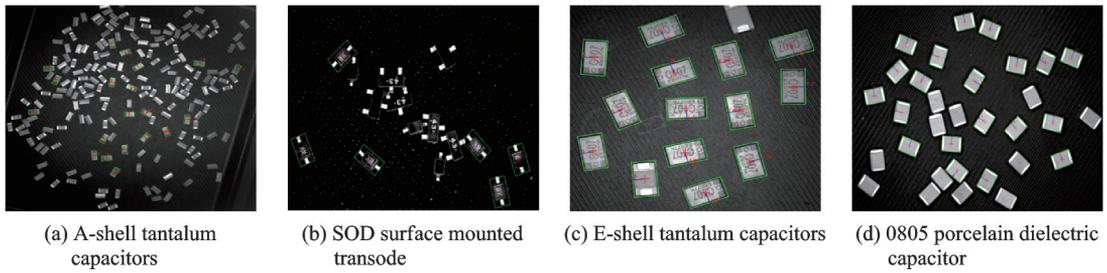


图8 不同规格片式元器件图像识别效果

Fig.8 Image recognition effect of chip components with different specifications

2 结果与分析

2.1 实验环境搭建

基于 Windows 10 64 位操作系统,采用 Qt5.14.2+MSVC2017 64bit 编译器开发上位机软件,并使用 OpenCV4.5.0 计算机视觉库开发视觉定位算法。系统对海康工业相机 SDK(Software development kit)进行二次开发,实现 CCD 相机控制功能。硬件方面,使用纳博特(iNexBot)机械手结合真空吸嘴实现电子元器件的抓取,同时配合 CCD 相机与 90°直角棱镜进行卧式装配,以实现对抓取的电子元器件的二次精准定位。上位机软件与机械手之间通过 TCP/IP 通讯协议实现实时数据交互与控制。

片式元器件全自动检测系统(以下简称 CCADS 系统)整体框架如图 9(a)所示。系统主要由上位机软件、机械臂平台、现场控制平台、图像识别软件、机械手、机械手控制器、CCD 工业相机、光源、柔性振动盘、测试治具及测试设备等部分组成。其中,上位机软件负责执行电子元器件检测的总体流程控制,包括测试方案的执行、通信协议的管理、人机交互界面的实现、数据采集与处理及仪器设备的程控管理等任务。机械臂平台根据上位机发出的控制指令,完成待测元器件的上下料、抓取与分拣以及其他相关 I/O 控制操作。图像识别软件通过相机实时采集电子元器件图像信息,并基于视觉定位算法精确获取元器件的坐标信息,实现对元器件正反面、正负极的自动判别,如图 9(b,c)所示。

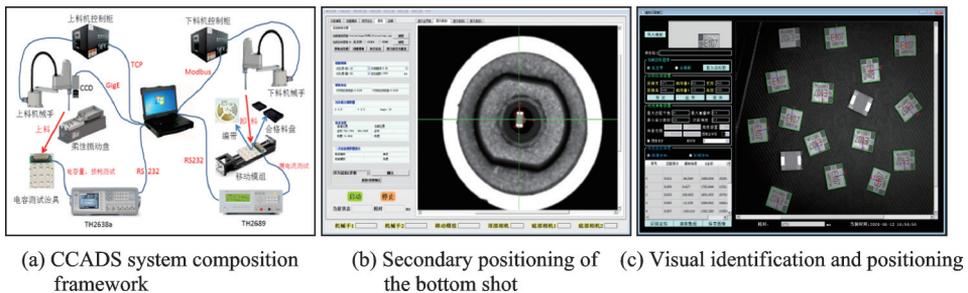


图9 CCADS系统结构与视觉检测示意图

Fig.9 Schematic diagram of CCADS system structure and visual inspection

系统实际运行过程如图 10 所示,待测元器件首先放置于柔性振动盘内,相机拍摄并采集元器件图像,随后图像识别软件基于视觉定位算法完成元器件的初步定位,指导机械手进行抓取并移动至底部定位装置上方,再次通过视觉算法实现元器件的二次精准定位,最终完成对电子元器件的全自动检测任务。

2.2 算法先进性分析

为验证本文视觉定位算法匹配分数(相关系数)、定位精度、识别速度、对片式元器件的正反面识别准确率、正负极性识别准确率,使用本文视觉定位算法与OpenCV提供的3种视觉匹配定位算法(平方差匹配(TM_SQDIFF)、相关匹配(TM_CCORR)、标准相关匹配(TM_CCOEFF))进行对比。为验证旋转标定算法的有效性,对真空吸嘴标定前后的器件抛料率、器件损耗率和放料成功率进行比对。本文所使用相机为海康威视生产的黑白相机,型号为MVS-CE120-10GM,分辨率为 $5\,472\text{像素}\times 3\,548\text{像素}$,拍摄靶面尺寸为 $52\text{mm}\times 34\text{mm}$,单位像素精度为 $0.009\,14\text{mm}$,本文所有原图像均使用该相机采集。

首先,为验证各种定位算法的匹配分数,使用同一模板图像 T ,对目标图像进行匹配定位,得到匹配分数(相关系数),统计结果如表1所示。由表1可知,本文视觉定位算法对于某电子元器件的匹配分数平均值为 0.961 ,均高于TM_SQDIFF、TM_CCORR、TM_CCOEFF定位算法,证明本文算法对电子元器件识别效果更好。

为验证本文定位算法定位精度,采集某型号元器件图像,使用同一模板图像 T 、同一标定文件,分别使用OpenCV中的3种定位算法与本文定位算法对元器件视觉定位抓取,机械手抓取器件后移动到底拍定位装置上方,对抓取器件进行二次定位,计算坐标偏移量,通过坐标偏移量来评价视觉算法的定位精度。表2为定位精度统计数据,与OpenCV定位算法相比,本文定位算法定位精度较高,平均定位精度为 $0.008\,5\text{mm}$,能满足常规片式电子元器件的视觉定位抓取精度要求。

为验证本文视觉定位算法对片式元器件的识别耗时、正反面识别准确率、正负极识别准确率,分别

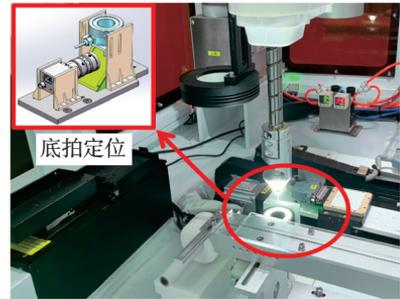


图10 CCADS系统实物图

Fig.10 Physical diagram of the CCADS system

表1 OpenCV与本文视觉算法匹配分数对比
Table 1 Comparison of matching scores between OpenCV and the proposed visual algorithm

样本编号	TM_SQDIFF	TM_CCORR	TM_CCOEFF	本文算法
样本1	0.683	0.763	0.852	0.951
样本2	0.694	0.754	0.861	0.982
样本3	0.715	0.773	0.852	0.973
样本4	0.673	0.765	0.840	0.957
样本5	0.682	0.783	0.863	0.956
样本6	0.703	0.792	0.882	0.947
相关系数平均值	0.692	0.772	0.858	0.961

表2 OpenCV与本文视觉算法定位精度对比

Table 2 Comparison of positioning accuracy between OpenCV and the proposed vision algorithm

样本编号	TM_SQDIFF		TM_CCORR		TM_CCOEFF		本文算法	
	X坐标	Y坐标	X坐标	Y坐标	X坐标	Y坐标	X坐标	Y坐标
样本1	0.021	0.019	0.025	0.020	0.016	0.012	0.009	0.007
样本2	0.022	0.018	0.024	0.021	0.016	0.014	0.010	0.007
样本3	0.021	0.018	0.024	0.021	0.017	0.012	0.009	0.009
样本4	0.020	0.019	0.026	0.023	0.015	0.013	0.010	0.008
样本5	0.021	0.018	0.025	0.020	0.016	0.013	0.009	0.009
样本6	0.023	0.017	0.026	0.021	0.016	0.014	0.008	0.008
平均定位精度/mm	0.021	0.018	0.025	0.021	0.016	0.013	0.009	0.008

采用 A、W 型号片式钽电容各 100 只,0603、0805 封装尺寸的瓷介电容器各 100 只,SOD-323、SOD-523 两种型号的表贴二极管各 100 只,测试统计结果如表 3 所示。由表 3 可知,本文定位算法对 6 种型号电子元器件的平均耗时为 68 ms,识别耗时远低于 3 种 OpenCV 视觉定位算法,而对于电子元器件正反面识别准确率和正负极识别准确率,所有算法均为 100%。

表 3 OpenCV 与本文视觉算法识别耗时、准确率对比

Table 3 Recognition time and accuracy comparison between OpenCV and the proposed visual algorithm

器件类型		片式钽电容		瓷介电容器		表贴二极管	
		A	W	0603	0805	SOD-323	SOD-523
识别耗时/ms	TM_SQDIFF	356	365	389	325	359	372
	TM_CCORR	425	456	468	462	458	495
	TM_CCOEFF	125	123	135	156	154	149
	本文算法	69	70	54	59	80	77
正反面识别准确率/%	TM_SQDIFF	100	100			100	100
	TM_CCORR	100	100			100	100
	TM_CCOEFF	100	100			100	100
	本文算法	100	100			100	100
正负极识别准确率/%	TM_SQDIFF	100	100			100	100
	TM_CCORR	100	100			100	100
	TM_CCOEFF	100	100			100	100
	本文算法	100	100			100	100

最后,为验证旋转标定算法效果,使用系统抓取 3 种 0603 封装类型片式元器件样本各 100 只,每个样本重复抓取 100 次,累计测试数量 10 000 次,统计器件抛料数量、器件损伤数量及放料成功数量(非抛料数量),如表 4 所示。由表 4 可知,对真空吸嘴进行旋转标定后,系统对器件的损伤率由 0.04% 降低至 0.01%,器件抛料率由 0.4% 降低至 0.02%,放料成功率由 99.80% 提高至 99.98%。

表 4 旋转中心标定前后抓取器件结果对比

Table 4 Comparison of grasping device results before and after rotation center calibration

样本编号	旋转标定算法	样本数量	统计测试数量	损伤数量	器件抛料数量	器件损伤率/%	器件抛料率/%	放料成功率/%
样本 1	旋转标定前	100	10 000	2	20	0.02	0.2	99.80
	旋转标定后	100	10 000	1	2	0.01	0.02	99.98
样本 2	旋转标定前	100	10 000	4	40	0.04	0.4	99.60
	旋转标定后	100	10 000	1	2	0.01	0.02	99.98
样本 3	旋转标定前	100	10 000	3	30	0.03	0.3	99.70
	旋转标定后	100	10 000	0	2	0.00	0.02	99.98

2.3 系统有效性分析

为了验证 CCADS 系统的有效性,首先,采用 120 个片式元器件样品,其中含 115 只 3 个质量特性(电容量、损耗角正切和漏电流)均合格的合格品和 5 只漏电流超差的不合格品,对元器件进行编号。然后,采用与人工检测作对比的方式评价 CCADS 系统是否有效,人工和 CCADS 系统均采用电容测试仪

(TH2618B)检测电容量值和损耗角正切值质量特性,均采用漏电流测试仪(TH2689)检测漏电流质量特性。人工和CCADS系统检测结果如表5所示。

表5 检测结果统计

Table 5 Statistics of test results

检测方式	合格数/只			不合格数/只			检测耗时/min
	电容量	损耗角正切	漏电流	电容量	损耗角正切	漏电流	
人工	120	120	115	0	0	5	88
CCADS系统	120	120	115	0	0	5	17

由表5可知,CCADS样品库中任意一只片式元器件,其人工和CCADS系统检测结果均一致,这初步验证了CCADS系统的有效性。而人工和CCADS系统检测完CCADS样品库花费的时间分别为88 min和17 min,CCADS系统的检测效率是人工检测的5倍以上。表6为5只不合格品检测结果统计,将人工和CCADS系统检测出的电容量、损耗角正切、漏电流分别进行判限,合格用“Y”表示,不合格用“N”表示。

表6 不合格品检测结果统计

Table 6 Statistics of test results of unqualified products

器件编号	电容量值/ μF			损耗角正切			漏电流值/ μA		
	人工	CCADS	判限	人工	CCADS	判限	人工	CCADS	判限
10	21.804	21.851	Y/Y	0.035 9	0.035 9	Y/Y	114.519	122.487	N/N
11	21.060	21.094	Y/Y	0.029 5	0.029 7	Y/Y	161.876	158.015	N/N
32	21.898	21.955	Y/Y	0.027 9	0.028 6	Y/Y	57.709 5	60.316 0	N/N
103	21.433	21.467	Y/Y	0.026 0	0.026 5	Y/Y	405.573	387.102	N/N
119	21.849	21.879	Y/Y	0.038 9	0.039 1	Y/Y	924.328	965.014	N/N

为了更直观体现CCADS系统的有效性,绘制了人工和CCADS系统检测115只合格品得到的电容量、损耗角正切和漏电流结果对比,如图11所示,横坐标为片式元器件的编号,纵坐标分别为电容量值、损耗角正切值和漏电流值,正方形蓝色折线为人工检测结果,“×”型红色折线为CCADS系统检测结果。由图11可知,CCADS系统与人工检测结果吻合,由此说明,CCADS系统能够准确有效地对片式元器件进行全自动检测,能够准确有效地检测片式元器件的质量特性,扩展后可兼容所有片式元器件。

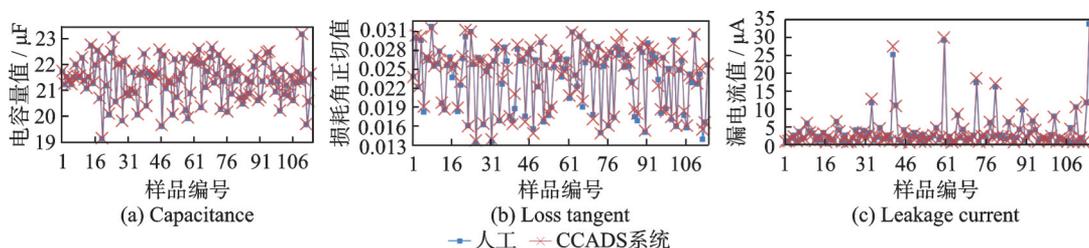


图11 人工和CCADS系统检测结果对比

Fig.11 Comparison of detection results between manual and CCADS system

3 结束语

提出了一种基于互相关模板匹配算法的片式电子元器件自动检测方法,该方法通过互相关模板匹配算法结合四轴机械手视觉引导和底拍二次定位技术,实现了对多种封装元器件的精准识别与抓取,定位精度达0.008 5 mm,单次识别100只元器件仅需68 ms,正反面及极性识别准确率均达100%。针对机械手同轴度误差问题,创新设计的旋转中心标定算法将误差从0.4 mm降至0.008 mm,显著降低器件损伤率(0.01%)和抛料率(0.02%),放料成功率达99.98%。实验验证的CCADS系统较人工检测效率提升5倍以上,支持片式钽电容、0402封装瓷介电容器及SOD-323二极管等9种以上器件的兼容检测。目前,本文提出的片式元器件自动检测技术主要应用于静态抓取场景,未来可通过动态跟踪算法与产线环形输送系统集成,进一步推动检测全流程无人化及智慧工厂建设。

参考文献:

- [1] 张林怡. 军用电子元器件国产化质量保证研究[J]. 电子质量, 2024(3): 96-100.
ZHANG Linyi. Research on quality assurance for military electronic components localization[J]. Quality Management, 2024 (3): 96-100.
- [2] 施航杰. 基于机器视觉引导的电容高精度装配系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(5): 71-76.
SHI Hangjie. Research on high precision capacitor assembly system based on machine vision guidance[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(5): 71-76.
- [3] 艾羽丰, 郭继昌, 安冠华, 等. 图像增强对低光照场景语义分割影响研究[J]. 数据采集与处理, 2023, 38(4): 959-977.
AI Yufeng, GUO Jichang, AN Guanhua, et al. Effect of image enhancement on semantic segmentation of low-light scene[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2023, 38(4): 959-977.
- [4] 陈飞, 王飞, 雷雷. 基于机器视觉的三维运动装置定位抓取系统[J]. 制造业自动化, 2017, 39(8): 22-25.
CHEN Fei, WANG Fei, LIU Lei. A positioning and grabbing system by three-dimensional motion device based on machine vision[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(8): 22-25.
- [5] 夏广远. 工业机器人抓取中的视觉定位方法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
XIA Guangyuan. Research on visual positioning method in industrial robot grasping[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2021.
- [6] 杨人豪. 工业机器人视觉定位抓取技术的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
YANG Renhao. Research on visual positioning and grabbing technology of industrial robot[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [7] 贾阳光, 韩迪, 常海峰, 等. 军用电子元器件质量等级的统计分析研究[J]. 新技术新工艺, 2023(11): 76-80.
JIA Yangguang, HAN Di, CHANG Haifeng, et al. Statistical analysis and research on quality grade of military electronic components[J]. New Technology and New Process, 2023(11): 76-80.
- [8] 关明宇, 黄茜, 胡志辉, 等. 基于图像处理的轮辐角度测量[J]. 数据采集与处理, 2019, 34(1): 189-194.
GUAN Mingyu, HUANG Qian, HU Zhihui, et al. Spoke-angle measurement with image processing[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2019, 34(1): 189-194.
- [9] GOLLAPUDI S. Learn computer vision using OpenCV[M]. New York: Berkeley, 2019.
- [10] XU Jiale, MEI Xiaoyu, CHEN Yunfan, et al. An effective premature ventricular contraction detection algorithm based on adaptive template matching and characteristic recognition[J]. Signal, Image and Video Processing, 2024, 18(3): 2811-2818.
- [11] 齐敏, 牛贝乐. 三角环工业标志符快速高精度定位算法[J]. 数据采集与处理, 2021, 36(4): 789-798.
QI Min, NIU Beile. Fast and high accuracy positioning algorithm of industrial triangular ring mark[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2021, 36(4): 789-798.
- [12] 张家宁, 刘星龙, 支勇超, 等. 基于机器视觉的工件识别和定位系统设计[J]. 科学技术创新, 2024(4): 64-67.
ZHANG Jianing, LIU Xinglong, ZHI Yongchao, et al. Design of workpiece recognition and positioning system based on machine vision[J]. Science and Technology Innovation, 2024(4): 64-67.

- [13] 马红卫. 基于机器视觉的工业机器人定位系统研究[J]. 制造业自动化, 2020, 42(3): 58-62.
MA Hongwei. Research on positioning system of industrial based on machine vision[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(3): 58-62.
- [14] YU B, ZHANG Y, LIU W, et al. A robotic spindle end high-accuracy positioning method based on eye-in-hand vision active correction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 5024011.
- [15] 姜广文, 晁志超, 伏思华. 基于可控旋转的相机高精度标定技术[J]. 光学学报, 2020, 30(5): 1308-1314.
JIANG Guangwen, CHAO Zhichao, FU Sihua. High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 30(5): 1308-1314.
- [16] 戴琨, 祁宇明, 董瑞佳. 基于模板匹配的法兰盘位姿估计研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(8): 157-161.
- [17] WAN J, ZHANG X, YANG W, et al. A calibration method for defocused cameras based on defocus blur estimation[J]. Measurement, 2024, 224: 115045.
- [18] GUO J, CHEN H, LIU B, et al. A system and method for person identification and positioning incorporating object edge detection and scale-invariant feature transformation[J]. Measurement, 2023, 223: 113759.
- [19] REAL-MORENO O, RODRÍGUEZ-QUINONEZ J C, SERGIYENKO O, et al. Fast template match algorithm for spatial object detection using a stereo vision system for autonomous navigation[J]. Measurement, 2023, 220: 113299.
- [20] NIU Z, REN Y, LIN J, et al. An accurate and robust visual-inertial positioning method[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(4): 045902.
- [21] JIANG J, ZHENG Q, LIANG Y, et al. RETRACTED ARTICLE: Improve students' fast reading ability based on visual positioning technology[J]. Journal of Autism and Developmental Disorders, 2024, 54(4): 1620.

作者简介:



王红彬(1997-),男,硕士研究生,工程师,研究方向:计算机视觉、智能检测装备研发,E-mail:htcs3422@126.com。



王伟伟(1987-),男,硕士研究生,研究方向:专用测试仪器研制、图像识别与工业机器人控制技术。



杨松翰(1998-),男,硕士研究生,研究方向:无人机电磁信号识别、工业机器人故障诊断。



朱义杰(1989-),男,硕士研究生,研究方向:密码测评、网络安全试验、网电空间安全。



孙毅(1994-),男,硕士研究生,研究方向:自动化、软件验证。



邹宜楨(1997-),男,硕士研究生,工程师,研究方向:智能检测装备研发。



成建宏(1992-),通信作者,男,博士,高级工程师,研究方向:计算机视觉、工业缺陷检测等,E-mail: jianhong_cheng@csu.edu.cn。

(编辑:夏道家)