

基于机器视觉过曝特征的产品姿态检测方法

郭元兴, 宋真, 杨光, 赵鹏, 廖熹, 蒲君豪

(中国电子科技集团公司 第三十研究所, 成都 610041)

摘要: 为实现通信模块产品在自动化测试过程中放置姿态偏差的准确检测, 提出一种基于机器视觉过曝特征的检测方法; 该方法通过调控工业相机的曝光参数建立特殊检测条件, 当产品姿态正确时, 通信模块表面图像处于过曝状态, 经二值化处理后黑色像素点个数全为零; 当产品姿态存在偏差时, 通信模块表面图像处于正常曝光状态, 经相同图像算法处理后, 黑色像素点数量远大于零; 通过实时对比两种状态图像黑色像素点的差异, 可精准识别产品姿态偏差; 该方法利用过曝成像特征构建了具有显著区别的检测判据, 经实验和实际环境测试验证表明, 能准确检测出产品在自动化测试过程中的姿态偏差, 可有效提升自动化测试线运行的稳定性。

关键词: 机器视觉; 过曝; 姿态偏差; 像素点统计; 自动化测试

Detection Method for Product Poses Based on Machine Vision Overexposure Characteristics

GUO Yuanxing, SONG Zhen, YANG Guang, ZHAO Peng, LIAO Xi, PU Junhao

(No. 30 Institute, CETC, Chengdu 610041, China)

Abstract: To achieve the accurate detection of placement pose deviation in communication modules during automated testing process, a detection method based on machine vision and overexposure features is proposed, which regulates the exposure parameters of an industrial camera to establish special detection conditions. If the product posture is correct, the surface image of the communication module is in an overexposed state, and the number of black pixels is zero after binarization processing; If the product is misaligned, the surface image is in a normally exposed state, and the number of black pixels is significantly greater than zero after identical image processing. By comparing the difference in the number of black pixels between the two states in real time, the pose deviation of products can be precisely identified. This method utilizes the overexposure imaging characteristics to construct a detection criterion with a significant distinction. In both laboratory and actual environments, experimental validation demonstrates that this method can accurately detect pose deviation of products during automated testing, effectively improving the stability of automated testing line.

Keywords: machine vision; overexposure; pose deviation; pixel statistics; automated testing

0 引言

通信模块作为通信系统中的关键组件, 在批量生产自动化测试过程中, 必须确保通信模块接口与测试设备探针的精准对位, 从而实现各项功能和性能指标的全面测试。然而, 在自动化测试过程中, 因定位方法存在误差, 易导致通信模块的放置位置出现偏差, 这种放置偏差不仅导致探针无法接触到被测通信模块, 更严重的是在气缸压紧过程中, 会导致通信模块变形或断裂。尤其是对于一些高价值、生产周期较长的通信模块, 会大幅

增加制造成本, 延长交付周期, 并可能引发批次性质量风险。

为解决这一问题, 部分自动化测试设备在设计初期就引入姿态检测工序, 放置后同步检测模块的姿态^[1]。现有的姿态检测方法包括基于线结构光和机器视觉研发的钢丝捆扎机 C 形钩姿态检测系统^[2], 通过提取线结构光在物体表面的特征光条, 并借由相机标定和光平面标定完成姿态检测; 基于双目视觉中二维图像之间的空间位置转换关系, 实现对探针姿态的检测^[3]; 超声波测距^[4]、微波雷达测距^[5]、红外测距^[6]、激光测距^[7]等基

收稿日期: 2025-08-29; 修回日期: 2025-10-28。

作者简介: 郭元兴(1980-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 郭元兴, 宋真, 杨光, 等. 基于机器视觉过曝特征的产品姿态检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(12): 82-88.

于测距的方法, 可以通过测量被测物体个边角的高度变化及侧面相对于测距仪的距离变化, 判断被测物体是否存在倾斜或偏移; 机器视觉模板匹配方法通过提前设置基准模板, 利用工业相机采集被测物体的图像, 在实际图像中搜索与基准模板具有最高相似度的位置区域完成被测物体定位^[8], 从而判断被测物体是否存在姿态偏差。

本文设计并实现了一种基于视觉过曝特征的通信模块产品姿态检测方法, 仅需要一台 2D 工业相机, 就可以实现通信模块自动化测试过程中姿态的判断。该方法通过调控工业相机的曝光参数, 满足在产品姿态正确时, 工业相机采集到的图像处于过曝状态; 在产品姿态存在偏差时, 工业相机处于正常曝光状态。两种情况下的图像经相同图像算法处理后, 具有显著区别, 从而实现对通信模块位置偏差的准确检测。实验结果和实际环境测试验证表明, 该方法检测准确, 稳定性强, 完全满足通信模块自动化测试的使用需求。

1 检测系统构成

不同种类的通信模块产品尽管在物理形态、接口及测试设备上存在差异, 但大部分通信模块的测试模式相似, 即采用探针与通信模块接口连接, 并采用气缸压紧, 将信号传输至测试设备, 完成功能和性能测试。如图 1 (a) 所示, 当产品正确放置时, 探针与被测产品接触良好。然而, 若产品放置偏差, 如图 1 (b) 所示, 探针无法完全接触被测产品, 更严重的是在气缸压紧时会导致被测产品变形或断裂, 此时需通过姿态检测及时发现并进行干预。

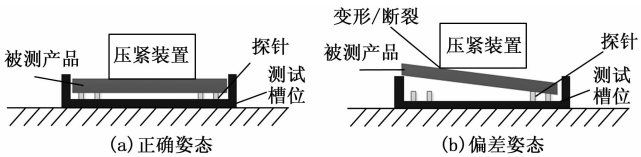


图 1 通信模块产品测试姿态说明

本文以某专用通信模块为研究对象, 针对其自动化测试流程中 8 个通信模块并行测试的特点, 设计了一套放置偏差检测系统。该系统能够实时检测 8 个通信模块的放置位置是否存在偏差。

该检测系统由硬件和软件两部分组成, 整体架构如图 2 所示。系统硬件主要包括工业相机、镜头、光源、测试设备和计算机。其中, 工业相机、镜头和光源用于采集通信模块的图像信息。工业相机采用张氏平面标定法^[9]进行标定, 并使光轴垂直于测试设备表面, 以确保图像采集的准确性; 镜头则根据被测模块的尺寸和测试需求选择合适的焦距和视场角; 考虑照射区域、被测通信模块表面状态以及光源明亮、稳定等需求^[10]选用环形光源提供高强度的正面光源, 提高被测通信产品表面

亮度。测试设备用于专用通信模块的功能和性能测试, 上面配有 8 个测试槽位, 每个槽位对应一个通信模块。测试设备通过探针与模块接口连接, 并配有压紧装置, 确保探针与接口接触良好。压紧装置可横向移动, 不会遮挡相机视野。计算机作为系统的核心控制单元, 通过千兆网线与工业相机连接, 实现对工业相机的控制和图像数据的传输。

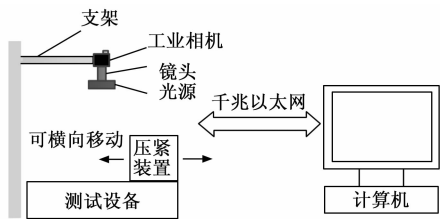


图 2 检测系统硬件结构图

系统软件运行于计算机上, 主要负责控制工业相机进行图像采集, 通过预设的算法检测通信模块是否存在放置偏差, 并根据检测结果控制测试流程, 例如触发偏差报警或启动二次纠偏功能。

2 检测方法分析

2.1 原理分析

在基于模板匹配的机器视觉检测方法中, 通常以正确姿态下的图像作为基准模板, 记录其图像信息。实际检测时, 系统会采集实时图像, 并通过模板匹配算法定位待测通信产品的图像信息^[11]。随后, 系统会对基准模板和实时图像中的图像信息进行差值计算, 并与预设阈值进行比较。若差值超过阈值, 则判定为姿态偏差。然而, 在实际应用中发现, 当通信模块在测试槽位内仅发生小角度的姿态偏差时, 采集的 2D 平面图像与基准模板之间的偏差可能非常微小, 导致系统出现误判。这种误判的主要原因在于, 测试槽位内部小角度偏差情况下, 通信模块在平面二维方向上的位置变化不足以引起显著的图像差异, 使得传统基于模板匹配的方法难以准确区分测试槽位内正确姿态与偏差姿态。

为了解决这一问题, 需要找到一种能够在测试槽位内显著区分正确姿态和偏差姿态的方法, 从而实现对通信模块位置偏差的准确检测。在多次实验中发现, 可以利用过曝现象来构建一种新的检测方法。具体而言, 在正确姿态下, 调整相机的曝光参数, 使相机处于过曝状态, 此时相机成像的图片呈现纯白色。经过二值化处理, 过曝区域中仅存在像素值为 255 的白色像素点, 而黑色像素点 (像素值为 0) 的个数接近 0。在模块出现偏置时, 采用相同的曝光参数, 由于偏差角度会导致被测通信产品表面的反射光方向发生偏转, 大部分光线无法正确进入相机传感器靶面, 相机接收到的光线强度大大降低, 在同样的曝光参数下, 相机采集的图片处于正

常曝光状态, 图像能够正常显示产品表面信息。经过二值化处理后, 图像中存在大量像素值为 0 的黑色像素点。

基于这一现象, 可以构建一种具有显著区别的检测判据。通过寻找临界曝光参数, 确保被测通信产品在正确姿态时相机处于过曝状态, 而在任一偏置状态下, 相机都处于非过曝状态, 有效区分正确姿态和偏差姿态, 从而实现对通信模块位置偏差的准确检测。

如图 3 (a) 和 (b) 所示, 为产品正确姿态和偏差姿态的典型检测环境示意图。

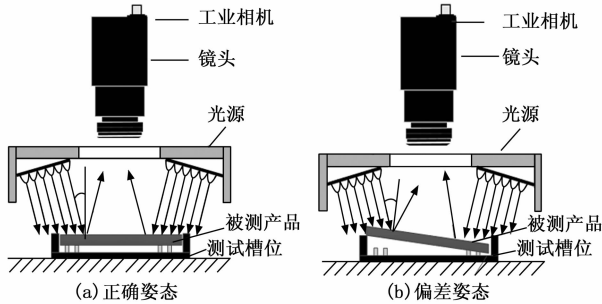


图 3 正确姿态和偏差姿态光线示意图

根据工业相机成像原理, 相机过曝是由相机的曝光量超过传感器的记录范围。曝光量 H_v 定义为物体表面接收光照度在时间内的积分^[12], 计算公式为:

$$H_v = \int_0^t E_v dt \quad (1)$$

其中: E_v 为光照度。由于检测环境中使用的光源为恒定光源, 其照度变化与时间无关, 因此式 (1) 可简化为:

$$H_v = E_v t \quad (2)$$

即曝光量为光照度与曝光时间的乘积。再根据相机的成像关系可得^[13]:

$$E_v = qL \left(\frac{d}{f} \right)^2 \quad (3)$$

式中, q 表示摄影成像系统特性参数, 由相机物理参数决定, L 为亮度, d 为镜头光圈直径, f 为镜头焦距。将公式 (3) 代入公式 (2) 可得:

$$H_v = qL \left(\frac{d}{f} \right)^2 t \quad (4)$$

在检测过程中, 正确姿态和偏差姿态都使用相同的曝光参数, 因此 q 、 d 、 f 和 t 参数都为常量。结合公式 (4) 可得出曝光量与物体亮度成正比。

实际环境中, 光源发出的光线经被测模块表面反射后, 被相机捕获, 模块表面的光线反射特征与模块表面材质有关, 对于通信模块, 外壳一般为金属材料。因此物体亮度分析选用高光反射 phong 模型^[14-15]。该模型是一种介于镜面反射和朗伯反射之间的类型。当光线入射至模块表面时, 反射光线会大部分集中在镜面反射方向

附近, 且越靠近镜面反射方向, 反射光的辐射能就越大, 其亮度^[16]的计算方程式为:

$$L_{e0}(p, \omega_0, \gamma) = \int_{\Omega} ks (r \cdot \omega_0)^e \rho(p, \gamma) L_{ei}(p, \omega_i, \gamma) \cos \theta_i d\omega_i \quad (5)$$

其中: ks 为高光反射系数, e 为高光指数, $\rho(p, \gamma)$ 为材质在 p 点的光谱反射率, L_{ei} 为入射光线的光谱辐亮度, θ_i 为入射角。在实际环境中, 正确姿态和偏差姿态使用的光源和环境因素都相同, 唯一差别为被测模块出现偏差后, 光线的入射角 θ_i 不同, 因此两种姿态的亮度 L_{e0} 与入射角 θ_i 的余弦成正比, 再结合公式 (4), 两种姿态的曝光量也正比于入射角 θ_i 的余弦。即:

$$H_v \propto L_{e0} \propto \cos \theta_i \quad (6)$$

根据实际测试场景分析, 如图 4 所示, 当通信模块的一边刚好落在槽位边缘壁上时, 通信模块与测试槽位水平面形成偏差夹角为 α_1 , 所对应的光线入射角为 β_1 。此时, 一旦偏差夹角小于 α_1 , 通信模块根据重力将自动滑落到槽位, 变为正确姿态, 因此夹角 α_1 为通信模块偏差状态下的最小夹角。当通信模块的中线刚好落在槽位边缘壁上时, 通信模块与测试槽位水平面形成偏差夹角为 α_2 , 所对应的光线入射角为 β_2 。此时, 一旦偏差夹角大于 α_2 , 由于重心偏上的原因, 通信模块将放置到槽位区域之外, 此时模块位置相比于槽位区域出现极大偏差, 可并行通过基于模板匹配的机器视觉检测方法进行检测。因此本文主要实现测试槽位内, 偏差夹角在 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 区间内姿态偏差检测。同时, 由于姿态偏差是在测试的过程中随机出现, 因此相对应的偏差夹角和光线入射角 θ_i 的变化是 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 和 $[\beta_1, \beta_2]$ 区间的随机数。

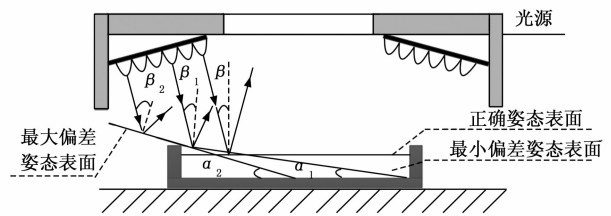


图 4 偏差姿态下被测产品与槽位夹角示意图

由于本文采用环形光源, 该光源发出的光线为平行光线, 结合三种姿态表面法线的偏转情况可知 $\beta < \beta_1 < \beta_2$ (β 为正确姿态时的入射角), 在光源恒定, 曝光时间 t 相同的情况下, 3 种姿态所对应的曝光量关系为 $H_{\beta} > H_{\beta_1} > H_{\beta_2}$ 。因此只要入射角为 β_1 时, 相机处于非过曝状态, 那么在入射角 $[\beta_1, \beta_2]$ 区间内的所有姿态偏差产生的入射角曝光量, 相机一定处于非过曝状态。因此, 在测试过程中, 只需要设定相机的曝光参数, 确保在正确姿态时相机处于过曝光状态, 同时, 在 α_1 位置偏差角度时, 相机处于非过曝状态, 即可实现对测试槽

位内所有偏差姿态的准确检测。

2.2 最小偏差角度位置测定

根据上述分析, 该方法的核心需要测出通信模块的临界放置坐标, 使得通信模块的一边刚好落在槽位边缘壁上, 此时该模块处于最小偏差角度位置, 即 α_1 偏差角度姿态。在实际环境中, 需要使用自动化测试线上抓取模块的机械臂辅助移动测定该位置。具体步骤如下:

1) 如图 5 (a) 所示, 控制机械臂抓取被测模块, 移动到测试槽位的正上方, 此时被测模块底面正好与测试槽位的上边沿齐平, 且模块可以正常放入测试槽位。记录此时的机械臂世界坐标值 $A(x_1, y_1, z_1)$ 。

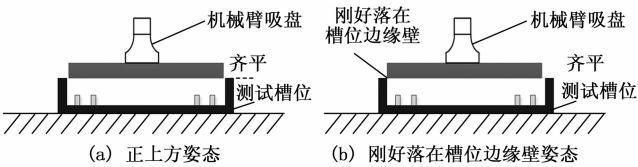


图 5 最小偏差角度位置测定示意图

2) 根据机械臂的重复精度, 通常为 0.03 mm, 向槽位的一边步进平行移动, 保持 z 坐标不变, 每移动 0.03 mm, 关闭吸盘, 将模块放置一次, 直到通信模块的一边刚好落在槽位边缘壁上, 如图 5 (b) 所示, 记录此时的机械臂世界坐标值 $B(x_2, y_2, z_2)$ 。由于位置偏差在测试槽位的 4 个方向都存在, 但环形光源对 4 个方向上产生的曝光量基本一样, 因此只需要在测试槽位的一个方向上开展测试即可。

3) 将机械臂的放置坐标直接设定为 $B(x_2, y_2, z_2)$, 并将通信模块按照该坐标放置, 配合相机调试曝光参数。

进一步, 将图 5 (b) 的场景简化, 可得到最小偏差角度 α_1 的计算模型, 如图 6 所示。

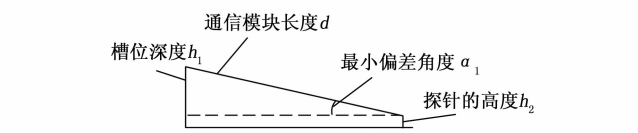


图 6 最小偏差角度计算模型

从计算模型可得出:

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{d}{(h_1 - h_2)} \tag{7}$$

式中, d 、 h_1 和 h_2 均为已知常数, 因此可计算出该通信模块检测偏差角度的最小值的理论值。

2.3 检测参数的测定

在最小偏差角度位置测定的基础上, 进一步通过实验确定两个关键参数: 工业相机的曝光时间 t 和黑色像素点统计阈值。

1) 将机械臂的放置坐标设定为 $A(x_1, y_1, z_1)$, 并将通信模块按照该坐标放置, 此时通信模块处于正确

姿态。

2) 逐步增大工业相机的曝光时间 t , 直至被测通信模块表面在图像中呈现明显过曝状态。此时, 模块表面的图像呈现纯白色, 经过二值化处理后, 模块表面区域的黑色像素点 (像素值为 0) 数量接近 0, 记录此时的黑色像素点个数, 多次重复实验取最大值 C_{\max} 。

3) 将机械臂的放置坐标直接设定为 $B(x_2, y_2, z_2)$, 并将通信模块按照该坐标放置, 此时通信模块处于最小偏差角度位置, 偏差角度为 α_1 。

4) 保持步骤 2) 相同的曝光时间 t 不变, 采集模块表面的图像。此时需要确保图像处于正常曝光状态。如果此时仍然处于过曝状态, 需要返还步骤 1) 和 2) 减少曝光时间。直至最小偏差角度位置图像处于正常曝光状态。记录相机的曝光时间 t , 并经过二值化处理后, 记录此时通信模块表面区域的黑色像素点个数, 多次重复实验取最小值 C_{\min} 。

5) 确定阈值, 步骤 2) 和 4) 分别记录了正确姿态和最小偏差姿态下黑色像素点的数量。考虑到并不是所有通信模块都处于光源正中心, 存在打光不均情况, 同时黑色像素点统计也存在误差, 因此将 2) 记录的黑色像素点数量与 4) 中记录的黑色像素点数量取平均值。并将阈值确定为该平均值的十分之一。

这一阈值比例经过多次实验验证确定, 试验统计如表 1 所示。

表 1 阈值试验数据统计表

比例	TP	FP	TN	FN	误检率/%	漏检率/%
1/20	19	0	80	1	0	5
1/10	20	0	80	0	0	0
1/5	20	0	80	0	0	0
1/2	20	1	79	0	1.25	0
1	20	4	76	0	5	0

表 1 中, 设置了 100 组样本, 其中正确姿态 (阳性) 20 组, 偏差姿态 (阴性) 80 组 (其中最小偏差角度姿态 50 组), 并重复试验 5 次, 统计 FP (假阳性) 和 FN (假阴性) 的最大值。从统计数据可以看出, 当阈值比例为 1/10 和 1/5 时, 分类效果最佳。考虑到实际环境中可以接受一定的漏检率 (不会造成产品物理损伤), 同时避免误检率 (会造成产品物理损伤), 最终选择阈值比例为 1/10。

2.4 检测流程

检测流程如图 7 所示, 使用测定后的曝光时间 t 采集图像, 将图像中测试槽位所在区域设为感兴趣区域 (ROI)。随后, 对采集到的图像中的感兴趣区域进行二值化处理, 并统计该区域内黑色像素点的数量。最后, 将统计结果与测定的阈值进行比较: 若黑色像素点数量

小于阈值，则判定模块放置位置正常；若大于等于阈值，则判定模块姿态存在偏差。若判定模块放置位置正常，系统返回至图像采集步骤，等待下一次检测；若判定模块姿态存在偏差，系统将触发报警提示或启动二次纠偏机制，对模块进行重新调整和放置，并再次触发检测流程进行姿态检测。

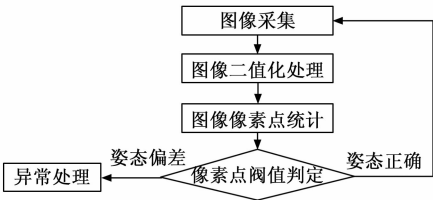


图 7 检测系统的测试流程

2.5 软件实现

本文中检测系统软件设计基于 Vision Master 4.3.3 平台进行编程实现，主要包含如图 8 所示的 4 个功能模块：图像采集模块、二值化处理模块、像素统计模块和自定义脚本模块。各模块的功能和实现方式如下：

- 1) 图像采集模块：该模块用于控制工业相机的图像采集过程，并通过调节“控制曝光”参数，精确设置工业相机的曝光时间 t 。
- 2) 二值化处理模块：该模块提供了 4 种二值化方法：硬阈值二值化^[17]、均值二值化^[18]、高斯二值化^[19]和自动二值化^[20]。根据被测产品表面颜色和光源特性的不同，可以选择最合适的二值化方法。本文采用的是高斯二值化方法，该方法能够更好地适应被测产品表面的光照条件，有效提高图像处理的准确性和可靠性。
- 3) 像素统计模块：该模块负责统计设定区域内黑色像素点的数量。通过调用像素统计模块函数实现。
- 4) 自定义脚本模块：该模块通过自定义编程实现对检测结果的判断和上报。基于测定的阈值，系统能够灵活判断检测结果，并触发偏差报警或二次纠偏机制。

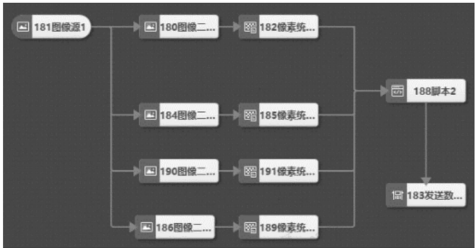


图 8 Vision Master 软件实现模块

在实际使用中，多个通信模块并行测试时，受相机视野限制和不同通信模块尺寸大小不同等因素，通常需要注意多次拍摄的时间间隔。表 2 为软件各模块的耗时典型值统计。完整的测试流程总共耗时约 60 ms，因此在

多次拍摄时，两次拍摄的时间间隔必须大于 60 ms。

表 2 软件各模块耗时统计表

模块类型	图像采集	二值化	像素统计	自定义脚本
耗时时间/ms	23	15	17	5

3 测试验证

3.1 角度梯度实验验证

硬件环境中，工业相机采用 MV-CDYM-650 型号，分辨率为 $2\,560 \times 2\,048$ ，像元尺寸为 $3.45\,\mu\text{m}$ ，传感器类型为 CMOS。镜头选用 MVL-MF1628M 型号，焦距为 16 mm 可调，光圈范围为 F2.8~F16，可根据实际需求进行调整。光源采用 MV-LRDS 标准环形光源，提供高角度的正面光照，确保被测通信模块表面的光照均匀。角度梯度调节采用万能角度仪进行调节，被测通信模块放置于万能角度仪表面。

试验结果如表 3 所示。在角度小于 2.5° 时，黑色像素点数量对角度变化不敏感，通信模块表面图像处于过曝状态；当角度增加到 $2.5\sim5^\circ$ 时，黑色像素点数量对角度变化极为敏感，每增加 0.5° ，像素点数量至少增加 600 个以上，此时已能辨识表面图案；在 $5\sim15^\circ$ 内，尽管黑色像素点数量继续随角度增长，但增长幅度明显放缓，通信模块表面图案基本清晰；当角度在 $15\sim20^\circ$ 内，黑色像素点数量趋于稳定，这是由于此时通信模块表面已经处于非常清晰状态，取值区域内图案变化较小。

表 3 角度梯度实验数据统计

角度/ $^\circ$	0	0.5	1	1.5	2
黑色像素个数	0	0	10	46	120
角度/ $^\circ$	2.5	3	3.5	4	4.5
黑色像素个数	1 048	2 676	4 632	6 372	7 094
角度/ $^\circ$	5	7.5	10	15	20
黑色像素个数	7 634	8 230	10 160	11 946	11 726

从梯度试验可以看出，该专用通信模块在 2.5° 附近具有明显的分界特征。因此对测试槽位内大于 2.5° 的位置偏差都能实现准确的判断。

同时，结合公式 (7)，专用通信模块的尺寸 $d=10.08$ ，槽位深度 1.6，探针高度 0.5，计算出的理论最小偏差角度 $\alpha_1=6.2^\circ$ ，大于 2.5° ，可以实现该通信模块测试槽位内的位置偏差检测。

3.2 实际应用

测试环境由工业机器人、工业相机、镜头、环形光源和测试设备组成。工业相机采用 MV-CA050-12GC 型号，分辨率为 $2\,448 \times 2\,048$ ，像元尺寸为 $3.45\,\mu\text{m}$ ，传感器类型为 CMOS。镜头选用 MVL-MF1628M 型号，焦距为 16 mm 可调，光圈范围为 F2.8~F16，可根据

实际需求进行调整。光源采用 MV-LRDS 标准环形光源。

测试设备上配备 8 个测试槽位，用于放置被测通信模块。由于工业相机的视野限制，最多支持同时检测 4 个槽位。因此，工业机器人会带动相机分两次拍摄：第一次拍摄槽位 1 至槽位 4，第二次拍摄槽位 5 至槽位 8。本文的实验和讨论将主要基于第一次成像的前 4 个槽位（槽位 1 至槽位 4）进行，被测产品选用某专用通信模块。

按照最小偏差角度位置测定流程和检测参数的测定流程，对相机的曝光参数和阈值进行测定。4 个槽位同时测定，测定方向选择槽位的左偏位置，如表 4 所示，正确姿态下取最大值，最小偏差角度姿态取最小值。最后确定工业相机的曝光时间为 25 000。

表 4 实际环境黑色像素点测定数据统计表

槽位	姿态	黑色像素点个数
槽位 1	正确姿态	0
	α_1 角左偏	7 864
槽位 2	正确姿态	0
	α_1 角左偏	7 658
槽位 3	正确姿态	0
	α_1 角左偏	7 731
槽位 4	正确姿态	0
	α_1 角左偏	7 596

基于此，将 Vision Master 软件中将 4 个槽位的像素点阈值按照 $\lceil (C_{\min} + C_{\max}) / 2 \rceil / 10$ ，分别设定为 393、383、387 和 380，Vision Master 软件中自定义脚本对阈值的设置如图 9 所示。当 4 个槽位检测到的黑色像素点数量大于等于阈值时，系统判定该槽位中通信模块为偏差姿态。随后，Vision Master 将偏差信息发送至工业机器人，触发其报警或二次纠偏功能。

```
47 public bool Process()
48 {
49     //每次执行将进入该函数，此处添加所需的逻辑处理流程
50     string cao1="1:true",cao2="2:true",cao3="3:true",cao4="4:true";
51     if(in1>=393) {cao1="1:false";}
52     if(in2>=383) {cao2="2:false";}
53     if(in3>=387) {cao3="3:false";}
54     if(in4>=380) {cao4="4:false";}
55
56     setStringValue("outMes",cao1+","+cao2+","+cao3+","+cao4);
57     return true;
58 }
```

图 9 检测系统软件自定义脚本阈值

在实际现场环境中，工业相机采集的图片如图 10 所示。当通信模块处于正确姿态时，表面图像呈现过曝状态，黑色像素点数量为 0。在临界偏差 α_1 角度姿态时，表面图像处于正常曝光状态，黑色像素点数量显著增加。在偏差 α_2 角度姿态时，黑色像素点数量进一步增加。3 张图像进一步表明曝光量关系为 $H_{\alpha} > H_{\beta_1} > H_{\beta_2}$ ，且姿态偏差的图像与姿态正常的图像存在显著差异。

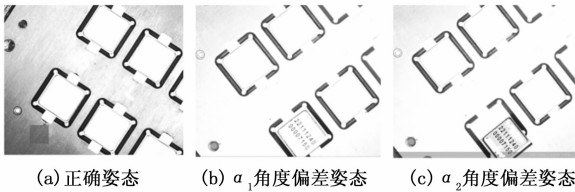


图 10 实际测试环境中正确姿态与偏差姿态图像

为验证本文方法的稳定性，模拟被测通信模块在测试槽位的放置情况，每次测试时都会使用机械臂对通信模块姿态进行微调，检测系统判断情况统计如表 5 所示。

表 5 测试结果统计表

产品姿态	槽位	测试数量 /次	姿态判断		准确率 /%
			正确/次	错误/次	
正确姿态	槽位 1	100	100	0	100
	槽位 2	100	100	0	100
	槽位 3	100	100	0	100
	槽位 4	100	100	0	100
偏差姿态	槽位 1	200	200	0	100
	槽位 2	200	200	0	100
	槽位 3	200	200	0	100
	槽位 4	200	200	0	100

从表 5 可以看出，基于视觉过曝特征的自动化测试线产品姿态检测方法能准确地检测出被测产品姿态是否存在偏差。完成检测系统的验证后，将该检测方法应用于实际的生产中，上述专用通信模块的某批次生产测试数据如表 6 所示。

表 6 专用模块的某批次生产测试数据

产品数量/个	测试数量/次	偏差数量/次	偏差姿态检测结果/次		准确率/%
			成功	失败	
38 652	77 304	6	6	0	100

通过上述实际环境的测试验证，并结合生产测试数据，可证明基于视觉过曝特征的自动化测试线产品姿态检测方法能正确检测出自动化测试过程中被测产品姿态偏差。

4 结束语

针对通信模块自动化测试过程中因姿态偏差导致测试失败的问题，本文提出了一种基于视觉过曝特征的检测方法。通过原理分析、检测系统设计、搭建实验环境测试和结合实际测试环境进行验证表明，该方法利用过曝特征，能够显著区分通信模块产品正确姿态和偏差姿态。同时，该方法基于工业相机和简单的图像处理算法，无需额外硬件设备，且检测流程简单，能够在短时间内完成对多个模块的并行检测，具有很高的实用

价值。

参考文献:

- [1] 李 耀, 郑常宝, 王群京. 基于机器视觉的永磁球形电机转子姿态检测 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (11): 115 - 118.
- [2] 胡璇宇, 罗柏文. 基于视觉的钢丝捆扎机 C 形钩姿态检测方法研究 [J]. 工业控制计算机, 2019, 32 (7): 49 - 50.
- [3] 刘国华, 邓钊钊. 基于双目视觉的探针姿态检测 [J]. 天津工业大学学报, 2019, 38 (2): 68 - 72.
- [4] 廖 文, 徐 进, 高 莹, 等. 超声波测距导盲车关键技术的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 294 - 297.
- [5] 李 欢, 余红英. 基于 FPGA 的高性能激光雷达测距系统设计 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (20): 6 - 10.
- [6] 左 旭. 红外测距技术在采煤机位置动态监测中的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, 16: 163 - 165.
- [7] 陈翠娟. 激光测距机缺陷智能估计方法 [J]. 激光杂志, 2021, 42 (4): 187 - 191.
- [8] 闫俊涛, 吴自然, 陈宪帅, 等. 小型断路器柔性装配中视觉识别系统的设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 192 - 198.
- [9] 韩成浩, 曾繁歌. 基于机器视觉的障碍物识别系统研究 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2023, 46 (1): 88 - 93.
- [10] 朱宝伟. 机器视觉中的光源照明设计 [J]. 电子科技, 2013, 26 (3): 80 - 82.
- [11] 张叶梅. 基于机器视觉的 TR 型芯片检测与定位算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [12] 王庆有. 图像传感器应用技术 [M]. 上海: 电子工业出版社, 2013.
- [13] 李龙龙. 基于图像处理的摄像机自动对焦和自动曝光技术的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [14] 尹清静. 基于 phong 混合反射模型的三维重建研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [15] 王欢欢. 基于 Phong 模型的去光照算法及其在钢坯缺陷检测中的应用 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.
- [16] 储海龙. 基于亮度的光环境表征方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [17] 张喜红, 王玉香. 红外寻迹小车寻迹控制策略的改进 [J]. 江汉大学学报 (自然科学版), 2017, 45 (2): 168 - 172.
- [18] 梁 日, 冯 迪, 于文海, 等. 保偏光子晶体光纤图像特征孔中心提取算法 [J]. 半导体光电, 2018, 39 (6): 886 - 891.
- [19] 张小刚, 俞东宝, 汤 慧, 等. 基于深度学习的 X 射线燃料棒端塞缺陷自动检测方法研究 [J]. 原子能科学技术, 2024, 58 (8): 1767 - 1776.
- [20] 石锦成, 丁成波, 刘林琳, 等. 浅析一种基于机器视觉的继电器衔铁组件在线检测方法 [J]. 中国设备工程, 2024, 9 (上): 180 - 181.
- [25] GACE D A. On the performance of a coriolis mass flowmeter (CMF): experimental measurement and FSI simulation [J]. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2022: 133.
- [26] BINULAL B R, RAJAN A, KOCHUPILLAI J. Dynamic analysis of coriolis flow meter using timoshenko beam element [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2016, 47: 100 - 109.
- [27] SUN L J, WU W, LIAN J P. Design optimization of micro-coriolis flowmeters [C] //2022 IEEE International Instrumentation & Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada, 2022.
- [28] KOLHE V A, EDLABADKAR R L. Performance evaluation of coriolis mass flow meter in laminar flow regime [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 77: 1021837.
- [29] KOLHE V A, PAWAR S Y, CHAUDHARY V D, et al. Evaluation of omega-shaped coriolis mass flow meter for laminar flow [J]. Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering, 2024, 13 (2): 181 - 190.
- [30] 裴祥翔, 陈强峰, 孙世恩, 等. 直筒型科里奥利质量流量计与液氢的整体耦合研究 [J]. 低温工程, 2023, 129: 103625.
- [31] 裴祥翔, 陈强峰, 宋玉彩, 等. U 型液氢科里奥利质量流量计理论与数值分析 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2024, 57 (9): 992 - 1000.
- [32] PEI X X, LI X, XU H, et al. Flow-induced vibration characteristics of the U-type coriolis mass flowmeter with liquid hydrogen [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2022, 23 (6): 495 - 504.
- [33] PEI X X, CHEN Q F, SUN S, et al. The monolithic coupling of straight tube coriolis mass flowmeter with liquid hydrogen [J]. Cryogenics, 2023, 129: 103625.
- [34] HOYAS S, JIMENEZ J. Scaling of the velocity fluctuations in turbulent channels up to $Re_\tau = 2003$ [J]. Physics of Fluids, 2006, 18: 011702.
- [35] 贺世超, 张新铭, 邢兰昌, 等. 基于电-声复合传感器测量含水合物液膜厚度仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 48 - 53.
- [36] 张欢欢, 王 硕, 邢兰昌, 等. 基于含水合物多孔介质复电导率的渗透率测试有限元仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (12): 69 - 75.

(上接第 81 页)