

基于自标定功能的机器视觉 尺寸检测平台设计

葛根波, 吴陈陈, 吴泽楷, 陈厉枫, 洪英杰

(上海科创职业技术学院 智能制造学院, 上海 201600)

摘要:针对传统机器视觉标定方法人工依赖性强、流程繁琐及精度有限等问题, 该文设计了一种具备自标定功能的机器视觉尺寸检测平台。该平台通过笛卡尔坐标系运动系统实现标定板的多角度自动运动, 并集成毫米级边缘刻度板作为实时尺寸校准基准, 结合自适应阈值特征提取与最小二乘迭代优化算法, 构建了软硬件协同的闭环检测系统。以金属零件板为对象的实验结果表明: 该平台将平均重投影误差显著降低至 0.093 像素, 标定效率提升约 42.3%, 尺寸检测绝对误差控制在 ± 0.02 mm 以内, 验证了其在精密尺寸测量中的有效性与实用性。

关键词:机器视觉; 相机标定; 自标定算法; 尺寸检测; 检测装置

中图分类号: TP29; TP273

文章编号: 1000-0682(2026)02-0057-07

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.02.012

Design of a machine vision dimensional inspection platform with self-calibration capability

GE Genbo, WU Chenchen, WU Zekai, CHEN Lifeng, HONG Yingjie

(Shanghai Technology and Innovation Vocational College, Shanghai 201600, China)

Abstract: To address the limitations of traditional machine vision calibration methods—such as high dependence on manual intervention, cumbersome procedures, and limited accuracy—this study designs a self-calibrating machine vision-based dimensional inspection platform. The platform employs a Cartesian coordinate motion system to enable multi-angle automated movement of the calibration board and integrates a millimeter-scale edge-graduated reference plate for real-time dimensional calibration. By combining adaptive threshold-based feature extraction with an iterative least squares optimization algorithm, a closed-loop inspection system with coordinated hardware and software is established. Experimental evaluations conducted on metal part plates demonstrate that the platform achieves a significant reduction in the average reprojection error to 0.093 pixels, improves calibration efficiency by approximately 42.3%, and confines the absolute dimensional measurement error within ± 0.02 mm, thereby validating its effectiveness and practicality for precision dimensional measurement applications.

Keywords: machine vision; camera calibration; self-calibration algorithm; size inspection; measurement apparatus

0 引言

在机器视觉检测领域, 传统标定方法依赖人工

操作, 流程繁琐且易受环境干扰, 难以满足亚微米级高精度检测需求。虽然自标定算法实现了自动化操作, 但由于缺乏软硬件协同优化, 难以有效抑制镜头畸变、温度漂移等累积误差。

韩瑞琦等^[1]的研究虽然提升了场景适应性, 但是没有解决动态标定精度衰减的问题, 而且还缺乏实时校准基准; 罗国强等^[2]的改进算法虽然提高了鲁棒性, 不过依赖多帧特征匹配, 导致单次标定周期

收稿日期: 2025-09-05

第一作者: 葛根波(1984—), 男, 本科, 讲师, 主要研究方向为机器视觉, 自动化设备。

通信作者: 吴陈陈(1995—), 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉, 自动化设备。E-mail: lafer_cc675951022@163.com

比较长,很难适配高速生产线;石李智等^[3]的模型简化了场景约束,却忽略了机械运动误差的影响,使得畸变矫正精度受到限制;薛琛等^[4]的系统实现了定位自动化,但是没有构建完整的检测流程,仍然需要相机标定来构筑尺寸测量的精度。尽管为相机标定尺寸检测等技术提供了许多的可行性方案,但目前因现有技术多因素误差补偿以及软硬件协同优化等方面尚有不足^[5-7]。

针对上述问题,该文提出一种集成自标定与高精度尺寸校准的机器视觉检测平台。该平台采用笛卡尔坐标系运动系统驱动标定板进行多角度运动,并引入毫米级边缘刻度板作为实时校准基准,结合自适应阈值特征提取与最小二乘迭代优化算法,构建了集运动控制、图像采集、参数解算与精度校准于一体的闭环系统^[8]。有效突破了传统方法在精度与效率方面的瓶颈。

1 系统设计

1.1 系统整体架构

该系统采用了一种将硬件与软件相结合进行设计的分层架构^[9-10],其中硬件主要承担运动控制以及图像采集的任务,软件则负责对数据加以处理并校准精度,二者借助标准接口实现数据的实时交互,以此保证系统整体性能达到最佳状态,平台的具体工作流程可参考图 1。

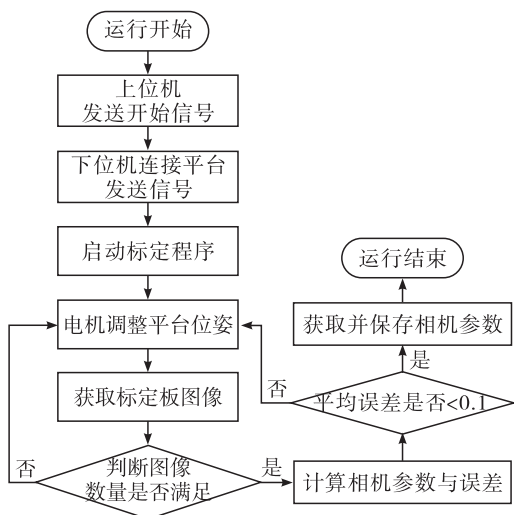


图 1 系统工作流程图

1.2 硬件层面

如图 2 所示,硬件系统是由三维运动系统、视觉采集模块、尺寸校准单元以及控制终端这四个部分共同组合而成的,这几个部分依靠机械结构以及电

气接口来实现集成,最终形成了一个完整的检测平台体系。

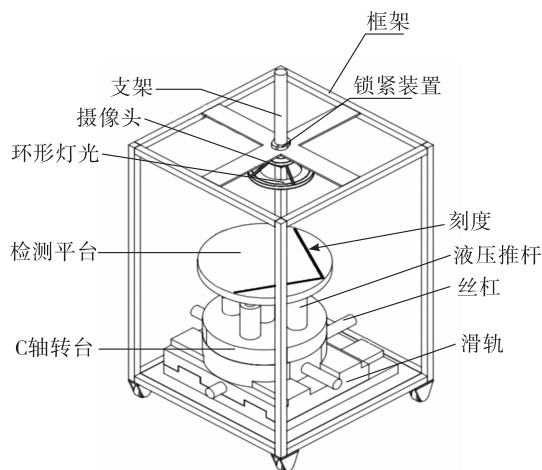


图 2 设备整体硬件设计图

三维运动系统:用伺服电机驱动方式,让标定板或工件能做多方向运动,系统由三个核心轴^[11]组成。

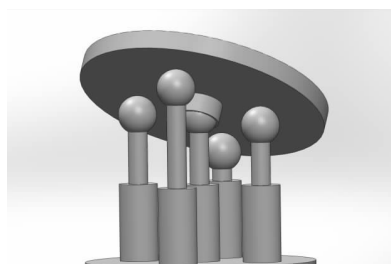


图 3 两个关节驱动俯仰角度

俯仰轴:采用 57C-4S-150-0 混合式直线步进电机驱动,可控制平台 $\pm 35^\circ$ 角度范围。该电机额定推力为 294 N,可实现 0.031 75 mm 的整步线性分辨率,确保了俯仰角度控制的精确性与微调能力。

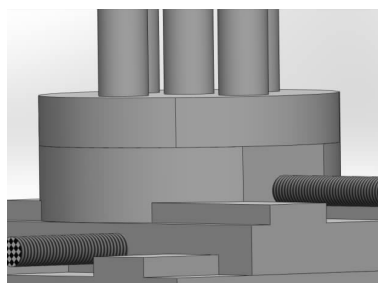


图 4 一个伺服电机驱动水平旋转

水平旋转轴:采用伺服电机配合谐波减速器驱动控制平台 360°的水平旋转,谐波减速器有传动比大、回程间隙小的特性,可保证水平旋转过程中的定位一致性。

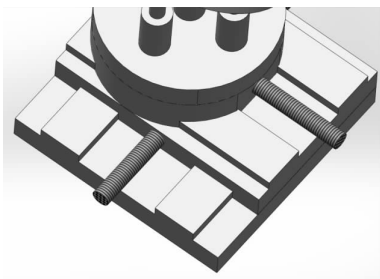


图5 两个滚珠丝杠驱动平台平移

平移轴: X 方向可移动 240 mm, 在 Y 方向可移动 200 mm, 由滚珠丝杠驱动, 其中丝杠型号为 SFU1605, 并配备了 THK 直线导轨, 所使用的驱动电机是台达 ASD - A2 - 0421 - L 伺服电机, 可达成标定板或者工件在平面上的精确移动。

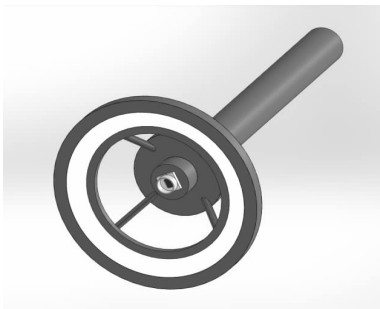


图6 相机采集模块

视觉采集模块, 负责高精度采集工件图像。由工业相机、变焦镜头、环形 LED 光源组成。工业相机选用了 Basler acA2500 - 14gm, 支持全局快门模式, GigE 接口确保图像实时传输。变焦镜头选了 Computar V1220 - MPZ, 焦距范围 12 ~ 20 mm, 畸变系数 $\leq 0.1\%$, 光圈范围 F1.4 - F16, 能适应不同光照条件。环形 LED 光源用了奥普特 OPT - RI100, 亮度可调, 光照均匀。视觉采集模块安装在刚性铝合金支架上, 通过隔热垫与运动系统相连, 减少温度的影响。

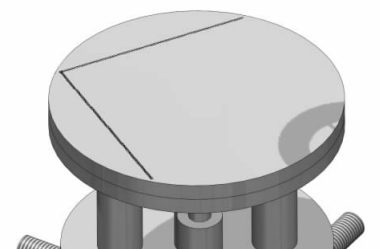


图7 检测平台

尺寸校准单元: 采用蜗轮蜗杆配合伺服电机驱动, 实现平台水平旋转, 更好地实现标定板的位姿变化。平台的边缘设有高精度刻度, 以此作为实时校准的基准, 工件放置于其上, 当相机拍摄图像时, 可

依靠对比工件与刻度的位置, 实时校准出精确的尺寸数据。

1.3 软件层面

软件系统运用多层级控制体系, 自底层开始, 依次设有下位机控制层、中层交互层以及上层算法层, 各层级借助标准化数据接口达成协同工作, 平台系统的设计如图 8 所示。

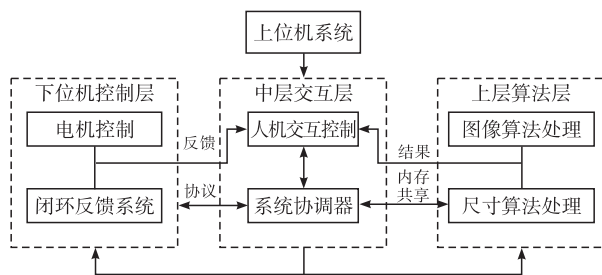


图8 平台系统设计图

下位机控制层: 基于 STM32H743 微处理器开发, 负责三维运动系统的实时控制。该层凭借脉冲宽度调制伺服电机与步进电机的动作来控制。

对于平移轴伺服电机, 借助输出脉冲信号来控制电机转速, 凭借脉冲数量控制位移量, 对于俯仰轴的步进电机推杆, 通过调节 PWM 信号的占空比, 精确控制推杆的伸缩位置与速度, 从而实现俯仰角度的精准调节。下位机实时采集各轴的位置反馈信号, 凭借 PID 算法进行闭环控制, 保证运动精度。



图9 人机交互界面

中层交互层: 如图 9 所示, 该层基于 C# 语言进行开发, 在工业计算机上运行, 属于人机交互的核心部分, 它借助 Qt^[12] 框架来构建 GUI, 可达成参数配置功能, 此功能支持 XML 格式的导入与导出, 还有状态监控功能, 可借助动态图表展示系统以及设备的运行数据, 也拥有手动/自动模式切换功能, 手动模式用于调试, 自动模式则按照预设流程执行, 另外以及异常报警功能, 可实时显示相关信息并且触发声光报警。该层通过 Modbus 协议与下位机通信, 以共享内存方式与上层算法层交互数据, 保障传输实时可靠。

上层算法层是依据 HALCON 视觉算法库^[13] 进行开发的,它充当着系统核心数据处理单元的角色,主要由图像处理、特征提取、标定解算以及尺寸校准这四个子模块构成,其具体的处理流程如下:先将图像处理模块针对原始图像开展灰度校正、高斯滤波以及图像提高等一系列预处理操作,后将特征提取模块运用自适应阈值与亚像素边缘检测技术来获取边缘特征,最后标定解算模块借助多姿态标定板图像求解相机的内外参数,尺寸校准模块依据刻度板的标准尺寸对工件测量结果进行修正。各个任务借助多线程并行执行,经过优化后,单帧图像处理的时间可控制在 200 ms 以内,契合高速产线的需求。

2 标定相关技术

2.1 介绍标定作用

在机器视觉系统当中,标定属于极为关键的环节^[14],其主要发挥的作用在于构建相机图像像素跟实际物理世界之间的对应关系,如同图 10 所示,在针孔相机模型的情况下,空间点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 在世界坐标系中的坐标与图像点 $p(u, v)$ 在像素坐标系中的坐标关系,计算公式如式 1 所示:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ d_x & & \\ 0 & f_y & v_0 \\ & d_y & \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

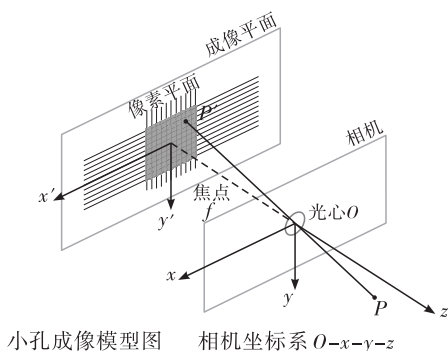


图 10 小孔成像模型

借助标定可得到相机的内参,像焦距、主点坐标等,以及外参,比如旋转矩阵、平移向量等,消除镜头畸变这类因素给测量结果带来的影响,以此保证尺寸检测的精度。

2.2 标定方法研究

明确了标定所有的核心作用后,下面会对主流的标定方法以及它们各自的适用性展开的探讨,张

正友标定法是计算机视觉领域里一项经典的相机标定技术,它的核心机制为:采集多组处于不同空间位姿状况下的标定板图像序列,按照世界坐标系和图像坐标系之间角点的对应关系,构建出非线性优化模型,最终求解得出相机的内参数矩阵以及外参数向量。该方法因为操作流程较为简易,并且设备依赖性较低,在工程实践当中获得了广泛的应用,如图 11 所示。

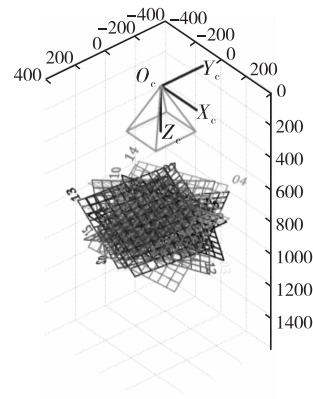


图 11 张氏标定法模型

研究发现,不同类型的标定板会对张正友标定法的结果产生影响,棋盘格标定板因为其特征点分布规则、角点提取算法成熟,在常规视场以及光照条件下有较高的稳定性,然而在大视场或者低对比度环境里,角点误匹配率会明显上升,圆形阵列标定板^[15]借助亚像素级圆心定位算法,可有效降低角点提取误差,在高精度测量场景中表现出色,不过标定板制作工艺要求高而且计算复杂度有所增加,非对称结构标定板可以简化外参数计算流程,减少位姿估计偏差,但是由于特征点分布不均匀,可能致使局部参数估计不准确。

依据文献^[16-17]所开展的系统研究工作,运用棋盘格、圆形阵列以及非对称结构标定板来进行对比实验,实验结果显示,在相同成像条件时,棋盘格标定板的平均重投影误差是 0.8 像素,圆形阵列标定板的这一误差降低到了 0.5 像素,对于非对称结构标定板而言,因为位姿约束得到了优化,其外参数误差减少了 23%,不过内参数误差相较于棋盘格标定板增加了 15%。该研究证明了不同标定板在图像角点提取误差、空间位姿估计偏差以及非线性优化收敛性等方面存在着差异,可为实际应用中按照测量需求选择标定板类型提供量化依据,具体情况如表 1 所示。

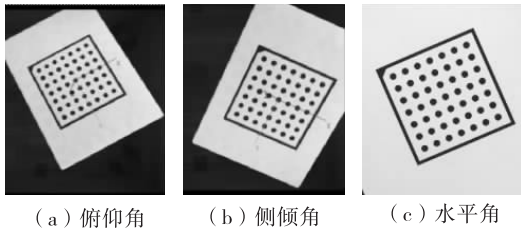
表1 标定板数据分析

标定板类型	平均重投影误差/像素	外参误差变化率	内参误差变化率
棋盘格	0.8	基准	基准
圆形阵列	0.5	-12.5%	+10%
非对称结构	0.7	-23%	+15%

3 基于自标定功能的机器视觉与算法

3.1 控制三维运动系统带动标定板运动

通过控制三维运动系统,促使标定板在相机视野范围之内进行空间运动,依照预先设定好的运动轨迹以及采样间隔,如图12所示,采集至少15幅不同姿态下的标定板图像^[18]。以此来获取丰富多样的标定板特征信息,方便后续可准确地求解相机参数。

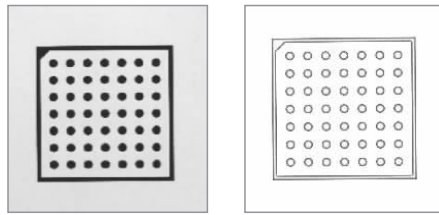


(a) 俯仰角 (b) 侧倾角 (c) 水平角

图12 标定板不同位姿图像

3.2 图像处理

图像处理属于机器视觉检测关键的前置环节,其处理质量对于后续特征提取精度以及尺寸检测准确性有着决定性的作用^[19],如图13所示。



(a) 灰度矫正 (b) 图像增强

图13 图像处理结果

灰度校正:采用基于区域划分的策略,以此抑制非均匀光照对图像质量产生的干扰,具体操作是,把原始图像划分成多个局部子区域,之后分别计算各区域的平均灰度值,接着借助插值算法生成全局灰度校正系数矩阵,实现对整幅图像的自适应光照补偿。

高斯滤波:采用 3×3 尺寸的高斯卷积核对图像进行滤波处理,这种方法可以在保留图像边缘信息的情况下,有效地滤除高频噪声成分,为后续处理提供平滑且特征清晰的图像数据,其计算公式如下式(2)~(3)所示:

一维高斯滤波公式:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

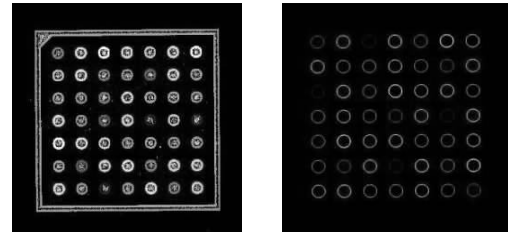
二维高斯滤波公式:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

图像增强:引入对比度受限的自适应直方图均衡化算法,依靠局部区域的自适应直方图调整机制,达成图像局部对比度的优化提高,极大地提升图像细节信息的可辨识度,为后续特征提取提供优质的数据源。

3.3 特征提取

在特征提取环节,会从经过预处理的图像里准确地提取出和尺寸检测任务有关的关键特征信息,此系统融合了自适应阈值分割技术以及亚像素级边缘检测技术,具体情况如图14所示。



(a) 自适应阈值分割 (b) 亚像素边缘检测

图14 图像特征提取结果

自适应阈值分割:它依据图像灰度分布所有的局部统计特性,来构建动态阈值计算模型,凭借采取自适应阈值调整策略,可达成目标区域与背景区域的精确分离,切实克服传统固定阈值方法存在的局限性。

亚像素边缘检测:它是在像素级边缘定位之后,依靠运用最小二乘法对边缘轮廓实施亚像素级曲线拟合,把边缘定位的精度提高到亚像素尺度,为高精度尺寸测量打造了稳固的基础。

3.4 参数优化求解

依据最小二乘迭代优化理论(Levenberg - Marquardt)构建参数估计模型,借助非线性迭代办法去求解相机的内部参数以及外部参数矩阵,以此降低系统误差所带来的影响,具体如式(4)所示:

$$\min_{\mathbf{K}, \mathbf{D}, \{\mathbf{R}_k, \mathbf{t}_k\}} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m \| \mathbf{P}_{ki} - \pi(\mathbf{K}, \mathbf{D}, \mathbf{R}_k, \mathbf{t}_k, \mathbf{P}_i) \|^2 \quad (4)$$

其中, \mathbf{K} 为内参矩阵,包含焦距 f_x, f_y 与主点坐标 (u_0, v_0) ; \mathbf{D} 为畸变系数向量,包括径向与切向畸变系数; \mathbf{R}_k 和 \mathbf{t}_k 分别表示第 k 幅图像对应的旋转矩阵和平移向量; \mathbf{P}_{ki} 为第 k 幅图像上第 i 个特征点的

像素坐标; P_i 为该特征点在世界坐标系下的三维坐标; $\pi(\cdot)$ 为透视投影函数, 描述从三维世界点到二维像素点的映射过程; M 为采集的标定板图像总数; N 为每幅图像中提取的特征点数量。该模型通过最小化重投影误差, 迭代优化上述参数, 从而获得高精度的相机标定结果。

3.5 结果验证与存储

在对相机内参以及第一幅图像所对应的标定板位姿进行提取并优化的过程中, 所获取的内参包含了如焦距、主点坐标以及畸变系数等一系列关键参数, 而位姿方面则抱括了平移向量与旋转角等相关信息。

利用重投影误差作为评估指标, 当平均重投影误差低于 0.1 像素时视为标定有效, 保存参数矩阵; 否则返回步骤 1 调整采集策略后重新标定。将优化所得的相机内参与位姿参数分别予以存储。

4 实验设计与结果分析

4.1 实验设计

为验证该平台在检测精度与效率方面的提升, 搭建了如表 2 所示的实验系统, 并与基于传统张正友标定法的视觉系统进行对比。

表 2 实验硬件参数

部件名称	关键参数	型号
平移轴 (X/Y)	伺服电机驱动/滚珠丝杠	台达 ASD - A2 - 0421 - L 伺服电机
水平旋转轴	伺服电机驱动/蜗轮	松下 MSMD042G1U
俯仰轴	三轴三杆双行程气缸	CNDH MGPM16X75
工业相机	Basler acA2500 - 14gm	500 万像素
工业镜头	Computar V1220 - MPZ	焦距范围 12 ~ 20 mm
光源	环形 LED 光源	奥普特 OPT - RI100
主控制器	STM32H743 微处理器	
工件	金属零件板	Cap for coupler B30553

使用该实验平台做如下实验, 如图 15 所示。系统启动后执行自标定流程, 求解相机内外参数, 随后, 将工件置于检测平台, 运动控制模块将其移动至最佳拍摄位置, 视觉采集模块在优化光照条件下获取图像; 经图像预处理、尺寸特征提取后, 基于标定参数将像素尺寸转换为物理尺寸, 并通过温度补偿与畸变校正输出最终测量值。

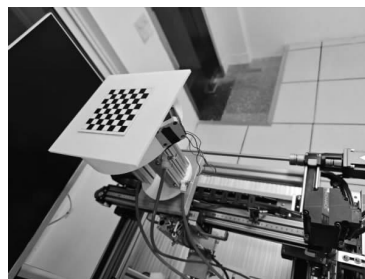


图 15 实验平台

4.2 结果与分析

据表 3 实验表明, 与传统人工方法相比, 该平台将平均重投影误差从传统方法的 0.159 像素显著降低至 0.093 像素, 精度提升达 41.5%。平台在重复性实验中表现出更高的稳定性, 通过自动化位姿调整将相关耗时从 120 秒缩短至 43 秒, 效率提升 64.2%。其整体校准效率提升约 42.3%。

表 3 实验硬件参数 (n = 10)

性能指标	传统人工方法	该文自标定平台	性能提升
平均重投影误差/像素	0.159	0.093	41.5%
标定板位姿调整与摆放耗时/s	120	43	64.2%
参数计算与优化耗时/s	66	75	-13.6%
标定总耗时/s	260	150	42.3%

图像处理与特征提取结果如图 16 所示, 系统能有效识别零件轮廓与孔径边缘。尺寸检测精度分析如表 4 所示, 绝对误差控制在 ± 0.02 mm 以内, 尺寸的相对误差均小于, 证明了系统在精密尺寸测量中的准确性和可靠性。

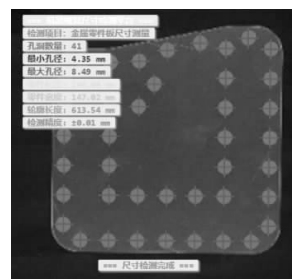


图 16 处理结果

表 4 零件尺寸检测结果报告 (n = 10)

检测	标称值/mm	测量均值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
长度	146.04	146.03	-0.01	0.007
宽度	147.05	147.07	+0.02	0.014
孔径	8.50	8.49	-0.01	0.118

实验结果表明,平台在精密尺寸检测中具有显著优势。高精度的标定结果为尺寸测量提供了可靠的转换基准,而自动化的流程设计则大幅提升了操作效率。与传统人工方法相比,该平台不仅保证了更高测量精度,而且实现了效率显著的提升。

5 总结

该设计并实现了一种基于自标定功能的机器视觉尺寸检测平台,构建了融合笛卡尔运动系统、毫米级刻度板与多层控制架构的软硬件协同系统。实验表明,该系统能显著提升校准效率与检测精度。

在硬件方面构建了三维运动系统,该系统由多类型电动执行器协同驱动组成,并且集成了毫米级精度边缘刻度板等部件,形成了完整的检测硬件体系,软件运用多层次控制体系,构建出一套完整的闭环系统。未来可对结构设计给予优化,探索与先进算法相互融合,提升平台的适应性、稳定性以及检测精度和效率。

参考文献:

- [1] 韩瑞琦. 基于机器视觉的移动式尺寸检测平台研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.
- [2] 罗国强,潘光洋. 一种双目相机自标定改进算法[J]. 自动化与仪器仪表,2025(04):97-101+106.
- [3] 石李智,刘宾. 关于相机自标定算法的研究[J]. 电子技术应用,2024,50(07):78-82.
- [4] 薛琛,陈挺,陈浩,等. 基于机器视觉的量规测位偏差自动调整装置研究[J]. 工具技术,2024,58(05):137-141.
- [5] 司徒风云. 数控机床加工误差分析与补偿方法研究[J]. 南方农机,2025,56(16):156-159.
- [6] 杨艺舒. 运动状态对原子干涉重力测量误差影响研究[D]. 北京:军事科学院,2024.
- [7] 张国宁. 基于YOLO的目标检测软硬件协同设计[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2024.
- [8] 董嫚旒,闫亚宾,赵苗言,等. 基于MATLAB APP Designer的吊装机械电控系统检测平台设计[J]. 自动化与仪表,2025,40(02):148-150+164.
- [9] 柏广泉,孟燕菲,邓礼兵,等. 装置视觉检测系统的设计与应用[J]. 科技创新与应用,2025,15(08):136-140.
- [10] 庄欠芬. 利用单片机实现机电一体化系统的高效控制[J]. 时代汽车,2025(18):130-132.
- [11] 蔡站文. 三维工作台的研制及其精度优化研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2022.
- [12] 张延顺,宁远涛,黄涛,等. 基于STM32和PyQt5的分子泵监控系统设计与实现[J]. 工业仪表与自动化装置,2025(02):60-63+104.
- [13] 何玉辉. 基于Halcon+单片机的视觉识别系统设计[J]. 电脑编程技巧与维护,2024(09):149-151.
- [14] 朱一鑫,董帅,陈凡秀,等. 标定板位姿对相机标定精度的影响[J]. 实验力学,2024,39(06):705-718.
- [15] 汪首坤,赵金枝,姜明,等. 基于圆形阵列标定板的张氏相机标定法[J]. 北京理工大学学报,2019,39(08):859-863.
- [16] 方俊文,司娟宁,王昊伟. 基于张正友标定法的系统姿态调节方法[J]. 传感器世界,2024,30(11):15-19.
- [17] 黄文文,彭小红,李丽圆,等. 相机标定方法及进展研究综述[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(16):9-19.
- [18] 李晓晓,杨涛,雷进,等. 基于Halcon的相机标定方法研究与精度验证[J]. 技术与市场,2023,30(01):8-13.
- [19] 陈键. 基于机器视觉的图像处理与尺寸检测研究[J]. 河南工程学院学报(自然科学版),2022,34(03):61-64.
- [5] 杨兆欣,曾星,张文清. 气体介质条件下的热电偶动态特性[J]. 航空动力学报,2020,35(12):2514-2520.
- [6] 李可,张婷婷,李竟怡,等. 非标短型无补偿导线铍铈热电偶的校准方法研究[J]. 计量学报,2025,46(03):340-346.
- [7] 李岩峰,李佳,魏娟,等. 热电偶动态校准系统设计及动态性能评估方法[J]. 电子质量,2024(04):96-100.
- [8] 王涵宇. 基于脉冲响应的热电偶动态测试系统研究[D]. 太原:中北大学,2023.
- [9] 孟庆富,涂程旭,杨洪波,等. 微秒级温度传感器动态校准研究进展[J]. 电子测量技术,2023,46(24):54-60.
- [10] 贵州航天计量测试技术研究所,浙江大学. 一种校准热电偶温度传感器响应时间常数的装置及使用方法:202510460530.2[P]. 2025-07-18.

(上接第38页)