

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.034

作动筒装配系统的视觉定位方法研究

汤杰¹, 陆永华¹, 朱赞², 李小宝¹, 赵东标¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国航发控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

摘要:为实现作动筒自动装配系统的视觉定位功能,设计一种基于图像处理的作动筒工件视觉定位方法。该方法可以识别检测工件,根据工件尺寸信息筛选目标特定圆轮廓,利用最小二乘法拟合出圆轮廓的中心像素坐标;对眼在手外的视觉系统进行标定,得到相机的内外参数;最终将目标的像素坐标转换到机器人下三维坐标,实现工件的精准定位。通过定位试验验证了该方法的可靠性和精准性,补偿后视觉系统定位精度在 ± 0.1 mm内。

关键词:作动筒;机器视觉;视觉定位;圆拟合;工业机器人

中图分类号:TP391 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0175-05

Research on Vision Positioning Method for Actuator Cylinder Assembly System

TANG Jie¹, LU Yonghua¹, ZHU Yun², LI Xiaobao¹, ZHAO Dongbiao¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. China Aero Engine Control System Research Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: To achieve visual positioning in an automatic assembly system for actuator cylinders, a vision positioning method based on image processing is proposed. This method can identify the workpiece to be inspected, screen specific circular contours according to the workpiece dimensions, and fit the center pixel coordinates of the circular contours using the least squares method. The eye-to-hand vision system is calibrated to obtain the internal and external parameters of the camera. Finally, the target pixel coordinates are converted into three-dimensional coordinates in the robot coordinate system, enabling precise positioning of the workpiece. Positioning experiments verify the reliability and accuracy of the method, with the compensated vision system achieving a positioning accuracy within ± 0.1 mm.

Keywords: actuator cylinder; machine vision; visual positioning; circle fitting; industrial robot

0 引言

飞机作动筒是一种高功率液压执行机构,主要由外筒、活塞和活塞杆等零件组成,如图1所示。在航空领域广泛应用,其工作原理是通过调节活塞两端的压力差来实现活塞往复运动,然后由活塞杆驱动执行机构的运动^[1]。



图1 作动筒零件实物图

开发作动筒自动装配系统取代传统手工装配,可以显著提升装配质量和效率^[2]。工业机器

人因其能够连续执行危险、繁重和复杂的任务,提高工作效率和产品质量,在装配、焊接、码垛等领域得到广泛应用^[3]。传统示教再现机器人的作业轨迹固定,缺乏对环境的感知能力^[4]。智能化工业机器人基于视觉定位可以利用视觉设备感知周围环境,通过图像处理算法从所捕获的图像中提取必要的信息^[5]。尤其是近年来,视觉技术与工业机器人相结合的自动装配系统快速发展^[6]。

本文旨在探究作动筒自动装配系统的视觉定位方法,采用单目视觉引导工业机器人,抓取、对准和装配零件^[7]。

1 作动筒视觉定位系统整体设计

1.1 硬件组成

图2为本文设计搭建的视觉定位系统,由工业相机、相机镜头、环形光源、工控机和6R型工业机器人等^[8]设备构成。系统以工控机为控制中心,与相连设备进行数据交换,使用光源控制器调

节光源亮度,通过交换机触发相机采集并获取图像。相机安装在铝型材支架上,与机器人构成眼在手外的手眼系统^[9]。3台相机视野固定,视角竖直向下,分别检测下方的工件。工件 Z 轴方向移动受限,水平方向上在一定范围内浮动。

根据视觉系统工作距离和定位精度,选用黑白相机,分辨率 $5\,496\text{px} \times 3\,672\text{px}$,像元尺寸 $2.4\,\mu\text{m}$ 。镜头分辨率 $20\,\text{Mpx}$,固定焦距 $75\,\text{mm}$ 。工作距离约为 $780\,\text{mm}$,视场范围为 $137\,\text{mm} \times 91\,\text{mm}$,测量精度较高,约为每像素 $0.024\,9\,\text{mm}$ 。

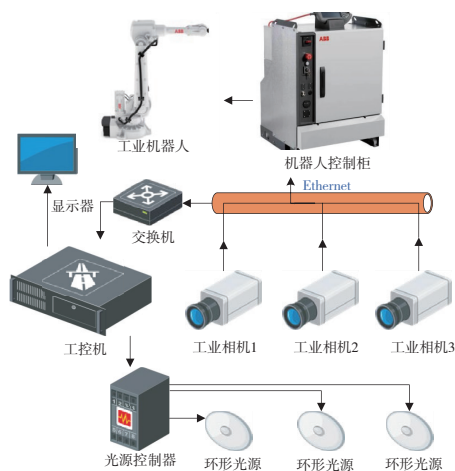


图2 视觉定位系统硬件组成

1.2 软件算法流程

软件整体架构分为离线和在线测量两部分,如图3所示。视觉系统硬件搭建完成后,对相机进行内参标定,并通过手眼标定获取3台相机的外参,用于在线测量时坐标变换。软件系统录入各型号作动筒工件的高度和直径信息,用于在线检测时深度计算与轮廓筛选。

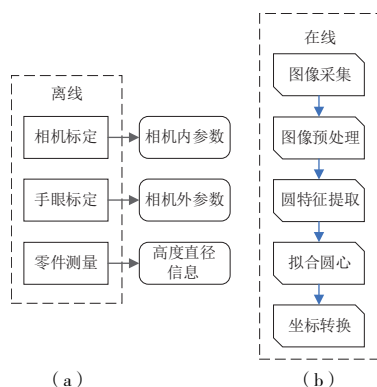


图3 视觉定位算法流程

首先控制光源打光,软件触发相机采集图像。然后对图像进行处理,进行目标识别和定位,结合

离线测量信息进行坐标转换。最后将三维坐标数据发送给机器人,引导工业机器人作业。

软件系统使用 Windows 平台的 Qt Creator 开发,基于 OpenCV 库进行图像处理。图4为视觉定位软件界面,左侧显示原图和 ROI 矩形框,右侧显示拟合出的特征圆轮廓和圆心。



图4 视觉定位软件界面

2 相机模型和手眼标定

在机器视觉应用中,为确定三维空间中某点的几何位置与其在图像中成像点间的转换关系,需建立相机成像的几何模型。准确的成像模型对于获取目标的位姿信息尤为重要,是后续目标定位的基础^[10]。

2.1 相机模型

建立以下4个坐标系描述相机线性模型^[11],变换关系如图5所示。像素坐标系 $O-uv$ 与图像物理坐标系 $O-xy$ 共面,前者的单位是像素,以左上角为原点, u 轴、 v 轴分别与 $O-xy$ 的两边平行。

相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 的单位是 mm ,原点在相机镜头的光心, Z_c 轴与光轴重合,垂直于成像平面, X_c 轴、 Y_c 轴分别和 $O-xy$ 的 x 轴、 y 轴平行。世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 是一个三维空间直角坐标系,用于描述相机和目标物体的空间位置,本文将世界坐标系 $\{w\}$ 建立在机器人基坐标系 $\{\text{base}\}$ 上。

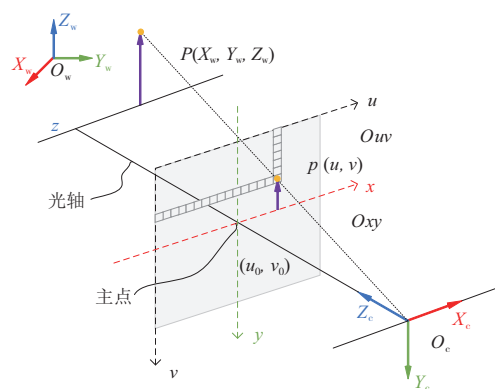


图5 透视投影模型

根据以上透视投影模型可以得到以下变换关

系,式(1)中 K 为相机内参矩阵,式(2)描述了三维空间下点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 到二维像素空间内点 $p(u, v)$ 的映射关系

$$K = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 手眼标定

视觉定位系统手眼关系如图6所示,相机位置相对于机器人基座固定,需求解相机坐标系 $\{cam\}$ 到机器人基坐标系 $\{base\}$ 的转换矩阵,即式(3)中的相机外参 M

将圆形标定板安装到机器人末端,移至相机的工作距离,相机采集15张机器人不同位姿下的标定板图片,并记录机器人对应位姿^[12]。使用张正友标定法^[13]进行求解,求解相机内参 K 和相机外参 M

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

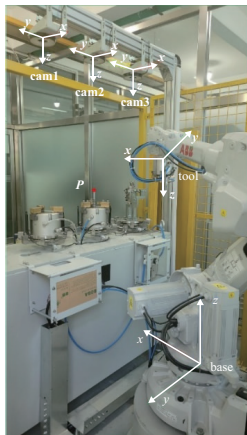


图6 视觉定位系统手眼关系示意图

3 工件识别定位与坐标转换

3.1 目标物体轮廓提取

图像处理在视觉定位中起着至关重要的作用。

以作动筒外筒工件为例,图7为筒口图像,存在多个圆轮廓,提取图像中工件孔口倒角圆特征。

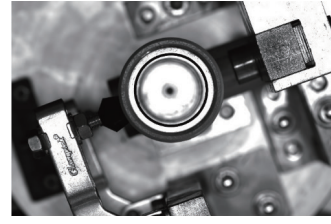


图7 作动筒的筒口图像

将筒口部分从原始图像中裁剪出来得到图8(a),使用OTSU算法对图8(a)进行阈值分割得到图8(b);然后对其进行形态学闭运算和开运算^[14],去除孤立点并填补内部空洞得到图8(d);其次对其进行轮廓查找,查找出的轮廓区域绘制为图8(e);最后根据条件筛选出筒口倒角对应的图8(f)。

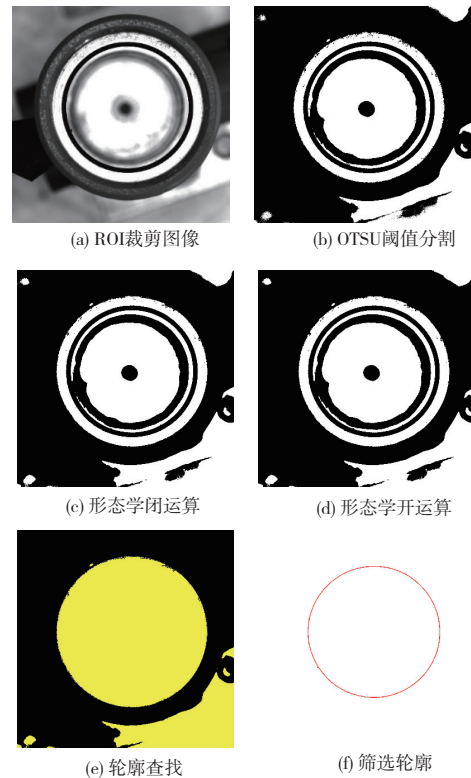


图8 轮廓筛选处理流程

3.2 轮廓圆心拟合

图8(f)近似正圆,采用圆拟合算法对该轮廓进行拟合^[15]。已知轮廓边缘像素点,本文使用最小二乘法拟合离散的边缘像素点,设拟合圆的圆心坐标为 (x_c, y_c) ,半径为 r_c ,则其圆方程可表示为式(4)。

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r_c^2 \quad (4)$$

通过最小二乘法拟合,可以获得圆轮廓的圆心坐标和半径信息。

3.3 目标物体三维坐标

本文使用单目视觉定位^[16-17],被拍摄物体相对于世界坐标系 $\{w\}$ 有一定高度,目标高度用 Z_w 表示。不同型号工件高度不同,代入式(5)求解出深度方向信息 Z_c 。结合相机内外参数,已知物体像素坐标 (u,v) ,根据式(6)即可求解其对应三维世界坐标 $[X_w \ Y_w \ Z_w]^T$,实现目标空间定位。

$$\begin{cases} M_{at,l} = R^{-1} K^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, & M_{at,r} = R^{-1} T \\ Z_c = \frac{Z_w + M_{at,r}(2,0)}{M_{at,l}(2,0)} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $M_{at,r}(2,0)$ 和 $M_{at,l}(2,0)$ 表示对应矩阵第三行元素

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = R^{-1} \left(K^{-1} Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} - T \right) = R^{-1} K^{-1} Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} - R^{-1} T \quad (6)$$

4 试验验证与结果分析

为验证本文提出的定位方法可行性,在作动筒视觉装配平台上进行试验,以图6中cam3为例,下方工件筒口 Z_w 为934.140 mm时,由式(5)可以求出 Z_c 为777.529 mm。调整筒口水平位置,采集11张不同位置下的筒口图像,利用本文的定位方法进行位置计算,并与实际位置比对,数据如表1所示。

表1 工件视觉定位结果与实际位置对比

试验编号	像素坐标 $(u,v)/\text{px}$	视觉定位坐标 $(X_w, Y_w)/\text{mm}$	实际位置坐标 $(X'_w, Y'_w)/\text{mm}$
1	(2 680.17, 1 601.95)	(813.659, -521.489)	(813.972, -521.732)
2	(2 675.04, 1 503.96)	(813.756, -523.814)	(814.033, -524.223)
3	(2 715.71, 1 543.98)	(812.802, -522.855)	(813.120, -523.066)
4	(2 671.42, 1 718.51)	(813.897, -518.728)	(814.171, -518.963)
5	(2 628.19, 1 723.89)	(814.923, -518.612)	(815.240, -518.923)
6	(2 858.98, 1 693.59)	(809.443, -519.271)	(809.740, -519.485)
7	(2 627.52, 1 505.33)	(814.883, -523.794)	(815.159, -524.022)
8	(2 728.38, 1 719.94)	(812.546, -518.680)	(812.700, -518.968)
9	(2 838.93, 1 752.06)	(809.933, -517.890)	(810.236, -518.219)
10	(2 646.42, 1 645.23)	(814.471, -520.472)	(814.786, -520.830)
11	(2 823.68, 1 532.18)	(810.239, -523.107)	(810.607, -523.505)

试验结果表明工件视觉定位坐标与实际位置存在一定偏差,但偏差较小,本文的定位方法精度高、稳定性好。如图9所示,11组坐标数据 x 方向、 y 方向的偏差存在规律。偏差代入式(7)中计算,坐标的平均偏移为 $\bar{\Delta x} = -0.292 \text{ mm}$, $\bar{\Delta y} = 0.293 \text{ mm}$ 。

$$\bar{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i, \quad \bar{\Delta y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta y_i \quad (7)$$

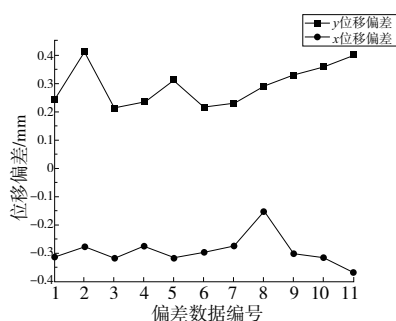


图9 定位点坐标 x 方向、 y 方向误差

将平均偏差反向补偿到视觉定位结果,可以减小定位偏差,提高定位精度,修正后系统的定位精度在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 内。

5 结语

本文提出了一种用于作动筒装配系统的视觉定位方法,完成了视觉定位系统试验平台的设计与搭建,涉及硬件选型和软件平台开发。通过对作动筒图像进行预处理、轮廓查找和筛选、圆拟合以及坐标转换等步骤,实现了作动筒工件在装配系统下的精准定位,试验验证其定位精度在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 内。该方法可用于引导工业机器人对准、抓取和装配零件。

参考文献:

- [1] 董勇. 作动筒位移传感器测试系统设计和动态测试误差分析[D]. 西安:西安理工大学,2006.

- [2] 许翰卿,胡欢,李天剑,等. 一种基于机器视觉的轴孔装配控制方法[J]. 机床与液压,2025,53(9):23-30.
- [3] 孟明辉,周传德,陈礼彬,等. 工业机器人的研发及应用综述[J]. 上海交通大学学报,2016,50(增刊1):98-101.
- [4] 刘宝临,邹汶材. 基于视觉定位的机器人智能拆垛系统[J]. 计算机系统应用,2023,32(7):138-144.
- [5] 尹仕斌,任永杰,刘涛,等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. 光学学报,2018,38(8):11-22.
- [6] 蒋彬. 基于机器视觉的目标检测与多轴孔精密装配系统研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.
- [7] 王新,郭俊. 工业机器人单目视觉装配系统研究[J]. 机械设计与制造,2024(6):342-347.
- [8] 朱福康. 工业机器人轴孔装配视觉定位方法[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [9] 国正. 基于机器人手眼系统的无纹理工业堆叠零件识别与定位研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
- [10] 王诗宇. 智能化工业机器人视觉系统关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所),2021.
- [11] 石岩青,常彩霞,刘小红,等. 面阵相机内外参数标定方法及进展[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(24):1-21.
- [12] 洪立. 基于圆形标定板的相机标定改进方法研究[D]. 大庆:东北石油大学,2024.
- [13] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(11):1330-1334.
- [14] 张亚奇. 量子图像的阈值分割及形态学方法研究[D]. 大庆:东北石油大学,2025.
- [15] 孔盛杰,黄翔,周崩,等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(4):247-255.
- [16] 杜广胜. 面向工业机器人装配的单目视觉定位方法[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [17] 曾鹏. 基于单目视觉的工件定位与机器人抓取技术研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.

收稿日期:2024-01-05

(上接第94页)

4)通过建立铰链元件下游测量截面的总压分布模型,可快速得到下游截面的总压分布情况,且随机森林方法建立的模型性能优于BP神经网络;几何特征对总压分布影响的重要程度从大到小依次为张开角度、宽高比和开孔率。

参考文献:

- [1] 杨权. 航空发动机进气压力畸变评估试验装置的选择[C]. //大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年年会论文集. 深圳:2007:303-307.
- [2] 刘大响,叶培梁,胡骏. 航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定技术[M]. 北京:航空工业出版社,2004.
- [3] GJB 9891-2020 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机进气压力畸变试验方法[S].
- [4] BEALE D,DAVIS M,SIRBAUGH J. Requirements and advances in simulating aircraft inlet total pressure distortion in turbine engine ground tests[C]// ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air, Barcelona,Spain: 2008:25-36.
- [5] 刘阳,陈杰,黄国平. 管内插板后稳动态流动规律研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(3):125-129.
- [6] DIPIETRO T. Fundamental wind tunnel experiments for total pressure distortion generator concept selection[R]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [7] CRAMER K B. Design of a total pressure distortion generator for aircraft engine testing [D]. Virginia Tech, 2002.
- [8] BEALE D,WIELAND S,REED J,et al. Demonstration of a transient total pressure distortion generator for simulating aircraft inlet distortion in turbine engine ground tests[C]// ASME Turbo Expo 2007: Power for Land,Sea,and Air, Montreal,Canada: 2009:39-50.
- [9] 叶巍,陆德雨,李丹,等. 畸变模拟板的设计与试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2001,14(2):1-8.
- [10] 王勤,刘世官,王振华. 某型发动机进气总压畸变流场中涡旋尺度的计算及其变化特征[J]. 航空发动机,2003,29(2):29-33.

收稿日期:2024-01-09