# 工业机器人视觉定位系统的实现

冯志刚<sup>1,\*</sup>,李泷杲<sup>1</sup>,熊天辰<sup>2</sup>,江一帆<sup>1</sup>
1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016

2. 江西航天海虹测控技术有限责任公司, 江西 南昌 330013

**摘 要**:描述了一种利用机器视觉技术的工业机器人定位系统,可用于飞机小型零部件的装配定位和复合材料胶结部件的 加压保压等作业。系统利用双目相机对目标工件上的反射靶标进行测量,获取机械臂末端与工件间的相对位姿关系,系统 控制模块根据位姿反馈驱动末端进行位姿调整,实现末端对工件的精确定位。利用激光跟踪仪对位姿偏差进行测量,结果 表明位置误差为0.11mm,姿态误差为0.04°,在定位精度和稳定性方面均能满足实际应用需求。

关键词:双目视觉,工业机器人,装配定位,机器视觉

## 中图分类号: TP242.2 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.06.048

工业机器人以其效率高、稳定性强、环境适应性强等特 点,配合各种末端执行器被广泛地应用在自动制孔、装配定 位、切割焊接、检测探伤、喷涂等飞机装配作业中。传统的工 业机器人因其精度、刚度和负载的不足<sup>[1]</sup>,在飞机装配的应 用中受到限制,随着机器人技术的发展,工业机器人已演变 成了一种柔性化、自主化、智能化的设备。机器视觉技术通 过非接触测量手段,获取目标特征和丰富的环境数据,能够 实时地对目标或环境的变化做出响应,通过与机器人的集 成,提高了机器人对环境的感知和应变能力,减少了机器人 前期示教或离线编程所占用的时间,成为工业机器人智能化 发展中被广泛研究和应用的技术手段。

本文描述的机器人定位系统针对飞机数字化装配对定 位精度的要求,采用双目视觉测量技术作为机器人作业的辅 助定位手段,研制了基于双目视觉的机器人定位系统。系统 利用双目相机对目标工件定位特征点进行图像采集,通过图 像处理技术获取末端执行器位姿和目标位置信息,并对相应 的数据进行计算处理,控制机器人完成精确定位的作业任务。

### 1 系统组成

#### 1.1 硬件部分

如图1所示,系统主要由控制中心、移动平台、工业相机、末端执行器、工业机器人和作业对象组成。



图 1 系统硬件组成示意图 Fig.1 Diagram of system hardware components

由工业相机和末端执行器组成的立体视觉测量系统是 本系统的重要组成部分。末端执行器通过法兰安装在机器 人末端,工业相机采用 AVT Stingray F-504C 相机,像素为 2452×2056,采用 8mm 的定焦镜头。在相机分布、倾斜角 度、安装高度等方面进行了充分的考虑,保证作业对象能够 处在两个相机的公共视场内。作业对象是被定位待作业的 工件,可以是待装配的飞机零件或需要加压保压的复合材料 胶接件,系统测量的定位特征点为粘贴的反射靶标。为便 于后续描述,本文采用如图 1 所示的工件示意图作为作业

收稿日期:2018-04-08; 退修日期:2018-04-24; 录用日期:2018-05-16 基金项目:航空科学基金(2016ZE52053)

\*通信作者.Tel.: 18761685018 E-mail: zhigangfeng123@163.com

引用格式: Feng Zhigang, Li Shuanggao, Xiong Tianchen, et al. Implementation of visual location system for industrial robot [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (06): 48-53. 冯志刚,李泷杲,熊天辰,等. 工业机器人视觉定位系统的实现[J]. 航空科学技术, 2018, 29 (06): 48-53.

## 对象。

## 1.2 软件部分

系统软件主要功能包括如下4个方面:(1)信息提取; (2)系统标定;(3)视觉定位;(4)运动控制。根据系统的功能要求,软件的工作流程如图2所示。



图 2 软件工作流程图 Fig.2 Software workflow

## 2 **定位原理**

## 2.1 工件信息提取

信息提取基于 CATIA 等三维设计软件二次开发平台, 主要包括特征信息提取、理论位姿计算、数据存储模块,如 图 3 所示。



Fig.3 Structure of information extraction

信息提取的目的在于获取定位特征点在工件坐标系下 的坐标,以外形面形心点为坐标原点,法向为Z轴方向,在 工件上建立工件坐标系,即机器人末端定位时的理论位姿, 如图4所示,其中P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub>,P<sub>3</sub>,P<sub>4</sub>为定位特征点,在实际的应 用中,其为粘贴的反射靶标,坐标系W为工件坐标系,即理 论位姿。信息提取模型根据精度要求的不同,可以是理论设 计模型,也可以是实际工件的逆向重建模型。工件信息提取 作业可离线进行,在进行具体的定位任务时,只需通过索引

#### 对存储的信息进行提取。



## 图 4 信息提取示意图

## Fig.4 Diagram of information extraction

## 2.2 系统标定

标定系统的各坐标系关系,如图5所示。



Fig.5 Diagram of coordinate system

其中,坐标系 R, C, L, T, S 分别为机器人末端坐标系、 相机坐标系、T<sub>i</sub>(*i*,*j*=*R*,*C*,*L*,*T*,*S*)激光跟踪仪测量坐标系、末端 执行器工具坐标系、标定工装坐标系,表示坐标系*i*到坐标 系*j*的变换矩阵,机器人末端只给出了与末端执行器连接的 局部。

系统的标定主要包括双目相机的内外参数标定<sup>[2]</sup>、机器人的手眼标定、末端执行器的末端标定。相机标定的目的 是获得相机的内参数和两个相机的相互位置关系,机器人的

(4)

手眼标定是为了获得相机与机器人末端的位置关系,即变换 矩阵  $T_{CR}$ ,末端标定是为了获得执行器工具末端与机器人末 端的位置关系,即变换矩阵  $T_{RT}$ 。相机标定的具体过程见参 考文献[3],其他标定中,以手眼标定为例,其标定过程如图 6 所示。



图 6 手眼标定坐标系转换关系图

Fig.6 Coordinate transformation diagram of hand-eye calibration

分别在标定工装和机器人末端的P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>和 P'<sub>1</sub>, P'<sub>2</sub>, P'<sub>3</sub>点处放置激光跟踪仪的反射靶球,其中各点在相应 坐标系中的坐标已知,记为**P**<sub>51</sub>, **P**<sub>52</sub>, **P**<sub>53</sub>和**P**'<sub>R1</sub>, **P**'<sub>R2</sub>, **P**'<sub>R3</sub>。利 用激光跟踪仪测得各点在测量坐标系中的坐标,记为**P**<sub>L1</sub>, **P**<sub>L2</sub>, **P**<sub>L3</sub>和**P**'<sub>L1</sub>, **P**'<sub>L2</sub>, **P**'<sub>L3</sub>, 双目相机测得的各点坐标为**P**<sub>C1</sub>, **P**<sub>C2</sub>, **P**<sub>C3</sub>。根据坐标转换关系,可以得到式(1)~式(3)三组 方程组:

$$\begin{cases} \boldsymbol{T}_{CS} \boldsymbol{P}_{C1} = \boldsymbol{P}_{S1} \\ \boldsymbol{T}_{CS} \boldsymbol{P}_{C2} = \boldsymbol{P}_{S2} \\ \boldsymbol{T}_{CS} \boldsymbol{P}_{C3} = \boldsymbol{P}_{S3} \end{cases}$$
(1)

$$\begin{cases} T_{SL} P_{S1} = P_{L1} \\ T_{SL} P_{S2} = P_{L2} \\ T_{SL} P_{S3} = P_{L3} \end{cases}$$
(2)

$$\begin{cases} \boldsymbol{T}_{LR} \boldsymbol{P}_{L1} = \boldsymbol{P}_{R1} \\ \boldsymbol{T}_{LR} \boldsymbol{P}_{L2} = \boldsymbol{P}_{R2} \\ \boldsymbol{T}_{LP} \boldsymbol{P}_{L3} = \boldsymbol{P}_{P3} \end{cases}$$
(3)

式中:  $T_{ij} = \begin{bmatrix} R_{ij} & t_{ij} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $P_{in} = (x_{in}, y_{in}, z_{in})^{\mathrm{T}}$ , (i, j = R, C, L, T, S; n = 1, 2, 3),  $R_{ij}$  为旋转矩阵,  $t_{ij}$  为平移矢量。

变换矩阵的求解方法主要有最小二乘法<sup>[4]</sup>、奇异值分解 法<sup>[5]</sup>和四元数法,此处利用四元数<sup>[6]</sup>法求得**T**<sub>CS</sub>,**T**<sub>SL</sub>,**T**<sub>LR</sub>,则 相机与末端的位置关系 T<sub>CR</sub>,便可通过式(4) 求出。

$$T_{CR=}T_{CS}T_{SL}T_{LR}$$
  
2.3 立体视觉定位调姿

在获得了信息提取和系统标定两个阶段的数据之后, 便可利用双目视觉进行位姿的求解与调整。

如图 7 所示,相机对目标工件进行图像采集,利用图 像处理算法<sup>[3, 7, 8]</sup> 对工件上的反射靶标特征进行提取,根 据立体视觉测量原理<sup>[9]</sup>,求得各靶标点在在相机坐标系下 的坐标,记为 **P**<sub>C1</sub>, **P**<sub>C2</sub>, **P**<sub>C4</sub>,设信息提取阶段求得的 靶标点在工件坐标系下的坐标为**P**'<sub>W1</sub>, **P**'<sub>W2</sub>, **P**'<sub>W4</sub>,记相 机坐标系与工件坐标系的变换矩阵为**T**<sub>CW</sub>,则可建立方 程组:

$$\begin{cases} \boldsymbol{T}_{CW} \boldsymbol{P}_{C1} = \boldsymbol{P}'_{W1} \\ \boldsymbol{T}_{CW} \boldsymbol{P}_{C2} = \boldsymbol{P}'_{W2} \\ \boldsymbol{T}_{CW} \boldsymbol{P}_{C3} = \boldsymbol{P}'_{W3} \\ \boldsymbol{T}_{CW} \boldsymbol{P}_{C3} = \boldsymbol{P}'_{W3} \end{cases}$$
(5)



图7 不端定位示意图 Fig.7 Diagram of end effector location

通过解方程组求得 $T_{CW}$ ,根据末端标定 $T_{TR}$ ,手眼标定 $T_{RC}$ ,可以求得:

$$\boldsymbol{T}_{TW} = \boldsymbol{T}_{TR} \boldsymbol{T}_{RC} \boldsymbol{T}_{CW} \tag{6}$$

**T**<sub>TW</sub> 为末端当前位姿与目标位姿的偏差,通过将偏差解 算为机械臂的运动数据,传送到运动控制模块,驱动机器人 末端运动,重复上述步骤,直至当前位姿与目标位姿的偏差 值在设定阈值之内。

## 3 定位精度测量试验

试验平台如图 8 所示。



图 8 试验平台 Fig.8 Experimental platform

根据精度测量方法,设计如图9所示的验证工装,其中 凹槽代表工件的空间虚拟位置,在凹槽角点处粘贴靶标纸作 为特征角点。工装上设计激光跟踪仪基准孔,便于使用激光 跟踪仪验证机器人定位精度,在末端定位到目标位置之后, 利用激光跟踪仪分别测量工装上的靶标点和执行器工具端 的靶标点,获得两者之间的位姿关系,即视觉定位的误差,实 验的位置误差阈值为0.2mm,姿态误差阈值为0.05°。



图 9 验证工装 Fig.9 Verification tooling

具体试验流程如下:

(1)通过手动示教将机器人运动到验证工装上方,保证 相机视场能够拍摄整块工件,

(2)视觉测量工件角点,获取机器人末端执行器与工件 相对位置关系,

(3)将(2)中结果解算为机器人调姿运动量;

(4) 机器人调姿运动;

(5) 重复步骤(2)~步骤(4),直到测得的相对位姿误

差小于设定的阈值;

(6) 激光跟踪仪测量工装与末端执行器基准点;

(7) 基于激光跟踪仪测量值计算末端执行器与工件的 相对位置关系;

(8)基于计算结果评估基于视觉测量的机器人定位精 度。

使机器人末端处于不同的初始姿态,利用本系统共进 行了5次定位试验,测量得到的误差数据见表1。

表 1 定位精度测量试验数据 Table 1 The data for positioning experiments

组数	位置误差 /mm			姿态误差/(°)		
	Х	Y	Ζ	A	В	С
1	0.041	0.084	0.053	0.012	0.044	0.023
2	0.062	0.061	0.074	0.018	0.013	0.024
3	0.033	0.091	0.061	0.002	0.025	0.038
4	0.072	0.073	0.054	0.017	0.026	0.023
5	0.073	0.084	0.081	0.013	0.03	0.025

图 10 为末端工具坐标系与工件坐标系的位置和姿态 误差。其中,位置误差的均值为 0.11mm,方差为 9.6×10<sup>-4</sup>, 姿态误差的均值为 0.041°,方差为 3.5×10<sup>-5</sup>,其定位精度和 稳定性均满足要求。



在5组试验中,选择其中2组,对其从初始调姿到位姿 误差收敛的整个过程中,测量每一次调姿的误差,其误差在 各轴上的分布曲线如图11所示。

除了对定位精度的要求外,定位效率也是一个关键指标,而系统的调姿次数是影响效率的关键因素。从图 11 可以看出,平均三次调姿便可达到定位精度的要求,而且调姿过程中机器人运动至理论位姿的运动偏移量很小,不会引起测量视场丢失目标的现象。



Fig.11 Curve of error convergence

## 4 结论

本文描述的工业机器人定位系统,利用双目视觉测量 技术,获取末端执行器与目标的相对位姿,以位姿作为机器 人的运动反馈,驱动机器人进行迭代调姿以运动至目标作业 位置,整个系统构成了一个位置反馈型的闭环系统,具备定 位精度高、抗噪性能好、自主性和柔性程度高等特点,试验结 果表明该系统满足装配定位的应用要求。

#### 参考文献

[1] 秦瑞祥,邹冀华.工业机器人在飞机数字化装配中的应用[J].
 航空制造技术,2010(23):104-108.

Qing Ruixiang, Zou Jihua. Application of industrial robot in aircraft digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010 (23): 104–108. (in Chinese)

- [2] Zhang Zhengyou.A flexible new technique for camera calibration[J].Tpami, 2000, 22 (11): 1330–1334.
- [3] 布拉德斯基.克勒.学习 OpenCV [M].北京:清华大学出版 社, 2009.

Kaehler A, Bradski G. Learning OpenCV[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)

- [4] 沈海平,达飞鹏,雷家勇.基于最小二乘法的点云数据拼接研究[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10 (9): 1112-1116.
  Shen Haiping, Da Feipeng, Lei Jiayong. Research of point-clouds registration based on Least-square method[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10 (9): 1112-1116. (in Chinese)
- [5] 牛雪娟,刘景泰.基于奇异值分解的机器人工具坐标系标定
  [J].自动化与仪表,2008,23 (3):1-4.
  Niu Xuejuan, Liu Jingtai. Robot tool control frame calibration based on SVD[J]. Automation & Instrumentation, 2008, 23 (3): 1-4. (in Chinese)
- [6] 王勇,马立元,王忠强.四元数法在计算机图形学中的应用
  [J]. 军械工程学院学报,2001,13 (2):48-51.
  Wang Yong, Ma Liyuan, Wang Zhongqiang. Application research of quaterion in computer garphics[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2001, 13 (2): 48-51. (in Chinese)
- [7] 张会章,张利霞,郭雷.用霍夫变换来提取目标边界[J]. 计算机应用,2003,23 (z1):117-119.

Zhang Huizhang, Zhang Lixia, Guo Lei. Extracting target boundary by Hough transform[J]. Computer Applications, 2003,

[8] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C]//IEEE International Conference on Computer Vision, 2012; 2564–2571.

[9] Richard S. 计算机视觉:算法与应用 [M]. 北京:清华大学出版 社, 2012.
Richard S. Computer vision: Algorithms and applications[M].
Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)

## 作者简介

冯志刚(1993-) 男,硕士研究生。主要研究方向:数字化 测量技术。
Tel:18761685018
E-mail:zhigangfeng123@163.com
李泷呆(1978-) 男,博士,副教授。主要研究方向:飞机数字化装配与测量技术。
E-mail:lishuanggao@nuaa.edu.cn

## Implementation of Visual Location System for Industrial Robot

Feng Zhigang<sup>1</sup>, Li Shuanggao<sup>1,\*</sup>, Xiong Tianchen<sup>2</sup>, Jiang Yifan<sup>1</sup>

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Jiangxi Aerospace Haihong Test & Control Co. Ltd., Nanchang 330013, China

**Abstract:** An industrial robot positioning system based on machine vision which applies to aircraft assembly and packing was introduced in this paper. The system measured the reflecting target affixed to part by binocular camera and calculated the pose between end effector and part as the feedback of control system to drive the end effector to move to precise position. A series of precision measurement experiments were performed by laser tracker. The results show that position uncertainty is 0.11mm, angle uncertainty is 0.04°, positioning accuracy and stability can meet the practical application requirements.

Key Words: binocular vision; industrial robot; assembly location; machine vision

Received: 2018-04-08;Revised: 2018-04-24;Accepted: 2018-05-16Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2016ZE52053)\*Corresponding author.Tel.: 18761685018E-mail: zhigangfeng123@163.com