

## 三自由度并联机械手的目标定位和轨迹规划的设计与验证

甄卓, 刘朝英, 宋哲英, 宋雪玲  
(河北科技大学, 石家庄 050000)

**摘要:** 将机器视觉技术应用到三自由度并联机械手的目标定位中,建立了三自由度并联机械手位置逆解的数学模型。采用 LabVIEW 软件编写上位机程序,并运用 Matlab 软件对机械手轨迹规划的算法进行仿真,完整地模拟出了机械手完成抓取任务的整个工作过程。最后,完成了样机的制作,并对样机进行了测试。通过将实验数据与理论设计进行对比,可以有效地证明理论分析和模型建立的正确性,同时也进一步证明引入机器视觉技术可以提高并联机械手的智能化和定位的精准化。

**关键词:** 机器视觉; 三自由度并联机械手; 轨迹规划; LabVIEW

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)01-0093-04

## Design and Verification of Target Localization and Trajectory Planning for 3-DOF Parallel Manipulator

ZHEN Zhuo, LIU Chao-ying, SONG Zhe-ying, SONG Xue-ling  
(Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** The robot vision technology was applied to the target location of the 3-DOF parallel manipulator, and a mathematical model of the position inverse solution for the manipulator with 3-DOF was established. The LabVIEW software was used for programming and Matlab software was used to simulate the manipulator trajectory planning algorithm, thus the simulation of the whole working process of the grasping task was implemented. Finally, the prototype of 3-DOF parallel manipulator was made and tested. By comparing the experimental data with the theoretical design, the correctness of the theoretical analysis and model is proved. It is also proved that the introduction of machine vision technology can increase the intelligent level and positioning precision of the parallel manipulator.

**Key words:** machine vision; 3-DOF parallel manipulator; trajectory planning; LabVIEW

### 0 引言

随着计算机技术、网络技术以及人工智能化的飞速发展,能够实现多方位、多角度、多功能、智能化的自动化工业机器人成为了现代自动化生产线的重要组成部分。其凭借特有的多自由度检测方位和快速有效的抓取、放置特征,在汽车工业、航空制造、电子封装和现代物流等规模化生产中具有广泛的应用。

1985年 CLAVEL 等人发明了一种高速并联机械手——Delta 机械手<sup>[1]</sup>;1987年瑞士 Demaurex 公司首先实现了 Delta 机械手的工业化生产,制造出 Pack-Placer, Line-Placer, Top-placer 和 Presto 等工业机器人

产品<sup>[2-3]</sup>。为了解决 UPU 支链的问题,PIERROT 等人于 1999 年发明了一种可实现 3 个平动自由度和 1 个转动自由度的 H4 机械手。近年来,国内外学者针对高速并联机械手的设计,围绕其拓扑结构创新、尺度参数设计、精度分析、动态分析、运动控制等方面开展了大量研究工作<sup>[4-7]</sup>。

为了实现快速准确地对待抓物体进行定位,机器视觉技术被广泛应用到机器人控制系统中。机器视觉是一个飞速发展的新兴研究领域,已成为计算机科学的重要研究领域之一<sup>[8]</sup>。视觉机械手的工业应用始于 20 世纪 90 年代初。日本 FANUC 公司开发的 6 轴多功能、高速、高精度串连视觉机械手 R-2000i,主要可用于随机堆放工件的 pick-and-place 操作或者大型物体的排列和整理工作,其最大抓取速度为 30 次/min。然而,由于串联机械手自身难以克服的缺点,并不适用

收稿日期:2014-12-12

修回日期:2015-10-13

作者简介:甄卓(1986—),男,河北保定人,硕士生,研究方向为智能型并联机构设计及开发,机器视觉。

于对物流系统进行高速或超高速操作。因此,ABB公司借助于Adept技术开发了基于Delta并联机构的视觉机械IRB340 FlexPicker。

本文在西林瓶产品质量检测系统的背景下,进一步对带有机器视觉的三自由度并联机械手的目标定位、轨迹规划进行了设计和验证。设计中,主要采用LabVIEW技术编写目标定位上位机程序,并运用Matlab软件实现了三自由度并联机械手轨迹规划的仿真,完整地模拟出了机械手完成抓取任务的整个工作过程,同时对机械手样机进行了测试,通过与仿真对比,验证了理论的正确性。

### 1 三自由度并联机械手结构设计

本文采用SolidWorks软件来搭建机械手机械结构模型和各部位细节,如图1所示。该三自由度并联机械手主要由静平台、吸盘、动平台、3个主动臂、3个从动臂组成。静平台通过3条轴对称均匀分布的运动链分别连接到动平台上,且每条运动链都是由1个主动臂和1个从动臂组成,其中,从动臂是由4个球形副和杆件组成的闭环机构,该闭环机构直接与主动臂串联固定。因此,通过控制伺服电机转动角度的变化来实现动平台在空间内的三自由度运动。

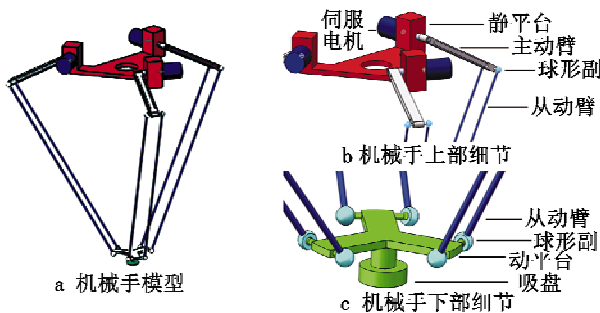


图1 机械手模型

Fig.1 3D model of the manipulator

### 2 目标获取和定位

由于NI公司的VBAI组件只能够完成快速样机的搭建功能,不能真正运用于工业生产。同时,LabVIEW是一种图形化的编程软件,只需选择合适的功能函数,配置好参数,便可以实现产品样机的测试功能以及满足商业级产品控制需求。所以,本文采用LabVIEW软件来编写目标定位的程序。

LabVIEW可以连接摄像机,借助于摄像机将待抓取实验物体的图像导入上位机。具体的目标获取和目标定位流程为:图像采集、灰度处理、距离标定、模板匹配、建立坐标、坐标输出、串口通信等<sup>[9]</sup>。

下面以实验物体为例进行分析。此实验物体为某

机械零件,将其图像通过摄像机导入到LabVIEW软件编写的上位机中,初始图像为彩色,图2为目标经过定位处理的过程图片。

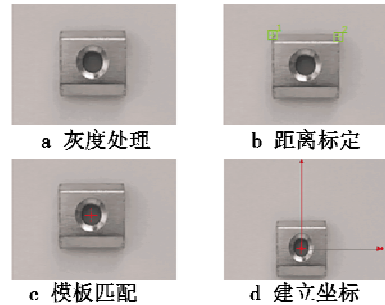


图2 上位机处理过程

Fig.2 Image processing

完整的LabVIEW程序如图3所示,图像获取和定位等各个环节分别被封装成了6个子VI。

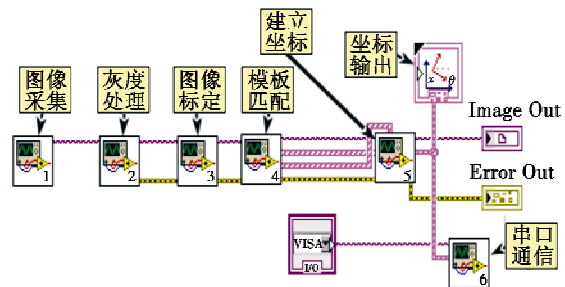


图3 LabVIEW完整程序

Fig.3 Complete program of LabVIEW

### 3 三自由度并联机械手位置逆解

三自由度并联机械手简化几何模型如图4所示。

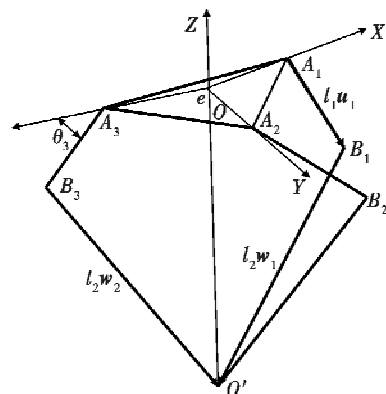


图4 并联机械手简化几何结构图

Fig.4 Simplified geometric model diagram

图4中:质点 $O'$ 代表动平台,参考坐标系 $O-XYZ$ 建立在静平台中心<sup>[10-12]</sup>,在该坐标系下动平台参考点 $O'$ 的位置可表示为 $r = [x, y, z]$ ;  $A_1, A_2, A_3$ 分别为3条主动臂和静平台的连接点; $B_1, B_2, B_3$ 分别为3条主动臂和从动臂的连接点; $O$ 为静平台的中心点,也是在静平台上建立的坐标系的原点; $e$ 为三角形静平台 $A_1A_2A_3$ 的外

接圆的半径,在实际中代表静平台和动平台外接圆半径的差; $l_1, l_2$  是标量,分别为主动臂和从动臂的长度; $u_i, w_i$  分别为支链  $i$  的主动臂和从动臂的单位矢量; $\theta_i$  为主动臂的转角。

图 4 中,  $O'$  点的位置矢量可表示为

$$r = e_i + l_1 u_i + l_2 w_i \quad i=1,2,3 \quad (1)$$

式中,  $O$  到  $A_i$  的向量  $e_i$  为动平台与静平台的外接圆半径差,经过推导可表示为

$$e_i = e(\cos \beta_i \quad \sin \beta_i \quad 0)^T \quad (2)$$

静平台结构角的表达式为

$$\beta_i = (i-1) \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6} \quad (3)$$

$$u_i = (\cos \beta_i \cos \theta_i \quad \sin \beta_i \cos \theta_i \quad -\sin \theta_i)^T \quad (4)$$

$$\theta_i = 2 \arctan \frac{-E_i - \sqrt{E_i^2 - G_i^2 + F_i^2}}{G_i - F_i} \quad i=1,2,3 \quad (5)$$

式中:  $\beta_i$  为静平台的结构角,即主动臂和  $X$  轴的夹角,是矢量,逆时针方向为正方向;  $\theta_i$  表示主动臂的转角,此转角可以作为驱动电机转动的依据。

$$E_i = 2l_1(r - e_i)^T [0 \quad 0 \quad 1]$$

$$F_i = 2l_2(r - e_i)^T (\cos \beta_i X + \sin \beta_i Y) \quad (6)$$

式中:  $X = (1 \quad 0 \quad 0)$ ;  $Y = (0 \quad 1 \quad 0)$ ;  $G_i = (r - e_i)^T \cdot (r - e_i) + l_1^2 - l_2^2$ ;  $E_i, F_i, G_i$  为中间变量,是矢量;  $X, Y, Z$  为  $O$ - $XYZ$  各坐标轴的单位矢量。

将式(1)化简后可得

$$r - e_i - l_1 u_i = l_2 w_i \quad i=1,2,3 \quad (7)$$

两端分别乘以各自的转置,可推导出

$$(r - e_i - l_1 u_i)^T (r - e_i - l_1 u_i) = l_2^2 \quad (8)$$

将式(4)代入式(8),可得

$$E_i \sin \theta_i + F_i \cos \theta_i + G_i = 0 \quad i=1,2,3 \quad (9)$$

### 4 轨迹规划

本文设计的验证方案:机械手的动平台从机械原点位置移动到目标物体位置,然后再从目标位置移动到应该放置物体的位置。该轨迹设计可以充分验证机械手日常工作出现的轨迹类型。动平台的轨迹为  $\overrightarrow{AB} \rightarrow \overrightarrow{BC} \rightarrow \overrightarrow{CD} \rightarrow \overrightarrow{DE} \rightarrow \overrightarrow{ED} \rightarrow \overrightarrow{DF} \rightarrow \overrightarrow{FG} \rightarrow \overrightarrow{GH} \rightarrow \overrightarrow{HI}$ 。

具体的运动轨迹如图 5 所示。

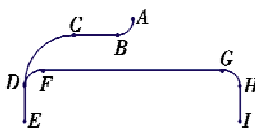


图 5 轨迹规划示意图

Fig. 5 Default track schematic

轨迹设计过程中,待抓取物体的位置是随机的,但是放置物体的位置是固定的。无论待抓取物在待抓取

区域的哪个位置,它们都遵循同一种轨迹模式,如图 6 所示。机械手从 LabVIEW 编写的上位机获取目标物体在  $XY$  平面的坐标后,机械手动平台迅速从原点位置移动到待抓取物位置,然后抓住目标物体移动到应放置物体位置。

假设机械手动平台的原点位置坐标为  $(0, 0, -748)$ ,根据设计需求机械手抓取物体后需向上( $Z$  方向的正方向)抬高 50 mm,待抓取物体的坐标为  $(M, N)$ ,放置点的坐标为  $(100, 200, -850)$ ,重力方向为  $Z$  轴的负方向,可以规划机械手的动平台在各个区间运动的轨迹。

本文采用 Matlab 软件来建立机械手模型,如图 6 所示。该模型是借助于设计好的 SolidWorks 中的机械结构模型而来,并且在 Matlab 环境中进行了运动轨迹的仿真,动平台运动的轨迹如图 7 所示。

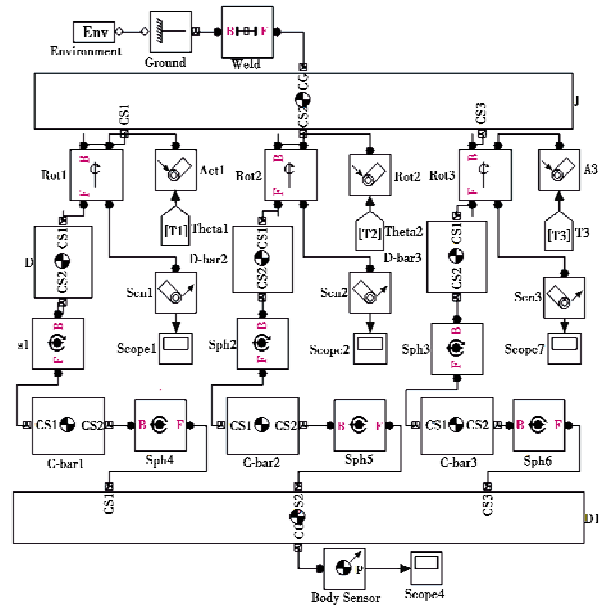


图 6 Matlab 中建立的机械手模型

Fig. 6 Manipulator model established in Matlab

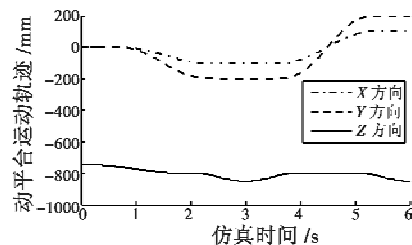


图 7 动平台  $X, Y, Z$  轴各方向运动的轨迹

Fig. 7 Moving platform trajectory in all directions

由图 7 可知,动平台从位置原点沿着所设计的轨迹成功到达目标物体放置点,仿真结果与预设轨迹相符。

图 8 所示为机械手的动平台在  $XY$  平面上方俯视运动轨迹图。由图可知,运动轨迹是一条直线,这说明机械手在运动过程中没有发生横向抖动。

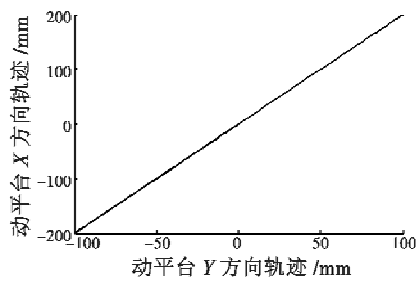


图8 动平台 XY 平面上的运动曲线

Fig. 8 Moving platform trajectory in the XY plane

图9所示为仿真得到机械手在空中运行的轨迹,可清楚地观察到机械手动平台在三维空间内的轨迹情况,将图9与所规划的轨迹图5对比可知,二者轨迹曲线一致。

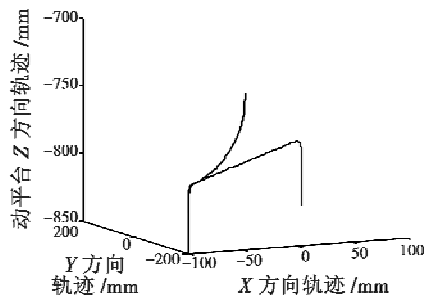


图9 机械手动平台立体空间运动轨迹图

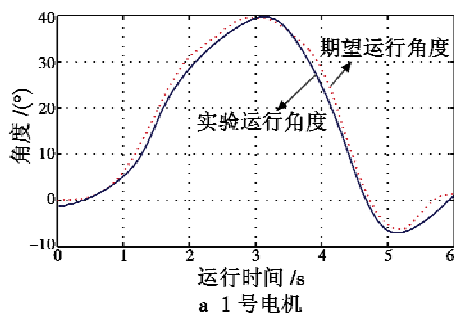
Fig. 9 Mechanical manual platform trajectory diagram

### 5 样机实验

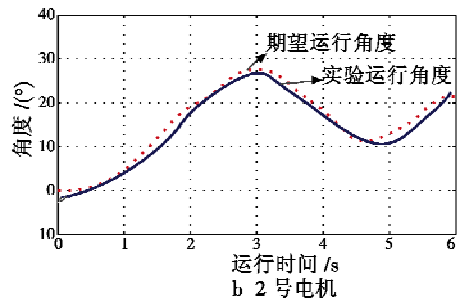
为了验证机械手设计的准确性,本文按照设计的要求制作了机械手样机,包括上位机部分和机械结构部分。

为了验证理论分析的正确性,本文对样机进行了测试。按照预设轨迹,机械手能够实现由原点静止状态运动到设计的目标位置,然后移动到放置目标物体的位置,初步证明所设计的目标定位系统和轨迹规划部分是满足设计要求的。

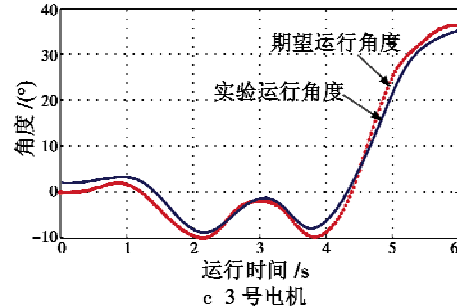
图10给出了预期设计的3台电机转动角度与实际电机转动角度的对比。从图10中可以看出,样机测试与理论设计轨迹大致相吻合,但是仍存在一定的误差。



a 1号电机



b 2号电机



c 3号电机

图10 电机期望运行角度与实验运行角度对比  
Fig. 10 Comparison between the expected angle of the motor and the actual corner angle

### 6 结论

针对三自由度并联机械手系统,本文给出了三自由度并联机械手位置逆解数学模型,并采用 LabVIEW 软件技术进行目标定位,运用 Matlab 软件对轨迹进行了仿真。最后,制作了样机,并对样机进行了测试。通过将实验与仿真结果对比可知,二者具有相吻合的曲线轨迹,进而证明了机械结构设计的合理性、轨迹规划的正确性以及目标定位的准确性。

### 参考文献

[1] CLAVEL R. Device for the movement and positioning of an element in space;US, 4976582[P]. 1990-12-11.

[2] 陈润超,何建玲,徐贵阳. 浅析 Delta 并联机器人的从动臂[J]. 机械传动, 2013, 37(5): 54-56, 69. (CHEN R C, HE J L, XU G Y. Analysis of Delta parallel robot driven arm[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2013, 37(5): 54-56, 69.)

[3] 刘辛军,吴泽启,张立杰. 基于力传递性能的一种平面并联机器人的优化设计[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2008, 48(11): 1751-1754. (LIU X J, WU Z Q, ZHANG L J. Optimum design of a planar parallel robot based on force transmissibility [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(11): 1751-1754.)

[4] JOSHI S A, TSAI L W. Jacobian analysis of limited-DOF parallel manipulators [J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 124: 254-258.

(下转第 101 页)

- [8] ELGAMMAL A, HARWOOD D, DAVIS L. Non-parametric model for background subtraction[C]// Proceedings of the 6th European Conference on Computer Vision, 2000; 751-767.
- [9] BARNICH O, VAN DROOGENBROECK M. VIBE: a powerful random technique to estimate the background in video sequences [C]//International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2009:945-948.
- [10] BARNICH O, VAN DROOGENBROECK M. VIBE: a universal background subtraction algorithm for video sequences [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(6):1709-1724.
- [11] MANZANERA A.  $\Sigma$ - $\Delta$  background subtraction and the zipf law[C]//Progress in Pattern Recognition, Image Analysis and Applications, 2007:42-51.
- [12] MANZANERA A, RICHEFEU J C. A new motion detection algorithm based on  $\Sigma$ - $\Delta$  background estimation[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(3):320-328.
- [13] 曹倩霞, 罗大庸, 王正武. 基于改进的 Sigma-Delta 滤波的复杂场景背景估计[J]. 计算机工程, 2014, 40(9):225-232. (CAO Q X, LUO D Y, WANG Z W. Complex scenes background estimation based on improved Sigma-Delta filtering[J]. Computer Engineering, 2014, 40(9):225-232.)
- [14] 胡小冉, 孙涵. 一种新的基于 ViBe 的运动目标检测方法[J]. 计算机科学, 2014, 41(2):149-152. (HU X R, SUN H. Novel moving object detection method based on ViBe[J]. Computer Science, 2014, 41(2):149-152.)
- 
- (上接第 96 页)
- [5] 杨志永, 黄田, 梅江平, 等. 基于全域优化的高速并联机械手控制器参数整定[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9):123-129. (YANG Z Y, HUANG T, MEI J P, et al. Whole workspace optimization based parameter tuning of high-speed parallel manipulator controller [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9):123-129.)
- [6] 唐国宝, 黄田. Delta 并联机构精度标定方法研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8):55-60. (TANG G B, HUANG T. Kinematic calibration of Delta robot [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8):55-60.)
- [7] LU Y, SHI Y, YU J P. Kinematic analysis of limited-DOF parallel manipulators based on translational/rotational Jacobian and Hessian matrices [J]. Robotica, 2009, 27:971-980.
- [8] TRIGGS B. Autocalibration and the absolute quadric[C]// Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, Puerto Rico, USA; 1997:609-614.
- [9] 关旭, 张春梅, 王尚锦. 虚拟仪器软件 LabVIEW 和数据采集[J]. 微机发展, 2004, 14(3):77-79. (GUAN X, ZHANG C M, WANG S J. Virtual instrument software LabVIEW and data acquisition [J]. Microcomputer Development, 2004, 14(3):77-79.)
- [10] HONG K S, KIM J G. Manipulability analysis of a parallel machine tool application to optimal link length design [J]. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(8):403-415.
- [11] 杨斌久, 蔡光起, 罗继曼, 等. 少自由度并联机器人的研究现状[J]. 机床与液压, 2006(5):202-205. (YANG B J, CAI G Q, LUO J M, et al. The state of research on limited-DOF parallel robot [J]. Machinel Tool & Hydraulics, 2006(5):202-205.)
- [12] LIU X J, WANG J S, GAO F, et al. On the analysis of a new spatial three-degrees-of-freedom parallel manipulator [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(6):959-968.

## 下 期 要 目

基于扰动流体的无人机空中自主避撞算法  
 基于 DSP 的目标跟踪半实物仿真系统设计  
 遗传算法和拍卖算法在任务分配中的性能比较  
 时间触发以太网加速航电互联  
 SystemVue 在雷达组网仿真系统中的应用  
 基于云理论的图像自适应滤波新方法  
 GM-PHD 滤波算法在IRST中的应用

一种基于动态面控制的三维导引律  
 基于组稀疏表示的二维全级化散射中心提取  
 单脉冲雷达对不可分辨舰船目标的角估计  
 GPS 诱骗下 GPS/INS 组合导航偏差分析  
 距离多假目标干扰下雷达网优化选择研究  
 舰船目标雷达高分辨距离像的建模与仿真  
 红外干扰弹与舰空导弹火力冲突检测及消解