

并联跟踪台单目视觉自标定方法

刘 峰,王向军,许 薇,张召才

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘 要:对并联机构进行标定是实现并联机构几何量校正和高精度定位的前提和基础。目前,现有的自标定方法因得不到完整的并联机构动平台位置和姿态信息,不能满足对并联机构所有几何量进行辨识和标定的要求。针对上述问题,以四自由度并联跟踪台为研究对象,提出了一种新的单目视觉自标定方法,通过实验对其标定精度进行了初步验证,并给出提高标定精度的可行性建议。该方法为并联机床、并联机器人、并联跟踪系统等实现高精度提供了一种新的解决途径。

关键词:四自由度; 并联跟踪台; 单目视觉; 自标定

中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1007-2276(2009)01-0175-05

Self-calibration method for the parallel tracking platform based on the monocular vision

LIU Feng, WANG Xiang-jun, XU Wei, ZHANG Zhao-cai

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract:The calibration for the parallel mechanism is the premise and base to realize the geometric sense correcting and high accuracy position of the parallel mechanism. As the present self-calibration methods cannot get all information about position and attitude of the motional platform, they can't realize the identification and calibration of all the parallel mechanism geometric parameter. Due to the problems above, a new self-calibration method based on monocular vision was proposed, which took four-degree-of-freedom parallel tracking platform as the subject investigated. The calibration precision was verified preliminarily through the experiments, and some feasibility advices of increasing calibration precision were given. This method provides a new way to realize high accuracy calibration for parallel machines, parallel robots and parallel tracking systems.

Key words:Four-degree-of-freedom; Parallel tracking platform; Monocular vision; Self-calibration

0 引 言

实现并联机构几何量校正和高精度定位的方法有两种:一是直接提高加工精度及安装精度;二是对

并联机构进行标定^[1-2]。标定是指利用测量工具测量并联机构的输出量(包括动平台的位置和姿态等),利用误差模型对这些输出量进行计算,得到并联机构的几何量误差和几何量的实际值,将所得实际值代替并

收稿日期:2008-05-20; 修订日期:2008-06-28

作者简介:刘峰(1978-),男,辽宁辽阳人,博士生,主要研究方向为高速、精密并联运动跟踪技术和立体视觉成像技术。

Email:tjuliufeng@tju.edu.cn

导师简介:王向军(1955-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,博士,主要研究领域为计算机视觉、影像测量技术和微光机电系统。

Email:xdocuxjw@vip.163.com

联机构控制模型中对应的理论值来实现对并联机构的误差补偿。第一种方法能够提高并联机构几何量的精度,但会使制造成本增加,而采用标定方法则只需要按普通精度要求进行机械加工,而后利用误差补偿方法对并联机构几何量进行校正以提高精度。与第一种方法相比,通过标定提高并联机构定位精度的方法成本低且可行性好。

自标定法是近年来并联机构标定技术的研究热点^[3],其原理是利用安装在主动或从动铰链上的内部传感器来检测系统内部运动变量,依据内部运动变量来构造相应的误差模型辨识和标定几何量。研究表明:利用自标定法进行标定,只有一部分几何量可以辨识,因为自标定是在并联机构动平台坐标系下进行的,而内部传感机构(例如安装编码器或位移传感器的机构等)不能提供足够信息来描述动平台坐标系相对于定平台坐标系的运动关系,不能够实现对并联机构所有几何量的辨识和标定,因此,研究一种能够描述动平台坐标系和定平台坐标系之间运动关系且能够对所有几何量进行辨识和标定的自标定方法具有重要的意义。以四自由度并联跟踪台为研究对象,结合单目视觉特点,提出了一种利用单目视觉进行自标定的方法。

1 四自由度并联跟踪台

1.1 跟踪台组成

四自由度并联跟踪台是一种带约束分支的并联机构,如图 1 所示。其组成包括转台、动平台、定平台、一个约束分支和 4 个驱动杆。其中,约束分支位于动平台和定平台几何中心,为精密可伸缩万向铰链,两端分别与动平台和定平台固定。驱动杆可通过直线电机驱动其伸长和缩短,两端通过球铰链分别与动平台和定平台连接。该并联跟踪台具备空间 4 个自由度,

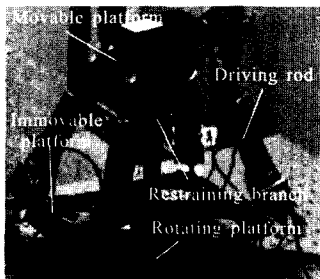


图 1 四自由度并联跟踪台

Fig.1 Four-degree-of-freedom parallel tracking platform

可实现方位运动、俯仰运动、偏摆运动、升降运动以及 4 种运动的合成。

1.2 几何量及几何量误差提取

影响并联机构的误差因素有很多,主要包括几何量误差、热变形误差和载荷误差。其中,几何量误差所占比例最大,主要包括铰点位置误差和驱动杆杆长误差。依据四自由度并联跟踪台结构特点,其几何量提取如图 2 所示:以约束分支中万向铰链十字轴心为原

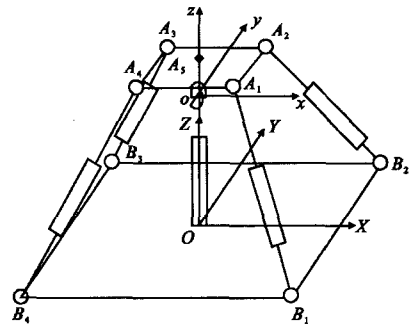


图 2 跟踪台结构简图

Fig.2 Diagram of the tracking platform structure

点建立动平台坐标系 $oxyz$,以定平台中心点为原点建立定平台坐标系 $OXYZ$,两坐标系坐标轴同向且平行。动平台各铰点坐标用 $A_i (i=1,2,3,4,5)$ 表示(5 号铰点是约束分支中万向铰链与动平台的连接点),定平台各铰点坐标用 $B_i (i=1,2,3,4)$ 表示,4 个驱动杆杆长为 $L_i (i=1,2,3,4)$ 。其中, A_i 包含动平台 5 个铰点坐标,每个铰点坐标包含 x, y, z 坐标分量(其中 5 号铰点坐标是由万向铰链和伸缩杆组合运动定位),共 15 个几何量; B_i 包含定平台 4 个铰点的坐标,共 12 个几何量; L_i 包含 4 个杆长几何量,全部几何量的总和为 31,因此,待辨识和标定的几何量误差为 31 个。

2 单目视觉自标定方法

单目视觉自标定方法原理是将摄像机安装在并联机构的动平台上,它可随动平台一起运动。在靶标上设定 n 个特征点,其特征点的世界坐标已知,摄像机随动平台运动到某一位置和姿态,处于该状态下,计算出 n 个特征点的像面坐标,利用得到的像面坐标和特征点的世界坐标计算出摄像机坐标系相对于世界坐标系的位置和姿态变换矩阵,将位置变换矩阵用向量表示,对姿态变换矩阵进行三角函数分解得到摄像机运动的姿态向量,这两个向量就是动平台的位置和姿

态向量,将两个向量带入并联机构误差模型进行计算,就可以得到31个几何量误差,具体标定过程如下。

2.1 CCD 摄像机内部参数的标定

为了减少后续动平台位置和姿态求解的计算量,提高计算速度,首先对摄像机内部参数进行标定,标定采用小孔成像模型,利用已知点的世界坐标和像面坐标的透视变换关系进行求解。待标定的内部参数主要包括有效焦距、一阶透镜径向畸变系数、比例因子和像面中心。

2.2 计算动平台位置和姿态

设靶标上有 n 个已知特征点,则特征点的像面坐标和世界坐标满足:

$$Z_{ci} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $(u_i, v_i, 1)$ 为第 i 点的像面坐标; $(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, 1)$ 为靶标上第 i 点的世界坐标; M 为物像关系投影矩阵,其分解形式为:

$$M = M_1 M_2 = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: M_1 矩阵是摄像机的内部参数,已由内部参数标定得到; M_2 矩阵包含了摄像机坐标系相对于世界坐标系的位置和姿态信息,分别用平移矩阵 T 和旋转矩阵 R 来表示。

通过在靶标上选取足够的特征点,带入公式(2)进行计算,可求出 M_2 矩阵。对 M_2 矩阵中的旋转矩阵 R 用欧拉角的形式表示,即 θ, ϕ 和 ψ 的函数^[4-5]:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi & \cos\theta\sin\phi \\ \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\sin\theta\cos\phi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: θ 为方位角; ϕ 为俯仰角; ψ 为偏摆角,3个旋转角构成了动平台的姿态向量 $\eta = [\theta \ \phi \ \psi]^T$,通过对平移矩阵的分解可以获得动平台的位置向量 $P = [P_x \ P_y \ P_z]^T$,位置向量和姿态向量表达了动平台的位置和姿态信息。

2.3 误差模型

并联机构误差模型^[6-7]的建立可以分为基于运动学正解模型方法和基于运动学逆解模型方法。对于并联机构,由于其正解方法只能有数值解或相当复杂的解析解,因此,不能直接建立关于驱动杆杆长的位置和姿态矩阵。而并联机构具有很方便的逆解,其求解过程简单,运算速度快,可以依据动平台的位置和姿态向量来计算并建立误差方程。

对动平台位置向量 P 和姿态向量 η 进行运动学逆解运算,可以得到各驱动杆的伸长量向量,逆解过程^[8]表示为:

$$\Delta L^j = N(X, P^j, \eta^j) \quad (4)$$

式中: ΔL^j 为第 j 个位置和姿态下驱动杆伸长量的实际

值向量; X 为并联机构的结构参数; P^j 和 η^j 为第 j 个位置和姿态下动平台的位置和姿态向量。考虑 n 个位置和姿态,误差方程可以表示为:

$$e = \Delta L - \Delta L^j = \Delta L - N(X, P^j, \eta^j) \quad (5)$$

式中: ΔL 为 n 个位置和姿态下驱动杆伸长量理论值向量,可以根据动平台设定的位移和转角计算得到。

3 单目视觉自标定方法精度验证

3.1 靶标图像特征点的提取

采用改进的 SUSAN 角点检测算法提取特征点像面坐标。SUSAN 角点检测算法^[9]是使用圆形检测模板对图像中的像素点进行 USAN 面积计算。其中,检测模板的中心称之为“核”,图像中所有与核相同或相似灰度的像素构成的区域称为 USAN。SUSAN 算法依据如下规律实现对角点的检测:当核心点位于 USAN 区域内时,USAN 区域面积最大;当核心点位于边缘时,USAN 区域相当于整个邻域面积的一半;当核心点位于角点时,USAN 区域面积最小。

如图 3 所示,标定实验采用的靶标图形由 5 个正方形组成,正方形的所有 20 个顶点为特征点,即特征角点,由于特征角点的形状为“L”型,因此,设计 7×7

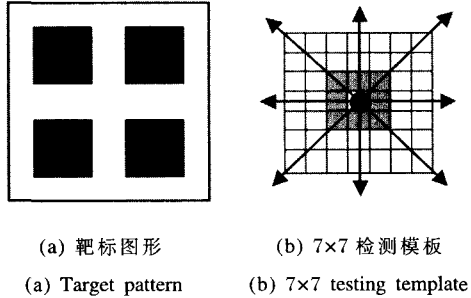


图 3 靶标图形和检测模板

Fig.3 Target pattern and testing template

邻域的正方形检测模板来实现对靶标图像中 20 个特征角点的检测,检测分为特征角点粗筛选和特征角点精筛选两步进行,具体过程如下:

(1) 特征角点的粗筛选

当 7×7 邻域的正方形检测模板的核位于靶标图像某像素点 (i,j) 时,检查其邻域的 4 组像素点是否都属于 USAN 区域,分别为 $(i,j+1)$ 和 $(i,j-1)$ 、 $(i+1,j+1)$ 和 $(i-1,j-1)$ 、 $(i+1,j)$ 和 $(i-1,j)$ 、 $(i-1,j+1)$ 和 $(i+1,j-1)$,若其中任何一组属于 USAN 区域,则可以判定该像素点为非角点。

(2) 特征角点的精筛选

首先计算当前像素点在正方形检测模板下的 USAN 区域面积 $n(r_0)$,计算公式为:

$$n(r_0) = \sum_r e^{-\left(\frac{I(r)-I(r_0)}{t}\right)^2} \quad (6)$$

式中: r_0 是当前点的位置; r 为模板窗口内其他任意一点的位置; $I(r)$ 表示像素点的灰度值; t 是预设的灰度阈值,是判定其他像素点是否属于 USAN 区域的重要依据,对于场景复杂的图像,常采用动态值 t 。由于本实验靶标图像为黑白块的灰度图像,场景简单,实验取阈值 $t=26$ 即可满足要求。

定义 S 为 7×7 邻域正方形检测模板的面积,记录 USAN 区域面积小于 $S/2$ 的所有像素点,其中包含特征角点。通过对所有 USAN 区域面积进行比较,面积最小值所对应的像素点就是寻找的特征角点。

3.2 精度验证

由以上分析可知:验证单目视觉自标定方法的精

度即是验证摄像机位置和姿态定位精度,位置和姿态定位精度将直接决定对并联机构几何量标定达到的精度等级。

依据运动分解理论,四自由度并联跟踪台的运动可以分解为一维升降运动和三维旋转运动两部分,与这两种运动相对应的定位精度包括一维升降运动定位精度和三维旋转运动定位精度,其中,由于方位旋转运动是相对独立的,方位旋转运动的定位精度取决于转台的定位精度,采用高精度转台就可以满足要求,所以,在分析四自由度并联跟踪台定位精度时,只需考虑一维升降运动定位精度和二维旋转运动定位精度的影响。因此,对于验证单目视觉自标定方法精度来说,只需对摄像机一维升降运动和二维旋转运动的定位精度进行验证。

实验采用 CCD 摄像机的分辨率为 1 280×1 024,像元大小为 6.45 μm ×6.45 μm ,靶标图形采用 CAD 软件绘制,升降基准采用行程 110 mm、精度 0.001 mm 的精密升降台,姿态角度基准采用角位移 $\pm 15^\circ$ 、精度 30"的二维精密转台。升降定位精度验证是将 CCD 摄像机置于精密升降台上,用公式(1)~(3)计算 CCD 摄像机初始位置坐标,调整升降台往复运动 50 次,计算其每次上升 30 mm 时的摄像机上升距离的实际值。同理,二维旋转定位精度是将 CCD 摄像机置于二维精密转台上,调整转台俯仰与偏摆 50 个角度,用公式(1)~(4)计算俯仰角和偏摆角的实际值。部分实验数据如表 1 所示。

表 1 位置、姿态角理论与实验数据比较

Tab.1 Comparison between the theoretical value and the real value of position and attitude

Rising distance/mm		Pitch angle/(°)		Tilt angle/(°)	
Theoretical values	Real values	Theoretical values	Real values	Theoretical values	Real values
30	29.971 2	5	5.053 9	5	5.025 3
30	30.052 7	10	10.034 2	10	9.948 1
30	30.055 9	15	14.970 2	15	15.069 5

取所有数据中具有最大偏差的上升距离、俯仰角和偏摆角分别为 30.055 9 mm、5.053 9°和 15.069 5°,将其带入误差方程(5)计算出几何量误差值,即标定能够达到的精度。以一组驱动杆杆长数据为例(各驱动杆以数字 1-4 标识),计算得到的杆长和误差如表 2 所示。

表 2 驱动杆杆长理论与实验数据比较

Tab.2 Comparison between the theoretical length and the real length of driving rods

	Length of No.1 rod/mm	Length of No.2 rod/mm	Length of No.3 rod/mm	Length of No.4 rod/mm
Theoretical values	270.648 9	261.771 5	283.343 1	293.143 9
Real values	270.604 0	261.818 2	283.299 8	293.054 3
Error	0.044 9	-0.046 7	0.043 3	0.089 6

4 结 论

通过实验对单目视觉自标定方法进行了初步验证,实验表明:标定精度与摄像机性能指标、特征点提取算法和靶标上特征点定位精度有关,可以通过以下几方面进一步提高标定精度:

(1) 采用高分辨率的摄像机用于获取高分辨率的靶标图像;

(2) 采用具备高精度特征的特征点提取算法,提高靶标上特征点像面坐标的提取精度;

(3) 采用具备高精度特征的靶标,如光刻靶标等,提高特征点世界坐标精度。

参考文献:

- [1] PENG Bin-bin. Modeling for calibration of parallel robot[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*(彭斌彬. 并联机器人的标定建模. *机械工程学报*),2005,41(8):132-135.
- [2] DUC E, CHANAL H, RAY P, et al. A new approach for the geometrical calibration of parallel kinematics machines tools based on the machining of a dedicated part[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007,47 (7-8): 1151-1163.
- [3] ECORCHARD G, MAURINE P. Self-calibration of delta parallel robots with elastic deformation compensation [C]//2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,2005:1283-1290.
- [4] XIN Fu-xue. Mathematical analysis of course tracking control and pose aberration correction[J]. *Infrared and Laser Engineering* (幸福学. 航向随动控制与姿态畸变校正的数学分析. *红外与激光工程*),2003,32(2):182-185.
- [5] ZHANG Wei-sheng, WANG Hong-bing, WANG Yong-ming, et al. Real time geometric rectification algorithm by system of movement along with odd axes base on C6201 [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张维胜, 王红兵, 王永明, 等. 基于 C6201 的单轴随动系统几何校正实时算法. *红外与激光工程*),2003,32(2):186-190.
- [6] ZHOU Pu, WANG Xing-shu, QIN Shi-qiao, et al. Errors modeling and simulating in laser gyro strapdown attitude surveying system[J]. *Infrared and Laser Engineering* (周朴, 王省书, 秦石乔, 等. 激光陀螺捷联姿态测量系统误差建模与仿真研究. *红外与激光工程*),2007,36(4):565-569.
- [7] KIM J W, SHIN C R, KIM H S, et al. Error model and kinematic calibration of a 5-axis hybrid machine tool [C]//2006 SICE-ICASE International Joint Conference,2006:3111-3115.
- [8] YAN Hao, HE Jing-feng, HUANG Qi-tao, et al. Calibration of Stewart platforms using a coordinate measuring machine [J]. *Machine Tool and Hydraulics* (延皓, 何景风, 黄其涛, 等. 基于三坐标测量仪的 Stewart 平台标定技术. *机床与液压*),2007,35(7):11-15.
- [9] SMITH S M, BRADY M, SUSAN-A. A new approach to low level image processing[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997,23(1):45-78.