

结构光视觉测量机器人的标定

李爱国, 马 孜, 王文标

(大连海事大学 自动化研究中心, 辽宁 大连 116026)

摘要: 构建了由线结构光测头和机器人组成的视觉测量系统. 利用齐次坐标变换的方法建立了测量系统的数学模型. 针对数学模型中的手眼关系, 使用半径已知的球体, 采用定点变位姿的方法, 进行粗略的估计. 考虑到机器人的绝对精度较低, 将定点信息和尺度信息作为优化条件, 对计算机器人的运动学参数和手眼关系做进一步寻优. 实验表明文中的方法能够有效提高测量机器人的重复精度.

关键词: 结构光视觉; 运动学标定; 手眼标定

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Calibration for robot-based measuring system

LI Ai-guo, MA Zi, WANG Wen-biao

(Automation Research Center, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: A platform composed of a line-structured-light vision scanner and an industrial robot is established for 3D surface digitalization. A mathematical model for the measuring system is constructed by using the homogenous coordinate transform principle and a solution to hand-eye matrix is proposed through measuring a fixed point at different robot hand postures. Considering the absolute accuracy of the robot, a scheme involving scale information and fixed point information is proposed to estimate the robot kinematic parameter errors and hand-eye errors. Test results of real experiments on an industrial robot are reported and analyzed.

Key words: structured-light vision; robot calibration; hand-eye calibration

1 引言(Introduction)

结构光主动视觉测量技术, 因其精度高且测量速度快的优点在三维重建^[1,2], 工业视觉检测^[3]等领域获得了广泛的应用. 在工业检测领域, 结构光传感器通常安装在三坐标测量机上用于检测产品的质量. 该模式虽具有很高的测量精度, 但由于其受三维运动导轨约束的限制, 难于真正实现大型构件的现场在线三维坐标测量. 为了实现加工过程的在线测量, 这里将线结构光测头安装在六自由度机器人末端构成自由曲面非接触测量系统. 由于六自由度机器人具有三维移动平台无可比拟的灵活性, 在其手腕上配备线结构光测头, 即可在加工现场在被测部件不离开加工卡具的情况下完成检测任务. 结构光测头基于激光三角法原理^[4], 输出的数据是光平面上的被测物体的二维数据. 要由这些二维数据恢复被测物体的形貌, 必须确定测头和机器人末端之间的连接关系, 即手眼关系. 目前, 手眼问题的求解通常归结为解齐次矩阵方程 $AX = XB$ ^[5,6]. 其中 X 表示手

眼关系; A 代表手腕的运动变换矩阵, 由机器人的正向运动学得到; B 为传感器(通常为摄像机)的运动变换矩阵. 这里, 测头返回数据为二维, 通过这些数据不能确定测头所做的三维运动. 考虑到球体的几何特征, 提出了一种使用半径已知的标准球进行手眼关系标定的方法. 该方法利用光平面和球体相交所形成的圆拟合出球心的坐标, 使用定点变位姿计算手眼关系. 考虑到标定时需要使用机器人的末端位姿, 而机器人的绝对定位精度相对较低(主要由机器人的运动学参数存在误差导致), 势必会降低手眼关系的计算精度. 为进一步提高测量精度, 将定点信息和尺度信息作为优化条件, 同时计算机器人的运动学参数误差和手眼关系误差, 有效的提高了测量机器人的重复精度.

2 测量系统的数学模型(Mathematical model for measuring system)

以 MOTOMAN HP3 工业机器人为运动平台, 配备线结构光测头搭建如图1所示的实验平台, 其结构

简图见图2. 结构光测头输出的数据是包含被测物体深度信息的二维数据, 而被测点的位置是利用空间的三维坐标描述的. 实现三维测量必须将这种二维数据利用测量系统的几何模型转化为三维数据. 为便于研究测量系统中各环节之间的关系, 首先建立了下述3个坐标系(见图2).



图1 测量机器人系统

Fig. 1 Measuring robot system

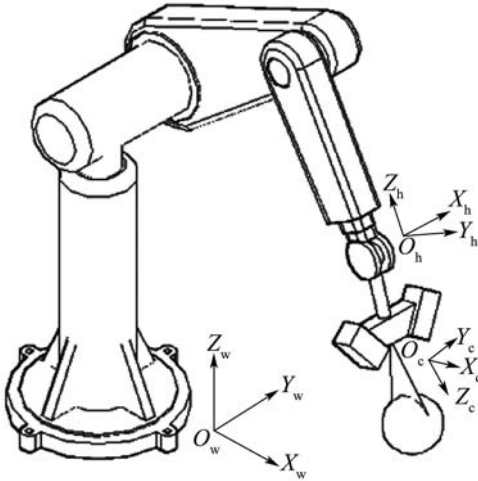


图2 测量系统坐标系的定义

Fig. 2 Coordinate system definition

1) 全局坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$, 测量数据最终应统一到该坐标系. 为方便起见, 选择全局坐标系和机器人的基座坐标系重合.

2) 手腕坐标系 $O_h - X_h Y_h Z_h$, 坐标系原点在法兰盘的中心, 相对于基坐标系的姿态由机器人的正向运动学确定.

3) 测头坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$, 坐标系原点由测头标定的外参数决定. 测头和手腕之间是刚性连接, 安装后它们之间的关系固定不变.

设测头坐标系相对于手腕坐标系的姿态(手眼关系)为 (R_x, t_x) , 手腕坐标系相对于机器人的基坐标系

的姿态为 (R_h, t_h) , 将以上3个坐标系的后一个坐标系向前一个坐标系做变换, 建立系统的坐标变换模型为

$$\mathbf{x}_w = R_h(R_x \mathbf{x}_c + \mathbf{t}_x) + \mathbf{t}_h, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{x}_w, \mathbf{x}_c$ 分别表示被测量点在基坐标系和测头坐标系的坐标. R_h, t_h 由机器人的正向运动学得到, R_x, t_x 为待标定的参数.

求解 R_x, t_x 需要以式(1)为基础建立包含这些未知数的方程, 其中每个方程的未知数的系数由 (R_h, t_h) 和 $\mathbf{x}_c$ 确定, 方程的建立需要多对 (R_h, t_h) 和 $\mathbf{x}_c$, 同时保证 (R_h, t_h) 和 $\mathbf{x}_c$ 改变时 $\mathbf{x}_w$ 不能改变, 这要求测量点必须是空间中的固定点.

3 测量系统的标定(Measuring robot calibration)

3.1 手眼关系标定(Hand-eye calibration)

在机器人的工作空间内放置一个半径已知标准球, 手腕带动测头以不同的姿态测量标准球, 利用不同姿态下由测量系统的数学模型恢复的球心坐标的一致性来标定手眼关系.

设测头系下球的方程为

$$\|\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{oc}\| = R. \quad (2)$$

结构光测头输出的数据是光平面内被测物体的二维数据, 不失一般性, 令光平面方程为 $\mathbf{x}_c = 0$. 光平面和球面相交, 得到的圆的方程应为

$$(y_c - y_{oc})^2 + (z_c - z_{oc})^2 = R^2 - x_{oc}^2. \quad (3)$$

由测量数据拟合出的圆的方程为

$$(y_c - y'_{oc})^2 + (z_c - z'_{oc})^2 = r^2. \quad (4)$$

球心在测头系下的坐标为

$$\begin{aligned} y_{oc} &= y'_{oc}, \\ z_{oc} &= z'_{oc}, \\ x_{oc} &= \pm \sqrt{R^2 - r^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 x_{oc} 的符号按右手规则确定.

改变机械手的位姿可以得到多个球心坐标:

$$\mathbf{x}_{oc}^i = [x_{oc}^i, y_{oc}^i, z_{oc}^i]^T, i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

将这些球心坐标映射到机器人基坐标系

$$\mathbf{x}_b^i = R_{hi}(R_x \mathbf{x}_{oc}^i + \mathbf{t}_x) + \mathbf{t}_h. \quad (7)$$

1) R_x 的确定.

设手腕为纯平移运动, 即 $R_{hi} = R_{hj}$, 基坐标系下球心坐标是唯一的

$$R_x(\mathbf{x}_{oc}^i - \mathbf{x}_{oc}^j) = R_{hi}^T(\mathbf{t}_{hj} - \mathbf{t}_{hi}), \quad (8)$$

改变手腕的姿态可以得到形如 $R_x A = B$ 的矩阵方程, 正交矩阵 R_x 可由式(9)确定^[7]:

$$R_x = VU^T, \quad (9)$$

U, V 为矩阵 AB^T 的左奇异矩阵和右奇异矩阵.

2) t_x 确定.

根据式(7):

$$(R_{hi}R_x x_{oc}^i + t_{hi}) - (R_{hj}R_x x_{oc}^j + t_{hj}) = (R_{hj} - R_{hi})t_x. \quad (10)$$

多个姿态的测量组成形如 $Ax = b$ 的方程, 由最小二乘法即可确定 t_x :

$$t_x = (A^T A)^{-1} A^T b, \quad (11)$$

3.2 手眼关系的精度分析(Accuracy analysis)

利用上述方法, 控制机械手以3个不同的姿态沿 x, y 和 z 方向扫描标准球, 共得到3组数据. 机器人的重复精度为0.02 mm, 测头的精度优于0.05 mm. 利用上述方法计算的手眼关系为

$$R_x = \begin{bmatrix} -0.9995 & -0.0128 & 0.0272 \\ 0.0271 & 0.0085 & 0.9995 \\ -0.0131 & 0.9999 & -0.0081 \end{bmatrix},$$

$$H = [-1.9195 \quad 0.4428 \quad 178.9612]^T.$$

利用手眼矩阵将以上测得的3组数据转换到全局坐标系下, 计算球心在全局坐标系的坐标(如表1).

从表1中的数据可以看出, 机器人在同一个姿态下的各球心坐标的重复性较好. 但是在不同姿态时, 各个位置恢复的球心坐标具有一定的重复性误差. 分析上述标定过程发现: 在不同的测量位置, 光平面和球面相交得到的测量点数量不同, 靠近CCD镜头一侧得到的测量点较多, 远离CCD镜头一侧由于球体遮挡测量点数较少, 测量点数量越多拟合圆的精度越高; 第二, 当光平面接近球心时, 拟合圆的半径和球心半径较接近, 此时拟合圆的半径即使存在较小误差也会给球心在测头坐标系下的坐标的计算带来较大误差; 应当注意到机器人的重复精度和测量机器人重复精度在概念上的不同: 机器人的重复精度表示在机器人的工作范围之内, 机器人是以固定的示教姿态到达一个已经示教好的点精度^[8]; 测量机器人的重复精度是指机器人在多个不同姿态测量某个固定点的精度. 虽然机器人具有较高的重复精度, 但是由于其运动学误差的存在, 并不能保证其在多个姿态下对某一固定点的测量具有较高的重复精度.

表1中:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2}{n-1}}.$$

表1 重复精度测试数据

Table 1 Test data for repeatability

序号	沿x轴/mm	沿y轴/mm	沿z轴/mm
1	624.665	623.425	624.486
	-39.308	-39.940	-40.818
	-232.139	-232.687	-233.294
2	624.709	623.431	624.399
	-39.400	-39.975	-40.806
	-232.131	-232.658	-233.253
3	624.716	623.437	624.471
	-39.370	-39.985	-40.751
	-232.118	-232.699	-233.269
4	624.696	623.437	624.410
	-39.358	-39.966	-40.831
	-232.122	-232.726	-233.258
5	624.675	623.35	624.394
	-39.351	-39.983	-40.835
	-232.102	-232.729	-233.315
6	624.699	623.418	624.409
	-39.378	-39.996	-40.828
	-232.094	-232.717	-233.261
7	624.707	623.573	624.413
	-39.362	-39.968	-40.854
	-232.063	-232.830	-233.215
8	624.701	623.487	624.463
	-39.247	-39.932	-40.864
	-232.221	-232.617	-233.265
σ	0.069	0.092	0.075

3.3 运动学误差和手眼误差校正(Optimization of robot kinematic and hand-eye parameters)

1) 机器人的前向运动学模型.

工业机器人一般是开环运动结构, 通过角度测量装置可以确定每根轴的角度值. 在每根轴上建立相应的齐次方程而构建机器人的运动模型, 就可以确定机器人的末端位置和姿态. 确定机器人每根轴的齐次变换矩阵需要连杆长 a 、连杆偏置 d 、连杆扭角 α 、轴的转角 θ 4个参数. 通过将这些齐次矩阵联乘, 就可以确定机器人末端的位姿. 这里使用的MOTOMAN HP3机器人是一个六自由度串联机器人, 采用标准的DH模型^[8]来描述其前向运动学模

型.

$$T_h = A_1 A_2 \cdots A_6, \quad (12)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i - \sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

表2 HP3名义DH参数

Table 2 Nominal DH parameters of HP3

坐标变换	$\alpha_i/(\circ)$	d_i/mm	a_i/mm
A_1	-90	100	0
A_2	180	370	0
A_3	-90	85	0
A_4	90	0	-380
A_5	90	0	0
A_6	180	0	-90

2) 运动学参数和手眼关系寻优.

机器人的运动学标定通常包括运动学建模、误差测量、参数识别和误差补偿4个步骤^[9,10], 主要分为开环(open loop)标定方法^[11,12]和闭环(close loop)标定方法^[13,14]. 开环标定方法大多需要借助外部仪器测量末端的位姿误差, 闭环标定一般使用机器人的内部传感器, 对机器人施加一定的运动约束. 考虑到测量机器人的配置特点, 本文中运动学参数和手眼关系的寻优是以名义DH参数和定点变位姿法计算的手眼关系为初值, 具体做法是: 以半径已知的球面作为参考物, 控制机器人在多个姿态下测量球面, 将各个姿态的测量数据转换到机器人的基坐标系. 如果机器人的运动学模型和手眼关系没有误差, 转换后的数据应该在同一球面上. 利用测量数据的共球面约束, 实现运动学模型和手眼关系的同时标定.

将机器人的运动学参数和手眼参数用向量 $\mathbf{p}$ 描述, 球面上某点在机器人基坐标系的坐标向量 $\mathbf{P}_R$ 是关于向量 $\mathbf{p}$ 的函数:

$$\mathbf{P}_R = f(\mathbf{p}), \quad (13)$$

设球面中心的坐标向量为 $\mathbf{x}_0$, 每个测量点满足球面约束

$$(\mathbf{P}_R - \mathbf{x}_0)^T(\mathbf{P}_R - \mathbf{x}_0) = r^2, \quad (14)$$

辨识的目标是计算运动学参数和手眼参数使得各个测量点到球面距离的误差和最小, 即

$$\min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}} O(\mathbf{p}) = \min \sum_i^n |(\mathbf{P}_{Ri} - \mathbf{x}_0)^T(\mathbf{P}_{Ri} - \mathbf{x}_0) - r^2|, \quad (15)$$

六自由度的串联机器人的运动学模型需要18个参数描述, 传感器和机器人之间的坐标变换需要6个参数描述, 球面中心需要3个参数描述. 这样, 至少需要27个参数需要辨识. 为了加快计算速度, 我们使用两层优化的方案. 外层的优化算法用于计算机器人的运动学参数, 初值设定为名义的运动学参数. 内层用于优化机器人和传感器之间的变换关系以及球面中心向量.

3) 实验研究.

控制机器人以20个姿态(见表3)采集球面数据, 计算出的运动学参数误差如表4所示, 并对辨识结果进行评价. 评价的准则是: 将球面随机放置在某一位置, 以多个姿态测量球面, 拟合球面中心, 比较优化前后的重复精度. 由图3可以看到优化后重复精度提高46.4%, 该方法能够有效的提升测量机器人的性能.

利用测量点共球面性进行参数标定, 其结果是使多个姿态下测量数据能够很好的拟合出一个球面. 计算时, 球的半径是已知条件, 实质上已经将尺度信息传递给优化程序. 也就是说, 该过程已经隐式的考虑测量的绝对精度问题. 另一方面, 球面中心的坐标作为计算的结果之一, 即希望优化出的参数能够使不同姿态扫描的球面同心, 这实际上是包含了测量的重复精度问题.

表3 机器人的位姿

Table 3 Robot postures $(\circ)$

序号	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	0.159	32.491	-13.237	11.365	-44.959	40.474
2	-0.586	32.493	-15.873	11.365	-40.699	40.473
3	-0.586	32.493	-15.873	11.365	-40.699	40.473
4	-0.586	32.493	-15.873	11.365	-40.699	40.473
5	0.907	32.247	-15.388	14.351	-40.699	84.279
6	0.211	32.249	-15.391	13.080	-39.579	120.998
7	-0.136	32.821	-15.394	13.080	-39.582	140.195
8	-0.981	32.503	-15.354	10.240	-39.585	189.715
9	0.801	69.523	44.697	9.194	-100.105	185.209
10	-1.195	32.472	-15.960	10.240	-39.588	278.713
11	-3.579	15.358	-43.381	18.918	-2.646	332.432
12	-5.322	15.623	-45.764	74.047	2.887	308.438
13	-4.525	15.054	-46.435	52.973	2.887	308.438
14	-6.175	14.704	-46.292	38.542	1.115	289.710
15	-4.800	14.686	-46.396	20.863	2.110	277.499
16	23.406	79.012	19.417	-117.00	102.827	202.08
17	26.333	62.94	-29.719	-81.317	88.526	182.326
18	28.055	61.302	-41.645	-70.759	91.577	172.11
19	28.054	61.306	-41.646	-70.76	90.753	236.397
20	-3.579	15.358	-43.381	18.918	-2.646	332.432

表4 HP3机器人DH参数的修正值
Table 4 Modified value of HP3 DH parameters

序号	$\delta\alpha_i/(\circ)$	$\delta d_i/\text{mm}$	$\delta a_i/\text{mm}$
1	-0.039	0.437	-0.037
2	0.031	1.048	0.040
3	0.039	0.589	-0.040
4	-0.023	-0.164	0.280
5	-0.023	0.653	0.037
6	0.125	0.877	0.040

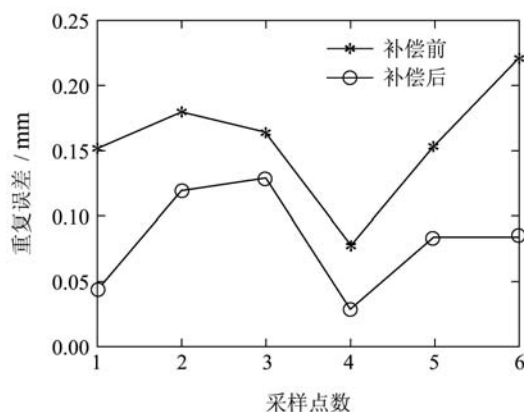


图3 重复精度测试

Fig. 3 Repetitive accuracy test

4 结论(Conclusion)

为适应现代生产对测量技术的要求,提出了一种由线结构光测头和六自由度机器人组成的自由曲面非接触测量系统,建立了系统的数学模型.利用标准球作为参照物,提出确定测头和机器人手腕之间相对姿态的方法.考虑到机器人的绝对精度较低,将定点信息和尺度信息作为优化条件,对计算机器人的运动学参数和手眼关系做进一步寻优,有效的提高了测量机器人的重复精度.

参考文献(References):

- [1] YANG R, CHENG S, YANG W, et al. Robust and accurate surface measurement using structured light[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(6): 1275 – 1280.
- [2] 陈家乾, 何衍, 蒋静坪. 自主移动机器人的室内结构化环境地图创建[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(4): 767 – 772.
(CHEN Jiaqian, HE Yan, JIANG Jingping. Map building with au-
- tonomous mobile robot in the structured indoor environment[J]. *Control Theory & Application*, 2008, 25(4): 767 – 772.)
- [3] MICHEAL DEMEYERE, DEO RURIMUNZU, CHRISTIAN EUGENE. Diameter measurement of spherical objects by laser triangulation in an ambulatory context[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(3): 867 – 872.
- [4] CHEN C H, KAK A C. Modeling and calibration of a structured light scanner for 3-D robot vision[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robot and Automation*. North Carolina: IEEE, 1987: 807 – 815.
- [5] PARK F, MARTIN B. Robot sensor calibration: solving $AX = XB$ on the euclidean group[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, 10(5): 717 – 721.
- [6] ZHUANG H Q. Hand/eye calibration for electronic assembly robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(4): 612 – 616.
- [7] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [8] CRAIG J J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*[M]. Reading Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1986.
- [9] ROTH Z, MOORING B, RAVANI R. An overview of robot calibration[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(5): 377 – 385.
- [10] LIU J C, ZHANG Y R. Improving the positioning accuracy of a neurosurgical robot system[J]. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, 2007, 12(5): 527 – 533.
- [11] DRIELS M R, SWAYZE L W, POTTER L S. Full-pose calibration of a robot manipulator using a coordinate measuring machine[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1993, 8(1): 34 – 41.
- [12] VINCZE M, PRENNINGER J P, GANDER H. A laser tracking system to measure position and orientation of robot end effectors under motion[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1994, 13(4): 305 – 314.
- [13] GATLA C S, LUMIA R, WOOD J, et al. An automated method to calibrate industrial robots using a virtual closed kinematic chain[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(6): 1105 – 1116.
- [14] BENNET D J, HOLLERBACH J M. Autonomous calibration, of single loop closed kinematic chains, formed by manipulators with passive endpoint constraints[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, 7(5): 597 – 606.

作者简介:

李爱国 (1978—), 男, 工学博士, 讲师, 目前研究方向为视觉测量, E-mail: aiguo@newmail.dlmu.edu.cn;

马孜 (1955—), 女, 工学博士, 教授, 目前研究方向为机器人应用技术, E-mail: zima@newmail.dlmu.edu.cn;

王文标 (1982—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为机器视觉, E-mail: wwbl12@163com.