

线激光器的手眼标定方法

王英男, 戴曙光

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要 为解决线激光器与多轴式机器人组成测量系统时, 激光器与机器人位置关系不确定的问题, 提出一种适用于线激光器的手眼标定方法, 以空间定点在基坐标系下的坐标不变为基础, 通过多姿态测量固定点, 求解出手眼标定矩阵。同时设计了以标准球为靶标, 以标准球球心为定点的寻点方案, 提高了测量精度与可靠性。

关键词 线激光器; 机器人; 标准球; 手眼标定

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **文章编号** 1007-7820(2015)07-183-03

Research on the Line Laser Hand-eye Calibration Method

WANG Yingnan, DAI Shuguang

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract When the line laser is mounted on the multi-joints robot, the relative position between the two is uncertain. To solve this problem, a hand-eye calibration method is adopted to measure a fixed point with different poses and calculate the rotation and translation matrices. A standard ball is used to find the precise fixed point with the centre of the ball as the point. The experiments show the method is feasible and efficient.

Keywords line laser; robot; standard ball; hand-eye calibration

激光传感器是一种利用激光技术进行测量的传感器,作为一种新型的测量仪器,其具有测量精度高、速度快、抗光电干扰能力强、可远距离无接触测量等优点。激光传感器由于其所使用的测量方法可分为点激光传感器和线激光传感器。线激光传感器由于与点激光器相比,其测量面较大被广泛应用于模具质量检测、逆向工程等领域^[1]。由于线激光传感器只能获得激光线测量处的有限长度信息,为了实现整体测量,必须借助其他高精度测量平台,从而组成测量系统,来完成物体的整体测量。

多轴式工业机器人^[2]具有测量精度高、操作简单、使用方便等优点使其成为激光传感器理想的搭载平台,与激光器构成测量系统,从而有效提高了激光器的测量范围。由于安装等原因,机器人与激光传感器的位置关系是未知的,为了实现精确测量,在测量前需要对机器人与激光器位置关系的求解与校正,即“手眼标定”。

传统的手眼标定方法是基于摄像机^[3-4]的标定,其通过在不同位置不同角度对空间中同一点 P 进行摄像,通过解算点 P 在两幅图像中不同的位置关系,

从而求解出摄像机与机器人的位置关系来实现手眼标定的。而由于线激光器测量范围有限,此方法不适用于线激光器的手眼标定^[5-6]。

本文介绍了一种利用空间中一固定点 P ,通过控制机器人使激光器以不同姿态获取固定点 P 在激光器坐标系下的位置坐标,从而解算出激光器与机器人的位置关系,来实现线激光器的手眼标定的方法。

1 手眼标定方法

1.1 模型结构

基于线激光的手眼标定模型结构如图 1 所示,坐标系 O_1 为机器人基坐标系,坐标系 O_2 为机器人工具坐标系,坐标系 O_3 为激光器坐标系,通过控制六轴式机器人,带动通过法兰盘与机器人固定的激光器来完成对被测物体的精确测量。

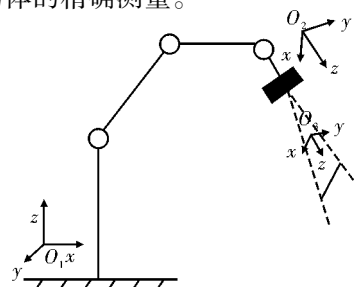


图 1 手眼结构简图

收稿日期: 2014-12-10

作者简介: 王英男 (1991—), 男, 硕士研究生。研究方向: 数字图像处理。E-mail: 252958539@qq.com。戴曙光 (1957—), 男, 教授。研究方向: 工业光电检测技术与装置, 测试信息获取与处理等。

1.2 对空间定点的手眼标定解算

如图2所示,空间中点A为固定点,因此点A在基坐标系下位置是固定的。通过控制机器人使激光器在不同位置以不同姿态对点A进行测量,从而获得点A在激光器坐标系下的位置坐标。

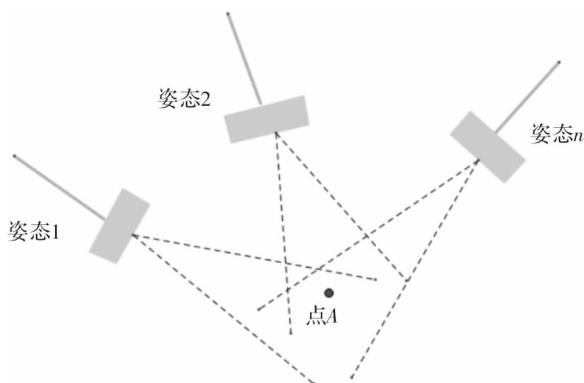


图2 对空间定点的手眼标定模型

设点A在激光器坐标系下坐标为 $P_l = (x_l \ y_l \ z_l)^T$, 在基坐标系下的坐标为 $P_b = (x_b \ y_b \ z_b)^T$, 激光器坐标系到工具坐标系下的旋转矩阵为 r , 平移矩阵为 t , 工具坐标系到基坐标系下的旋转矩阵为 R , 平移矩阵为 T 。其中旋转矩阵为 3×3 矩阵, 平移矩阵为 3×1 矩阵^[2]。

激光器坐标系到工具坐标系下的转换为

$$P_l = r \times P_l + t \quad (1)$$

工具坐标系到基坐标系下的转换为

$$P_b = R \times P_l + T \quad (2)$$

则激光器坐标系到基坐标系下的转换为

$$P_b = R \times (r \times P_l + t) + T \quad (3)$$

由式(3)可知

$$\begin{bmatrix} P_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_l \\ 1 \end{bmatrix} = B_l X \begin{bmatrix} P_l \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中矩阵 X 为激光器坐标系到工具坐标系的转换矩阵即手眼标定矩阵。

在对空间中一固定点A以不同姿态测量时,由于A为定点所以A在基坐标 P_{bA} 系下的坐标不变,因此可建立方程

$$B_{l1} X \begin{bmatrix} P_{l1} \\ 1 \end{bmatrix} = B_{l2} X \begin{bmatrix} P_{l2} \\ 1 \end{bmatrix} = \cdots = B_{ln} X \begin{bmatrix} P_{ln} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $B_{l1}, B_{l2}, \dots, B_{ln}$ 可由机器人给出, $P_{l1}, P_{l2}, \dots, P_{ln}$

可由激光器读出。旋转矩阵 r 可用单位四元数 $(q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3)$ 表示,即

$$X = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & t_1 \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & t_2 \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,方程未知数为7个为 $q_0, q_1, q_2, q_3, t_1, t_2, t_3$, 每两个姿态可确定3个等式,即基坐标系下的 x_b, y_b, z_b 分别相等,因此确定4个不同姿态即可求解。为保证测量精度与可靠性,通常测量次数 > 4 次,求得最优解。

2 标准球定点法

由式(6)可知,精确获得定点在激光器坐标系下的坐标,是得到精确手眼标定矩阵的关键,而通过肉眼判定定点的方式会使结果误差在 $0.5 \sim 5 \text{ mm}$, 对激光测量这种高精度测量仪器,这种误差显然是不可接受的。球体是一种特殊的数学立体结构,其具有在任意方向被平面切割后,其剖面为圆形,且此剖面圆心与标准球球心的连线垂直于切割面的特性。

如图3所示,激光面与标准球^[2]相切,其剖面圆心为 O' , 标准球球心为 O , 激光面为激光器坐标系中 x 轴与 z 轴构成的平面,激光线上的点在激光器坐标系下 y 值恒为0,线 $O'O$ 垂直于激光面,因此与激光器坐标系 y 轴平行,由此可知 O 点与 O' 点在激光器坐标系下具有相同的 x, z 值, y 值由于球心相对激光面的位置不同为 $\pm |OO'|$, 如图4所示。剖面圆的圆心是剖面圆上任意4个点两两相连所构成的两线段的垂直平分线的交点,而 $|OO'| = \sqrt{R^2 - r^2}$, 其中 R 为标准球的半径, r 为剖面圆的半径。为减少误差,可通过取多组点,分别求出圆心坐标 $(x_1 \ z_1), (x_2 \ z_2), \dots, (x_n \ z_n)$, 而后分别对 x 和 z 求平均值 $x = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$, $z = \frac{z_1 + z_2 + \dots + z_n}{n}, y = \pm \sqrt{R^2 - r^2}$ 。

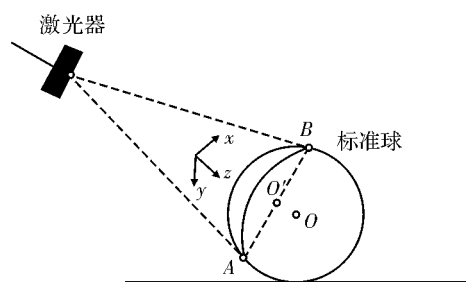


图3 激光线对标准球照射数学模型图

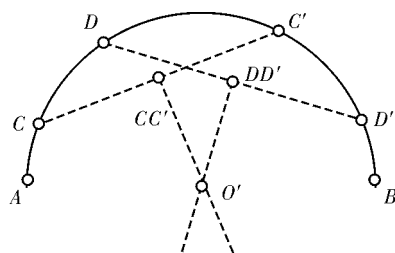


图4 切剖面圆心求解数学模型图

3 实验结果

实验选用加拿大 LMI 公司 Gocator2340 型线激光器,通过法兰盘与 ABB IRB120 六轴式机器人相连接构成测量系统,对标准球进行测量,通过 Matlab 解算求得手眼标定矩阵,并由此矩阵计算出标准球球心在基坐标系下的坐标,并进行误差分析。

表1 基于标准球的手眼标定实验结果

线激光的手眼标定实验					
实验组	工具坐标系相对于基坐标系的平移值/mm	工具坐标系相对于基坐标系的旋转值	标准球球心在激光器坐标系下的坐标/mm	求解出的标准球球心在基坐标系下的坐标/mm	误差分析/mm
第1组	$X=418.411$	$Q_0=0.015\ 28\ Q_1=0.997\ 55$	$X=13.00$	$X=410.889\ 332\ 97$	$X=0$
	$Y=8.402$	$Q_3=0.059\ 9\ Q_4=0.032\ 73$	$Y=5.31$	$Y=22.843\ 235\ 828$	$Y=0$
	$Z=86.912$		$Z=92.69$	$Z=169.343\ 159\ 055$	$Z=0$
第2组	$X=409.802$	$Q_0=0.027\ 84\ Q_1=0.998\ 63$	$X=-12.01$	$X=410.912\ 781\ 75$	$X=0.023\ 448\ 7$
	$Y=32.51$	$Q_3=0.044\ 25\ Q_4=0$	$Y=4.52$	$Y=22.840\ 388\ 08$	$Y=-0.002\ 847\ 7$
	$Z=111.412$		$Z=67.12$	$Z=169.254\ 941\ 339\ 3$	$Z=-0.088\ 217\ 7$
第3组	$X=401.502$	$Q_0=0.025\ 55\ Q_1=0.855\ 45$	$X=-11.50$	$X=410.353\ 817\ 6$	$X=-0.535\ 515\ 3$
	$Y=25.411$	$Q_3=0.517\ 16\ Q_4=-0.010\ 15$	$Y=5.21$	$Y=22.985\ 335\ 0$	$Y=0.142\ 099$
	$Z=108.519$		$Z=70.25$	$Z=169.283\ 761\ 5$	$Z=-0.059\ 397\ 5$
第4组	$X=391.503$	$Q_0=0.011\ 9\ Q_1=-0.916\ 29$	$X=-1.701$	$X=410.866\ 414\ 75$	$X=-0.022\ 918$
	$Y=19.951$	$Q_3=-0.387\ 19\ Q_4=0.101\ 77$	$Y=-4.52$	$Y=22.849\ 005\ 20$	$Y=0.005\ 769\ 37$
	$Z=87.942$		$Z=93.2$	$Z=169.154\ 569$	$Z=-0.188\ 589\ 4$
第5组	$X=427.642$	$Q_0=0.012\ 56\ Q_1=-0.807\ 77$	$X=19.7$	$X=410.872\ 181\ 7$	$X=-0.171\ 512\ 7$
	$Y=17.613$	$Q_3=-0.588\ 94\ Q_4=0.022\ 26$	$Y=5.23$	$Y=22.835\ 945\ 97$	$Y=-0.007\ 289\ 851\ 7$
	$Z=134.321$		$Z=43.5$	$Z=169.224\ 063\ 0$	$Z=-0.119\ 096\ 015$

由表1可知,基于标准球的手眼标定误差为0.01~0.17 mm,与基于定点的手眼标定0.5~5 mm的误差相比有明显提高。

4 结束语

由机器人和激光器组成的测量系统具有高效率、高精度、低成本等优点,被广泛应用于工业生产中,本文提出了一种线激光器的手眼标定方法,以空间定点在基坐标系下的坐标为定值为基础解算出激光器与机器人的手眼标定矩阵,并以标准球为靶标,以标准球球心为定点,从而避免了肉眼判定所带来的误差,提高了测量精度。此方法精度高、实用性强、通用性好、有效解决了激光器与机器人之间位置的解算问题。

参考文献

[1] 王胜华,都东,张文增,等.机器人定点变位姿手-眼标定

方法[J].清华大学学报:自然科学版,2007,47(2):165-168.

[2] Dornaika F. Simultaneous robot - world and hand - eye calibration [J]. IEEE Transactions on Robotics, 1998, 14(4): 617-633.

[3] 王君臣,王田苗,杨艳,等.非线性最优机器人手眼标定[J].西安交通大学学报,2011(9):15-20,89.

[4] 王君臣,王田苗,杨艳,等.基于无迹卡尔曼滤波的机器人手眼标定[J].机器人,2011(5):621-627.

[5] 尹慧琳,王磊, Martin Bauer. 一种基于手眼标定的增强现实跟踪注册方法[J].计算机工程与应用,2006(8):26-27,33.

[6] 魏振忠,张博,张广军.双机器人系统的快速手眼标定方法[J].光学精密工程,2011(8):1895-1902.