

基于标准球的机器人手眼标定方法改进研究

林玉莹, 穆平安

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要:现代工业测量中,机器人与激光扫描仪相结合的测量系统应用广泛。在测量前,为解决激光器与机器人位置关系问题,提高测量精度,提出一种改进的基于标准球的机器人手眼标定方法。以标准球球心作为定点,以激光线第一次投射到球体上的位置为基准,控制机器人带动激光扫描仪自动搜索并移动到标准球最大圆弧处,以此求出球心坐标以及手眼标定矩阵。实验结果表明,改进后的手眼标定方法测量误差小,能有效、快速地应用于各种高精度测量环境。

关键词:工业机器人;激光扫描仪;标准球;手眼标定

DOI:10.11907/rjdk.182468

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1672-7800(2019)005-0041-03

An Improved Hand-eye Calibration Method for Robot Based on Standard Ball

LIN Yu-ying, MU Ping-an

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

Abstract: In modern industrial measurement, measurement systems combining robots and laser scanners are widely used. In order to solve the problem of laser and robot position relationship and further improve the measurement accuracy before the measurement, an improved standard ball-based robot hand-eye calibration method is proposed. The method uses the standard ball center as a fixed point, and takes the position where the laser line is first projected onto the sphere as a reference, then it controls the robot to drive the laser scanner to automatically search and move to the maximum arc of the standard ball to find the spherical coordinates and the hand-eye calibration matrix. The experimental results show that the improved hand-eye calibration method has smaller measurement error and can be effectively and quickly applied to various high-precision measurement occasions.

Key Words: industrial robot; laser scanner; standard ball; hand-eye calibration

0 引言

现代工业测量中,为达到高效率、高精度要求,激光扫描仪与机器人相结合的手眼系统应用逐渐增多^[1-4]。激光扫描仪是一种利用激光技术进行测量的传感器,它常利用多轴式工业机器人作为搭载平台构成测量系统,具有误差小、效率高、运动灵活等优点^[5]。实际测量前,为提高测量精度,减小安装误差,往往需要进行“手眼标定”,即求解激光扫描仪坐标系到机器人坐标系的变换矩阵,以确定机器人与激光器的相对位置关系^[6-11]。

文献[12]提出了一种定点变位姿标定方法(FPDP)。

在此基础上,文献[13]利用一个已知半径的标准球,将其球心位置作为定点。当激光线投射到球体上时,由于任意切剖面都为圆形,且该剖面半径与球体半径、剖面圆心与球体球心距离满足勾股定理,由此可得球心在激光扫描仪坐标系下的坐标,根据机器人基坐标系下坐标不变原理求出手眼标定矩阵。但该方法并没有准确反映出机器人空间姿态信息与标准球球心坐标的对应关系,导致手眼标定结果不够准确^[14]。为解决上述问题,本文提出一种改进的基于标准球的手眼标定方法。该方法控制机器人运动,使激光扫描仪恰好输出标准球球心所在的最大圆弧,针对机器人每种位置姿态都能确定唯一的标准球球心坐标与之对应,从而使手眼标定结果更加准确。

收稿日期:2018-09-25

作者简介:林玉莹(1995-),女,上海理工大学光电信息与计算机工程学院硕士研究生,研究方向为测试计量技术及仪器;穆平安(1964-),男,博士,上海理工大学光电信息与计算机工程学院教授、硕士生导师,研究方向为测试信号获取与处理。

1 标准球定点法

基于标准球的手眼标定方法根据基于定点的方法演变而来,实质就是利用球心的位置作为固定点。标准球为一个已知半径的高精度球体,当被任意方向上的平面切割时,所形成的剖面一定为圆形,并且由球体球心与所形成的剖面圆心所构成的连线必与切剖面垂直。

图1为激光扫描仪对标准球照射的数学模型。激光扫描仪发射的激光测量线在标准球球体表面会形成一条圆形弧线AB,激光测量面与标准球相切所得到的剖面圆心为 O' ,标准球球心为 O ,且该球心在机器人基坐标系 O_b 下的坐标不变,为 $P_b=(x_b, y_b, z_b)^T$ 。设球心在激光扫描仪坐标系 O_s 下的坐标为 $P_s=(x_s, y_s, z_s)^T$,则由坐标转换关系可得式(1)。

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

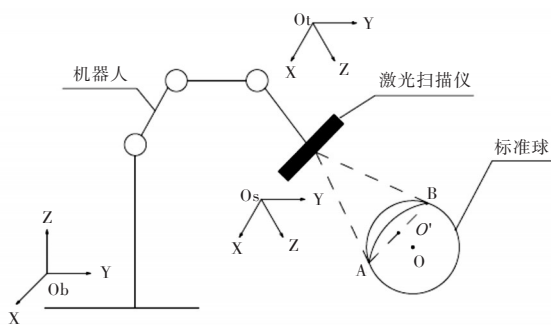


图1 手眼系统结构

其中,矩阵 X 为激光扫描仪坐标系 O_s 到机器人工具坐标系 O_t 下的手眼标定矩阵, r 和 t 分别为 O_s 到 O_t 下的旋转矩阵和平移矩阵, R 和 T 分别为 O_t 到 O_b 下的旋转矩阵和平移矩阵,且旋转矩阵为 3×3 矩阵,平移矩阵为 3×1 矩阵。球心在 O_s 下的坐标 $P_s=(x_s, y_s, z_s)^T$ 跟剖面圆心坐标 O' 有关,设 O' 在 O_s 下的坐标为 $(x_1, 0, z_1)$,则根据几何关系可知 $P_s=(x_s, y_s, z_s)^T$ 满足 $x_s=x_1$, $z_s=z_1$, $y_s=\pm|OO'|=\pm\sqrt{R^2-l^2}$ 。其中 R 是标准球半径, l 为剖面圆半径,剖面圆的圆心坐标及半径可根据激光测量线按照圆形拟合求出,如图2所示^[15-17]。

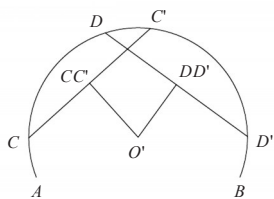


图2 剖面圆圆心坐标几何模型

当多次改变扫描姿态时,可建立方程式(2)。

$$B_{t1} X \begin{bmatrix} x_1 \\ \pm\sqrt{R^2-l_1^2} \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = B_{t2} X \begin{bmatrix} x_2 \\ \pm\sqrt{R^2-l_2^2} \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \dots = B_{tm} X \begin{bmatrix} x_n \\ \pm\sqrt{R^2-l_n^2} \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 O_t 到 O_b 的转换矩阵 $B_{t1}, B_{t2}, \dots, B_{tm}$ 可从机器人机械柜中得到,手眼标定矩阵 X 中的旋转矩阵 r 可通过单位四元数 (q_0, q_1, q_2, q_3) 化为4个参数的形式表示,即 X 包含7个未知数,因此通过确定4个及以上不同姿态即可求解。

2 改进的机器人手眼标定方法

手眼标定方法是输出标准球某一圆弧,根据该圆弧半径与球体半径,圆弧圆心与球体球心距离由几何关系计算得到球心坐标。本文在前人研究成果基础上提出一种改进的手眼标定方法,该方法能控制机器人运动使激光扫描仪恰好输出标准球球心所在的最大圆弧,针对机器人每种位置姿态都能确定唯一的标准球球心坐标与之对应,从而使手眼标定结果更加准确,其方法流程如图3所示。

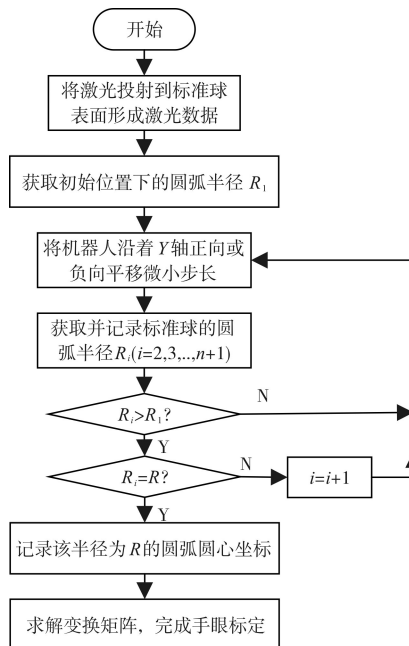


图3 改进的基于标准球的机器人手眼标定方法

此手眼标定方法最终所要获取的结果与通过该球心坐标的最大圆弧相关,为了缩短优化过程,应使激光扫描线第一次投射到标准球的位置尽可能靠近最大圆弧处。

在初始位置下,接收激光扫描线投射到标准球表面的圆弧离散点数据,通过圆形拟合计算圆弧半径 R_1 ,所对应的球心坐标为 $(x_1, 0, z_1)$,以初始位置为基准点,将机器人沿Y正方向平移微小步长 d 后,获取并记录此次剖面圆的圆弧半径 R_2 。将 R_2 与 R_1 进行比较,如果 $R_2 > R_1$,说明Y轴正向指向标准球最大圆弧方向;反之,说明Y轴正向是背

离最大圆弧方向,需将机器人重新复位,并改变移动方向为 Y 轴负方向。假设标准球的半径为 R ,当机器人沿 Y 轴正向移动并且 $R_2 > R_1$ 时,继续判断 $R_2 = R$ 是否成立,即判定是否到达最大圆弧处,如果不满足条件则继续沿 Y 轴正方向平移相等的微小步长 d 。在进行第 n 次平移后 $R_{n+1} = R$,说明已到达最大圆弧处,记录此次圆弧半径为 R 的圆心坐标为 $(x_1, n \cdot d, z_1)$ 。

若多次改变初始投射位置并按上述方法寻找最大圆弧,则可建立公式(3)。

$$B_{r1}X\begin{pmatrix}x_{s1}\\n_1 \cdot d\\z_{s1}\\1\end{pmatrix}=B_{r2}X\begin{pmatrix}x_{s2}\\n_2 \cdot d\\z_{s2}\\1\end{pmatrix}=\cdots=B_{rm}X\begin{pmatrix}x_{sn}\\n_n \cdot d\\z_{sn}\\1\end{pmatrix}\quad (3)$$

d 为机器人每次沿 Y 轴正向或负向平移的微小步长。式中 $B_{r1}, B_{r2}, \cdots, B_{rm}$ 可从机器人机械柜中得到,且 $x_{s1}, z_{s1}, \cdots, x_{sn}, z_{sn}$ 可由激光测量线与球面的剖面圆从空间几何角度求解得到。由此方程可以求解出手眼标定矩阵 X ,进而确定标准球球心 O 在 O_i 下的坐标。

3 实验结果

为验证两种方法得到的手眼标定结果误差大小,实验选用 FANUC 机器人公司的 Robot LR Mate 200iD 型机器人^[18],并与基恩士轮廓测量仪 LJ-V7060 组成测量系统^[19],对标准球进行多次不同姿态的扫描,利用 Matlab 求得手眼标定矩阵^[20],并将激光扫描仪坐标系下标准球的球心坐标根据式(1)全部转换至机器人基坐标系中。以第一组数据为准,算出其它组数据的误差并进行误差分析。

表 1 标准球定点法实验结果及误差

序号	O_i 相对于 O_b 的平移值/mm	O_i 相对于 O_b 的旋转值	标准球球心		误差/mm
			O 在 O_s 下的坐标值/mm	O 在 O_b 下的坐标值/mm	
1	$q_0=0.07921$	$t_1=306.433$	$x_s=-26.25$	$x_b=324.442$	$x_b=0$
	$q_1=-0.1606$	$t_2=-54.903$	$y_s=4.0246$	$y_b=-47.636$	$y_b=0$
	$q_2=-0.979$	$t_3=59.2488$	$z_s=78.46$	$z_b=140.087$	$z_b=0$
	$q_3=-0.0914$				
2	$q_0=0.10295$	$t_1=340.971$	$x_s=-25.883$	$x_b=324.593$	$x_b=0.151$
	$q_1=0.35775$	$t_2=-76.5559$	$y_s=2.6945$	$y_b=-47.847$	$y_b=0.211$
	$q_2=-0.9215$	$t_3=112.216$	$z_s=32.092$	$z_b=140.077$	$z_b=-0.09$
	$q_3=0.1101$				
3	$q_0=0.11431$	$t_1=356.454$	$x_s=34.28$	$x_b=324.298$	$x_b=-0.144$
	$q_1=-0.8087$	$t_2=-43.035$	$y_s=3.1291$	$y_b=-47.429$	$y_b=0.207$
	$q_2=-0.5765$	$t_3=72.7765$	$z_s=62.1$	$z_b=140.021$	$z_b=-0.066$
	$q_3=-0.0196$				
4	$q_0=0.17451$	$t_1=312.849$	$x_s=4.977$	$x_b=324.630$	$x_b=0.188$
	$q_1=-0.8010$	$t_2=-43.7155$	$y_s=-7.6544$	$y_b=-47.752$	$y_b=-0.116$
	$q_2=-0.5695$	$t_3=77.2967$	$z_s=62.78$	$z_b=140.043$	$z_b=-0.044$
	$q_3=0.05927$				
5	$q_0=0.1944$	$t_1=317.578$	$x_s=-28.601$	$x_b=324.242$	$x_b=-0.2$
	$q_1=-0.9078$	$t_2=3.72554$	$y_s=-5.5512$	$y_b=-47.486$	$y_b=0.15$
	$q_2=-0.33645$	$t_3=74.113$	$z_s=78.802$	$z_b=139.955$	$z_b=-0.132$
	$q_3=-0.15751$				

从表 1 可以得知,在基于标准球的机器人手眼标定实验中,标定误差最大为 0.211mm,而表 2 中,改进的机器人手眼标定实验最大误差为 0.0815mm,最大误差降低了 61.4%,改进方法明显优于改进前的手眼标定方法,从而使测量结果更加准确。

表 2 改进后手眼标定结果及误差

序号	O_i 相对于 O_b 的平移值/mm	O_i 相对于 O_b 的旋转值	标准球球心		误差/mm
			O 在 O_s 下的坐标值/mm	O 在 O_b 下的坐标值/mm	
1	$q_0=0.1873$	$t_1=562.415$	$x_s=-8.5362$	$x_b=621.2354$	$x_b=0$
	$q_1=-0.9027$	$t_2=-110.245$	$y_s=18.7165$	$y_b=-42.7743$	$y_b=0$
	$q_2=-0.3606$	$t_3=-139.394$	$z_s=-46.0993$	$z_b=-323.6365$	$z_b=0$
	$q_3=-0.1398$				
2	$q_0=0.1168$	$t_1=555.775$	$x_s=17.1568$	$x_b=621.1539$	$x_b=-0.0815$
	$q_1=-0.9125$	$t_2=-129.153$	$y_s=29.1495$	$y_b=-42.8550$	$y_b=-0.0807$
	$q_2=-0.3836$	$t_3=154.864$	$z_s=-36.5295$	$z_b=-323.5701$	$z_b=0.0664$
	$q_3=-0.0817$				
3	$q_0=0.1921$	$t_1=576.505$	$x_s=-20.1498$	$x_b=621.3104$	$x_b=0.075$
	$q_1=-0.9069$	$t_2=-98.913$	$y_s=21.4145$	$y_b=-42.7561$	$y_b=0.0182$
	$q_2=-0.3725$	$t_3=-141.628$	$z_s=-40.0390$	$z_b=-323.6635$	$z_b=-0.027$
	$q_3=-0.0433$				
4	$q_0=0.0069$	$t_1=553.781$	$x_s=-12.4557$	$x_b=621.1572$	$x_b=-0.0782$
	$q_1=-0.9445$	$t_2=-89.973$	$y_s=-10.4683$	$y_b=-42.7264$	$y_b=0.0479$
	$q_2=-0.3064$	$t_3=-133.044$	$z_s=-48.5348$	$z_b=-323.6328$	$z_b=0.0037$
	$q_3=-0.1196$				
5	$q_0=0.3162$	$t_1=539.091$	$x_s=3.4557$	$x_b=621.2736$	$x_b=0.0382$
	$q_1=-0.8577$	$t_2=-91.129$	$y_s=-14.4683$	$y_b=-42.7582$	$y_b=0.0161$
	$q_2=-0.4051$	$t_3=-135.615$	$z_s=-47.8945$	$z_b=-323.6319$	$z_b=0.0046$
	$q_3=-0.0258$				

4 结语

由机器人与激光扫描仪组成的测量系统效率高、实用性强,在现代工业测量中发挥着重要作用。本文提出了一种改进的基于标准球的手眼标定方法,通过控制机器人运动使激光扫描仪恰好输出标准球球心所在的最大圆弧,以此求出球心坐标及手眼标定矩阵,进而准确建立机器人真实位置姿态与标准球球心坐标的对应关系,使手眼标定结果更加准确,该方法相比于改进前的方法误差明显减小。后期将研究如何通过外部误差补偿方式进一步提高标定精度,应用于更多高精度测量场合。

参考文献:

[1] 计时鸣,黄希欢.工业机器人技术的发展与应用综述[J].机电工程,2015,32(1):1-13.

[2] 顾震宇.全球工业机器人产业现状与趋势[J].机电一体化,2006,12(2):6-9.

[3] 孙宇臣,葛宝臻,张以谟.物体三维信息测量技术综述[J].光电子·激光,2004,15(2):248-254.

[4] 张启福,孙现申.三维激光扫描仪测量方法与前景展望[J].北京测绘,2011(1):39-42.

[5] 郝继贵,邹剑,林嘉睿,等.面向测量的工业机器人定位误差补偿[J].光电子·激光,2013(4):746-750.

(下转第 48 页)

统,可分析用户行为日志信息并实时计算关注度,产生在线推荐列表,然后与离线推荐相结合对用户进行推荐。但是系统尚有一些不足之处,本文在线计算中采用模拟器模拟用户行为日志,将来需要加强系统对实际用户行为日志的采集与传输。另外本系统没有使用 Spark 集群对训练任务进行分配,因而未能实现负载均衡,下一步需要研究并解决 Spark 的集群负载不均衡问题。

参考文献:

- [1] IDC. The digital universe of opportunities: rich data and the increasing value of the internet of things [EB/OL]. <http://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014view/executive-summary.htm>.
- [2] CAO J, WU Z, WANG Y, et al. Hybrid collaborative filtering algorithm for bidirectional Web service recommendation[J]. Knowledge and Information Systems, 2013, 36(3): 607-627.
- [3] GE Y, XIONG H, TUZHILIN A, et al. Cost-aware collaborative filtering for travel tour recommendations[J]. ACM Transactions on Information Systems, 2014, 32(1): 479-496.
- [4] 赵铁柱,袁华强. 基于并发策略的分布式文件系统性能优化方案[J]. 网络安全技术与应用, 2013(7): 17-18.
- [5] REYNOLD X S, JOSH R, MATEI Z, et al. Shark: SQL and rich analytics at scale[J]. Computer Science, 2012: 13-24.
- [6] 王虹旭,吴斌,刘晔. 基于 Spark 的并行图数据分析系统[J]. 计算机科学与探索, 2015, 9(9): 1066-1074.
- [7] 曹波,韩燕波,王桂玲. 基于车牌识别大数据的伴随车辆组发现方法[J]. 计算机应用, 2015, 35(11): 3203-3207.
- [8] LU X, RAHMAN M W U, ISLAM N, et al. Accelerating spark with RDMA for big data processing: early experiences[C]. Proceedings of the 22nd Annual Symposium on High-Performance Interconnects, 2010: 9-16.
- [9] YANG J, HE S Q. The optimization of parallel DBN based on spark [C]. Proceedings of the 19th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, 2016: 157-169.
- [10] 单明. 基于个性化推荐的电子商务推荐系统的设计与实现[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [11] ZAHARIA M, DAS T, LI H, et al. Discretized streams: an efficient and fault-tolerant model for stream processing on large clusters[C]. Proceedings of the 4th USENIX conference on Hot Topics in Cloud Computing, 2012: 10.
- [12] 张贤德. 基于 Spark 平台的实时流计算推荐系统的研究与实现[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [13] 俞美华. 融合用户兴趣度与项目相关度的电影推荐算法研究[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(8): 22-26.
- [14] RESNICK P, IACOVOUN, SUCHAK M, et al. GroupLens: an open architecture for collaborative filtering of netnews[C]. ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work. ACM, 1994: 175-186.
- [15] SARWAR B, KARYPIS G, KONSTAN J, et al. Item-based collaborative filtering recommendation algorithms[C]. Proceedings of the 10th International Conference on World Wide Web. ACM, 2001: 285-295.
- [16] 阎辉,张学工,李衍达. 支持向量机与最小二乘法的关系研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(9): 77-80.
- [17] SU X, KHOSHGOFTAAR T M. A survey of collaborative filtering techniques[M]. Hindawi Publishing Corp, 2009.
- [18] DE REZENDE R. Giving flexibility to the nelson-siegel class of term structure models[R]. Available at SSRN1290784, 2011.
- [19] 赵文芳,刘旭林. Spark Streaming 框架下的气象自动站数据实时处理系统[J]. 计算机应用, 2018(1): 38-43.
- [20] 李天喜. 基于 Spark Streaming 的试验数据处理系统的研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [21] 周斯波,程广,赵宇杰. 计算机软件的测试方法和装置[P]. CN 106126426 A, 2016.

(责任编辑:黄健)

(上接第43页)

- [6] DORNAIKA F, HORAUD R. Simultaneous robot-world and hand-eye calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 2011, 14(4): 617-622.
- [7] 王东署. 工业机器人标定技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [8] 李爱国,马孜,张旭,等. 一种用于机器人三维表面扫描系统的手眼标定算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(6): 885-888.
- [9] 张云珠. 工业机器人手眼标定技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [10] 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, 19(8): 1895-1902.
- [11] 刘振宇,陈英林,曲道奎,等. 机器人标定技术研究[J]. 机器人, 2002, 24(5): 447-450.
- [12] 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.
- [13] 王英男,戴曙光. 线激光器的手眼标定方法[J]. 电子科技, 2015, 28(7): 183-184.
- [14] ROTH Z S, MOORING B W, RAVANI B. An overview of robot calibration[J]. Information Technology Journal, 1987, 3(1): 377-385.
- [15] 潘国荣,李怀锋. 基于空间向量的空间圆形拟合检测新方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(4): 106-108.
- [16] 李英硕,杨帆,袁兆奎. 空间圆形拟合检测新方法[J]. 测绘科学, 2013, 38(6).
- [17] 田晓,李全海. 基于投影点的空间圆形拟合检测新方法[J]. 工程勘察, 2014, 42(5): 72-74.
- [18] FANUC Robot series R-30iB/ R-30iB Mate 控制装置[S]. B-83284CM/04.
- [19] Ultra-High Speed In-line Profilometer LJ-V7000 Series User's Manual[S]. 96M13610.
- [20] 王吕梁,郭唐永,李世鹏,等. 机载三维激光扫描仪软件系统构建[J]. 软件导刊, 2016, 15(12): 87-89.

(责任编辑:杜能钢)