

文章编号 1004-924X(2009)12-3028-06

通用机器人视觉检测系统的全局校准技术

王 一,刘常杰,任永杰,叶声华

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘要:介绍了基于通用机器人的车身在线柔性视觉检测系统的工作原理和在复杂现场环境下使用激光跟踪仪和测量臂进行全局校准的实用方法。基于测量姿态的全局校准方法,利用机械约束将传感器坐标系和靶标坐标系统一起来,实现测量姿态时传感器坐标系与系统基准坐标系的坐标转换。基于机器人运动学模型的全局校准方法,利用机器人末端关节位姿可通过正向运动学获知的特点,在现场构建机器人基坐标系,并通过坐标变换获得与机器人运动精度无关的手眼关系,实现任意姿态时的全局校准。实际测量结果表明,应用两种校准方法后系统的重复性精度都十分理想,测量装置重复测量标准差和系统重复测量标准差分别为 0.07 mm 和 0.13 mm,能够满足在线监控白车身加工尺寸变化的精度要求,系统进行坐标测量时的误差分别为 ± 0.2 mm 和 ± 0.8 mm。

关键词:通用机器人;视觉检测;全局校准;激光跟踪仪;测量臂;运动学模型

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A

Global calibration of visual inspection system based on universal robots

WANG Yi, LIU Chang-jie, REN Yong-jie, YE Sheng-hua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: An on-line and flexible visual inspection system based on universal robots was introduced for the car body-in-white (BIW) and two practical global calibration methods by using a laser tracker and a measuring arm were described in complexity field environments. The method based on a measuring posture realized the coordinate transformation between the sensor coordinates and the system reference coordinate by combining the sensor coordinates with the target coordinates through the mechanical constraint. And the method based on the robot kinematics realized the global calibration at arbitrary postures by establishing a robot coordinate frame in fields and by obtaining hand-eye calibration relation through the coordinate transformation. Experimental results show that the standard deviations of repeatability for the measurement equipment and the system are 0.07 mm and 0.13 mm respectively, which indicates that both the methods can meet the requirement of monitoring the manufacture dimension changes of BIW. Furthermore, the coordinate measuring errors of the system are ± 0.2 mm and ± 0.8 mm from the two methods, respectively.

Key words: universal robot; visual inspection; global calibration; laser tracker; measuring arm; kinematics model

收稿日期:2008-12-04;修订日期:2009-03-12.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA042407);国家自然科学基金资助项目(No. 50805105)

1 引 言

在汽车工业中,白车身总成是关键工序之一,白车身总成需要对车身的几何尺寸进行高精度测量。早期该项测量多采用三坐标测量机,操作复杂,检测周期长,成本高,因而只能进行定期离线抽检。白车身在线激光检测站^[1]的出现实现了在线 100%检测,并且具有非接触、直观、快速、高精度等优点。然而,现代汽车工业的不断发展又对检测手段提出了高度柔性和自动化程度等新的要求。

基于通用机器人的在线柔性视觉检测系统融合了机器人优化控制、测头技术、机器人运动学模型及校正、生产装备集成等多种技术,很好地适应了多品种、小批量的现代化生产要求,在汽车工业中有广阔的应用前景。而作为在线柔性视觉检测关键技术之一的全局校准技术,直接影响着系统功能实现和测量精度。

全局校准技术是指应用坐标统一原理^[2],将各传感器局部坐标系统一到一个全局坐标系进行校准(基准坐标系通常为车身坐标系)。传统的全局校准采用双经纬仪交会测量系统^[3-4],需要系统定向和人工瞄准,因此标定点的采集比较复杂。通常情况下,用位置关系简单且个数较少的固定式测头进行全局校准时,可以应用约束条件简化校准过程^[5],但通用机器人作为载体带动视觉传感器运动时,各个传感器坐标系间没有直接联系,很难满足约束条件。本文考虑机器人的运动可以通过运动学模型来描述,同时利用适用于现场的手眼标定法,设计了一种基于机器人运动学模型的全局校准方法。该方法可以使校准工作量进一步减少,同时满足在线监控白车身加工尺寸变化的精度要求。由于使用激光跟踪仪设备,配合辅助靶标,大大缩短了校准时间。

2 通用机器人视觉检测系统的组成

通用机器人在线柔性检测系统的原理如图 1 所示。一般来说,车身的几何尺寸包括孔心位置、棱边位置和面法线方向。本系统配备了 4 台末端法兰盘安装有视觉传感器的通用工业机器人,对车身上 69 个几何特征进行检测。每个传感器在

各自的坐标系(相当于存在 69 个传感器坐标系)中进行测量,获得被测点在传感器坐标系下的坐标,然后通过坐标统一(即系统全局校准),将所有的坐标系统一到车身坐标系下,完成系统测量任务。

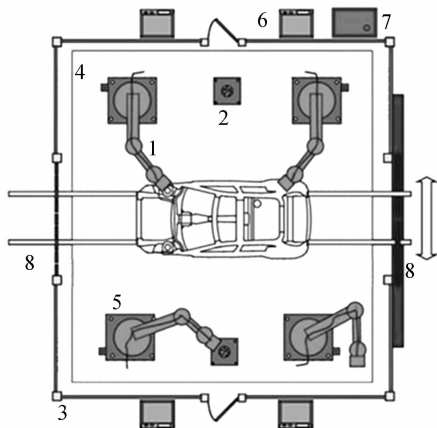


图 1 基于通用机器人在线柔性视觉检测系统
Fig. 1 On-line and flexible visual inspection system based on universal robots

实际工作过程为:由生产线运送车身到工装位置,然后由专用的控制系统完成待测位置的准确定位。4 台机器人带动视觉传感器按照要求同时开始测量,计算机采集检测点图像并进行处理,然后比对计算值与标准值,得出检测结果。测量结束,车身由生产线运送到下一工位。

3 坐标统一原理

坐标统一的目的是要获得 2 个坐标系之间的齐次坐标变换矩阵。在欧式空间内存在 2 个直角坐标系 $O_a X_a Y_a Z_a$ 和 $O_b X_b Y_b Z_b$, 设某点 P 在两个坐标系下的坐标向量分别为 $\mathbf{P}_a = (x_a \ y_a \ z_a)^T$ 和 $\mathbf{P}_b = (x_b \ y_b \ z_b)^T$, 那么坐标变换可以定义为:

$$\mathbf{P}_a = \mathbf{R}_a^b \mathbf{P}_b + \mathbf{T}_a^b, \tag{1}$$

其中 $\mathbf{R}_a^b = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$ 为描述姿态的旋转矩阵, $\mathbf{T}_a^b = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 为描述位置的平移向量。

式(1)可用齐次坐标表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_a \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_a^b & \mathbf{T}_a^b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_b \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

令 $H_a^b = \begin{bmatrix} R_a^b & T_a^b \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为坐标系 b 到坐标系 a 的转换矩阵, 包括旋转和平移在内的 12 个参数, 其中旋转矩阵 R_a^b 满足正交约束:

$$R_a^b T_a^b = I. \quad (3)$$

式(3)提供了 6 个正交约束方程, 因此式(1)至少给出 3 组坐标向量对就可以确定转换矩阵 H_a^b 。

4 基于测量姿态的全局校准技术

视觉传感器与机器人末端法兰盘依靠杆件连接, 杆件两端加工有起定位作用的键槽和销孔, 传感器和靶标上则配有相同规格的键以保证与杆件装配的互换性。

进行全局校准时, 首先令传感器和测量臂测量不在同一条直线上的 3 个标准球, 得到传感器坐标系和测量臂坐标系之间的关系, 然后用测量臂建立传感器的键坐标系, 接着以相同的原则建立靶标的键坐标系, 再用测量臂测量靶标, 如果可以保证传感器和靶标装配到连接杆件的互换性, 就能通过坐标变换链: 传感器坐标系 → 标准球坐标系 → 测量臂测量装置坐标系 → 键坐标系 → 靶标坐标系, 实现传感器坐标系与靶标坐标系之间的统一。

使用激光跟踪测量检测系统的基准坐标系, 得到二者关系; 接着令机器人带动靶标运动到工作姿态, 使用激光跟踪仪测量靶标在空间中的位置, 得到靶标坐标系与跟踪仪坐标系之间的关系, 最后用传感器换下靶标, 通过坐标变换链: 传感器坐标系 → 靶标坐标系 → 激光跟踪仪测量装置坐标系 → 基准坐标系, 实现传感器坐标系到检测系统基准坐标系之间的统一, 即全局校准。

5 基于机器人运动学模型的全局校准技术

如图 2 所示, 检测系统中存在以下 4 个坐标系: 基准坐标系(车身坐标系) $O_w X_w Y_w Z_w$ 、机器人基坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 、法兰盘坐标系 $O_f X_f Y_f Z_f$ 和

传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 。设 p_s 为被测点在传感器坐标系下的坐标值, p_w 为被测点在车身坐标系下的坐标值, 则有

$$p_w = {}^w T_b \cdot {}^b T_f \cdot {}^f T_s \cdot p_s, \quad (4)$$

其中, ${}^w T_b$ 、 ${}^b T_f$ 、 ${}^f T_s$ 分别为机器人基坐标系到车身坐标系、法兰盘坐标系到机器人基坐标系和传感器坐标系到法兰盘坐标系的坐标变换矩阵。

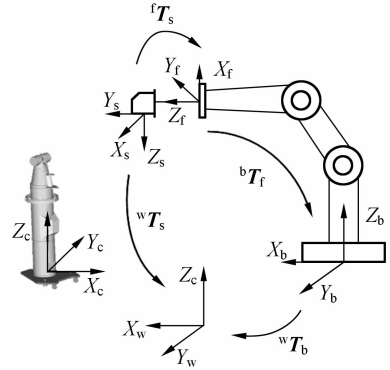


图 2 现场坐标系示意图
Fig. 2 Coordinates on field

传感器坐标系与法兰盘坐标系的变换关系 ${}^f T_s$ 也被称为手眼关系。通常的方法是令机器人带动传感器做特殊的运动, 其间传感器对参照物进行测量, 然后求解矩阵方程^[6-7]。这种方法操作复杂, 对噪声较为敏感, 所以本文并没有在复杂现场予以采用, 而是提出了一种适合现场条件的标定方法。该方法与机器人的运动无关, 可以快速、准确地获得手眼关系。首先将靶标放置在传感器的测量空间内并固定, 得到传感器坐标系和靶标坐标系之间的关系; 其次, 用测量臂测量靶标在空间内的位置, 得到靶标坐标系和测量臂坐标系之间的关系; 再次, 用测量臂测量连接杆件的销

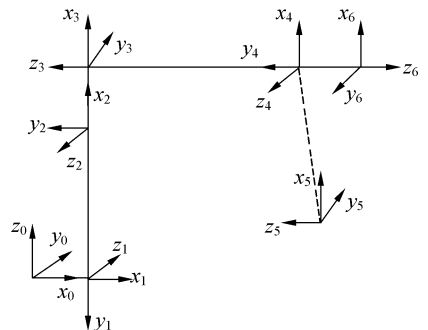


图 3 UP50N 机器人 D-H 模型关节坐标系
Fig. 3 D-H joint coordinates of UP50N

孔坐标系(实际安装时该坐标系与法兰盘坐标系重合);最后,由坐标变换链:传感器坐标系→靶标坐标系→测量臂测量装置坐标系→法兰盘坐标系(销孔坐标系),实现手眼标定。

机器人基坐标系到法兰盘坐标系的变换关系 bT_f 可以通过正向运动学模型得到。UP50N 型通用机器人具有 6 个旋转自由度,关节变量为旋转轴的角度。依据 D-H 准则^[8]建立关节坐标系如图 3 所示,连杆参数如表 1 所示。

得到运动学模型:

$${}^bT_f = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 = f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$$

其中

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, 3, 4, 5, 6), \quad (5)$$

这说明机器人基坐标系到法兰盘坐标系的坐标变换只与各轴转角有关,转角可以从机器人控制器中读出。

表 1 UP50N 机器人连杆参数

Tab.1 Link parameters of UP50N

	a/mm	d/mm	$\alpha/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$
1	145	0	-90	θ_1
2	870	0	-180	$\theta_2 - 90$
3	110	0	-90	θ_3
4	0	-1 025	90	θ_4
5	0	0	-90	θ_5
6	0	-175	-180	θ_6

机器人基坐标系与基准坐标系 wT_b 的变换关系也称为机器人的外部位姿。根据刚体运动规律,空间一点围绕不经过自身的直线旋转,会形成一段圆周轨迹,圆周所在平面与旋转轴垂直且圆心位于旋转轴之上^[9]。分别令机器人单独转动第一个关节和第二个关节,观测手臂末端上某点的坐标值,用最小二乘法拟合出两段圆弧轨迹,过圆弧圆心的法线与转轴轴线重合。 Z_0 轴和 Z_1 轴的方向可由示教器上的符号加以确定, Z_0 、 Z_1 的公

垂线分别交 Z_0 、 Z_1 于点 O_0 和点 O_1 , O_0 指向 O_1 的方向为 X_0 轴向, Y_0 轴方向由右手定则确定,这样就建立了机器人的基坐标系。

使用激光跟踪测量得到基准坐标系,通过坐标变换链:机器人基坐标系→激光跟踪仪测量装置坐标系→基准坐标系,实现机器人基坐标系与检测系统基准坐标系的统一。

6 测量实验

全局校准完成之后,从测量装置重复性、检测系统重复性和检测系统测量精度 3 个方面考察系统稳定性和校准精度,并用标准差评价重复性精度和极差评价测量精度。

测量装置重复性实验要求对同一车身连续进行 15 次测量,其间车身位置不发生变化,因此该实验检验的是传感器和机器人组成的测量装置的重复性。部分测量点的数据如表 2 所示。结果表明两种全局校准方法的重复性精度非常相似,标准差都处于 0.07 mm 以内。

表 2 测量装置重复性测量误差

Tab.2 Repeatability errors of measurement equipments (mm)

检测点 编号	基于测量姿态 的校准方法			基于运动学模型 的校准方法		
	x	y	z	x	y	z
3	0.07	0.03	0.02	0.07	0.03	0.02
8	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03
18	0.02	0.02	0.07	0.02	0.02	0.07
32	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
33	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.05
38	0.02	0.04	0.07	0.02	0.04	0.07
63	0.06	0.02	0.02	0.06	0.02	0.02
67	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

检测系统的重复性实验要求对同一车身连续进行 15 次测量,每次测量之间要求车身进行重新定位,因此该实验检验的是包含定位装置和测量装置在内的系统重复性。部分测量点的数据如表

表 3 检测系统重复性测量误差

Tab. 3 Repeatability errors of visual inspection system (mm)

检测点 编号	基于测量姿态 的校准方法			基于运动学模型 的校准方法		
	x	y	z	x	y	z
3	0.12	0.07	0.10	0.12	0.07	0.10
8	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.04
18	0.09	0.04	0.06	0.09	0.04	0.06
32	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05
33	0.11	0.05	0.07	0.10	0.05	0.07
38	0.04	0.13	0.09	0.04	0.13	0.09
63	0.11	0.06	0.06	0.11	0.06	0.06
67	0.06	0.09	0.08	0.06	0.09	0.08

表 4 基于测量姿态校准方法的测量结果

Tab. 4 Measurement results for calibration based on measuring posture (mm)

	7 号检测点			62 号检测点			66 号检测点		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	2 532.44	-558.65	1 178.21	175.39	500.00	704.66	1 047.00	589.252	1 111.96
2	2 532.43	-558.68	1 178.21	175.38	499.93	704.68	1 047.04	589.25	1 111.934
3	2 532.47	-558.69	1 178.17	175.35	500.01	704.68	1 047.01	589.26	1 112.00
4	2 532.43	-558.69	1 178.14	175.38	499.96	704.70	1 047.03	589.29	1 111.96
5	2 532.44	-558.64	1 178.21	175.38	499.98	704.64	1 047.05	589.28	1 111.92
三坐标	2 532.52	-558.73	1 178.06	175.44	499.91	704.54	1 046.95	589.35	1 111.82

表 5 基于运动学模型校准方法的测量结果

Tab. 5 Measurement results for calibration based on kinematics (mm)

	7 号检测点			62 号检测点			66 号检测点		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	2 532.31	-558.24	1 177.70	175.28	500.06	704.90	1 047.27	589.48	1 112.22
2	2 532.34	-558.23	1 177.71	175.26	500.08	704.93	1 047.25	589.45	1 112.18
3	2 532.30	-558.27	1 177.70	175.26	500.07	704.94	1 047.28	589.48	1 112.23
4	2 532.34	-558.20	1 177.71	175.25	500.01	704.89	1 047.25	589.45	1 112.26
5	2 532.34	-558.22	1 177.77	175.25	500.08	704.89	1 047.24	589.47	1 112.24
三坐标	2 532.52	-558.73	1 178.06	175.44	499.91	704.54	1 046.95	589.35	1 111.82

7 结 论

两组检验重复性精度的实验表明,检测系统的重复测量性能良好,这是因为重复性精度只与传感器的重复测量精度、机器人以及工装的重复定位精度有关。基于运动学模型的全局校准方法采用的坐标转换较多,更容易产生精度损失,因而测量精度明显低于基于测量姿态的校准方法。如果系统应用于质量监测场合,仅要求较高的重复

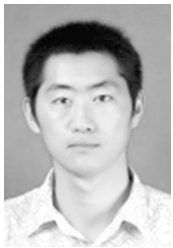
性定位精度,那么两种校准方法都可以使用,但第一种方法的校准工作量与测量点个数成正比,而第二种方法的校准工作量与测量点个数无关;如果系统应用于坐标测量场合,要求较高的绝对测量精度,那么第一种方法较为适合,第二种方法在使用前就必须进行有效的模型误差补偿。文中两种校准方法都采用了激光跟踪仪作为测量设备,与采用双经纬仪测量系统相比,保证了校准精度的同时工作效率提高了一倍,因此在进行现场全局校准工作时更具有优势。

性定位精度,那么两种校准方法都可以使用,但第一种方法的校准工作量与测量点个数成正比,而第二种方法的校准工作量与测量点个数无关;如果系统应用于坐标测量场合,要求较高的绝对测量精度,那么第一种方法较为适合,第二种方法在使用前就必须进行有效的模型误差补偿。文中两种校准方法都采用了激光跟踪仪作为测量设备,与采用双经纬仪测量系统相比,保证了校准精度的同时工作效率提高了一倍,因此在进行现场全局校准工作时更具有优势。

参考文献:

- [1] 刘常杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 汽车白车身在线激光视觉检测站[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 671-672.
LIU CH J, ZHU J G, YANG X Y, *et al.*. Auto-car-body on-line laser inspection system with machine vision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 671-672. (in Chinese)
- [2] 张洪涛, 段发阶, 王学影, 等. 多传感器视觉测量系统坐标统一技术研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 1031-1034.
ZHANG H T, DUAN F J, WANG X Y, *et al.*. Technique of unifying the coordinates of multi-sensor visual measuring system [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(4): 1031-1034. (in Chinese)
- [3] 郝继贵, 杨学友, 叶声华. 车身三维尺寸视觉检测及其最新进展[J]. 汽车工艺与材料, 2002, 3: 22-25.
ZHU J G, YANG X Y, YE SH H. Body three-dimensional visual detection and latest progress [J]. *Automobile Technology and Material*, 2002, 3: 22-25. (in Chinese)
- [4] 艾莉莉, 袁峰, 丁振良. 应用线阵 CCD 的空间目标外姿态测量系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 161-165.
AI L L, YUAN F, DING ZH L. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 161-165. (in Chinese)
- [5] 李喆, 丁振良, 袁峰. 基于共面点的多视觉测量系统的全局标定[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 467-472.
LI ZH, DING ZH, YUAN F. Global calibration method for multi-vision measurement system with coplanar targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 467-472. (in Chinese)
- [6] SHIU Y C, AHMAD S. Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form $AX = XB$ [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(1): 16-29.
- [7] ZHAO Z J, LIU Y C. Hand-eye calibration based on screw motions [C]. *The 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR06)*, 2006 (3): 1022-1026.
- [8] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A kinematic notation for lowerpair mechanisms based on matrices [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1955, 22(2): 215-221.
- [9] BAI Y, ZHUANG H Q, ROTH Z S. Experiment study of PUMA robot calibration using a laser tracking system [C]. *Proceedings of the 2003 IEEE International Workshop on Soft Computing in Industrial Applications*, 2003: 139-144.

作者简介:



王 一(1981—),男,河北唐山人,博士研究生,2004年,2006年于天津大学分别获得学士、硕士学位,主要从事视觉检测及机器人应用方面的研究。E-mail: realupnagon@126.com



刘常杰(1973—),男,山东人,副教授,硕士生导师,1996年,1999年,2002年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事视觉检测技术方面研究。E-mail: liuchangjie@tju.edu.cn



任永杰(1975—),男,河北河间人,博士后,1998年于华北电力大学分别获得学士学位,2004年,2007年于天津大学获得硕士、博士学位,主要从事视觉检测及机器人应用方面的研究。E-mail: ryj_tj@126.com

导师简介:



叶声华(1934—),男,湖北沙市人,教授,博士生导师,院士,主要从事激光及光电测量技术方面的研究。E-mail: shhuaye@tju.edu.cn