

文章编号 1004-924X(2014)12-3239-08

机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进

杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰*, 郝继贵, 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:提出一种改进的柔性视觉测量系统标定方法。建立了包含手眼关系误差与机器人运动学参数误差的系统误差模型。在机器人末端安装结构光传感器构建了机器人柔性视觉测量系统,并在机器人工作空间中固定一个标准球作为标定参考物。标定时,机器人被控制在不同位姿下测量球心坐标。首先,应用机器人的理论模型初步标定手眼关系;然后,基于球心约束,通过迭代算法同时得到准确的手眼关系和实际的机器人运动学参数。基于 ABB IRB2400 工业机器人进行了系统标定实验,并利用激光跟踪仪进行精度验证。结果表明:标定前后机器人柔性视觉测量系统的距离测量标准差由 0.566 mm 降低到 0.173 mm,充分验证了改进方法的有效性和实用性。该方法提高了手眼关系的精度;不需要采用任何昂贵的外部设备,适合工业现场使用。

关键词:工业机器人;柔性视觉测量;手眼标定;误差修正

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142212.3239

Improvement of calibration method for robotic flexible visual measurement systems

YANG Shou-ruì, YIN Shi-bin, REN Yong-jie*, ZHU Ji-gui, YE Sheng-hua

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

* Corresponding author, E-mail: yongjieren@tju.edu.cn

Abstract: An improved calibration method for robotic visual flexible measurement systems was proposed and a mathematical model for hand-eye errors and kinematic parameter errors of a robot was established. The robotic flexible visual measurement system was set up with a line-structured laser sensor mounted on the robot end and a standard sphere was fixed in the robot workspace as the calibration target. In the calibration, the robot was controlled to measure the coordinates of the standard sphere center at different poses. The initial hand-eye transformation was firstly identified by theoretical kinematic parameters of the robot, then, based on constraint of sphere center, the exact hand-eye transformation and real kinematic parameters were identified with an iterative algorithm at the same time. A calibration experiment for the robotic flexible visual measurement system was performed based on an ABB IRB2400 robot and the accuracy verification experiment was conducted by a laser tracker. The results show that the distance standard deviations of the robotic visual flexible measurement system

收稿日期:2014-03-20;修订日期:2014-05-13.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA041205);国家教育部优秀青年教师基金资助项目(No. 51005166);国家自然科学基金资助项目(No. 51225505)

before and after calibrations have been reduced from 0.566 mm to 0.173 mm, which verifies the validity and practicability of the method proposed. The method improves the accuracy of the hand-eye relationship and does not need external measuring devices, so is suitable for industrial applications.

Key words: industrial robot; flexible visual measurement; hand-eye calibration; error correction

1 引言

面向制造现场的在线自动化测量是当前精密测量技术研究的一个重要方向^[1],对提高产品质量和生产效率,降低废品率具有重要意义。几何尺寸是产品(零件)的基本参数,是保证制造精度和产品质量的基础,也是制造过程中测量与控制的主要参数。制造过程中(工位状态下)几何尺寸的在线测量方法要具有非接触、柔性高效、高度适应制造现场环境等特性。

近二、三十年来,随着光学非接触测量方法研究的深入和成熟,线结构光传感器能实现非接触、高精度以及高效率的几何测量^[2-4]。工业机器人作为多关节高度柔性运动平台,在高性能控制器的支持下,可以高效率实现非常复杂的空间姿态和定位,能够以多种路径将测头送到指定位置,并可在恶劣的工业现场环境中工作。工业机器人柔性视觉测量系统结合了视觉传感器和工业机器人的优点,在车身检测等在线测量领域得到了广泛应用^[5-6]。但是,这种测量系统的测量精度受到机器人定位精度的限制,所以工业机器人这种多关节机构的定位精度明显低于直线机构^[7]。在线测量过程中,机器人运动到各个位姿时传感器的空间位姿不同,但传感器相对于机器人末端位姿的关系固定不变,为将结构光传感器测量得到的数据转换到统一的坐标系中,需要标定机器人末端与传感器之间的位姿转换关系,即手眼关系。手眼关系的标定精度是影响系统测量精度的关键因素之一。

手眼标定算法大致分为两类:一类是基于经典矩阵方程的标定方法;另一类为基于主动视觉的标定方法。前者由 Tsai^[8]提出,通过控制机械手运动在不同方位观测一个已知结构的标定物,建立手眼基本约束关系,将手眼标定问题转化为求解齐次方程 $AX = XB$ 问题。求解矩阵方程时采用基于四元数的奇异值分解^[9],非线性最优

化^[10-11]和卡尔曼滤波等^[12]方法。基于经典矩阵的标定方法计算复杂,对测量噪声较为敏感,鲁棒性较差。基于主动视觉的手眼标定算法由 Ma^[13]提出,通过控制机器人做些典型运动约束来求解手眼关系。许海霞^[14]设计了一种基于单个景物点的机器人手眼关系标定方法,通过控制末端执行器做 5 次以上平移运动和 2 次以上旋转运动完成标定。Sung^[15]运用平面棋盘靶控制机器人的平动和旋转,实现了手眼标定的全自动化。一般情况下,主动视觉的手眼标定方法依赖于系统的运动精度,所以其精度相对较差。更为重要的是,上述手眼标定方法的标定过程都涉及机器人运动,并需要利用机器人末端位姿来计算手眼关系;但是未标定的工业机器人的绝对定位精度普遍差,利用角度传感器读出的关节转角以及机器人理论模型参数计算得到的末端位姿将存在较大的误差,因此这些方法均无法得到准确的手眼关系。为解决这个问题,刘常杰^[16]等提出中间靶标方法,即视觉传感器与激光跟踪仪同时测量中间靶标,建立起传感器坐标系与跟踪仪坐标系之间的转换关系,进而建立与机器人末端坐标系的转换关系。但该方法需要借助激光跟踪仪,现场环境下操作复杂。

本文提出了一种改进的柔性视觉测量系统标定方法。首先基于机器人的理论模型通过定点变位姿测量初步标定手眼关系;然后利用标准球作为标定参照物,基于球心约束同时标定机器人运动学参数误差和手眼关系误差,进而得到准确的手眼关系和机器人运动学模型。本方法提高了手眼关系的精度,不需要采用任何昂贵的外部设备,适用于工业现场。

2 机器人柔性视觉测量系统测量原理

工业机器人柔性视觉测量系统主要由工业机器人和线结构光传感器组成。线结构光视觉传感器通过连接件固定在机器人末端。工业机器人柔

性视觉测量系统的坐标系包括:机器人基坐标系(BF),末端法兰坐标系(EF),传感器坐标系(SF),工件坐标系(WF),如图 1 所示。传感器坐标系下某点的坐标 \mathbf{X}_s 与工件坐标系下坐标 \mathbf{X}_w 的关系如下:

$$\mathbf{X}_w = {}^w\mathbf{T}_b \cdot {}^b\mathbf{T}_e \cdot {}^e\mathbf{T}_s \cdot \mathbf{X}_s, \quad (1)$$

其中: ${}^e\mathbf{T}$ 为传感器坐标系到机器人末端法兰坐标系之间的坐标转换关系,即手眼关系; ${}^b\mathbf{T}$ 为机器人末端法兰坐标系和基坐标系之间的坐标转换关系,通过机器人正向运动学得到; ${}^w\mathbf{T}$ 为机器人基坐标系到被测工件的工件坐标系之间的坐标转换关系。通常系统测量数据都统一到工件坐标系下。

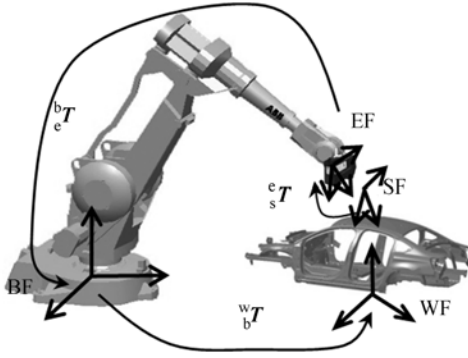


图 1 机器人视觉测量系统示意图

Fig.1 Schematic of robotic visual measurement system

3 改进的手眼关系标定方法

3.1 机器人手眼关系初步标定方法

手眼关系指末端坐标系和传感器坐标系之间的坐标转换关系。本文首先通过机器人带动视觉传感器对空间某一固定点进行多次变位姿测量,利用固定点约束,初步确定传感器坐标系与机器人末端坐标系间的旋转矩阵 \mathbf{R}_s 和平移向量 \mathbf{T}_s 。

由式(1)可知,固定点在基坐标系下的坐标 $\mathbf{X}_b = [x_b, y_b, z_b]^T$ 与在传感器坐标系下的坐标 $\mathbf{X}_s = [x_s, y_s, z_s]^T$ 满足以下关系:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_0 & \mathbf{T}_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{T}_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{X}_s \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $\mathbf{R}_0, \mathbf{T}_0$ 为机器人在当前位姿下末端坐标系相对于基坐标系的旋转矩阵和平移向量; $\mathbf{R}_s, \mathbf{T}_s$

为传感器坐标系到机器人末端坐标系的旋转矩阵和平移向量。将式(2)展开得到:

$$\mathbf{X}_b = \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{X}_s + \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{T}_s + \mathbf{T}_0. \quad (3)$$

控制机器人运动,两次测量固定点得到:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_b = \mathbf{R}_{01} \cdot \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{X}_{s1} + \mathbf{R}_{01} \cdot \mathbf{T}_s + \mathbf{T}_{01} \\ \mathbf{X}_b = \mathbf{R}_{02} \cdot \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{X}_{s2} + \mathbf{R}_{02} \cdot \mathbf{T}_s + \mathbf{T}_{02} \end{cases} \quad (4)$$

如果机器人末端姿态保持不变(平动),即

$\mathbf{R}_{01} = \mathbf{R}_{02} = \mathbf{R}_0$, 则式(4)中两式相减可以得到:

$$\mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_s \cdot (\mathbf{X}_{s1} - \mathbf{X}_{s2}) + \mathbf{T}_{01} - \mathbf{T}_{02} = 0. \quad (5)$$

由于 \mathbf{R}_0 是正交矩阵,经多次测量可得:

$$\mathbf{R}_s \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{s1} - \mathbf{X}_{s2} & \mathbf{X}_{s1} - \mathbf{X}_{s3} & \cdots & \mathbf{X}_{s1} - \mathbf{X}_{sn} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_0^T \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{02} - \mathbf{T}_{01} & \mathbf{T}_{03} - \mathbf{T}_{01} & \cdots & \mathbf{T}_{0n} - \mathbf{T}_{01} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

令 $\mathbf{A} = [\mathbf{X}_{s1} - \mathbf{X}_{s2} \quad \mathbf{X}_{s1} - \mathbf{X}_{s3} \quad \cdots \quad \mathbf{X}_{s1} - \mathbf{X}_{sn}]$,

$\mathbf{b} = \mathbf{R}_0^T [\mathbf{T}_{02} - \mathbf{T}_{01} \quad \mathbf{T}_{03} - \mathbf{T}_{01} \quad \cdots \quad \mathbf{T}_{0n} - \mathbf{T}_{01}]$, 则式(6)

可以写成型如 $\mathbf{R}_s \mathbf{A} = \mathbf{b}$ 的矩阵方程,利用矩阵奇异值分解法求解方程,可得:

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{V}\mathbf{U}^T, \quad (7)$$

其中: \mathbf{V}, \mathbf{U} 为矩阵 $\mathbf{A}\mathbf{b}^T$ 的右奇异矩阵和左奇异矩阵。

如果固定点测量过程中,机器人末端姿态发生变化,则式(4)中两式相减可得:

$$\begin{aligned} (\mathbf{R}_{02} - \mathbf{R}_{01}) \cdot \mathbf{T}_s &= \mathbf{R}_{01} \cdot \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{X}_{s1} - \\ &\mathbf{R}_{02} \cdot \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{X}_{s2} + \mathbf{T}_{01} - \mathbf{T}_{02}. \end{aligned} \quad (8)$$

多次重复以上的变姿态测量,得到型如 $\mathbf{A}\mathbf{T}_s = \mathbf{b}$ 的方程,采用最小二乘法求解 \mathbf{T}_s , 即:

$$\mathbf{T}_s = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (9)$$

至此初步标定了手眼关系: ${}^e\mathbf{T}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{T}_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

这里以标准球作为标定参照物,并以球心作为固定点,该手眼关系初步标定方法简单,运算时间短,不要求解复杂方程组或者求解最优化问题,同时使用示教器控制机器人的平动和变位姿运动非常方便,故可以快速计算手眼初值。但该算法通过理论运动学模型参数计算机器人的末端位姿,与实际末端位姿存在偏差,且控制机器人平动时末端姿态会产生微小变动,进而引入标定误差,因此需要修正手眼关系误差以及机器人模型误差,得到精确的手眼关系。

3.2 手眼关系误差与机器人模型误差修正方法

手眼关系误差与机器人模型误差的修正方法仍然以标准球作为参照物。由式(1)得机器人在

两次不同位姿下测量的球心在基坐标系下的理论位置为:

$$\mathbf{X}_i = {}^b\mathbf{T}_i \cdot {}^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si}, \mathbf{X}_j = {}^b\mathbf{T}_j \cdot {}^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{sj}, \quad (10)$$

其中: \mathbf{X}_s 为球心在传感器坐标系下的位置; ${}^e\mathbf{T}$ 为 3.1 中初步标定的手眼关系; ${}^b\mathbf{T}$ 为机器人末端坐标系到基坐标系的坐标转换矩阵, 由理论运动学模型获得。

由于手眼标定的初值及理论运动学模型都存在偏差, 因此标准球在基坐标系的实际位置为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}^R = ({}^b\mathbf{T}_i + \Delta_e^b\mathbf{T}_i)({}^e\mathbf{T} + \Delta_s^e\mathbf{T})\mathbf{X}_{si} \\ \mathbf{X}^R = ({}^b\mathbf{T}_j + \Delta_e^b\mathbf{T}_j)({}^e\mathbf{T} + \Delta_s^e\mathbf{T})\mathbf{X}_{sj} \end{cases}, \quad (11)$$

其中: $\Delta_s^e\mathbf{T}$ 为手眼关系的偏差; $\Delta_e^b\mathbf{T}$ 为机器人末端坐标系到基坐标系的坐标转换矩阵的偏差; \mathbf{X}^R 为球心在基坐标系下的实际位置。

球心在基坐标系下的理论位置与实际位置的偏差为:

$$\mathbf{X}^R - \mathbf{X}_i = {}^b\mathbf{T}_i \cdot \Delta_s^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si} + \Delta_e^b\mathbf{T}_i \cdot {}^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si} + \Delta_e^b\mathbf{T}_i \cdot \Delta_s^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si}. \quad (12)$$

根据微分运动学 $\Delta_s^e\mathbf{T} = {}^e\mathbf{T} \cdot \delta_s^e\mathbf{T}$, 式(12)中的第一项可以写为:

$${}^b\mathbf{T}_i \cdot \Delta_s^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si} = {}^b\mathbf{T}_i \cdot {}^e\mathbf{T} \cdot \delta_s^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si} = {}^b\mathbf{T}_i \cdot \delta_s^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si}, \quad (13)$$

$$\text{其中: } \delta_s^e\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & -\delta z & \delta y & \Delta x \\ \delta z & 0 & -\delta x & \Delta y \\ -\delta y & \delta x & 0 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ 为微分变}$$

换, $\mathbf{X}_{si} = [x_{si} \ y_{si} \ z_{si} \ 1]^T$ 。

式(13)可表示为:

$${}^b\mathbf{T}_i \cdot \Delta_s^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si} = {}^b\mathbf{T}_i \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\delta z & \delta y & \Delta x \\ \delta z & 0 & -\delta x & \Delta y \\ -\delta y & \delta x & 0 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \\ z_{si} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^b\mathbf{T}_i \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_{si} & -y_{si} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{si} & 0 & x_{si} \\ 0 & 0 & 1 & y_{si} & -x_{si} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = {}^b\mathbf{T}_i \cdot \mathbf{P}_i \cdot \Delta \mathbf{X} \quad (14)$$

由矩阵计算可知, 此时 ${}^b\mathbf{T}_i$ 取前三行三列, 为 3×3 矩阵。

根据机器人微分运动学 $\Delta_e^b\mathbf{T}_i = \delta_e^b\mathbf{T}_i \cdot {}^b\mathbf{T}_i$, 式(12)第二项运动学参数误差为:

$$\Delta_e^b\mathbf{T}_i \cdot {}^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si} = \delta_e^b\mathbf{T}_i \cdot {}^b\mathbf{T}_i \cdot {}^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si} = \delta_e^b\mathbf{T}_i \cdot \mathbf{X}_{bi}, \quad (15)$$

$$\text{其中: } \delta_e^b\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\delta z & \delta y & \Delta x \\ \delta z & 0 & -\delta x & \Delta y \\ -\delta y & \delta x & 0 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ 为微分变}$$

换, $\mathbf{X}_{bi} = {}^b\mathbf{T}_i \cdot {}^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si} = [x_{bi} \ y_{bi} \ z_{bi} \ 1]^T$ 。

式(15)改写为:

$$\Delta_e^b\mathbf{T}_i \cdot {}^e\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_{si} = \begin{bmatrix} 0 & -\delta z & \delta y & \Delta x \\ \delta z & 0 & -\delta x & \Delta y \\ -\delta y & \delta x & 0 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_{bi} & -y_{bi} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{bi} & 0 & x_{bi} \\ 0 & 0 & 1 & y_{bi} & -x_{bi} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_i \cdot \Delta \mathbf{X}_i = \mathbf{Q}_i \cdot \mathbf{J}_i \cdot \Delta \mathbf{P}, \quad (16)$$

其中: $\Delta \mathbf{X}_i = \mathbf{J}_i \cdot \Delta \mathbf{P}$ 为机器人运动学误差模型。

忽略二次高阶项, 每个姿态下球心真实值相对于基坐标系 \mathbf{X}^R 是固定不变的, 两个姿态球心在基坐标系下理论位置与实际位置的偏差相

减, 得:

$$(\mathbf{X}^R - \mathbf{X}_j) - (\mathbf{X}^R - \mathbf{X}_i) = \mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j =$$

$$[{}^b\mathbf{T}_j \cdot \mathbf{P}_j - {}^b\mathbf{T}_i \cdot \mathbf{P}_i \quad \mathbf{Q}_j \cdot \mathbf{J}_j - \mathbf{Q}_i \cdot \mathbf{J}_i] \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X} \\ \Delta \mathbf{P} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

模型中待求量为 6 个手眼关系微平移微转动误差 ΔX 以及 30 个机器人 MDH(Modified Denavit-Hatenberg)运动学模型参数偏差 ΔP 。

$$\text{令 } U_{ij} = [{}^b_s T_j \cdot P_j - {}^b_s T_i \cdot P_i \quad Q_j \cdot J_i - Q_i \cdot J_i],$$

$$V_{ij} = X_i - X_j, \Delta Y = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta P \end{bmatrix}, \text{得:}$$

$$V = \begin{bmatrix} V_{ij,1} \\ V_{ij,2} \\ \dots \\ V_{ij,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ij,1} \\ U_{ij,2} \\ \dots \\ U_{ij,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta P \end{bmatrix} = U \cdot \Delta Y. \quad (18)$$

由于噪声的存在,系数矩阵 U 的条件数非常大,故设定误差容限,采用奇异值分解法求解方程。

$$\Delta Y = (E \cdot S^+ \cdot F^T) V, \quad (19)$$

其中: E, F 分别为 U 的右奇异矩阵和左奇异矩阵, S^+ 为设定误差容限后的奇异值矩阵。

将求得的运动学参数误差和手眼关系误差带入原模型得到标定误差,即测量同一位置球时球心距的 RMS 误差:

$$\epsilon = \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n ({}^b_e T_j \cdot {}^e_s T \cdot X_{sj} - {}^b_e T_i \cdot {}^e_s T \cdot X_{si})^T \cdot ({}^b_e T_j \cdot {}^e_s T \cdot X_{sj} - {}^b_e T_i \cdot {}^e_s T \cdot X_{si}) / (n \times (n-1) / 2 - 1) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (20)$$

为了得到更准确的手眼关系,采用图 2 所示的迭代过程。综合考虑系统的各项误差,如机器人重复定位精度,传感器精度,计算球心精度等,

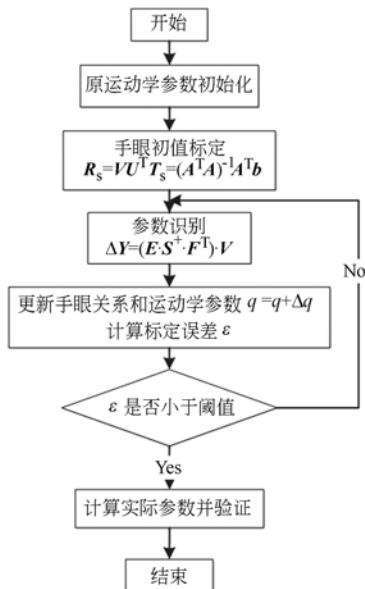


图 2 机器人标定算法流程图

Fig. 2 Flow chart of robot calibration algorithm

适当选取标定误差阈值 ϵ 。当标定误差小于给定阈值时,迭代结束,标定完成。

4 实验及结果分析

为了验证上述手眼标定方法的可行性和实用性,在实验室环境下搭建了如图 3 所示的机器人视觉测量系统。系统包含 ABB IRB2400 工业机器人,刚度与机器人相似的铁制连接件, nxSensor-I 型线结构光传感器,以及直径为 38.1 mm 的标准球。传感器的精度可达到 0.025 mm。跟踪仪 38.1 mm(1.5 inch)小球的磁性球座固定在可以自由移动和上下伸缩的三脚架上。球座上放置直径为 38.1 mm 的陶瓷球(G16,根据 ISO 3290-2001,直径变动量小于 0.4 μm)用于测量。



图 3 标定实验设备

Fig. 3 Experimental setup for robot calibration

4.1 球心测量

结构光传感器光条投射在半径为 R 的球面上,在传感器坐标系下激光平面为 $x=0$,摄像机拍摄弧状光条,经过图像处理和最小二乘拟合圆得到光条处圆弧半径 r 和圆心在传感器坐标系下的坐标 $Z(x_c, y_c, z_c)$ 。圆心 Z 和球心 $O(x_s, y_s, z_s)$ 满足以下关系:

$$\begin{cases} x_s = x_c \pm t \\ y_s = y_c \\ z_s = z_c \end{cases}, \quad (21)$$

其中: $t = \sqrt{R^2 - r^2}$, 正负号取决于圆心与球心的相对位置。

由相关实验可知,在测量球角度为 $\pm 40^\circ$ 左右时距离误差最小,球心测量精度最高。

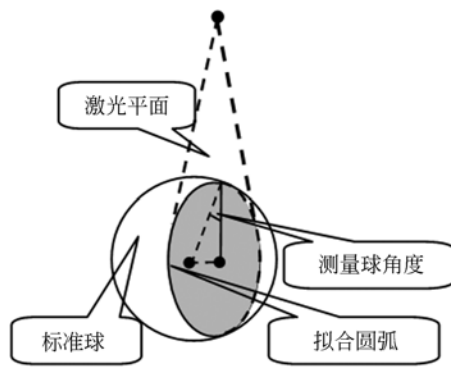


图 4 测量球心坐标示意图

Fig. 4 Schematic for sphere centre measurement

4.2 结果分析

在机器人运动空间中布置标准球,在示教模式下控制机器人做 4 次平动、6 次变姿态运动,结构光传感器对标准球进行测量,按式(21)拟合球心。通过前 4 次测量数据按式(7)解算 R_s ,后 6 次测量数据按式(9)解算 T_s ,得到手眼关系的初始矩阵:

$${}^c T_s^{\text{initial}} = \begin{bmatrix} 0.870 4 & 0.492 1 & -0.013 3 & -7.442 2 \\ 0.491 7 & -0.870 4 & -0.023 5 & -1.012 \\ -0.023 1 & 0.013 9 & -0.999 6 & 287.818 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在机器人的运动空间有规律地分布 9 个标准球位置,使在机器人基坐标系下 X, Y, Z 轴方向都分 3 个层次分布,在示教模型下控制机器人位姿,每个标准球的位置测量 6 次,测量球的角度大约为 $\pm 40^\circ$ 。每个位置 6 次数据不重复的两两相减得到 3 个式(17)所示方程。按式(19)解方程组得到参数模型误差,补偿到原模型后按式(20)标定误差,并完成迭代。其中标定误差阈值取 0.15 mm。

标定完成后手眼关系为:

$${}^c T_s = \begin{bmatrix} 0.870 3 & 0.492 5 & -0.010 8 & -7.442 \\ 0.492 1 & -0.870 2 & -0.022 7 & -1.012 \\ -0.020 5 & 0.014 4 & -0.999 7 & 287.804 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

MDH 模型参数误差如表 1 所示。

同一球空间位置固定,测量球心距离真值为零。标定前后每个标准球位置测量的球心距如图 5 所示。球心距的最大偏差由 0.467 mm 降低到 0.316 3 mm,球心距的标准差由 0.245 mm 降低到 0.149 mm。

表 1 运动学参数误差

Tab. 1 Identified values for kinematic parameter errors

连杆	$\Delta\alpha_i/(\circ)$	$\Delta a_i/\text{mm}$	$\Delta d_i/\text{mm}$	$\Delta\theta_i/(\circ)$	$\Delta\beta_i/(\circ)$
1	0.122 1	0.043 8	0	1.896 2	-0.039 9
2	0.092 0	0.209 7	0.000 3	0.162 4	0.044 4
3	-0.257 1	0.102 3	0.000 3	0.757 4	0.714 3
4	0.469 1	0.321 7	0.000 2	0.067 6	0.067 6
5	0.430 9	-0.692 1	-0.306 1	0.080 5	0.080 5
6	0.004 0	-0.000 4	-0.014 8	0.026 4	-0.029 3

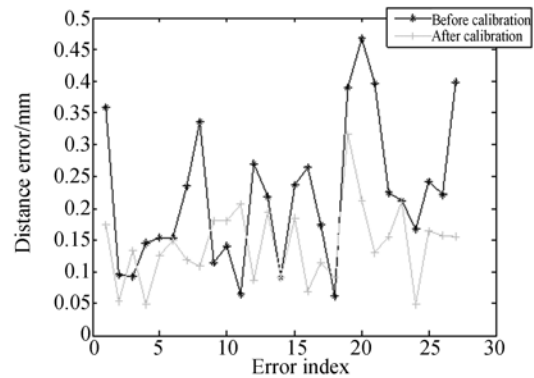


图 5 标定前后球心距误差

Fig. 5 Distance errors of sphere centre before and after calibrations

4.3 对比验证

为了验证本文提出的手眼标定算法的有效性和精度,引入激光跟踪仪系统。Leica AT901-LR 激光跟踪仪 AIFM (Absolute Interferometer) 的测距精度可达到 $\pm 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$,全范围内的测角精度可达到 $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ 。用激光跟踪的反射球 (SMR, 直径为 38.1 mm) 代替标准球,由于直径相同,可认为球心在空间同一点。在机器人标定运动范围内,随机分布 10 个标准球位置,每个位置机器人变化姿态测量 6 次,相邻两位置 6 个姿态测量的球心距离与跟踪仪测量距离比较,共有 54 组数据。以跟踪仪测量的两个位置的球心距离作为真值,比较用修正前后的手眼关系与机器人运动学模型参数计算的球心在基坐标系下的距离与真值的差,如图 6 所示。距离测量误差的最大偏差由 1.257 mm 降低到 0.397 mm,标准差由 0.566 mm 降低到 0.173 mm。实验结果表明,本文提出的改进标定方法显著提高了机器人视觉测量系统的精度。

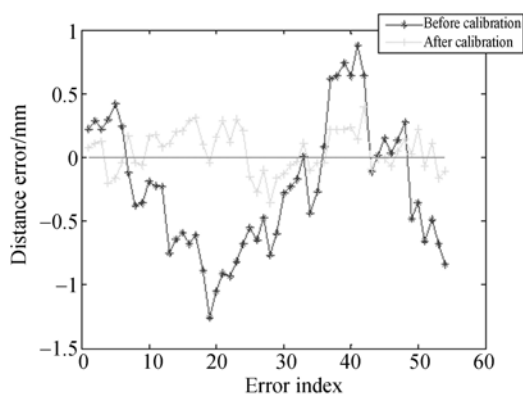


图 6 标定前后距离误差

Fig. 6 Distance errors before and after calibrations

5 结 论

本文提出了一种改进的工业机器人手眼标定

方法,建立了包含手眼关系误差和机器人运动学参数误差的误差模型,通过同时标定手眼参数和运动学参数提高了手眼关系的精度。对于 ABB IRB2400 工业机器人构建的实验系统,利用传感器测量标准球的球心。标定时,首先应用机器人的理论模型初步标定手眼关系,然后基于球心约束,通过迭代算法同时得到准确的手眼关系矩阵和实际的机器人运动学参数,完成手眼标定过程。标定前后测量距离的标准差由 0.566 mm 降低到 0.173 mm。标定过程中没有使用任何昂贵的外部测量设备,该标定方法非常适合运用于工业现场的在线测量系统中。在未来工作中,预期实现测量系统全自动化的标定过程以及本标定方法在工业现场的应用。

参考文献:

- [1] 裘祖荣,石照耀,李岩. 机械制造领域测量技术的发展研究[J]. 机械工程学报, 2010,46(14):1-11.
QIU Z R, SHI ZH Y, LI Y. Research on the development of measurement technology mechanical manufacture[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010,46(14):1-11. (in Chinese)
- [2] 张旭革,汪家其,张益昕,等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 140-147.
ZHANG X P, WANG J Q, ZHANG Y X, et al.. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3):140-147. (in Chinese)
- [3] 陈新禹,马孜,陈天飞. 线结构光传感器模型的简易标定[J]. 光学精密工程, 2013, 20(11): 2345-2352.
CHEN X Y, MA Z, CHEN T F. Calibration model for line structured light vision sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 20(11): 2345-2352. (in Chinese)
- [4] 裘祖荣,陈浩玉,胡文川,等. 嵌入式线结构光角度视觉检测及误差补偿[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10):2480-2487.
QIU Z R, CHEN H Y, HU W CH, et al.. Embedded angle vision inspection and error compensation for line structured lights[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10):2480-2487. (in Chinese)
- [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, 2013,24(4): 746-750.
ZHU J G, ZHOU J, LIN J R, et al.. Measurement-oriented positioning error compensation for industrial robot [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013,24(4): 746-750. (in Chinese)
- [6] 王一,刘常杰,任永杰,等. 通用机器人视觉检测系统的全局校准技术[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 3028-3033.
WANG Y, LIU CH J, REN Y J, et al.. Global calibration of visual inspection system based on universal robots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 3028-3033. (in Chinese)
- [7] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 236-245.
- [8] TSAI R Y, LENZ R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration [J]. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 1989, 5(3): 345-358.
- [9] CHOU J C K, KAMEL M. Finding the position and orientation of a sensor on a robot manipulator using quaternions[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1991, 10(3): 240-254.
- [10] ZHAO Z, WENG Y. A flexible method combining camera calibration and hand-eye calibration [J].

- Robotica*, 2013, 31(5):747-756.
- [11] HU J S, CHANG Y J. Automatic calibration of hand-eye-workspace and camera using hand-mounted line laser[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(6):1778-1786.
- [12] 陈天飞, 汪洋, 陈余庆, 等. 一种基于级联滤波的手眼在线标定方法[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2013, 43(A01): 138-142.
CHEN T F, WANG Y, CHEN Y Q, *et al.*. An online hand-eye calibration approach based on cascaded filter[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2013, 43(A01): 138-142. (in Chinese)
- [13] MA S D. A self-calibration technique for active vision systems[J]. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 1996, 12(1): 114-120.
- [14] 许海霞, 王耀南, 万琴, 等. 一种机器人手眼关系自标定方法[J]. *机器人*, 2008, 30(4): 373-378.
XU H X, WANG Y N, WAN Q, *et al.*. A self-calibration approach to hand-eye relation of robot[J]. *Robot*, 2008, 30(4): 373-378. (in Chinese)
- [15] SUNG H, LEE S, KIM D. A robot-camera hand/eye self-calibration system using a planar target[C]. *Robotics (ISR), 44th International Symposium on.*, IEEE, 2013: 1-4.
- [16] 刘常杰, 段宇, 王一, 等. 机器人柔性坐标测量系统现场校准技术研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(18): 1-6.
LIU CH J, DUAN Y, WANG Y, *et al.*. Study on the field calibration technology of robot flexible coordinate measurement system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18): 1-6. (in Chinese)

作者简介:



杨守瑞(1990—),女,山西晋中人,博士研究生,2012年于天津大学获得学士学位,主要从事激光及光电测试技术,视觉检测技术,机器人控制与机器人测量方面的研究。E-mail: shouruiyang@tju.edu.cn

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

通讯作者:



任永杰(1975—),男,河北河间人,博士,讲师,1998年于华北电力大学获得学士学位,2004年,2007年于天津大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光及光电测试,视觉检测技术,机器人控制及机器人测量技术方面的研究。E-mail: yongjieren@tju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)