

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2020.21.007

本文引用格式: 曹冬旺, 郝卫东, 杨道国. 线激光视觉测量机器人手眼标定方法研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(21): 31-35.

CAO Dongwang, HAO Weidong, YANG Daoguo. Research of Hand-eye Calibration Method for Line Laser Vision Measurement Robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(21): 31-35.

## 线激光视觉测量机器人手眼标定方法研究

曹冬旺, 郝卫东, 杨道国

(桂林电子科技大学机电工程学院, 广西桂林 541004)

**摘要:** 线激光视觉测量传感器与工业机器人组成三维测量系统时, 法兰盘坐标系与摄像机坐标系之间变换关系求解较复杂。为解决此问题, 提出一种基于固定参考点的手眼标定算法。该算法以标定球为靶标, 根据标定球球心在机器人基坐标系中坐标不变原则, 结合机器人运动学位置约束关系建立了矩阵变换方程, 并在旋转矩阵求解中引入四元数, 简化计算过程, 实现机器人手眼标定。通过试验量化分析测头光平面与标定球相交位置对测量结果的影响, 验证了该算法的有效性和实用性。

**关键词:** 线激光; 标定球; 四元数; 手眼标定

**中图分类号:** TP391

### Research of Hand-eye Calibration Method for Line Laser Vision Measurement Robot

CAO Dongwang, HAO Weidong, YANG Daoguo

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

**Abstract:** When linear laser vision measurement sensor and industrial robot are constituted a three-dimensional measurement system, the transformation relationship between the flange coordinate system and the camera coordinate system is more complicated to solve. In order to solve the problem, a hand-eye calibration algorithm based on fixed reference point was proposed. In this algorithm, the criterion sphere was taken as the target, and according to the coordinate invariance principle of the center of the criterion sphere in the basic coordinate system of the robot, the matrix transformation equation was established by combining the kinematic position constraint relation of the robot. The quaternion was introduced in the solution of the rotation matrix to simplify the calculations process and implement the hand-eye calibration of the robot. The influence of the intersection of the laser plane of scanning probe and the calibration sphere on the measurement results was quantified through experiments, and the effectiveness and practicability of the algorithm was verified.

**Keywords:** Line laser; Criterion sphere; Quaternion; Hand-eye calibration

### 0 前言

线激光视觉测量传感器是一种利用激光和视觉来实现测量的传感器, 具有精度高、抗干扰性强、无接触远距离测量等优点, 广泛应用于逆向工程、产品缺陷检测、质量控制中<sup>[1]</sup>。线激光视觉测量传感器测量机制是发射线结构光形成光平面与物体相交, 再由集成的视觉传感器采集相交光纹深度信息, 因此单次测量只能获取光纹处有限长度的深度信息。为实现对三维物体的整体测量, 必须将线激光视觉测量传感器装配在其他高精度测量平台构成测量系统, 以完成对物体的整体测量<sup>[2-3]</sup>。

六轴工业机器人具有响应时间短、自动化程度高、动作迅速、精度高、操作方便灵活等优点, 是搭

载线激光视觉测量传感器的理想平台<sup>[4-5]</sup>。通过刚性结构将线激光视觉测量传感器安装在机器人手腕末端组成三维测量系统, 从而有效提高传感器测量范围, 可实现大物体产品的缺陷检测、逆向工程和质量控制等<sup>[6-7]</sup>。因为线激光视觉传感器自身及外部众多原因, 使得传感器坐标系与机器人法兰盘坐标系变换关系复杂, 求解困难, 因此提出一种手眼标定方法: 变动机器人的手臂, 使安装在机器人手臂末端的线激光视觉传感器以不同位姿获取光平面与标定球相交圆弧坐标, 通过测量数据计算标定球球心在摄像机坐标系下的坐标, 再利用标定球球心在机器人基坐标系下相等的原理, 结合机器人运动学位置约束关系建立了矩阵变换方程, 求解出线激光视觉传感器与机器人之间

收稿日期: 2019-07-07

基金项目: 广西科技重大专项 (桂科 AA17204018)

作者简介: 曹冬旺 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究领域为智能机器人。E-mail: 781965287@qq.com。

的变换关系。

### 1 线激光三维测量系统介绍

基于六轴工业机器人的线激光三维测量系统如图 1 所示,该系统主要由 KR20-R1810-2 机器人、线激光视觉测量传感器及待测物体组成,其中测量传感器采用的是某公司的 SLP-2000 型高精度线激光扫描仪,输出数据是光平面与被测物体交线光纹的坐标值,可由该公司提供的 SDK 开发包来读取。

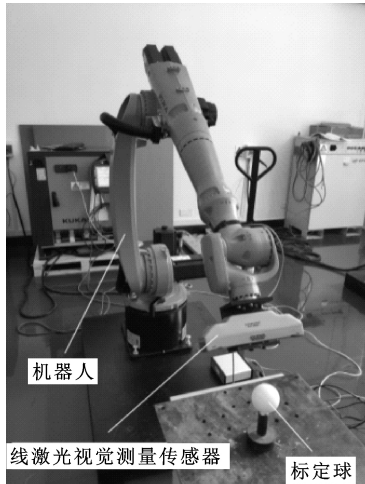


图 1 机器人线激光三维测量系统

机器人手腕末端安装线激光测头,按规划路径使线激光扫过被测物体表面,由测头两边的 CMOS 摄像头采集在摄像头坐标系下光平面与被测物体交线的坐标值(单条光线可达 752 个点),将坐标值与该时刻下机器人坐标整合到同一坐标(机器人基坐标),即可获得以机器人基坐标为原点的物体表面三维点云数据<sup>[8]</sup>。

### 2 手眼标定算法介绍

线激光视觉测量系统的手眼标定模型如图 2 所示,为方便手眼关系标定,现建立以下坐标系:  $o_b-x_b y_b z_b$  为基坐标系,  $o_w-x_w y_w z_w$  为世界坐标系,为了方便计算,将基坐标系与世界坐标系重合,所有测量数据将统一到基坐标系下;  $o_m-x_m y_m z_m$  为机器人法兰盘坐标系,其  $z$  轴为法兰盘旋转中心轴,坐标系原点在法兰盘中心,姿态由机器人正运动学确定;  $o_t-x_t y_t z_t$  为双目摄像头下的坐标系,其  $x$  轴垂直于光平面,姿态未知。

$o_b-x_b y_b z_b$  基坐标系与  $o_m-x_m y_m z_m$  法兰盘坐标系之间变换关系  ${}^B T_M$  随机器人运动不断变化,但可由机器人正运动学模型获得。线激光传感器刚性安装在机器人手腕末端,故  $o_t-x_t y_t z_t$  摄像头坐标系与  $o_m-x_m y_m z_m$  法兰盘坐标系变换关系  ${}^M T_T$  固定不变,但由于测头自身及外部众多原因,使得  ${}^M T_T$  未知,因而需要进行手眼标定。被测物体上的点,都满足以下关系<sup>[9]</sup>:

$$x_B = {}^B T_M \cdot {}^M T_T \cdot x_T \quad (1)$$

式中:  $x_B$  为被测物体上的点在机器人基坐标系下的坐标;  $x_T$  为被测物上的点在摄像机坐标系下的坐标矩阵。将式(1)进一步展开:

$$\begin{bmatrix} x_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m & T_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_t & T_t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $R_m$ 、 $T_m$  为法兰盘坐标系相对于基坐标系的旋转和平移矩阵,可由机器人正运动学获取;  $R_t$ 、 $T_t$  为摄像机坐标系相对于法兰盘坐标系的旋转矩阵和平移矩阵<sup>[10]</sup>,由手眼标定求解。将式(2)转换得:

$$x_B = R_m \times (R_t \times x_t + T_t) + T_m \quad (3)$$

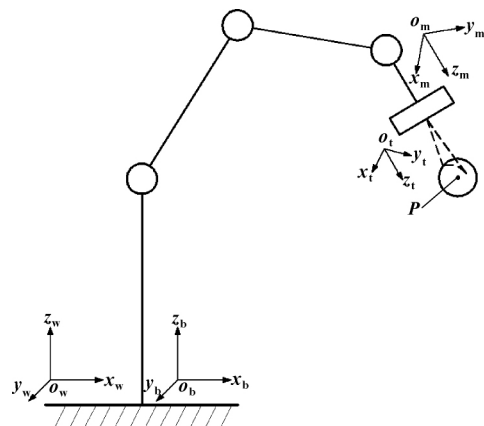


图 2 手眼结构简图

标定球放在三维测量系统工作空间内某个位置固定不动,控制机器人运动使测头光平面与标定球相交,将线激光视觉传感器测量数据导入到 MATLAB 中,用最小二乘法拟合得到相交圆弧在摄像机坐标系下的圆心坐标  $O_n$  及半径  $r$ ,则在摄像机坐标系( $x$ 轴垂直光平面)下拟合圆方程为

$$(y - y_n)^2 + (z - z_n)^2 = r^2 \quad (4)$$

图 3 所示为拟合圆圆心与标定球球心之间的关系,进一步求得在摄像机坐标系下标定球的球心  $P$  坐标为

$$\begin{cases} x_p = \pm \sqrt{R^2 - r^2} \\ y_p = y_n \\ z_p = z_n \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $R$  为标定球的半径;  $x_p$  的符号根据线激光测头的位置确定。改变机器人位姿进行多次测量并将计算出的标定球球心坐标整合到机器人基坐标系下,又因为标定球球心坐标在基坐标系相等,可由式(3)进一步得:

$$\begin{cases} x_b = R_{mi+1} (R_t x_{pi+1} + T_t) + T_{mi+1} \\ x_b = R_{mi} (R_t x_{pi} + T_t) + T_{mi} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $x_{pi}$ 、 $x_{pi+1}$  分别为在摄像机坐标系下第  $i$  次和第  $i+1$  次测量数据拟合的标定球球心坐标。

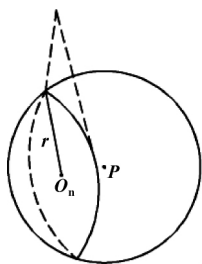


图 3 相交圆弧圆心与标定球球心关系示意

$$R_i = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式 (7) 与式 (8) 可知方程有 4 个未知数  $q_0$ 、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 。机器人保持姿态不变进行两次平移运动测量, 即可由基坐标系下  $x_b$ 、 $y_b$ 、 $z_b$  分量相等确定 3 个等式, 故只需进行 3 次测量即可求解方程, 但为了保证稳定性和提高精度, 使测量次数  $n > 3$ , 以寻求最优解。

## 2.2 求解 $T_i$

由式 (6) 进一步整理得:

$$(R_{mi+1} - R_{mi}) T_i = (R_{mi} R_{i1} x_{pi} + T_{mi}) - (R_{mi+1} R_{i1} x_{pi+1} + T_{mi+1}) \quad (9)$$

多次改变机器人手腕姿态对标定球进行测量组成型如  $Ax = b$  的方程, 由最小二乘法进行求解可得:

$$T_i = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (10)$$

至此, 完成了摄像机坐标系相对于法兰盘坐标系的旋转矩阵  $R_i$  和平移矩阵  $T_i$  标定。

## 3 试验研究

### 3.1 实际测试试验

通过自制刚性安装配件将 SLP-2000 型高精度线

### 2.1 求解 $R_i$

控制机器人手腕只进行平移运动对标定球多次测量, 则式 (6) 中  $R_{mi} = R_{mi+1}$ , 且旋转矩阵  $R_{mi}$  为正交矩阵, 可由式 (6) 进一步得:

$$R_i(x_{pi} - x_{pi+1}) = R_{mi}^T(T_{mi+1} - T_{mi}) \quad (7)$$

式中: 只有旋转矩阵  $R_i$  未知, 为方便对其求解, 将矩阵  $R_i$  用四元数 ( $q_0, q_1, q_2, q_3$ )<sup>[11]</sup> 表示:

激光扫描仪安装于 KR20-R1810-2 工业机器人手腕末端, 控制机器人以 3 个不同姿态分别沿  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向运动, 并且为了减少机器人自身误差带来的影响, 在改变姿态时, 尽量只动机器人的 4、5、6 轴<sup>[12-13]</sup>。每个姿态各采集 10 次数据, 并根据顺序记录测头位置及光平面与标定球相交圆弧位置, 以方便式 (5) 中  $x$  分量正负值判断及后续的数据分析。工业机器人重复定位精度优于 0.04 mm, 线激光视觉测量传感器测量精度优于 0.075 mm, 按上述方法对标定球 (半径  $R = 34.75$  mm) 进行测量, 通过 MATLAB 计算出手眼关系为

$$R_i = \begin{bmatrix} 0.732\ 825 & 0.667\ 160 & 0.133\ 661 \\ -0.671\ 510 & 0.740\ 821 & -0.016\ 061 \\ -0.109\ 734 & -0.077\ 985 & 0.990\ 897 \end{bmatrix}$$

$$T_i = [2.371\ 154 \quad -0.824\ 173 \quad 107.518\ 322]^T$$

利用计算出来的手眼关系, 由式 (3) 将上述试验计算出的标定球在摄像机坐标系下的坐标转换到机器人基坐标系下坐标, 如表 1 所示。

表 1 标定球球心坐标数据

mm

序号	沿 $x$ 轴运动	沿 $y$ 轴运动	沿 $z$ 轴运动
1	(1 251.79, -14.05, 601.01)	(1 254.49, -13.54, 600.14)	(1 252.72, -11.99, 598.69)
2	(1 252.57, -13.12, 600.73)	(1 253.72, -12.86, 599.93)	(1 253.25, -12.53, 599.90)
3	(1 253.61, -12.51, 599.71)	(1 253.63, -12.54, 599.71)	(1 253.56, -12.49, 599.71)
4	(1 253.78, -12.52, 599.68)	(1 253.51, -12.38, 599.69)	(1 253.58, -12.53, 599.64)
5	(1 254.10, -12.86, 600.06)	(1 253.73, -12.47, 599.59)	(1 253.45, -12.46, 599.67)
6	(1 253.64, -12.61, 599.73)	(1 253.06, -11.88, 599.29)	(1 253.83, -12.16, 598.94)
7	(1 253.70, -12.54, 599.80)	(1 253.60, -12.45, 599.67)	(1 253.55, -12.46, 599.79)
8	(1 253.58, -12.56, 599.71)	(1 253.55, -12.44, 599.79)	(1 253.48, -12.51, 599.78)
9	(1 253.07, -12.94, 599.13)	(1 254.02, -12.06, 599.83)	(1 253.91, -12.41, 599.86)
10	(1 252.69, -11.33, 600.89)	(1 252.64, -12.70, 599.18)	(1 254.02, -12.02, 600.75)

从表 1 可以看出, 对于同一姿态下所测得的标定球球心坐标, 除几个数据异常外, 其余数据一致性较

好, 但机器人在不同姿态下所测得的标定球球心坐标之间存在一定的差异, 其主要是由机器人运动学参数误

差造成的。

### 3.2 数据分析

由式 (11)、(12) 分别求得沿  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴方向 3 个姿态下所测得球心坐标的平均值和标准差:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (12)$$

$$\bar{P}_x = [1 \ 253.25 \ -12.70 \ 600.05]$$

$$\bar{P}_y = [1 \ 253.60 \ -12.53 \ 599.68]$$

$$\bar{P}_z = [1 \ 253.54 \ -12.36 \ 599.67]$$

$$\sigma_x = 1.1654, \sigma_y = 0.7293, \sigma_z = 0.7001$$

标准差结果显示, 沿机器人  $x$  轴运动比沿  $y$  轴、 $z$  轴时所测得的数据稳定性差。为进一步分析每一个试验组数据, 构造作为标定结果准确性的误差计算公式:

$$\Delta D_p = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2} \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (13)$$

式中:  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$  是球心坐标平均值的 3 个分量。由式 (13) 计算结果得出的  $\Delta D_p$  曲线如图 4 所示。

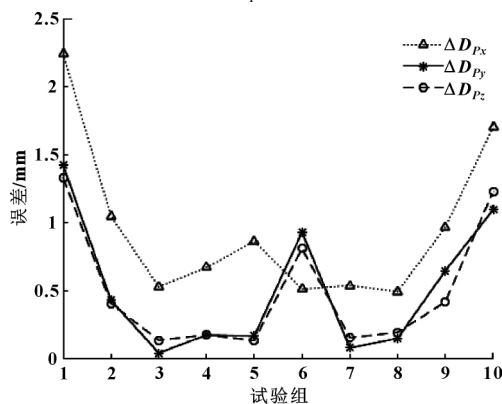


图 4  $\Delta D_p$  曲线

从图 4 中可以看出, 大多数试验组的误差值较小, 但有少数几个试验组误差值偏大, 并且在不同姿态下的误差曲线类似, 经统计, 所有试验组中误差值大于 0.6 mm 的有 11 组, 这些偏差较大的试验组导致对应姿态下测量数据的标准差变大。分析 3.1 节所提的试验过程记录发现, 这 11 组试验组测量位置都存在共性: 测量位置处于标定球边缘, 测头光平面与标定球相交圆弧的半径较小, 或测量位置接近标定球中心, 测头光平面与标定球相交圆弧的半径接近标定球半径。

对比沿  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴方向的 3 个姿态下的测量过程及测量数据发现, 沿  $x$  轴方向运动测量时, 测

头光平面与标定球相交在光平面上部分, 光平面的  $z$  轴偏离相交圆弧圆心较多, 使得远离摄像头那侧相交圆弧的测量点数减小, 拟合的拟合圆精度低, 故沿  $x$  轴运动时的测量误差较大, 数据稳定性差, 与图 4 反映的结果一致。

### 3.3 试验组优劣判断

3 个姿态下的试验过程具有相似性, 都是使测头光平面与标定球一侧边缘相交扫至另一侧边缘, 并依次将测量数据记录。当测头光平面与标定球边缘相交时, 其相交圆弧半径小, 测量点数少, 拟合出来的拟合圆精度低, 导致测量误差较大。当测头光平面接近标定球圆心时, 其相交圆弧半径接近于标定球半径, 拟合出来的拟合圆半径即使存在较小误差, 也会给标定球在摄像机坐标系下的坐标计算带来较大误差, 再经后续转换计算约简, 使得转换在基坐标系下的标定球球心坐标误差较大。从图 4 中可以看出, 3 组试验误差较大的数据集中在两端和中间, 这与上述分析一致。

在实测试验中, 拟合圆半径过小或接近于标定球半径, 都会使得测量误差变大, 故可以由拟合圆的半径  $r$  与标定球半径  $R$  的比值作为试验组优劣的判断依据。分别计算 3 组试验组数据的  $r/R$ , 结果如图 5 所示。

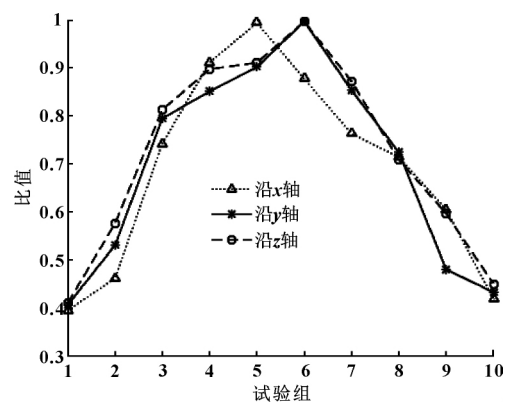
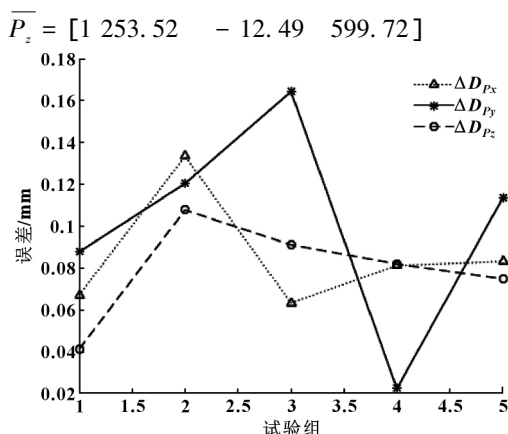


图 5  $r/R$  比值曲线

结合图 4、5 可以看出, 测头光平面与标定球相交圆弧半径过大或过小, 都会对标定结果产生很大影响, 因此, 在实际应用时, 应先计算试验组的  $r/R$  值, 选择合适的比值区间, 将不合格数据剔除后重新采集数据, 可以有效提高手眼标定精度。对于 3.1 节试验, 选取比值区间为  $[0.6, 0.92]$ , 将区间以外试验组剔除, 用剩余试验组数据重新标定手眼关系, 并利用计算出来的手眼关系重新计算坐标平均值和  $\Delta D_p$ , 其中  $\Delta D_p$  如图 6 所示。

$$\bar{P}_x = [1 \ 253.66 \ -12.55 \ 599.73]$$

$$\bar{P}_y = [1 \ 253.60 \ -12.46 \ 599.69]$$

图 6 优化后  $\Delta D_p$  曲线

再分别计算 3 组平均坐标之间的  $\Delta D_p$ :  $\Delta D_{pxy} = 0.1153$ 、 $\Delta D_{pxz} = 0.1526$ 、 $\Delta D_{pyz} = 0.0906$ 。

实验结果表明: 优化后, 同组测量数据的一致性大幅度提高, 不同组数据之间差异性减小。考虑到试验中使用的工业机器人定位精度  $< \pm 0.2$  mm, 故可认为 3 组数据之间的差异在正常范围之内。

#### 4 结论

本文作者以标定球球心坐标在机器人基坐标系下为定值, 结合机器人运动学位置约束关系建立了矩阵变换方程, 利用四元数简化了旋转矩阵求解过程, 实现了手眼标定。通过试验分析了测头光平面与标定球相交位置对测量结果的影响, 并进一步给出了判别式, 从而为获取合理测量数据提供了依据。通过优化后的试验组计算结果验证了所提算法的有效性和实用性, 有效解决了法兰盘坐标系与摄像机坐标系之间变换关系求解复杂的问题。

#### 参考文献:

- [1] 刘建伟, 侯军兴, 刘小波, 等. 单目结构光扫描仪的系统标定技术研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(13): 12-17.  
LIU J W, HOU J X, LIU X B, et al. Technical study of system calibration of single camera structure-light scanner[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(13): 12-17.
- [2] 黄佳, 郝继贵, 王一. 激光线扫式形貌测量机器人的标定研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(1): 62-66.  
HUANG J, ZHU J G, WANG Y. Calibration for 3D profile measurement robot with laser line-scan sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(1): 62-66.
- [3] 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): 183-185.  
WANG Y N, DAI S G. Research on the line laser hand-eye calibration method[J]. Electronic Science and Technology, 2015, 28(7): 183-185.
- [4] 杨永. 机器人单目视觉标定圆心靶标特征点几何求解[J]. 机床与液压, 2017, 45(5): 17-20.

YANG Y. Robot monocular vision calibration center target feature points geometric calculation [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(5): 17-20.

- [5] 李爱国, 马孜, 王文标. 结构光视觉测量机器人的标定[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 663-667.  
LI A G, MA Z, WANG W B. Calibration for robot-based measuring system [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(5): 663-667.
- [6] 侯茂盛, 王强, 马国庆, 等. 三维形貌柔性测量系统标定方法及验证[J]. 应用光学, 2018, 39(3): 385-391.  
HOU M S, WANG Q, MA G Q, et al. Calibration and verification method for 3D shape flexible measurement system [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(3): 385-391.
- [7] 何炳蔚, 周小龙. 线激光三维测量仪中视觉传感器规划方法研究[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1618-1625.  
HE B W, ZHOU X L. Research of sensor planning method in line laser three-dimensional measurement system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1618-1625.
- [8] 吴杭彬, 刘春. 三维激光扫描点云数据的空间压缩[J]. 遥感信息, 2006, 21(2): 22-24.  
WU H B, LIU C. Spatial compression of point cloud data from three dimension laser scanning [J]. Remote Sensing Information, 2006, 21(2): 22-24.
- [9] 齐立哲, 汤青, 贡超, 等. 机器人三维激光扫描视觉系统标定误差[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 9-15.  
QI L Z, TANG Q, YUN C, et al. Calibration error of robotic vision system of 3D laser scanner [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 9-15.
- [10] LI J F, CHEN M, JIN X B, et al. Calibration of a multiple axes 3-D laser scanning system consisting of robot, portable laser scanner and turntable [J]. Optik, 2011, 122(4): 324-329.
- [11] BAR-ITZHACK I Y. New method for extracting the quaternion from a rotation matrix [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2000, 23(6): 1085-1087.
- [12] 郭新年, 白瑞林, 王秀平. 基于主动视觉的手眼矩阵和光平面标定方法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(19): 56-60.  
GUO X N, BAI R L, WANG X P. Calibration approach for hand-eye matrix and light plane based on active vision [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(19): 56-60.
- [13] 张黎烁, 赵志梅. 基于主动视觉的结构光手眼系统自标定方法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(9): 202-206.  
ZHANG L S, ZHAO Z M. A self-calibration approach to structured light eye-in-hand system based on active vision [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(9): 202-206.

(责任编辑: 张楠)