

基于手眼系统的线结构光焊缝跟踪系统设计

陈天元¹, 宋光明¹, 王富林², 何杏兴², 宋爱国¹

(1. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096; 2. 南京熊猫电子装备有限公司 南京 210033)

摘要:为了实现一般手眼系统与线结构光焊缝跟踪系统主要部件的复用,在一般手眼系统的基础上,加装激光器、滤光片、保护装置等设备,将其用作焊缝跟踪系统中的线激光结构光焊缝跟踪传感器。通过实验对原手眼系统的标定结果进行实验修正,使其可以替代线结构光焊缝跟踪传感器的标定。详细分析了安装激光器、滤光片、保护装置等对原手眼标定结果造成的影响,使用数据逼近的方法提高线激光结构光焊缝跟踪传感器的手眼标定精度;实验时先对手眼系统进行标定,得到相机坐标系到工具坐标系的原外参矩阵;再对使用原外参矩阵得到的焊点数据,与焊点的实际坐标的误差进行分析,修正手眼系统标定结果。通过实验验证了本方法在手眼系统标定结果基础上,进行加装机构后的线结构光焊缝跟踪传感器的手眼标定的平均精度可达0.53 mm,能够满足机器人焊接的需求。

关键词:手眼系统;焊缝跟踪;线结构光;手眼标定

中图分类号: TP391.4 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.2040

Design of a welding seam tracking system with the structured light based on the hand-eye system

Chen Tianyuan¹, Song Guangming¹, Wang Fulin², He Xingxing², Song Aiguo¹

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing PANDA Electronics Equipment Co., Ltd, Nanjing 210033, China)

Abstract: In order to realize the reuse of the main components of the general hand-eye system and the structured-light seam tracking system, the installation of a laser, filter and protective device on the basis of the general hand-eye system makes it used as a seam tracking sensor. Calibration results of the original hand-eye system were experimentally modified to replace the calibration of the structured-light seam tracking sensor. The influence caused by the installation of laser and filter on the original hand-eye calibration result is analyzed in detail. The method of data approximation is used to improve the hand-eye calibration accuracy of the line laser structured light seam tracking sensor. In the experiment, the hand-eye system is calibrated firstly to obtain the original matrix of the camera coordinate system to the tool coordinate system. The error of welding point data obtained from the original extrinsic matrix and the actual coordinate of the solder joint is analyzed to correct the hand-eye calibration result. Experimental results show that the average precision of the hand-eye calibration of the light-seam tracking sensor based on the calibration results of the general hand-eye system is 0.53mm, which can meet the requirements of engineering welding.

Keywords: hand-eye system; welding seam tracking; line structured light; hand-eye calibration

0 引 言

工业机器人向着高效、智能、高可靠性的方向迅速发展,应用越来越广泛。为了提高机器人对周围环境的感

知能力及智能化程度,机器视觉技术应运而生。经过数十年的发展,机器视觉引导和定位技术已经成为工业机器人获得环境信息的主要手段,提高了工业机器人在搬运和焊接的灵活性。

工业焊接对自动化水平的要求在不断增加,焊接自

动化、机器人化、柔性化、智能化的发展已经成为必然趋势^[1]。线激光结构光扫描测量,是一种基于激光三角法^[2]的三维检测技术,十分适宜应用在焊接机器人对于焊缝的检测跟踪中。线激光结构光焊缝跟踪系统标定的精度,决定了线激光结构光对于焊缝检测的精度。线激光结构光系统的标定主要包含4个算法:相机内部参数标定算法、光条中心提取算法、线结构光平面标定算法以及相机外部参数标定算法。相机内部参数标定算法一般使用张氏标定法,能够获得较好的效果^[3]。北京航空航天大学魏振忠等人^[4],针对线激光图像光条中心的提取做了大量研究,提升了光条中心提取的精度,并研究了线结构光传感器的标定方法;中科院自动化研究所 Yan Z 等人^[5]完善了整个焊缝跟踪系统的设计,提出了基于激光结构光的焊缝跟踪系统,阐述了该系统的工作原理,特别是图像处理算法,并在钢管焊接实验中证明了该系统的高效性以及对于多种噪声的鲁棒性;中科院自动化研究所邹媛媛等人^[6]还对结构光焊缝跟踪进行误差分析,建立不同结构下视觉传感器的数学模型,提出优化的实际方法。针对相机外部参数标定,较多研究者使用经典的手眼标定方法,如 Tsai 两步法^[7]、Navy 手眼标定算法^[8]等。哈尔滨工业大学段子强等人^[9]对线激光结构光焊缝跟踪传感器进行了摄像机标定和光平面标定。在实际工程设计中,用于焊缝跟踪的线激光结构光传感器,不免需要在焊接过程中对焊接弧光的滤除、由于焊接时的高温对滤光片和相机进行保护等因素,在相机镜头前端,加装滤光片、保护片是十分必要的。但当线激光结构光焊缝跟踪传感器安装为一体化时,相机无法提供足够清晰、明亮的标定图像信息,用于外参标定,只能看到线激光的图像。而若在进行相机外参标定结束之后,再加装滤光片、保护片的话,则有可能因为机械的挤压、碰动,或由于加装了滤光片和保护片,改变了光线进入相机镜头的光路等原因,影响不安装时进行的手眼标定参数。因此,经典的相机外参标定方法,并不能直接应用于线激光结构光焊缝跟踪传感器的标定。南昌大学 Liu S. Y. 等人^[10]使用 Levenberg-Marquardt 算法,求解输入向量为图片中的焊点坐标,输出向量为焊点的世界坐标的非线性方程组,对基于线激光结构光传感器的焊缝跟踪系统进行了手眼标定。

机械臂的制造成本较高,而适用于搬运和焊接的传感器成本相对较低,很多时候手眼系统和焊缝跟踪系统,其基于机械臂及相机的部分可以通用。本文从工程的角度出发,设计了一套机构,可以实现原手眼系统经过简单改造并通过实验修正标定参数,即可用作焊缝跟踪系统。在焊缝跟踪系统中使用对原手眼系统的标定结果,对该条件下的系统误差进行误差分析,通过实验数据计算修正原标定结果,得到重新组装后的线激光结构光焊缝跟

踪系统的手眼标定结果。实验结果证明,使用该方法得到的基于手眼系统标定的线激光结构光焊缝跟踪系统的手眼标定结果,满足机器人焊接要求。

1 机构设计

图1(a)所示为未整体装配前的机构部件示意图,整套机构包含连接部件、相机、保护外壳、一字激光器、滤光片、保护片等。连接部件可以将相机的支架固定在机械臂法兰盘上,使得无论机械臂法兰盘上架载吸盘、抓手或焊枪,都不会影响视觉部件的安装。相机与机械臂法兰盘轴线间角度可调,方便选用最合适的角度。连接部件和相机组成了一般手眼系统。考虑到焊接的光谱范围^[11],一字激光器选取650 nm 波长的一字激光器,滤光片选取可以通过650 nm 附近波长光线的窄带滤光片。



(a) 装配前线结构光传感器部件示意图
(a) Schematic diagram of the line structured light sensor before installation



(b) 装配后线结构光传感器示意图
(b) Schematic diagram of the line structured light sensor after installation

图1 机构示意图

Fig. 1 Structural scheme of mechanism

将图1(a)中的部件组装起来,如图1(b)所示,为装配完成后的线激光结构光传感器示意图。考虑到相机视场大小与工作距离的关系,令激光器的光平面与相机的成像轴成 15° 角。在已知手眼系统标定参数的条件下,可以通

过简单的实验数据采集,修正标定参数,替代对线激光结构光焊缝跟踪传感器的单独标定,用于进行焊缝跟踪。

2 手眼标定

2.1 一般手眼系统标定

通过张氏标定法,求得相机的内部参数为 u_0 、 v_0 、 α 、 β 。其中 u_0 、 v_0 分别表示相机光轴中心 Z 轴方向与像平面交点在像素坐标系中的坐标; α 、 β 分别表示相机坐标系到像平面的距离,与像素坐标系 u 轴和 v 轴单位坐标的实际长度之间的比值。

图2所示为手眼标定过程中各坐标系关系示意图。设矩阵 P_C 为标定时机械臂工具坐标系到世界坐标系的转换矩阵;矩阵 M_C 为待求的相机坐标系到工具坐标系的转换矩阵;矩阵 C_C 为标定板坐标系到世界坐标系的转换矩阵;矩阵 L_C 为相机坐标系到标定板坐标系的转换矩阵。矩阵 M_C 为标定的目标。

$$P_C \cdot M_C = C_C \cdot L_C \quad (1)$$

由式(1)可得:

$$M_C = (P_C)^{-1} \cdot C_C \cdot L_C \quad (2)$$

$$P_C = T \cdot R_{ZT} \cdot R_{YT} \cdot R_{XT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_T \\ 0 & 1 & 0 & y_T \\ 0 & 0 & 1 & z_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(rz_T) & -\sin(rz_T) & 0 & 0 \\ \sin(rz_T) & \cos(rz_T) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(ry_T) & 0 & \sin(ry_T) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(ry_T) & 0 & \cos(ry_T) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(rx_T) & -\sin(rx_T) & 0 \\ 0 & \sin(rx_T) & \cos(rx_T) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

求取矩阵 C_C 时,将标定板水平放置,令标定板的三轴分别与世界坐标系的三轴平行。使机械臂的工具点尖端移至标定板原点,读取标定板原点的世界坐标为 $(x_{Cal}, y_{Cal}, z_{Cal}, rx_{Cal}, ry_{Cal}, rz_{Cal})$ 。同样通过机器人位姿转换公式计算得到矩阵 C_C 。可以认为 C_C 矩阵的求解具有足够的精度。

矩阵 L_C 使用 OpenCV 的标定函数^[13]处理标定图像求解,得到矩阵 L_C 旋转向量 $(x_{RC}, y_{RC}, z_{RC})^T$ 和平移向量 $(x_{TC}, y_{TC}, z_{TC})^T$ 。旋转向量表示相机坐标系按右手螺旋定则,以相机坐标系 O 点到空间点 (x_{RC}, y_{RC}, z_{RC}) 的连线为旋转轴,转动角度为:

$$\theta = \sqrt{x_{RC}^2 + y_{RC}^2 + z_{RC}^2} \quad (4)$$

转动 θ 弧度后,相机坐标系的 x 轴、 y 轴、 z 轴可分别与标定板坐标系的 x 轴、 y 轴、 z 轴平行。平移向量表示在相机坐标系按旋转向量旋转过后,分别在 x 轴、 y 轴、 z 轴向正方向平移 x_{TC} 、 y_{TC} 、 z_{TC} 后,可使其与标定板坐标系

矩阵 M_C 的求解,需先分别得到矩阵 P_C 、 C_C 、 L_C 。移动机械臂,让相机可以拍摄一张清晰的标定板照片,读取此时机械臂工具点的世界坐标为 $(x_T, y_T, z_T, rx_T, ry_T, rz_T)$ 。矩阵 P_C 通过机器人位姿转换公式^[12]计算得到,具有较高的精度。

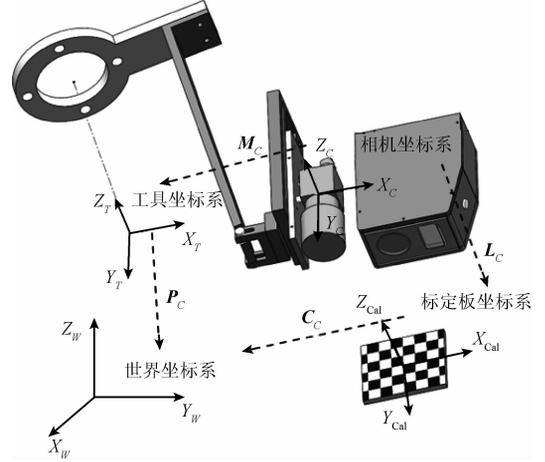


图2 坐标系关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the coordinate systems

重合。

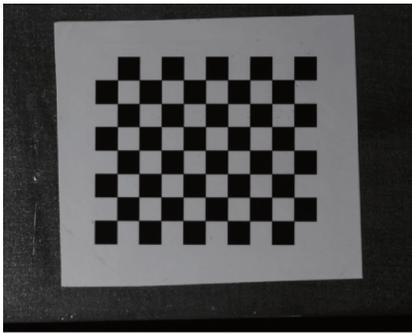
通过罗德里格斯变换将旋转向量转化为旋转矩阵,并与由平移向量得到的平移矩阵相乘计算得到矩阵 L_C 。

由以上得到的矩阵 P_C 、 C_C 、 L_C 即可求得所需标定的矩阵 M_C 。

2.2 手眼系统标定分析

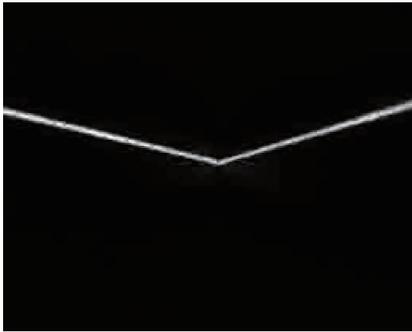
图3(a)所示为不加滤光片时相机拍摄得到的用于手眼标定的标定板图像。在系统组装为线激光结构光传感器时,由于在相机镜头前加装了窄带滤光片,大大削弱了能够入射到相机内的光线。当线激光投射在角接焊缝上,相机拍摄图像如图3(b)所示,可见,除了线激光的形状可以被清晰地看见,

其他的图像信息已经很难被采集。所以,以上用于手眼系统标定的方法,不能直接应用于该焊缝跟踪系统的标定。



(a) 加装滤光片前拍摄图像

(a) A picture taken before installation of the light filter



(b) 加装滤光片后拍摄图像

(b) A picture taken after installation of the light filter

图3 相机拍摄图像

Fig.3 Images taken by the camera

在原手眼系统的基础上,加装机构构成焊缝跟踪系统后,给原手眼标定数据带来的影响,主要来自以下两部分:1)加装的滤光片、保护片等,对原先进入相机的光路产生的影响;2)在加装滤光片、保护外壳等部件时,由于碰动等原因,改变了相机到法兰盘之间连接机构的位置。

假设焊缝跟踪系统手眼标定时,存在一块与手眼系统标定时使用的完全相同的标定板,能够被加装了滤光片的相机拍摄到,并全部沿用手眼系统标定时采集的数据。详细分析将手眼系统改装为焊缝跟踪系统后,对原手眼系统标定中计算矩阵 M_c 的式(2)中的3个未知矩阵的求解,造成了哪些影响。

1) 矩阵 P_c 的求解

如果设置将机械臂工具点,仍然位于手眼系统标定时拍摄图像的工具点位置。即使加装滤光片、保护片等装置时,改变了相机到法兰盘之间连接机构的位置,也不会影响到法兰盘与工具点之间的相对位置,所以矩阵 P_c 的求解不会受到任何的影响。

2) 矩阵 C_c 的求解

由于求解矩阵 C_c 的过程,仅与标定板和机械臂工具点的位置坐标有关,与相机和相机到法兰盘之间连接机构的位置无关,所以矩阵 C_c 的求解不会受到任何的影响。

3) 矩阵 L_c 的求解

由于加装的滤光片、保护片等,对原先进入相机的光路产生的影响,并且加装滤光片、保护装置外壳,有可能改变相机到法兰盘之间连接机构的位置,所以改变了相机到标定板之间的相对位置关系,即改变了矩阵 L_c 的平移向量和旋转向量。矩阵 L_c 的平移向量的改变,表现在使用原始手眼标定数据计算焊点的世界坐标时,总会产生与焊点实际坐标的偏差。矩阵 L_c 的旋转向量的改变,表现在使相机多次位于不同位置拍摄照片计算同一个焊点的世界坐标时,结果会在焊点实际坐标的某个方向上发生离散。

综合以上的分析,焊缝跟踪系统的手眼标定,可以在手眼系统的手眼标定基础上,沿用其求解矩阵 P_c 和矩阵 C_c 的部分,再通过实验对矩阵 L_c 的求解做适当修正,理论上即可得到较为满意的结果。

2.3 线结构光传感器手眼标定

在先前的标定的过程中,已由张氏标定法得到相机内部参数 u_0, v_0, α, β 。对组装之后的线激光结构光焊缝跟踪传感器,采集得到V形的线激光图像,使用最小二乘拟合的方法,提取中心线,求取两条直线交点坐标为焊点坐标^[14]。由于相机与激光器的相对位置固定,利用基于已知共线三点的线结构光平面标定原理^[15],可标定得到线激光面在相机坐标系中的平面方程为:

$$aX_c + bY_c + cZ_c + d = 0 \quad (5)$$

式中: a, b, c, d 为平面方程系数。

设计实验,使得线激光每次都穿过同一个焊点,并令机械臂工具点不存在3个轴方向上的旋转,每次在 z 方向上增加固定的值 Δz 采集 n 次线激光图像。读取 n 次拍摄时的工具点坐标为:

$$\begin{cases} (x_1, y_1, z + \Delta z, \pi, 0, 0) \\ (x_2, y_2, z + 2\Delta z, \pi, 0, 0) \\ \vdots \\ (x_n, y_n, z + n\Delta z, \pi, 0, 0) \end{cases} \quad (6)$$

分别对应 n 次得到的焊点在像素坐标系中坐标为 (u_n, v_n) , 采集固定位置的焊点实际世界坐标为 (X_R, Y_R, Z_R) 。

由相机内部参数和光平面方程,结合焊点在像素坐标系中坐标为 (u_n, v_n) 。

$$\begin{cases} X_{Cn} = Z_{Cn} \frac{u_n - u_0}{\alpha} \\ Y_{Cn} = Z_{Cn} \frac{v_n - v_0}{\beta} \\ Z_{Cn} = - \frac{d}{a \frac{u_n - u_0}{\alpha} + b \frac{v_n - v_0}{\beta} + c} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可求得V形线激光图像中的拐点在相机坐

标系中的坐标向量 $(X_{C_n}, Y_{C_n}, Z_{C_n})^T$ 。将其扩充为齐次向量 $(X_{C_n}, Y_{C_n}, Z_{C_n}, 1)^T$ 。

相机坐标系坐标到世界坐标系坐标的转换公式为:

$$\begin{pmatrix} X_{W_n} \\ Y_{W_n} \\ Z_{W_n} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P}_n \cdot \mathbf{M}_C \cdot \begin{pmatrix} X_{C_n} \\ Y_{C_n} \\ Z_{C_n} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

将式(2)代入式(8)中得:

$$\begin{pmatrix} X_{W_n} \\ Y_{W_n} \\ Z_{W_n} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P}_n \cdot (\mathbf{P}_C)^{-1} \cdot \mathbf{C}_C \cdot \mathbf{L}_C \cdot \begin{pmatrix} X_{C_n} \\ Y_{C_n} \\ Z_{C_n} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

利用之前的手眼标定计算过程中的矩阵 \mathbf{P}_C 、 \mathbf{C}_C 、 \mathbf{L}_C ，计算得到的焊点世界坐标为:

$$\begin{cases} (X_{W_1}, Y_{W_1}, Z_{W_1}) \\ (X_{W_2}, Y_{W_2}, Z_{W_2}) \\ \vdots \\ (X_{W_n}, Y_{W_n}, Z_{W_n}) \end{cases} \quad (10)$$

统计计算得到的焊点世界坐标平均值为:

$$\begin{cases} \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_1^n X_{W_n} \\ \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_1^n Y_{W_n} \\ \bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_1^n Z_{W_n} \end{cases} \quad (11)$$

实际上,计算得到的焊点坐标,都由机械臂工具点在式(6)表达的世界坐标位置处,分别拍摄实际坐标为 (X_R, Y_R, Z_R) 的焊点图像计算得到,令 \bar{X} 、 \bar{Y} 、 \bar{Z} 与 (X_R, Y_R, Z_R) 的平均值之差为:

$$\begin{cases} dX = \bar{X} - X_R \\ dY = \bar{Y} - Y_R \\ dZ = \bar{Z} - Z_R \end{cases} \quad (12)$$

定义总误差为:

$$\Delta T = \sqrt{dX^2 + dY^2 + dZ^2} \quad (13)$$

式(13)表达了不同位置拍摄图像计算得到的焊点坐标与焊点实际坐标的总体误差,总体来源于矩阵 \mathbf{L}_C 中的平移向量 $(x_{TC}, y_{TC}, z_{TC})^T$ 部分。

而 X_1, X_2, \dots, X_n 与 \bar{X} ; Y_1, Y_2, \dots, Y_n 与 \bar{Y} ; Z_1, Z_2, \dots, Z_n 与 \bar{Z} 的差异波动以及方向,可建立一个表达其偏移斜率的模型:

$$\begin{cases} K_X = \frac{|\bar{X} - X_R|}{\bar{X} - X_R} \sum_1^n (X_n - \bar{X}) \\ K_Y = \frac{|\bar{Y} - Y_R|}{\bar{Y} - Y_R} \sum_1^n (Y_n - \bar{Y}) \\ K_Z = \frac{|\bar{Z} - Z_R|}{\bar{Z} - Z_R} \sum_1^n (Z_n - \bar{Z}) \end{cases} \quad (14)$$

定义偏移斜率误差总量为:

$$\Delta R = \sqrt{K_X^2 + K_Y^2 + K_Z^2} \quad (15)$$

式(15)表达了不同位置拍摄图像计算得到的焊点坐标,在随着拍摄点的有序移动过程中,与焊点实际坐标误差的波动情况,总体来源于矩阵 \mathbf{L}_C 中的旋转向量 $(x_{RC}, y_{RC}, z_{RC})^T$ 部分。

先考虑优化旋转向量的求解,即要通过修正 $(x_{RC}, y_{RC}, z_{RC})^T$,使得 ΔR 最小。使用两步法使得 $(x_{RC}, y_{RC}, z_{RC})^T$ 向最优逼近。令 $(x_{RC}, y_{RC}, z_{RC})^T$ 从其相邻范围 $(x_{RC} - \Delta, y_{RC} - \Delta, z_{RC} - \Delta)^T$ 到 $(x_{RC} + \Delta, y_{RC} + \Delta, z_{RC} + \Delta)^T$,每一项分别步进 $\Delta/20$ 。共得到 8000 组 $(x_{RC}, y_{RC}, z_{RC})^T$ 与 ΔR 的关系。寻找数据中 ΔR 取到最小值时取得的 $(x_{RC}', y_{RC}', z_{RC}')^T$ 。重复以上步骤,选取 $(x_{RC}', y_{RC}', z_{RC}')^T$ 附近相对 $(x_{RC}' - \Delta/20, y_{RC}' - \Delta/20, z_{RC}' - \Delta/20)^T$ 到 $(x_{RC}' + \Delta/20, y_{RC}' + \Delta/20, z_{RC}' + \Delta/20)^T$ 和步进区间 $\Delta/100$,计算得到的 ΔR 数据取到最小值时的 $(x_{RC}'', y_{RC}'', z_{RC}'')^T$ 。

此时 ΔR 的误差来源可以认为全部来自于原先测量数据的随机误差。

将以上通过数据两步逼近求得的旋转向量 $(x_{RC}'', y_{RC}'', z_{RC}'')^T$ 代入计算 $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ 与 (X_R, Y_R, Z_R) 的平均值之差。

$$\begin{cases} dX = \bar{X} - X_R \\ dY = \bar{Y} - Y_R \\ dZ = \bar{Z} - Z_R \end{cases} \quad (16)$$

利用 $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ 与 (X_R, Y_R, Z_R) 的平均值之差 dX 、 dY 、 dZ 修正矩阵 \mathbf{L}_C 的平移向量,得到修正后的平移向量为 $(x_{TC}', y_{TC}', z_{TC}')^T$ 。将修正后旋转向量 $(x_{RC}'', y_{RC}'', z_{RC}'')^T$ 和平移向量 $(x_{TC}', y_{TC}', z_{TC}')^T$ 重新代入计算矩阵 \mathbf{L}_C ,并将矩阵 \mathbf{L}_C 与原矩阵 \mathbf{P}_C 、 \mathbf{C}_C 代入式(2)求解矩阵 \mathbf{M}_C 。

3 实验验证

为了验证本文方法的可靠性,搭建了一套机械臂及相机实验平台,对本文阐述的方法进行验证。六轴机械臂使用重复定位精度 ± 0.05 mm、型号为 PR1400 的熊猫六轴机器人,相机使用 2592×1944 像素、型号为 MER-500-14GC 的大恒水星系列相机。实验程序在 Window 7 和 QT 5.51 平台下运行,使用 OpenCV 2.4.10 作为图像处理的主要工具。

在相机和机械臂使用连接机构固定相对位置后,进行手眼系统标定时,使用角点间距为 4 mm,角点数为 7×9 的棋盘格标定板,放置于相机下方约 250 mm 位置。此位置下相机的视场范围约 50×60 mm,可以拍得标定板的清晰图像。

移动机械臂,采集在不同方向拍摄的20张标定板图片,采用张氏标定法得到相机内部参数 $u_0 = 1\,446.36$, $v_0 = 978.11$, $\alpha = 7\,505.75$, $\beta = 7\,499.5$ 。

令机械臂工具点世界坐标为 $(1\,010, 0, 0, \pi, 0, 0)$ 时,相机可以采集一张标定板的清晰图像。利用以上得到的相机内部参数和畸变向量,修正此图片,然后对此图片采集角点,结果如图4所示。

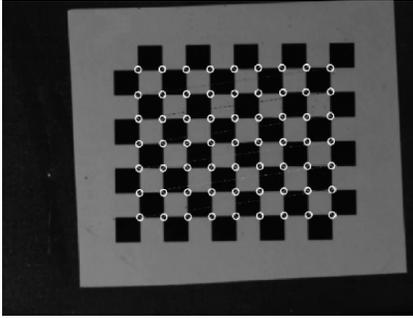


图4 标定板角点图

Fig.4 Corner map of the calibration plate

从右下角开始,设定找到的角点坐标,依次为 $(0,0)$, $(0,1)$, $(0,2)$, \dots , $(6,8)$,将此坐标输入进行计算,得到标定板到相机之间转换矩阵的旋转向量为 $(0.015\,5, -0.046\,5, -0.013\,9)^T$,平移向量为 $(-15.80, -14.43, 197.86)^T$ 。

将机械臂工具点移至标定板原点,即右下角点处,读取标定板原点的世界坐标为 $(1\,095.97, 16.39, -24.2)$ 。根据以上得到的数据,得到手眼系统标定结果矩阵为:

$$M_C = \begin{pmatrix} -0.013\,5 & -0.999\,8 & -0.015\,8 & 74.46 \\ 0.998\,8 & -0.014\,2 & 0.046\,3 & -9.98 \\ -0.046\,6 & -0.015\,2 & 0.998\,8 & -174.37 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

在加装了滤光片、保护片等装置后,利用交比不变原理,使用 $15\text{ mm} + 30\text{ mm}$ 的 $1:2$ 直线靶标,对线激光结构光传感器的激光平面位于相机坐标系中的位置进行标定,求得光平面方程为:

$$41.29 \times X_C + 0.30 \times Y_C + 3.18 \times Z_C + 1\,000 = 0 \quad (18)$$

在以上实验求得的旋转向量 $(0.015\,5, -0.046\,5, -0.013\,9)^T$ 附近,从 $(-0.4, -0.4, -0.4)^T$ 每一项分别步进 0.02 ,到 $(0.4, 0.4, 0.4)^T$,从数据中发现 ΔR 取到最小值时 $\Delta R = 0.72$, $(x_{RC}', y_{RC}', z_{RC}')^T$ 为 $(-0.02, 0.02, 0.02)^T$ 。再在 $(-0.02, 0.02, 0.02)^T$ 附近范围,令旋转向量 $(x_{RC}', y_{RC}', z_{RC}')^T$ 从 $(-0.04, 0, 0)^T$ 每一项分别步进 0.005 到 $(0, 0.04, 0.04)^T$ 。计算得到的 ΔR

数据取到最小值时 $\Delta R = 0.69$, $(x_{RC}'', y_{RC}'', z_{RC}'')^T$ 为 $(-0.015, 0.02, 0.015)^T$ 。将得到的旋转向量代入计算,得到:

$$\begin{cases} dX = \bar{X} - X_R = 0.49 \\ dY = \bar{Y} - Y_R = -0.52 \\ dZ = \bar{Z} - Z_R = -0.25 \end{cases} \quad (19)$$

利用此偏差修正平移向量,得到平移向量 $(x_{TC}', y_{TC}', z_{TC}')^T = (-14.88, -15.12, 198.11)^T$ 。

将修正后的矩阵 L_C 的旋转向量和平移向量带入原先标定计算过程,得到修正后的矩阵:

$$M_C = \begin{pmatrix} 0.015\,1 & -0.999\,8 & 0.014\,8 & 68.134\,1 \\ 0.999\,7 & 0.014\,8 & -0.020\,1 & 2.694\,8 \\ 0.019\,9 & 0.015\,1 & 0.999\,7 & -173.319\,0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

随机采集不同位置、不同角度的6组实验数据,进行焊缝跟踪实验。拍摄激光条纹的图像并对图像进行处理,计算得到焊缝与一字激光交点的世界坐标,控制机械臂工具点移动到该世界坐标。图5所示为单个焊点跟踪实验的过程,图5(a)所示为焊点跟踪的初始状态,在一字激光与焊缝的交点处做一个白色标记,图5(b)和(c)所示为跟踪的中间过程,图5(d)所示为焊点跟踪的最终状态。由图5可见,焊枪工具点准确到达了原先的标记位置。

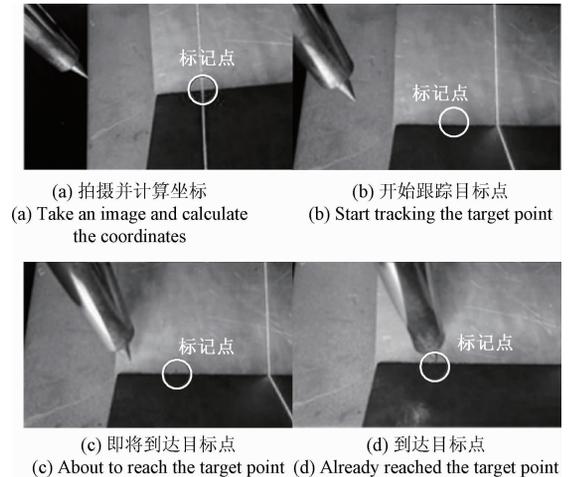


图5 焊点跟踪过程

Fig.5 Solder joint tracking process

分别将使用实验修正前与修正后的标定参数计算得到的矩阵 L_C 代入式(9)计算得到焊点世界坐标,与实际焊点坐标的直线误差如图6所示。使用实验修正后的标定参数计算焊点的世界坐标,提升了对于焊点跟踪的精度,与实际世界坐标的平均直线误差为 0.53 mm ,精度满足焊缝跟踪的要求。

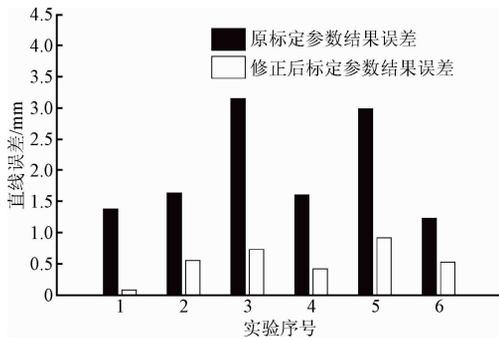


图6 焊点坐标直线误差

Fig.6 Linear error of solder joint coordinates

4 结 论

本文提出了一种在手眼系统机构基础上,经过简单的机械改造,以及通过实验对标定参数进行修正后,即可使其成为线激光结构光焊缝跟踪系统的实现方法。提出的机构设计和已有的机构设计相比,具有以下优点:1)可以实现机械臂和相机功能的复用,降低了成本,减少了系统整体重新装配的工作量;2)可以在一般手眼系统的标定结果基础上,对参数进行实验修正,简化了线激光结构光焊缝跟踪系统的标定复杂程度。

参考文献

- [1] 陈善本,吕娜.焊接智能化与智能化焊接机器人技术研究进展[J].电焊机,2013,43(5):28-36.
CHEN SH B, LV N. Research evolution on intelligentized robotic welding technologies[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(5):28-36.
- [2] 王晓嘉,高隼,王磊.激光三角法综述[J].仪器仪表学报,2004,25(增刊3):601-604.
WANG X J, GAO J, WANG L. Survey on the laser triangulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(Suppl 3):601-604.
- [3] ZHANG ZH Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transaction of Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- [4] 魏振忠,张广军.结构光直光条中心线的鲁棒性自动提取方法[J].仪器仪表学报,2004,25(2):244-247.
WEI ZH ZH, ZHANG G J. A robust automatic method for extracting the centric line of straight structured-light stripe [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(2):244-247.
- [5] YAN Z, XU D, LI Y, et al. A vision-based seam tracking system for submerged arc welding[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 349-357.
- [6] 邹媛媛,赵明扬,张雷,等.结构光视觉传感器误差分析与结构分析[J].仪器仪表学报,2008,29(12):2605-2610.
ZOU Y Y, ZHAO M Y, ZHANG L, et al. Error analysis and structural analysis of structured-light visual sensor for seam tracking [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12):2605-2610.
- [7] TSAI, ROGER Y. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989,5(3):345-358.
- [8] PARK F C, MARTIN B J. Robot sensor calibration: solving $AX = XB$ on the Euclidean group [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 10(5):717-721.
- [9] 殷子强,张广军,高洪明,等.焊接机器人再制造中结构光传感器的标定[J].焊接学报,2009,30(12):57-60.
YIN Z Q, ZHANG G J, GAO H M, et al. Calibration approach for structured-light sensor in remanufacture based on welding robot [J]. Transactions of the China welding institution, 2009, 30(12):57-60.
- [10] LIU S Y, WANG G R, ZHANG H, et al. Design of robot welding seam tracking system with structured light vision[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(4):436-442.
- [11] 柳刚,李俊岳,李恒.焊接电弧光谱的分布特征[J].机械工程学报,2000,36(5):58-61.
LIU G, LI J Y, L H. Spectral distribution characteristics of welding arc [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2000, 36(5):58-61.
- [12] 韩建海.工业机器人[M].武汉:华中科技大学出版社,2015:52-55.
HAN J H. Gongye Jiqiren [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2015: 52-55.
- [13] 赖小波,朱世强,曹新星.基于OpenCV的焊缝跟踪系统中摄像机标定方法[J].焊接学报,2010,31(7):75-78.
LAI X B, ZHU SH Q, CAO X X. OpenCV based camera calibration methods for seam tracking systems [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(7):75-78.
- [14] 周富强,王飞,张广军.结构光直线光条图像特征的三步法提取[J].机械工程学报,2008,44(11):215-219.

ZHOU F Q, WANG F, ZHANG G J. Three-step extraction method for line-stripe in structured light vision[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2008, 44(11):215-219.

[15] 刘艳. 机器人结构光视觉系统标定研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.

LIU Y. Research on robotic structured light vision system calibration[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

作者简介



陈天元, 2015 年于南京信息工程大学获得学士学位, 现为东南大学在读硕士研究生, 主要研究方向为焊缝跟踪系统设计。

E-mail: otischan@163.com

Chen Tianyuan received his B. Sc. degree from Nanjing University of Information Science

and Technology in 2015. Now he is M.Sc. candidate in Southeast University. His main research field is weld tracking system design.



宋光明 (通讯作者), 2004 年于中国科学技术大学获得控制科学与工程博士学位, 现为东南大学仪器科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向包括无线传感器网络以及分布式测量和控制。

E-mail: mikesong@seu.edu.cn

Song Guangming (Corresponding author) received his Ph. D. in control science and engineering from the University of Science and Technology of China in 2004. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in school of instrument science and engineering, Southeast University. His main research interests include wireless sensor networks and distributed measurement and control.