

基于单目立体视觉的焊缝粗定位方法

陆苗,王化明,邵凤阳,朱雄伟,易文韬
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对传统焊缝粗定位方法存在过程繁琐、适应性差等问题,提出一种基于单相机的立体视觉测量技术来实现焊缝粗定位。沿着直线或圆弧焊缝布置发光条削弱周围环境因素影响,控制单目相机以两个不同位姿采集图像,经灰度质心法提取发光条图像中心线,基于立体视觉模型重建焊缝特征点和直线或圆弧方程,获取焊缝在机器人基坐标系下的粗定位信息。实验表明:焊缝点坐标平均误差约为 1.27 mm,能够在保证精确度的情况下实现对不同场景下的焊缝粗定位。

关键词:单目立体视觉;标定;空间点线重建;粗定位

中国分类号:TG409 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0207-04

Coarse Positioning Method of Weld Seam Based on Monocular Stereo Vision

LU Miao, WANG Huaming, TAI Fengyang, ZHU Xiongwei, YI Wentao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: As to the problems of traditional welding seam coarse positioning methods, such as cumbersome process, poor adaptability etc., a method based on a monocular camera binocular vision measurement technology to realize weld coarse positioning is proposed. Light strips are arranged along the straight or arc welds to weaken the influence of surrounding environmental factors. The monocular camera is controlled to collect images with different poses. Upon the center line of the light strip images being extracted by the gray centroid algorithm, the feature points and straight or arc equations of the weld are reconstructed based on the stereo vision model to obtain the rough positioning information of the weld in the base coordinate of robot. The experiments show that the rough coordinate error of weld points is about 1.27 mm, which can realize the rough positioning of the weld under different scenes with guaranteed accuracy.

Keywords: monocular stereo vision; calibration; spatial reconstruction of point and line; coarse positioning

0 引言

基于视觉的焊缝引导和跟踪技术是未来智能化焊接技术的主要发展方向,而焊缝粗定位是实现焊缝精准引导和跟踪的前提^[1-2]。目前基于视觉的焊缝粗定位方法主要包括常规立体视觉法、在线模型匹配法、视觉伺服控制法、线激光传感器扫描法等。

常规立体视觉方法^[3-5]在实施过程中需多次调整相机位置,且存在一定的盲目性,需要较多的先验性工作。在线模型匹配法^[6]需预先知道焊缝形式,对焊件周边环境要求较高且智能获取焊缝的二维信息。视觉伺服控制法^[7]需连续人工干预,根据图像处理结果调整机器人位姿逼近焊缝,操作较为繁琐。线激光传感器扫描法^[8]分为人工示教扫描、从三维模型中提取路径扫描两种,均存在操作繁琐、耗时长、扫描过程的安全性难以保证等问题。

针对以上问题,本文提出一种基于单目立体视觉的焊缝粗定位方法。通过沿焊缝布置发光条以削弱周围环境对粗定位方法的限制;通过控制机械臂带动相机精确移动,避

免常规双目立体视觉的多相机位姿标定和立体视觉标定过程。求取方法简单、高效,对环境的适应性得到提高。

1 焊缝粗定位视觉系统

焊缝粗定位的目的是在焊接实时引导和跟踪前确定某条焊缝相对机器人的位姿,焊缝的定位与坡口形式无关,因此可用数学曲线来描述焊缝模型。焊缝在机器人基坐标系下的位姿包括平移和旋转两部分,用齐次变换来表示则为

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 & o_1 & a_1 & t_1 \\ n_2 & o_2 & a_2 & t_2 \\ n_3 & o_3 & a_3 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $[n_1, n_2, n_3]^T$ 、 $[o_1, o_2, o_3]^T$ 、 $[a_1, a_2, a_3]^T$ 分别为 x 、 y 、 z 方向的旋转变换矢量; $[t_1, t_2, t_3]^T$ 为平移变换矢量,共包含6个独立参数。粗定位的目标即确定所有未知参数的值。

基于单目立体视觉的焊缝粗定位系统包括单目相机、

机器人和目标焊件,其中单目相机负责视觉图像的采集、机器人系统由机器人本体和控制箱组成,用来控制机器人带动相机运动。

系统工作示意图如图 1 所示, $\{B\}$ 为机器人基坐标系, $\{E\}$ 为机器人末端坐标系, $\{C_i\}$ 、 $\{C_j\}$ 分别为 i 、 j 位置处的相机坐标系。根据相机小孔成像原理,空间点 $P(X, Y, Z)$ 在 i 、 j 两个位置处相机的成像点分别为 $P_i(u_i, v_i)$ 、 $P_j(u_j, v_j)$, 则满足以下方程:

$$\begin{cases} z_{ci} \cdot [u_i & v_i & 1]^T = M_i \cdot [X & Y & Z & 1]^T \\ z_{cj} \cdot [u_j & v_j & 1]^T = M_j \cdot [X & Y & Z & 1]^T \end{cases} \quad (2)$$

其中 M_i 、 M_j 分别为相机在 i 、 j 位置处的投影矩阵。

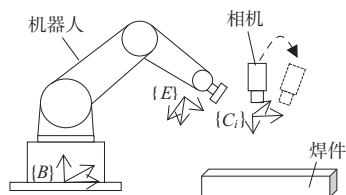


图 1 焊缝粗定位视觉系统示意图

2 粗定位视觉系统标定

2.1 单目相机标定

相机标定的目的是利用空间物体上点的三维坐标与它在图像上对应点之间的对应关系来确定相机内、外部参数。采用张正友平面标定^[9],具体标定步骤如下:

- 1) 固定单目相机位置不变;
- 2) 在相机视野范围内,任意移动和转动标定板,控制相机拍摄 15 张左右的标定板图像;
- 3) 检测和标记所有标定板图像的特征点;
- 4) 求解单目相机内外参数矩阵。

标定得到的具体相机参数如表 1 所示。

表 1 单目相机标定结果

标定参数	标定结果
内参矩阵	$\begin{bmatrix} 1892.876 & 0 & 1079.589 \\ 0 & 1887.082 & 859.496 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
畸变系数	$(-0.254, 0.308, -0.193, 0, 0)$
重投影误差	$(0.109, 0.097)$

2.2 手眼标定

手眼标定的目的是获取机器人坐标系和相机坐标系的关系,从而将视觉识别的结果转移到机器人坐标系中^[9]。焊缝粗定位视觉定位系统采用眼在手上 (eye-in-hand) 的布置形式^[10],具体标定步骤如下:

- 1) 在相机视野范围内固定合适大小的标定板;
- 2) 控制相机以不同的姿态获取 15~20 张标定板图像,并记录对应的机械臂末端位姿矩阵;

3) 根据标定板图像、机械臂末端位姿矩阵、相机标定参数,求解方程 $A_i X = X B_i$ 。其中 X 为相机坐标系到末端坐标系的转换矩阵; A_i 和 B_i 分别为相机、机械臂末端坐标系运动前、后的转换矩阵。

坐标系转换矩阵可分解为旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 两部分,可将 $A_i X = X B_i$ 方程分解整理为下式:

$$\begin{cases} R_a R_x = R_x R_a \\ R_a t_x + t_a = R_x t_b + t_x \end{cases} \quad (3)$$

其中: R_x 、 t_x 为待求参数; R_a 、 t_a 为相机坐标系两次运动前后的参数,可通过标定相机外参矩阵求出; R_b 、 t_b 为机器人末端坐标系两次运动前后的参数,可从机器人控制器读取。

求解出相机坐标系相对机器人末端坐标系的转换矩阵为

$${}^C_E T = \begin{bmatrix} 0.094 & 0.996 & 0.002 & -47.206 \\ -0.996 & 0.094 & -0.006 & 171.014 \\ -0.006 & -0.002 & 1.000 & -97.138 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3 焊缝粗定位方法

基于单相机的立体视觉测量技术来实现焊缝粗定位的流程包括:

- 1) 控制机器人以两个不同位姿采集焊缝发光条图像,并记录对应的机器人末端坐标系位姿矩阵;
- 2) 提取焊缝发光条图像中心线;
- 3) 根据立体视觉三维重建模型重建焊缝点、直线或圆弧焊缝。

3.1 发光条图像中心线提取

使用二维零均值离散高斯函数式(4)作为平滑滤波器对图像进行平滑去噪,在尽量保留图像细节特征的前提下抑制图像噪声。

$$G(x, y) = A e^{-\frac{(x-u_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-u_y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (4)$$

对高斯滤波后的发光条图像采用基于局部的自适应图像分割算法进行分割。该算法通过对图像按列扫描求出每列的最大灰度值 $g_{\max}$,并根据发光条图像的灰度直方图设定偏移量 ΔT ,对每列像素值进行如下操作:

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) & f(x, y) \geq \max(g_{\max} - \Delta T, \Delta T) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 分别为分割处理前、后图像在当前像素点 (x, y) 的灰度值。

使用灰度质心法提取发光条的亚像素级中心坐标。将灰度值作为质量处理,按行或者列遍历图像,以灰度质心点来代表该截面发光条中心点位置,用公式表示如下:

$$y = \frac{\sum_{i=0}^n g(x, y) y_i}{\sum_{i=0}^n g(x, y)} \quad (6)$$

其中: y 为图像每列中心点的纵坐标值; $g(x, y)$ 为点 (x, y) 处的灰度值。

为了进一步提高发光条中心坐标提取的精度,在按式(6)初步提取出发光条各截面中心坐标后,通过计算相邻中心点间的斜率,根据斜率突变来判定提取的中心点是否存在较大的偏离,若提取出的中心点偏离较大,则根据前后像素点的斜率对该点进行优化,调整该点位置。提取效果图如图2所示。

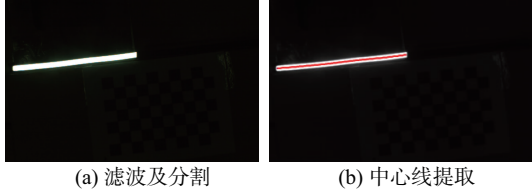


图2 焊缝中心线提取效果图

3.2 计算焊缝点空间坐标

焊缝可由多个离散点连接而成,因此在获取发光条图像起终点像素坐标的基础上,基于立体视觉空间点重建模型(图3)可计算出发光条的起点、终点空间坐标。焊缝粗定位视觉系统在控制相机以两次不同位姿获取同一焊缝发光条图像的过程中,考虑发光条自身厚度 d 对焊缝粗定位 z 向精度的影响,设定世界坐标系与相机位于位姿1时的相机坐标系重合,并尽量保持此位姿下的相机与焊缝所在平面垂直,对世界坐标系下焊缝的 z 向进行修正,则有

$$Z'_w \approx Z_w - d \quad (7)$$

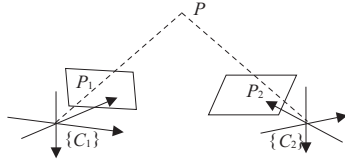


图3 空间点三维重建模型

经机器人控制器获取相机运动前后的末端位姿矩阵,结合手眼标定和相机内参矩阵,可确定相机在两次位姿下的投影矩阵,记作 M_1, M_2 ,则有:

$$Z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00}^{(1)} & m_{01}^{(1)} & m_{02}^{(1)} & m_{03}^{(1)} \\ m_{10}^{(1)} & m_{11}^{(1)} & m_{12}^{(1)} & m_{13}^{(1)} \\ m_{20}^{(1)} & m_{21}^{(1)} & m_{22}^{(1)} & m_{23}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00}^{(2)} & m_{01}^{(2)} & m_{02}^{(2)} & m_{03}^{(2)} \\ m_{10}^{(2)} & m_{11}^{(2)} & m_{12}^{(2)} & m_{13}^{(2)} \\ m_{20}^{(2)} & m_{21}^{(2)} & m_{22}^{(2)} & m_{23}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

展开并整理式(7)、式(8)可获得有关空间点 P_w 的线性方程:

$$\begin{bmatrix} u_1 m_{31}^{(1)} - m_{11}^{(1)} & u_1 m_{32}^{(1)} - m_{12}^{(1)} & u_1 m_{33}^{(1)} - m_{13}^{(1)} \\ v_1 m_{31}^{(1)} - m_{21}^{(1)} & v_1 m_{32}^{(1)} - m_{22}^{(1)} & v_1 m_{33}^{(1)} - m_{23}^{(1)} \\ u_2 m_{31}^{(2)} - m_{11}^{(2)} & u_2 m_{32}^{(2)} - m_{12}^{(2)} & u_2 m_{33}^{(2)} - m_{13}^{(2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} m_{14}^{(1)} - u_1 m_{34}^{(1)} \\ m_{24}^{(1)} - v_1 m_{34}^{(1)} \\ m_{14}^{(2)} - u_2 m_{34}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

由最小二乘法求解式(10)计算出像素点对应的世界坐标 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$,根据式(7)对 Z_w 进行修正,并利用下式求取焊缝点在机器人基坐标系下的坐标:

$$P_B = {}^E_B T \cdot {}^C_E T \cdot {}^W_C T \cdot P'_w \quad (11)$$

其中: P_B, P'_w 分别为焊缝点在机器人基坐标系、世界坐标系下的坐标; ${}^E_B T, {}^C_E T, {}^W_C T$ 分别为机器人末端坐标系相对基坐标系、相机坐标系相对末端坐标系、世界坐标系相对相机坐标系的转换矩阵。

3.3 计算直线和圆弧焊缝空间方程

确定焊缝起终点坐标信息后,基于立体视觉模型的线重建方法^[11]可获得焊缝空间直线和圆弧方程,三维重建模型如图4所示。

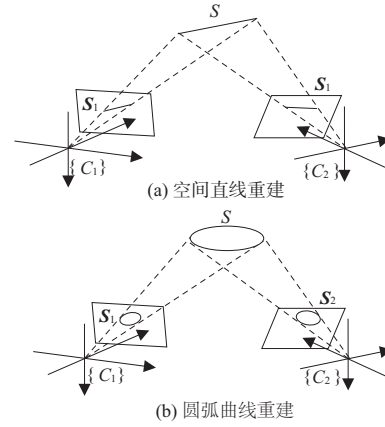


图4 空间直线和圆弧三维重建模型

空间直线和圆弧的三维重建等同于求解两空间平面和锥面的交线问题。假设 S_1, S_2 分别为空间直线或圆弧 S 在两次不同位姿相机上的投影,通过最小二乘法拟合中心点求得 S_i, S_j 的方程,可表示为:

$$\begin{cases} S_1^T u_1^T = 0 \\ S_2^T u_2^T = 0 \end{cases} \quad S \text{ 为直线} \quad (12)$$

$$\begin{cases} u_1^T S_1 u_1 = 0 \\ u_2^T S_2 u_2 = 0 \end{cases} \quad S \text{ 为圆弧}$$

其中: $u_1(u_1, v_1, 1)$ 为成像直线或圆弧 S_1, S_2 上点的齐次坐标; S_1, S_2 为成像直线或圆弧 S_1, S_2 方程系数构成的对称矩阵。

由空间点投影关系式(8)、式(9)结合式(12)可得:

$$\begin{cases} S_1^T M_2 P_w = 0 \\ S_2^T M_2 P_w = 0 \end{cases} \quad S \text{ 为直线} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_w^T M_1^T S_1 M_1 P_w = 0 \\ P_w^T M_2^T S_2 M_2 P_w = 0 \end{cases} \quad S \text{ 为圆弧}$$

通过求解式(13)即可获得直线和圆弧焊缝的空间方程。

4 试验结果分析

采用分辨率为 2 048×1 536 的相机搭配焦距 6 mm 的镜头,并将其固定在 ABB IRB120 型机器人末端。沿着目标焊缝布置发光条,控制机器人带动相机以两个不同位姿获取直线型和圆弧型发光条图像,并记录两次位姿时机器人末端位姿矩阵 T 。对拍摄的两组焊缝图像进行预处理、分割并提取发光条中心线,结果如图 5 所示。

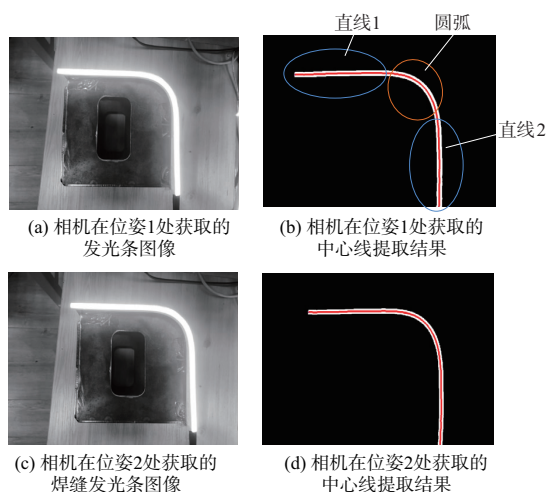


图 5 发光条中心线提取结果图

通过人工示教机器人跟踪焊缝,记录焊缝点坐标并拟合获取焊缝空间方程作为实际测量结果。将基于焊缝粗定位视觉系统计算出焊缝起点、终点坐标和空间方程与实际测量结果进行对比,如表 2、表 3 所示。

表 2 起点、终点坐标值对比 单位:mm

类型	计算坐标	测量坐标
直线 1 起点	(554.26, 267.67, 13.64)	(553.10, 266.70, 14.50)
直线 1 终点	(551.25, 167.29, 12.96)	(552.50, 164.80, 14.20)
圆弧起点	(551.25, 167.29, 12.96)	(552.50, 164.80, 14.20)
圆弧终点	(513.25, 124.68, 12.88)	(512.60, 126.30, 13.90)
直线 2 起点	(513.25, 124.68, 12.88)	(512.60, 126.30, 13.90)
直线 2 终点	(411.52, 125.26, 12.88)	(413.60, 125.50, 13.90)

表 3 焊缝曲线方程对比

类型	计算方程	测量方程
直线 1	$\begin{cases} x = 553.56 - 3.2t \\ y = 167.56 - 101.45t \\ z = 13.64 - 0.68t \end{cases}$	$\begin{cases} x = 553.25 - 0.89t \\ y = 163.79 - 102.2t \\ z = 14.5 - 0.3t \end{cases}$
圆弧	$\begin{cases} (511.51, 164.8, 12.98) \\ R = 39.82 \end{cases}$	$\begin{cases} (512.5, 167.2, 14.02) \\ R = 40.072 \end{cases}$
直线 2	$\begin{cases} x = 514.6 + 101.65t \\ y = 123.98 + 1.29t \\ z = 13.64 - 0.68t \end{cases}$	$\begin{cases} x = 513.65 + 100.1t \\ y = 125.65 + 0.9t \\ z = 14.5 - 0.3t \end{cases}$

将坐标点的计算值与测量值在 x 、 y 、 z 三个方向的平均偏差 E 和计算点与测量点间的平均距离 D 作为衡量焊

缝粗定位精度的指标,如下式:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x| + |y_i - y| + |z_i - z|}{3n} \quad (14)$$

$$D_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (15)$$

$$D = (\sum_{i=0}^n D_i) / n$$

坐标的计算值与测量值在三个方向的平均偏差约为 1.27 mm,计算坐标与测量坐标的平均距离约为 2.031 mm。实验表明,该方法能够实现焊缝跟踪前的粗定位,可以满足一定的精度要求。

5 结语

本文提出了一种基于通用双目测量模型的单目双工位三维测量方法来实现焊缝粗定位。沿着焊缝布置发光条,控制单目相机以两个不同位姿采集图像,利用灰度质心法提取发光条图像中心线,基于立体视觉模型重建焊缝特征点和焊缝空间方程,获得焊缝在机器人基坐标系的粗定位信息。

该方法通过沿焊缝布置发光条,有效降低了环境噪声对图像处理的影响,提高了粗定位方法的精度和适应性,可满足焊缝跟踪前的粗定位需求。

参考文献:

- [1] 朱永超. 焊接机器人焊缝跟踪与自动纠偏系统的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2018.
- [2] 闫文才. 视觉引导的焊接机器人焊缝跟踪控制技术的研究与开发[D]. 无锡:江南大学,2014.
- [3] YANG L, LI E, LONG T, et al. A novel 3-D path extraction method for arc welding robot based on stereo structured light sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(2): 763-773.
- [4] 王天琪, 李金钟, 李亮玉, 等. 基于单目视觉的初始焊位导引技术[J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 14-18, 161.
- [5] 杨雪君. 基于单目视觉的初始焊位导引及焊缝特征三维重建研究[D]. 上海:上海交通大学,2017.
- [6] DING Y Y, HUANG W, KOVACEVIC R. An on-line shape-matching weld seam tracking system[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 42: 103-112.
- [7] 董砚, 崔丽娜, 陈海永, 等. 基于同轴摄像机的激光焊缝初始点识别与定位[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(3): 700-702, 715.
- [8] 吴沛霖. 三维激光引导的机器人焊接中的焊缝定位算法研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [9] 刘冲. 面向视觉三维测量的机器人手眼标定技术研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2018.
- [10] WANG H X, FAN X H, LU X. Application of a hand-eye self-calibration technique in robot vision[C]//2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Guiyang, China: IEEE, 2013: 3765-3769.
- [11] 徐成刚. 机器人空间曲线焊缝识别及轨迹规划研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2017.

收稿日期:2020-10-30