

基于特定平面的单目视觉 焊缝起始点导引

倪沫楠 王天琪 李金钟

(天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

摘要 为了解决传统采用立体视觉和模板匹配方法实现焊缝起始点自动化导引过程中存在的算法复杂、运算速度慢以及导引精度不高等问题,提出了一种基于特定平面的单目视觉焊缝起始点导引方法。首先,采用“单目双位”和随机一致性算法对放置待焊工件的工作平面进行标定,将导引范围限制在该特定平面上;然后以手持点激光作为主动光源照射到该平面上,在保持摄像机坐标系姿态不变的情况下,导引摄像机至焊缝起始点,进而计算该点在机器人基坐标系下的三维坐标指导机器人运动使焊枪到达焊缝起始点。

关键词: 单目视觉 焊缝起始点 特定平面

中图分类号: TG409

0 前言

焊缝起始点的导引是机器人智能化焊接必不可少的技术之一^[1-3]。传统的应用机器人视觉进行焊接初始位置导引方法主要为立体视觉方法和模板匹配方法。立体视觉方法主要是利用双目视觉原理,获取焊缝的三维信息,对图像进行立体匹配使提取的焊缝边缘细化到单像素,并求取对应点^[4-6],但由于算法复杂以及立体匹配等环节中的立体视觉标定加大了定位误差,运算速度慢且定位结果误差大,同时实际焊接环境较为复杂,被动光图像处理过程易受工件表面灰度分布不均匀、边缘反光、工作台及夹具等工作环境影响,使得通过边缘提取求取特征点的方法难以实现;模板匹配方法为了提升匹配的成功率需要选择强反射平面曲线的工件^[7-9],增加了算法应用的局限性。

针对以上缺点,文中提出了一种基于特定平面的单目视觉焊缝起始点导引方法,首先对放置待焊工件的试验台进行平面标定:采用“单目双位”的方法采集特定平面上特征点的三维信息并通过随机一致性算法进行平面拟合,计算出特定平面在摄像机坐标系下的激光平面方程。然后将待焊工件放置于该平面上,采

用点激光为主动光源照射到该平面,在摄像机姿态不变的情况下将摄像机导引至焊缝起始点,进而计算该点三维信息指导焊枪到达焊接位置。

1 特定平面方程标定

1.1 “单目双位”基本原理

系统采用“单目双位”的方式对空间中的点进行三维测量,测量原理如图1所示,图中 C_w 为世界坐标系, C_i, C_j 为用以对相机坐标系进行控制的工具坐标系, C_{e1}, C_{e2} 为工具处于 i, j 位置时的相机坐标系,控制相机从两个位置对固定点 P 进行图像采集,根据相机小孔成像原理,点 P 在两个方位的摄像机成像平面上成的像点分别为 P_1, P_2 ,则空间中的点 P 应处于 P_i, P_j 与其相应的摄像机光轴中心 O_1, O_2 的连线上。因此,如果想

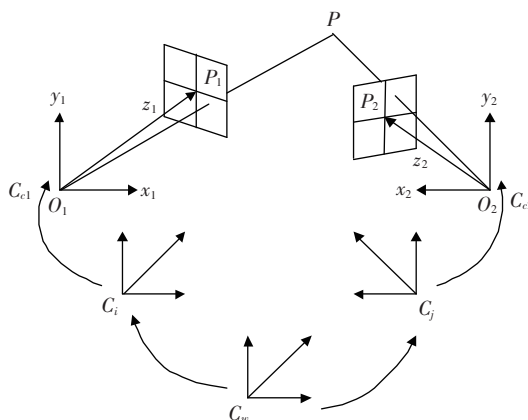


图1 “单目双位”方法的工作原理

收稿日期: 2018-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1733125);天津市自然科学基金项目(17JCZDJC38700)。

求得点 P 在世界坐标系 C_w 中的坐标, 只需求得空间直线 O_1P_1 与 O_2P_2 的交点坐标即可。而在实际情况下, 测得的两幅图像中点 P 的对应点往往存在误差, 所求的直线通常为空间异面直线的关系, 为了减小误差, 可取两异面直线共垂线中点作为 P 点。

1.2 求解特定平面方程

平面方程的求解可以通过对该平面上的点进行平面拟合获得, 如图 2 所示。相机从不同位置采集平面上的特征图像, 通过求解经过特征点与相机坐标中心的直线的交点即可求得特征点的三维坐标, 进而通过平面拟合的形式求解平面方程。求解过程中, 相机的位姿需要进行可控性操作, 一般通过机械手的运动来确认相机的位置参数, 另外可以通过在平面上建立特征点较多的复杂图形来增加标定结果的精度。

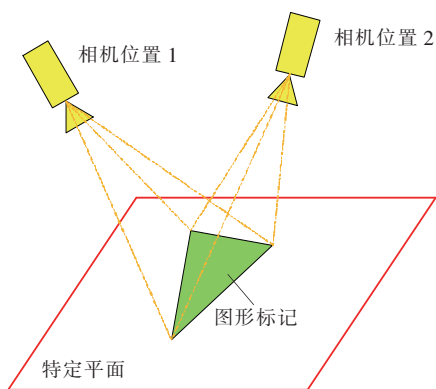


图 2 平面标定示意图

试验采用平面度较高的玻璃平板作为检测平面, 为了增加平面特征, 在平面上做工字型标记, 如图 3a 所示, 首先对图像进行二值化处理获取工字形标记的区域特征, 结果如图 3b 所示, 对二值化后的图像进行基于 Forstner 方法的角点信息检测^[10]。Forstner 算子是通过计算像素 (c, r) 为中心的窗口的灰度协方差矩阵以及每一个像素 Robert's 的梯度, 在影像中寻找尽可能小并且接近于圆的误差椭圆点为特征点。该方法主要是对兴趣值 q 与 w 的确定:

$$q = \frac{4\text{Det}(N)}{\text{tr}^2(N)} \quad (1)$$

$$w = \frac{1}{\text{tr}(Q)} = \frac{\text{Det}(N)}{\text{tr}(N)} \quad (2)$$

式中, $\text{Det}(N)$ 为协方差矩阵 N 的行列式; $\text{tr}(N)$ 为协方差矩阵 N 的迹; Q 为协方差矩阵 N 的逆矩阵; w 为该像元的权; q 是像素 (c, r) 对应的误差椭圆的圆度:

$$q = 1 - \frac{(a^2 - b^2)^2}{(a^2 + b^2)^2} \quad (3)$$

其中, a 和 b 为椭圆的长短半轴(若 a, b 中任一为 0, 则 $q=0$)。这表明该点可能是位于边缘上面, 若 $a=b$, 则 $q=1$, 表明为一个圆。将 q 和 w 与已知阈值 T_q 和 T_w 作对比, 若 q, w 大于给定阈值, 那么该点为代选点。检测结果如图 3c 所示, 图像中角点像素坐标信息见表 1。



图 3 玻璃平板图像处理

表 1 角点像素坐标 1

序号	x	y
1	78.278 3	366.898
2	128.040	241.225
3	121.600	381.404
4	140.433	332.385
5	156.053	291.762
6	171.176	253.361
7	338.219	483.06
8	359.445	412.382
9	371.729	370.534
10	394.115	300.478
11	382.345	492.131
12	436.553	316.078

分别从两个方位对平面进行图像采集, 对不同图像中平板上的工字形标记的角点信息进行采集, 求出其像素坐标; 为了保证不同图像中相同的角点进行匹配, 采用基于 Forstner 角点检测的图像匹配^[11]方法对两幅图像进行图像匹配, 匹配结果如图 4 所示。

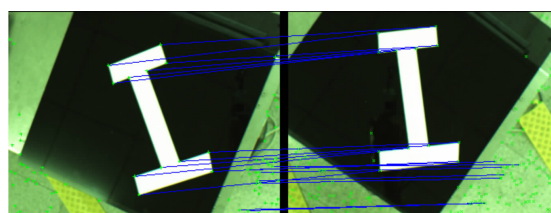


图 4 平面图像匹配

可以求出第一幅图中的角点在第二幅图中对应的像素坐标信息见表2。

表2 角点像素坐标2

序号	x	y
1	34.647 9	356.501
2	50.407 0	216.261
3	80.851 7	360.564
4	87.421 2	308.842
5	92.938 8	261.335
6	97.221 6	218.383
7	312.823	411.758
8	320.461	338.403
9	325.710	291.219
10	334.226	219.329
11	359.170	409.975
12	380.704	221.332

同时机器人处于不同位置时的位姿参数为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.025 & -0.414 & 0.910 & 1.003 \\ -0.488 & -0.800 & -0.351 & 0.846 \\ 0.872 & -0.435 & -0.222 & 1.469 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.026 9 & -0.644 & 0.765 & 1.166 \\ -0.313 & -0.732 & -0.605 & 0.604 \\ 0.949 & -0.223 & -0.221 & 1.468 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在得知特征点的图像坐标、系统标定参数以及机器人处于不同位置时的末端位姿参数后,利用上述的方法将其转换为机器人基坐标系下的坐标。

文中采用随机一致性算法进行平面拟合,过程如下:

(1)在数据集中随机选择三个点求出其所在平面方程;计算数据集中的点 (x_i, y_i, z_i) 到该平面的距离 t 。

$$t = |ax_i + by_i + cz_i + d| \quad (6)$$

(2)根据经验设定阈值 e ,若 $t < e$,则可认为该点属于平面内点,并统计出数据集中内点的个数。

(3)对所拟合的平面的内点数进行比较,选择内点数较多的点的平面方程作为平面方程。

2 基于特定平面上点的导引

平面在机器人基坐标系下的方程确定后,目标点

在平面上的运动即可通过单幅图像进行确定,通过求取通过该点与相机坐标系原点的直线在机器人基坐标系下的方程与平面方程的交点求得。已知直线方程和平面方程为

$$l = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (8)$$

平面与直线的交点坐标为:

$$\left(\frac{kx_2 - x_1}{k - 1}, \frac{ky_2 - y_1}{k - 1}, \frac{kz_2 - z_1}{k - 1}, 1 \right) \quad (9)$$

式中,

$$k = \frac{Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D}{Ax_2 + By_2 + Cz_2 + D}$$

图5为机器人在特定平面上的目标点的导引过程示意图,图中 M, N 为目标点在特定平面上不同时间的不同位置,其坐标分别为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$;从 M 点移动到 N 的坐标增量为 $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1$; $O_1(X_1, Y_1, Z_1), O_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 分别为导引过程中目标点处于 M, N 位置时的工具坐标系;坐标增量为 $\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2$;导引过程中工具坐标系与目标点始终保持固定距离 d ,由图可知:

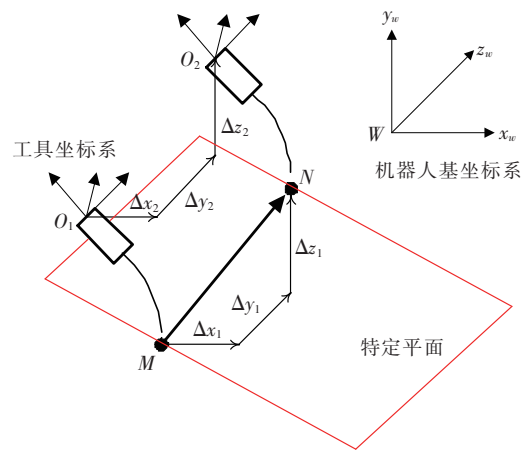


图5 特定平面目标点导引过程

$$\begin{cases} \Delta x_1 = x_2 - x_1 \\ \Delta y_1 = y_2 - y_1 \\ \Delta z_1 = z_2 - z_1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta x_2 = X_2 - X_1 \\ \Delta y_2 = Y_2 - Y_1 \\ \Delta z_2 = Z_2 - Z_1 \end{cases} \quad (11)$$

$$(X_1 - x_1)^2 + (Y_1 - y_1)^2 + (Z_1 - z_1)^2 = d^2 \quad (12)$$

$$(X_2 - x_2)^2 + (Y_2 - y_2)^2 + (Z_2 - z_2)^2 = d^2 \quad (13)$$

进一步可知:

$$\begin{aligned} &(\Delta x_2 - \Delta x_1)^2 + 2(X_1 - x_1)(\Delta x_2 - \Delta x_1) + (\Delta y_2 - \Delta y_1)^2 + 2(Y_1 - y_1)(\Delta y_2 - \Delta y_1) \\ &+ (\Delta z_2 - \Delta z_1)^2 + 2(Z_1 - z_1)(\Delta z_2 - \Delta z_1) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

在导引过程中,通常保持工具坐标系的表示姿态的四元数参数保持不变,工具坐标系的增量后即可通过调整机器人位姿进行目标点的导引跟踪。

$$\begin{cases} \Delta x_1 = \Delta x_2 \\ \Delta y_1 = \Delta y_2 \\ \Delta z_1 = \Delta z_2 \end{cases} \quad (15)$$

3 试验结果

试验以 ABB IRB1410 机器人为平台,采用像素为 656×492 的相机进行图像采集,试验系统如图 6 所示,试验过程中首先需要对相机以及机器人手眼关系进行标定^[12]。

试验过程中采用激光点作为目标点对 V 形焊缝进行导引,图 6 所示是导引过程中的三个位置的状态,经计算三个位置的激光点的三维坐标分别为 $(1.064\ 8, 0.757\ 3, 0.186\ 0)$, $(1.128\ 9, 0.782\ 9, 0.186\ 1)$ $(1.167\ 9, 0.812\ 5, 0.185\ 9)$; 两两之间的坐标增量为 $(0.060\ 1, 0.025\ 6, 0.000\ 1)$, $(0.041\ 0, 0.029\ 6, -0.000\ 2)$; 导引过程中保持机器人末端的姿态信息不变,位置信息随着目标点的变化而变化。



图 6 试验系统图

跟踪过程中三个位置所对应的机器人末端的位姿为 $(1.107\ 0, 0.777\ 9, 0.994\ 9, 0.173\ 20, -0.314\ 78, 0.932\ 55, 0.035\ 67)$, $(1.116\ 71, 0.803\ 5, 0.995\ 0,$

$0.173\ 20, -0.314\ 78, 0.932\ 55, 0.035\ 67)$, $(1.208\ 1, 0.833\ 1, 0.994\ 8, 0.173\ 20, -0.314\ 78, 0.932\ 55, 0.035\ 67)$; 可见导引过程中激光点始终位于图像中的固定位置不变。

结合激光平面方程易求得图 7c 中激光点位置在基坐标系下的三维坐标,控制机器人所示运动使焊枪到达该目标点。

文中提取图 7 中的 3 个上激光点位置计算其在机器人基坐标系下的三维坐标,与实际示教的点进行对比结果见表 3。

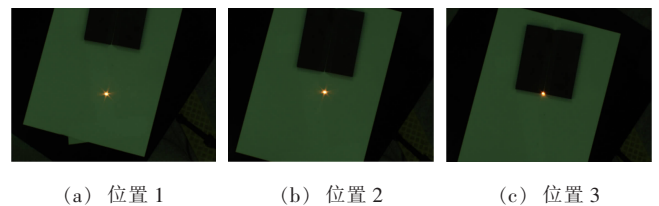


图 7 初始焊位摄像机导引阶段

表 3 定位误差

编号	x 方向误差 /mm	y 方向误差 /mm	z 方向误差 /mm
1	0.835 2	1.108 6	0.648 5
2	1.374 6	1.254 6	0.865 7
3	0.762 9	1.046 5	0.817 3

4 结论

文中通过将导引范围限制在实施焊接的工作平面内,实现了单目视觉的目标点三维信息提取。特定平面标定过程通过 Halcon 12.0 实现,在保证机器人与该平面位置不变的情况下只需进行一次标定。导引精度在 $0.5 \sim 1.6\ \text{mm}$ 范围之内,可以满足焊接需要。

参考文献

- [1] 宋天虎,刘永华,陈树君. 关于机器人焊接技术的研发与应用之探讨[J]. 焊接,2016(8):1-10.
- [2] 陈善本,林涛. 智能化焊接机器人技术[M]. 北京: 机械工业出版社,2006.

3 结论

(1) I_m 不影响熔丝峰值电流,因此可以在保证熔丝效率的前提下,调节 I_m 来降低对工件的热输入。

(2) M 弧对主路电弧有向两丝中间的拖拽作用,还产生向外的电磁力使主路电弧向外分散偏移,随着 I_m 的增加这种作用越大。

(3) 对熔滴进行受力分析得知, I_m 促进铝合金熔滴过渡,它设置在 34 ~ 38 A 时,电弧燃烧稳定,熔滴过渡平稳并不会产生飞溅。

(4) 当 I_m 设置在 39 A 以上时,会出现飞溅、电弧断弧、熔丝爆断、熔丝不连续及大量气孔出现的现象。飞溅是由于熔滴过渡尚未完成时,电流方向立刻改变,因此熔滴受到横向电磁力的作用被水平抛出。

参考文献

[1] 黄旺福,黄金刚. 铝及铝合金焊接指南[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2004.

[2] Fang C F, Meng X H, Hu Q X, et al. TANDEM and GMAW twin wire welding of Q690 steel used in hydraulic Support [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, 19(5):79-85.

[3] 杨俊. 基于双丝三电弧的堆焊工艺研究[D]. 哈尔滨:哈

尔滨工业大学硕士学位论文, 2015.

[4] 耿正,魏占静,韩雪飞,等. 高熔敷率低热输入的 Tri-arc 双丝电弧焊接方法[J]. 金属加工(热加工), 2014(22):36-37.

[5] 张顺善,吴东亭,邹增大,等. 磁场对双丝间接电弧形态的影响[J]. 焊接学报,2010,31(7):87-90.

[6] 杨春利,林三宝. 电弧焊基础[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2010.

[7] Harwig D, Dierk J E, Yapp D, et al. Arc behavior and melting rate in the GMAW process [J]. Welding Journal, 2006, 85(3):52-62.

[8] 代大山,宋永伦,张慧,等. 等离子电弧力的研究[J]. 焊接学报,2002,23(2):51-54.

[9] Li K, Wu C. Mechanism of metal transfer in DE-GMAW [J]. Material Science Technology, 2009, 25(3):415-418.

[10] 曹梅青,邹增大,曲仕尧. 双丝间接电弧氩气保护焊的溶滴过渡与电弧形态[J]. 焊接学报,2012,33(6):47-50.

作者简介: 刘丹,1981 年出生,博士研究生,讲师。主要从事焊接技术方面的科研和教学工作。

通讯作者: 常云龙,1963 年出生,教授,博士。主要从事焊接自动化方面教学与科研工作。

[上接第 15 页]

[3] Siciliano B, Sciavicco L, Villani L, et al. Robotics: modelling, planning and control[M]. Springer Publishing Company, Incorporated, Germany,2010.

[4] 李金泉. 基于视觉的弧焊机器人焊缝空间位置信息获取技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学博士学位论文,2003.

[5] 朱振友,朴泳杰,林涛,等. 基于视觉的局部环境焊缝起始位置识别方法[J]. 焊接学报,2004,25(2):95-98,133.

[6] 陈希章,陈善本,林涛. 一种基于视觉的平面焊缝初始焊位定位的简易方法[J]. 焊接学报,2006,27(3):73-76.

[7] 冯春. 基于单目视觉的目标识别与定位研究[D]. 南京:南京航空航天大学博士学位论文,2013.

[8] 陈希章,陈善本. 弧焊机器人起始焊接位置图像识别与定位[J]. 焊接学报,2009,30(4):17-20.

[9] 陈海永,方灶军,徐德,等. 基于视觉的薄钢板焊接机器人起始点识别与定位控制[J]. 机器人,2013,35(1):90-97.

[10] 王利强,郝莹. 一种基于 Forstner 算子的角点检测改进算法[C]. 福州:第十四届全国图象图形学学术会议论文集. 2008:272-276.

[11] 殷伶. 图像匹配技术的研究[D]. 西安:西安电子科技大学硕士学位论文,2010.

[12] Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration [J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1989, 5(3):345-358.

作者简介: 倪沫楠,1993 年出生,硕士研究生。主要从事机器人视觉及其控制方面的研究。