

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.014

基于激光扫描和工业机器人的 不锈钢保温杯自动焊接

翁文武

(浙江哈尔斯真空器皿股份有限公司, 浙江 永康 321300)

摘 要:由于激光焊接对保温杯的位置精度要求很高,依靠传统的工装夹具已无法满足要求,一种由笔者设计的激光扫描的视觉系统对保温杯杯口和杯底进行非接触扫描测量,对激光视觉采集的数据进行平滑处理,得到光滑的三维轨迹。焊缝轨迹平滑处理包括改进的RANSAC算法和均匀三次B样条曲线拟合相结合的方式。最后,设计模糊控制进行焊缝在线跟踪控制。实验结果表明,该方法可以获得平滑精确的保温杯杯口和杯底三维测量,明显提高了焊接质量。

关 键 词:保温杯;激光扫描;焊接机器人;三维轨迹;改进RANSAC算法;均匀三次B样条曲线拟合
中图分类号: TG456.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2895(2018)05-0073-05

Automatical Welding of Thermos Cup Based on Laser Scanning and Industrial Robot

WENG Wenwu

(Zhejiang Haers Vacuum Containers Co., Ltd., Yongkang, Zhejiang 321300, China)

Abstract: A laser scanning visual system was proposed for the reason that laser welding requires high positional accuracy of the thermos cup, while the traditional fixtures cannot meet the requirements. The non-contact measurement of the rim and the bottom was achieved by the designed system. The smoothing three-dimensional curve was obtained based on the collected laser scanning data. The seam trajectory smoothing process included the combination of the modified RANSAC and uniform B-spline curve fitting. Finally, a fuzzy control was designed to achieve the online tracking and the control of the weld seam. The experimental results show that the smooth and accurate three-dimensional measurement can be realized by the proposed method, which greatly improves the welding quality.

Keywords: thermos cup; laser scanning; welding robot; three-dimensional trajectory; modified RANSAC algorithm; uniform three degree B-spline curve fitting

目前,我国生产不锈钢真空器皿的企业主要以低档产品为主,与日本、德国等国外知名厂商相比有较大的差距。其主要因素是生产工艺与制造技术等方面比较落后,特别是高端装备方面差距比较明显。国内不锈钢真空保温器皿的主要问题是真空合格率不高,产品品质难以保证。虽然可以通过引入新型的激光焊接机器人装备来提高焊接的质量和效率^[14],但是如何把高速激光焊接与工业机器人很好地结合起来还存在诸多的问题。其中一个比较突出的问题是让机器人能自

适应焊缝的位置变化。焊接前待焊接焊缝的尺寸精度与理论值之间存在误差,导致激光器轨迹与焊缝间存在误差。为解决焊缝实际位置与理论位置的偏差,近年来有学者利用视觉检测具有非接触、精度高以及信息量丰富等优点,将其用于焊缝检测^[5-11]。但是直接把视觉检测数据用于焊接机器人,会由于数据本身的波动而造成机器人动作的抖动,最终影响焊接质量。对于不锈钢保温杯杯口和杯底的圆弧形焊缝,现有的焊缝跟踪系统大多采用传统的PID控制算法,缺少一

收稿日期:2018-06-19;修回日期:2018-08-01

基金项目:国家自然科学基金(61305024);浙江省重点研发计划(2015C01022)。

作者简介:翁文武(1974),浙江永康人,工程师,主要研究方向为激光焊接、机器人技术。E-mail:wengwenwu_haers@163.com

定的自适应性,焊缝跟踪控制方法精度还不够高。为此,笔者针对不锈钢保温杯焊缝设计了激光焊接机器人系统,并配置激光扫描系统对杯口和杯底焊缝进行精确检测;还设计了改进 RANSAC 和均匀三次 B 样条曲线拟合的算法,得到了平滑的杯口和杯底焊缝三维轨迹;并利用模糊控制对保温杯杯口和杯底焊缝进行在线跟踪。

1 系统构成

保温杯杯口和杯底激光焊接系统如图 1 所示。焊接系统主要有七部分组成:六关节机械臂、激光焊接头、激光扫描视觉系统、视觉控制单元、循环线、保温杯卡具和控制柜。六关节机械臂带着激光焊接头对保温杯杯口和杯底进行精密焊接,在焊接过程中要保证焊枪的位置和姿态处于最佳状态。激光扫描视觉系统由激光器投射系统和 CCD 相机组成,激光投射系统投射出一字激光线,与保温杯杯口和杯底相交形成激光条纹,反射光被 CCD 相机采集形成条纹图像,通过视觉检测算法可以精确计算出保温杯口和杯底的位置,供后续焊接机械臂进行位置纠偏,以保证焊接质量。视觉控制单元主要实现激光扫描视觉系统的二维扫描动作。循环线上间隔一定距离布置有保温杯卡具,实现保温杯的连续循环送料。控制柜里主要安装了机械臂控制系统、视觉扫描系统和循环线系统的电气总成。

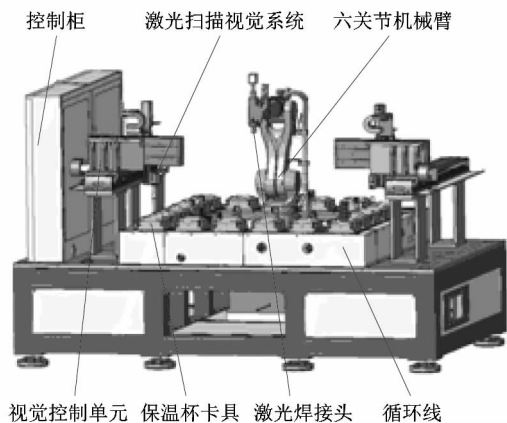


图 1 不锈钢保温杯机器人焊接系统

Figure 1 Robotic welding system for stainless thermos cup

2 保温杯杯口和杯底三维轨迹提取

由于保温杯杯口和杯底的三维焊缝轨迹是通过激光扫描动态得到的,加上反光等原因,扫描得到的三维焊缝轨迹势必会呈现锯齿形状,局部位置甚至会失真。如果直接用原始数据引导机械臂进行焊接,焊接质量无法得到保证。笔者提出一种结合改进 RANSAC 和

曲线拟合的方法得到平滑的三维焊缝轨迹,其中改进的 RANSAC 算法克服了传统 RANSAC 算法需要设置迭代上限以及无法识别多种模型的不足,在最大程度的排除局外点干扰的同时能更精确识别出局内点的模型。为了更精确地获取焊接轨迹的空间曲线,采用均匀三次 B 样条曲线拟合焊接点数据的空间曲线。算法流程如图 2 所示。

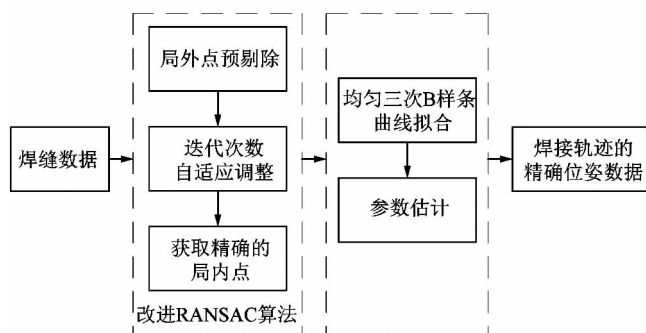


图 2 平滑的三维焊缝轨迹提取算法流程图

Figure 2 Flow chart of extraction of smooth three dimensional welding seam

2.1 基于改进 RANSAC 的焊缝奇异点检测与剔除

保温杯杯口和杯底的焊缝数据由激光扫描系统采集获取,理想情况下这些数据的空间分布应该是光滑的曲线且这些数据构成的圆直径约等于杯口和杯底直径,不满足这一条件的 3D 数据即可认为奇异点。本方案利用这一特性进行焊接数据的预筛选,图 3 为焊缝奇异点数据剔除示意图。

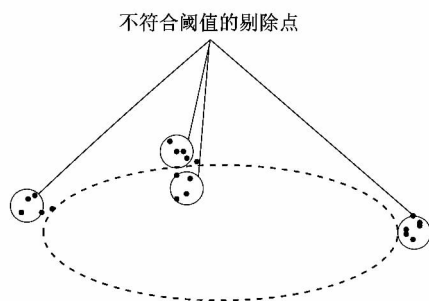


图 3 奇异点剔除示意图

Figure 3 Demonstration of singular point elimination

由 RANSAC 算法可得,迭代次数 k 由计算过程中筛选出的 n 个数据点中局内点的概率 P 以及再次计算时挑选出的点为局外点的概率 W 决定,如公式(1)所示:

$$k = \frac{\log(1 - P)}{\log(1 - (1 - W)^n)} \quad (1)$$

传统 RANSAC 算法中迭代次数的设置是难题,设

置固定的迭代上限可能导致抽样计算不充分无法排除大量的奇异点。因此,笔者提出一种自适应的迭代次数设置方法:在开始计算时将 k 值设置为一个较大的值,然后在每次迭代时根据局外点的比重重新计算 k 值自适应调整的效果。此外,该方法能够克服传统RANSAC算法计算局内点的空间分布单一性。多次进行RANSAC计算出数据点集,每次剔除的局外点作为新的计算样本重新计算,算法步骤如下:

1) 选定一组初步筛选好的点集 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 计算其中任意3点 $\{P_i, P_{i+1}, P_{i+2} | 1 \leq i \leq n-2\}$ 构成的圆弧半径值 r ,按照顺序无重复地遍历点集。

2) 将半径不在阈值范围内的对应点集剔除,得到新的点集 $\{P_{N_1}, P_{N_2}, \dots, P_{N_m}\}$ 。

3) 设置迭代次数 k 为一个较大的数值,随机抽取一个样本集合,计算该集合对应的空间圆弧参数。

4) 再次计算样本集合中点对应的圆弧半径 r ,确定是否符合阈值范围,若满足则执行下一步,否则执行上一步。

5) 遍历点集 $\{P_{N_1}, P_{N_2}, \dots, P_{N_m}\}$,判断依次从其余点集中加入数据点后拟合圆弧误差是否在设定阈值范围内,同时记录局内点数量。当局内点数量达到阈值范围内,根据公式(1)计算新的外点率与以及下次迭代次数 k 。

6) 重复3)~5)迭代过程,当新计算的空间圆弧参数对应的局内点更多时,替换上次计算得到的参数模型,同时保存局内点数量。

7) 根据上述计算参数模型剔除 $\{P_{N_1}, P_{N_2}, \dots, P_{N_m}\}$ 中的局外点,重复3)~6)计算步骤直到所有数据均计算完成。

2.2 保温杯杯口和杯底三维焊缝轨迹的曲线拟合

上述计算过程得到焊缝数据虽然空间结构分布紧凑,但是这些数据组成的空间曲线不够光滑。为了得到更光滑的焊缝轨迹数据,在此基础上,提出采用B样条插值的方法得到光滑的三维焊缝轨迹数据。由于三次B样条曲线是切矢和曲率连续的,因此文中选择三次均匀B样条曲线对保温杯杯口和杯底数据进行拟合,可以满足激光焊接工艺对焊缝曲线描述的精度要求。

3 基于模糊自调节的焊缝跟踪控制

由于激光焊接具有速度快、精度要求高、非线性强等特点,传统控制方法无法满足自动焊接要求,需设计融入焊接经验的智能控制方法。为此,笔者采用模糊控制方法实现激光自动焊接,原理框图如图4所示,主

要由焊接机器人、激光焊接头、视觉检测和模糊控制器等组成。图中公式 $(1-z^{-1})/T$ 中的 z^{-1} 表示取上一采样时刻的误差值, T 表示采样时间。该公式连同前面的误差信号表示对误差信号求导数。

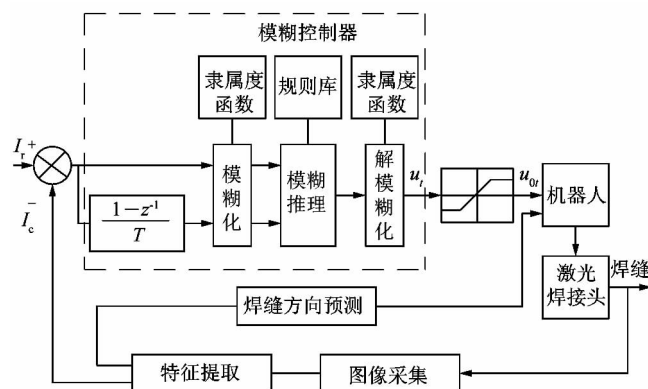


图4 保温杯激光焊接焊缝跟踪控制系统框图

Figure 4 Block chart of laser welding seam tracking control for stainless thermos cup

采用基于图像的视觉伺服方法实现激光焊接的焊缝跟踪功能。首先定义闭环控制系统的参考信号和反馈信号:本文的参考信号指手动调整焊枪使其对准焊缝起始点所采集的激光特征,记为 I_r ;反馈信号是在焊接过程中实时得到的激光特征,记为 I_c 。两者的偏差和偏差变化信号输入模糊控制器,公式为

$$e_t = I_r - I_c; \quad (2)$$

$$de_t = (e_t - e_{t-1})/T. \quad (3)$$

式中: e_t 和 de_t 是 t 时刻控制系统的误差和误差变化数据。

采用经典的三角函数法对误差和误差变化数据进行模糊化操作,得到模糊语言描述的模糊集。本文采用7个模糊集描述输入信号:正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(ZE)、负小(NS)、负中(NM)、负大(NB)。

通过咨询焊接专家或者车间焊接工人,得到有效的焊接经验,可以建立模糊控制规则库,它可以很好地体现控制器的智能性,以解决激光焊接的控制难点。模糊控制规则采用如下的IF-THEN形式:

IF e is S_e and de is S_{e1} , THEN u is S_u 。

其中: S_e, S_{e1} 和 S_u 是模糊控制规则中的模糊集。

本文所建立的模糊控制规则库如表1所示。

采用经典的最大最小方法实现控制器的推理过程。为了得到清晰物理意义的可控数据信号,对模糊控制器的输出进行解模糊化,文中采用重心法实现模糊控制器的解模糊化过程。

表 1 模糊规则库
Table 1 Fuzzy rule base

de	e						
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	PM	NM	NS	NS
PM	PB	PM	PS	NM	PM	NS	NS
PS	PB	PM	NM	NM	ZE	NS	NS
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	MS	NM
NS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
NM	PS	PS	NS	NS	NM	NM	NB
NB	NZ	NS	NS	NM	NM	NB	NB

激光焊接过程中存在很多的干扰,如烟雾、粉尘和闪光灯等,对特征提取带来不利影响甚至会造成特征提取的失败。若把错误的图像特征直接用于机器人的控制,会造成机器人末端位置的抖动,从而造成激光焊接头偏离焊缝,造成焊接质量下降。因此,需要对控制器的输出量进行判断:

$$u_{ot} = \begin{cases} u_t, & \text{if } |u_t| < u_{l1} \text{ and } |\Delta u| < u_{l2}; \\ u_{t-1} + \eta \Delta u, & \text{if } |u_t| < u_{l1} \text{ and } |\Delta u| > u_{l2}; \\ u_{l1}, & \text{if } |u| > u_{l1}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_{l1} 是单个控制周期的输出限幅, u_{l2} 是 2 个控制周期的输出量之差的阈值, η 是系数, u_t , u_{ot} 是经过判断前后的输出量。

4 实验与结果

为了验证笔者所提出算法的有效性,在车间的保温杯杯口和杯底激光焊接机器人系统上做了大量实验,实验平台如图 5 所示。机器人为 KUKA 弧焊机器人 KR 6 ARC,负载质量为 6 kg,重复定位精度为 0.1 mm。视觉系统为康奈视激光扫描传感器 DS925B,激光功率为 8 mW,中心波长为 405 nm。

采用本文的模糊控制器能很好地跟踪保温杯杯口和杯底焊缝,最大跟踪误差为 0.49 mm,平均跟踪误差为 0.17 mm。可以看出,文中的焊缝跟踪方法具有较高的跟踪精度。保温杯杯口和杯底焊接效果如图 6 所示,可以看出保温杯杯口和杯底焊缝光滑均匀,具有良好的焊接质量。

5 结语

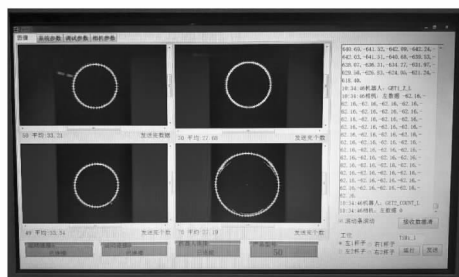
针对不锈钢保温杯焊接难题,笔者提出了一种基于激光扫描和工业机器人的自动焊接系统,可以明显提高焊接质量。通过激光扫描方法的应用,解决了传统工业机器人只能按照固定轨迹焊接的问题,提高了机器人对焊缝位置的自适应性。为了对激光扫描信息更充分地应用,接下来将进一步深入分析激光扫描信



(a) 激光焊接系统外观



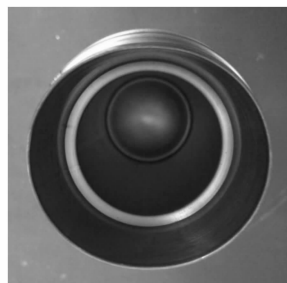
(b) 激光焊接系统内部



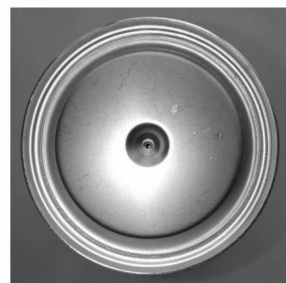
(c) 激光扫描软件界面

图 5 焊接机器人实验系统

Figure 5 Experimental system of welding robot



(a) 杯口焊缝



(b) 杯底焊缝

图 6 机器人激光自动焊接效果

Figure 6 Performance of robotic laser welding

(下转第 81 页)