

文章编号:1007-6735(2017)02-0149-05

DOI:10.13255/j.cnki.jusst.2017.02.009

基于激光测距的船体分段焊缝自主寻位

刘 源¹, 刘 芳¹, 马宏波², 林 涛^{2,3}, 朱振友²

(1. 上海理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200093; 2. 江苏北人机器人系统股份有限公司, 苏州 215021;

3. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: 采用激光测距传感器扫描船体格子间型结构件工件的各个侧面, 得到特征点, 经算法处理生成离线机器人程序. 基于该焊缝寻位方法, 将柔性化的焊缝寻位技术集成于机器人平台载体, 并利用 C# 语言开发了一套可用于格子间型件焊缝寻位的软硬件系统. 该系统能精确地实现焊缝轨迹的自主寻位, 系统精度为 0.4 mm, 重复定位精度为 0.16 mm. 实现了格子间型件非接触式快速寻找焊缝的功能, 大大缩短了焊缝寻位时间.

关键词: 柔性化焊接; 焊缝寻位; 激光测距; 船体分段

中图分类号: TP 249 **文献标志码:** A

Weld Seam Automatic Searching for Hull Blocks in Shipbuilding Based on a Laser Displacement Sensor

LIU Yuan¹, LIU Fang¹, MA Hongbo³, LIN Tao^{2,3}, ZHU Zhenyou³

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,

Shanghai 200093, China; 2. Jiangsu Beiren Robot System Co., Ltd., Suzhou 215021, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A laser displacement sensor was used to get the characteristic points by scanning each side of cubicle work-piece, and the system would generate off-line programs automatically after those points were processed by a certain software. Based on this automatic searching method, the flexible welding technology and C# language programming technology were applied to a robot welding system. The system can search the weld seam precisely, the precision and repeatability of positioning are 0.4 mm and 0.16 mm respectively. The weld system realizes the rapid searching of weld seams by the means of non-contact sensing, and reduces the searching time immensely.

Keywords: flexible welding; seam searching; laser displacement sensor; hull block

目前, 高度柔性化和自动化的船舶焊接系统在提高造船的质量、效率以及降低产品制造周期和成

本方面具有重要的作用^[1]. 在船体分段焊接过程中, 大型船体内底分布着的纵桁和肋板组成了大量的格

收稿日期: 2016-09-28

第一作者: 刘 源(1991-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 焊接自动化. E-mail: ryan.s.t@foxmail.com

通信作者: 刘 芳(1976-), 女, 副教授. 研究方向: 金属精密成型及仿真. E-mail: liufang@usst.edu.cn

子间型结构,这些分段的格子间型结构的底板与侧板主要靠焊接的方式实现连接,如图1所示,单独的格子间型结构件分别包含4个平角和4个立角的焊缝^[2].由于实际情况需要或装配差异以及不确定因素等原因,船底的格子间型虽然形状相似,尺寸大小却不尽相同.而目前市面上大多数自动化设备均是针对单一尺寸的标准产品^[3-5],焊接系统柔性化较低,针对这种形状大致相同但尺寸不一的结构件,大多数自动化设备都难以实现自动焊接.

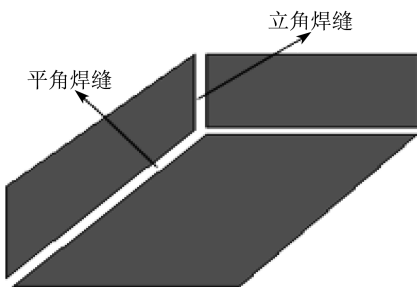


图1 船体格子间型结构焊缝
Fig.1 Weld seam in ship

针对这种尺寸差异较大的格子间型结构的焊缝寻位,目前部分船厂采用接触式传感焊接方法.它是将带有电压的焊丝向工件移动,当焊丝和工件接触时,焊丝和工件间的电位差变为零,通过程序计算出实际位置,从而获得焊缝轨迹^[6].但是,这种方法的



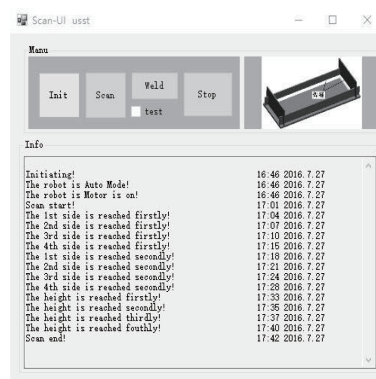
(a) 硬件结构

机器人焊接系统柔顺性比较差,当焊接下一个尺寸差异较大的格子间型结构时,初始焊位获取的周期较长,导致焊接效率降低.同时,文献[7]也提出了一种通过离线编程从格子间型结构件的数模中提取出焊缝轨迹,经软件处理生成焊缝轨迹,从而实现焊缝自主寻位的方法,但此方法获得的轨迹误差较大,有一定的局限性.

本文将柔性化焊接机器人技术集成于机器人平台载体,借助激光测距传感器与采集卡等外部设备,对格子间型结构侧壁进行扫描,提取特征点,通过工控机的算法处理后生成工件焊缝轨迹,从而达到焊接系统的高度柔性化,实现对格子间型结构件自动化焊接的目的.

1 系统架构

图2(a)为设计的机器人系统,该系统主要包括硬件系统和软件系统两部分.其中,硬件系统主要包括ABB六轴机器人及其控制柜、基恩士激光测距传感器、研华1710采集卡以及工控机等;图2(b)的软件界面是利用C#语言和ABB机器人SDK工具所开发的人机交互界面,该软件界面能应用于机器人扫描过程和焊接过程的控制,机器人扫描结束后将自动生成离线的焊缝轨迹程序,并自动导入机器人控制系统.



(b) 软件界面

图2 机器人焊接系统

Fig.2 Robot welding system

利用固定支架将激光传感器和焊枪固定在机器人末端,通过研华采集卡将激光测距传感器采集的数据传递给工控机,机器人与工控机之间采用以太网进行通讯.系统工作时,机器人运动到初始扫描位置,激光光线射在格子间型结构的侧壁上,激光器将采集到的模拟量通过采集卡传给工控机,同时,机器

人获取机器人末端实时位置的坐标值.如此,工件的每个侧壁均扫描两次,工控机上的软件系统将激光器测量数据与机器人采集的坐标数据进行处理,得到焊缝轨迹后自动生成离线的机器人程序.机器人系统工作流程如图3所示.本文所用到的激光测距传感器是基恩士IL-300,激光器光线的线性度为

$\pm 0.25\%$, 输出电压范围为 $-5\sim 5\text{ V}$, 通过线性回归将模拟量电压值转换成距离值。

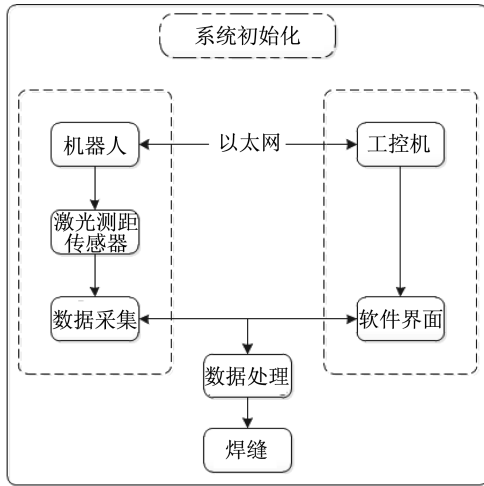


图3 系统运行框架图

Fig.3 Framework of the system operation

由于船体的格子间型结构件的侧板和底板大多是厚度为 $10\sim 32\text{ mm}$ 的钢板, 板间的接缝直线度良好。利用机器人指令 Move1 对焊缝轨迹进行编程, 焊接速度和转角半径可根据焊接经验设定, 只需获得机器人焊接时的起弧位置和收弧位置。对于 4 条平角焊缝, 焊缝轨迹呈四边形, 获得 4 个底角坐标即得到各条平角焊缝的轨迹; 对于 4 条立角焊缝, 获得 4 个底角的坐标值和侧板的高度即可获得各焊缝的轨迹, 侧板的高度需手动输入。

2 激光器坐标系的标定

在工控机处理数据的过程中, 由于需要将激光器采集的距离值与机器人获取的坐标值进行计算, 就必须确定激光器坐标系与机器人末端坐标系的位置和旋转关系^[8], 这样才能根据机器人末端相对于机器人的基坐标系的坐标向量, 得到激光器坐标系相对于焊枪坐标系的相对关系。这里将激光发射光束视为末端工具, 而光束上距离激光平面为 300 mm 的点则视为 TCP(tool center point), 采用六点法对其进行标定^[9]。其中, 采用特别设计的激光器安装支架, 使激光器的发射光束与法兰盘坐标系 y 轴平行。

激光器位置标定过程如下: 首先在桌面上固定一标准球, 在球面上做一个标记点, 然后示教机器人采用 4 种不同的姿态, 尽可能使 4 种姿态的差异更大; 同时, 在调整的过程中使激光光束直射球面上的

同一标记点, 且各姿态下的激光测距都为 300 mm 。图 4 为机器人基坐标系 C_B 、机器人末端坐标系 C_T 和激光器 TCP 坐标系 C_L 之间的转换关系, 可以建立如下的关系:

$$\begin{bmatrix} P_B \\ 1 \end{bmatrix} = B X \begin{bmatrix} P_L \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & e_x \\ n_y & o_y & a_y & e_y \\ n_z & o_z & a_z & e_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X = [P_x \ P_y \ P_z \ 1]^T$$

式中: P_B, P_L 分别表示在基坐标系和激光器坐标系下标记点的坐标矩阵; $[P_x \ P_y \ P_z \ 1]^T$ 表示的是激光器 TCP 相对于机器人末端的位置偏移量^[8]; 矩阵 B 和 X 分别表示由坐标 C_B 到 C_T , C_T 到 C_L 的转换关系; n_x, n_y, n_z 表示 C_T 的 x 轴与 C_B 的 x, y, z 轴的夹角余弦; o_x, o_y, o_z 表示 C_T 的 y 轴与 C_B 的 x, y, z 轴的夹角余弦; a_x, a_y, a_z 表示 C_T 的 z 轴与 C_B 的 x, y, z 轴的夹角余弦; e_x, e_y, e_z 表示 C_T 相对 C_B 的偏移量。

对于不同的位姿, X 始终保持不变。对于同一台机器人, 无论对应机器人哪个位姿, 矩阵 B 均可由机器人读出。根据 4 个不同的位姿, 得出不同的变矩 B , 采用线性最小二乘法求出 $[P_x \ P_y \ P_z \ 1]^T$ 。

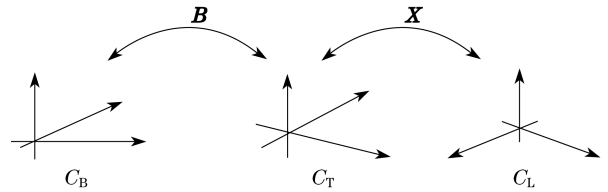


图4 各坐标系间的转换

Fig.4 Transformation between different coordinate systems

激光器的位置是激光器坐标系在空间中相对于机器人末端坐标系偏移的位置, 而激光器的姿态是其相对于机器人末端的旋转关系, 需要进一步确定。将激光器固定, 使激光发射光束与法兰盘 y 轴平行, 即确定了激光器坐标系的一个坐标轴的方向; 而坐标系的另外 2 个坐标轴的方向并未确定, 理论上绕激光器坐标 y 轴任意旋转的坐标系方向均可以成为激光器姿态标定的解; 若不对姿态进行标定, 则会出现无数组解。文献^[10]提供了一种借助于外界

辅助装置对激光器的姿态进行标定的方法,但是,辅助装置的引入会增加标定的误差,对于本文精度要求较高的系统并不适用.本文采用的方法是将激光器坐标系与机器人末端的坐标方向默认一致,在 ABB 机器人控制器里定义激光器坐标系的方向与法兰盘一致,可以认为激光器坐标系是机器人末端坐标系平移后的结果.按照上述过程就得到了激光器坐标系相对于法兰盘的姿态.

3 试验与分析

本文所开发的机器人系统采用模块化的设计思路,利用激光测距传感器进行测距,采取样点,通过编写的程序进行计算,得出焊缝轨迹,实现了整个系统按照其功能进行转换与调节.基于位移激光测距寻找焊缝轨迹的精度取决于激光器测量、系统结构以及标定结果等,不可控的影响因素较多,所以,对系统扫描计算得到的轨迹的准确性需要进一步分析.

格子间型结构平角焊缝主要是由其 4 个底角坐标构成的直线轨迹,而立角焊缝轨迹也是在 4 个底角坐标基础上得到的直线轨迹.所以,通过系统扫描计算得到的 4 个底角坐标的精度在焊缝轨迹重现的过程中至关重要.文献[11]提出,在进行系统精度分析时,重复性是系统至关重要的误差指标.

系统的重复性是指机器人系统在不改变任何条件下,按照同一方法步骤,再次达到同一轨迹位置的能力^[12].本系统的重复性分析需要对检测出的焊缝轨迹底角坐标的一致性进行分析比较.在不改变系统部件和试验条件下,用同一步骤针对同一个格子间型结构扫描计算,利用 4 个底角坐标值对轨迹进行描述.由于装配、机器人重复定位、激光测量等误差原因,造成了 4 个底角坐标的精度并不完全相同.通过 50 次重复扫描试验得到 4 组坐标值,被扫描工件如图 2(a)所示,一个底角对应 1×50 个坐标值,将各坐标值与人工测量值进行对比,得到各误差值,将各坐标的误差取均值,得到如图 5 所示的各底角的精度.精度最高的是第 2 个底角,为 0.335 8 mm;精度最低的是第 3 个底角,为 0.397 8 mm.船体分段焊接大多都是厚板角焊缝焊接,精度在 0.5 mm 范围内的焊缝轨迹均可较好地满足焊接要求.

为了进一步准确地表示出系统的重复性指标,针对单独一个坐标的重复性进行估算,运用标准差分析模型对系统精度的不确定度进行分析^[13].采用

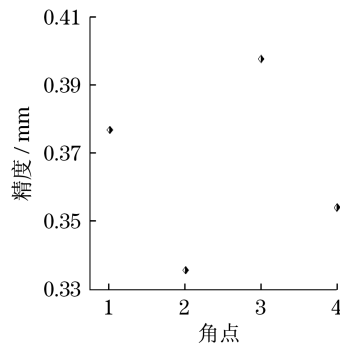


图 5 4 个底角坐标精度

Fig.5 Precision of four underside coordinates

Bessel 公式来建立典型系统重复性分析的标准差模型.

$$V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中: V 是系统重复性标准差; n 表示试验次数, $n = 50$; X_i 表示第 i 个坐标的误差值; $\bar{X}$ 表示 n 次坐标误差的均值; $(X_i - \bar{X})$ 表示试验残差.

再利用极差值来反映每组底角坐标之间的最大差距,结果如表 1 所示.从极差可以看出各组坐标值的差距较小,在 0.16 mm 内.同时,各组底角坐标的方差较小,收敛性好,系统的重复性很好.

表 1 各底角的重复性

Tab.1 Repeatability of four underside coordinates

底角	标准差/mm ²	极差/mm
1	0.090 62	0.138 81
2	0.119 66	0.151 37
3	0.088 48	0.128 99
4	0.078 28	0.116 24

4 结 论

a. 搭建了格子间型结构工件的焊缝寻位系统,即利用激光测距传感器配合机器人、采集卡、工控软件系统获得工件特征点信息,自动生成机器人可识别焊位轨迹.

b. 采用改进的 TCP 标定方法对激光测距传感器进行标定,使激光传感器得到的数据与机器人坐标数据一一对应,并进行了坐标变换.

c. 对焊缝轨迹精度进行分析,表明本文集成的机器人系统所得到的焊缝轨迹精度和重复性都较好,分别为 0.4 mm 和 0.16 mm.集成的机器人系统

柔性化程度高、精度好,较好地解决了格子间型结构由于尺寸较多、批量较少造成的柔性化焊接难题。

参考文献:

- [1] HEO H, CHUNG H, PARK J, et al. Compensation of welding shrinkage in ship production by integrating computer-aided design and computer-aided engineering in a design for assembly technique [J]. Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2015, 229 (2): 174 - 186.
- [2] LEE D, KU N, KIM T W, et al. Development and application of an intelligent welding robot system for shipbuilding [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(2): 377 - 388.
- [3] CHEN W Z. Optimization method of man-machine operating for multi-variety and small batch production [J]. Advanced Materials Research, 2012 (591/592/593): 493 - 497.
- [4] KORZENOWSKI A L, VIDOR G, VACCARO G L R, et al. Control charts for flexible and multi-variety production systems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 88: 284 - 292.
- [5] CHANG X F. Challenges posed by multi variety and small batch production mode and countermeasures acted by Chinese small and medium enterprises [J]. Advanced Materials Research, 2013(711): 794 - 798.
- [6] GAO F, CHEN Q L, GUO L Z. Study on arc welding robot weld seam touch sensing location method for structural parts of hull [C] // Proceedings of 2015 International Conference on Control, Automation and Information Sciences, IEEE, 2015: 42 - 46.
- [7] 詹超. 船体分段的机器人焊接路径规划与离线编程 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [8] YIN S B, REN Y J, ZHU J G, et al. A vision-based self-calibration method for robotic visual inspection systems [J]. Sensors, 2013, 13(12): 16565 - 16582.
- [9] 康存锋, 王红伟, 张鹏飞, 等. 焊接机器人工具坐标系标定的研究与实现 [J]. 北京工业大学学报, 2016, 42 (1): 30 - 34.
- [10] 刘成业, 李文广, 马世国, 等. 一种机器人工具坐标系标定方法 [J]. 山东科学, 2012, 25(1): 69 - 74.
- [11] CHEN X Z, HUANG Y M, CHEN S B. Model analysis and experimental technique on computing accuracy of seam spatial position information based on stereo vision for welding robot [J]. Industrial Robot, 2012, 39 (4): 349 - 356.
- [12] DARCY S P, GIL J E, WOO S L Y, et al. The importance of position and path repeatability on force at the knee during six-DOF joint motion [J]. Medical Engineering & Physics, 2009, 31(5): 553 - 557.
- [13] CORTÉS J C, JÓDARA L, VILLAFUERTE L. Mean square solution of Bessel differential equation with uncertainties [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2017, 309: 383 - 395.

(编辑: 石 瑛)