DOI: 10.3901/JME.2019.17.008

狭小空间不连续折线焊缝识别 移动机器人跟踪系统*

郭亮^{1,2} 张华¹

(1. 南昌大学江西省机器人与焊接自动化重点实验室 南昌 330031;

2. 南昌航空大学信息工程学院 南昌 330031)

摘要: 以自主移动焊接机器人平台, 主要解决船舶制造中船舱底部狭小空间的不连续折线焊缝识别跟踪问题。介绍了移动机器人的硬件结构和工作原理, 采用旋转电弧和激光视觉双传感方式, 对采集到的电流和图像信号进行处理, 分别用于焊缝跟踪和流水孔特征识别。对机器人折线运动进行了分析, 对十字滑块和机器人本体的运动进行了规划, 通过规划和实时控制相结合的方式实现焊缝跟踪。在开发的硬件平台上, 结合 VC 编程实现信号的采集、处理及控制, 经试验和生产现场应用, 结果表明, 该系统便携灵活适用于狭小空间不连续折线焊缝作业, 识别和跟踪效果良好。

关键词: 不连续焊缝; 激光视觉传感器; 旋转电弧传感器; 路径规划; 移动机器人

中图分类号: TG409

Discontinuous Fold Line Welding Seam Recognition and Mobile Robot Tracking System in Narrow Space

GUO Liang^{1,2} ZHANG Hua¹

(1. Key Lab of Robot & Welding Automation of Jiangxi, Nanchang University, Nanchang 330031;

2. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330031)

Abstract: Taking autonomous mobile welding robot as the platform, this paper mainly solves the problem of identifying and tracking the discontinuous fold line welding seam in the narrow space of the bottom in the ship cabin. The hardware structure and working principle of the mobile robot are introduced. Rotating arc and laser vision dual sensing mode are adopted. The collected current and image signals are processed for seam tracking and seam feature recognition of drain holes. The fold line motion of the robot is analyzed, and the movement of the cross slider and the robot body is planned. The welding seam tracking is carried out by the combination of planning and real-time control. On the hardware platform developed, the signal acquisition, processing and control are realized by VC programming. The results of test and work field application show that the system is portable and flexible for small space discontinuous fold line welding, and the effect of recognition and tracking is good.

Key words: fold line welding seam; laser vision sensor; rotating arc sensor; path planning; mobile robot

0 前言

船舶制造中, 船舱底层设置许多格子型构件, 此类构件大都顶部封闭, 空间狭小, 目前对于此类构件的焊接主要是人工来完成, 工作效率极其低下, 工作条件相当恶劣, 已成为新的造船工业发展的瓶颈^[1]。目前, 日本、韩国和欧美国家都把机器人技术和自动化技术放在科学技术发展中最首要的位

置, 特别是在先进造船企业。随着全球造船中心东移, 韩、中、日三国的船舶企业目前已经占有了世界 90% 以上的市场份额。在我国, 造船企业平均焊接自动化率不足 20%, 而日本和韩国 80% 的造船企业已采用了焊接自动化, CO₂ 气体保护焊机得到广泛采用。船舶焊接自动化水平的发展对推动造船工业的前行具有举足轻重的含义^[2-5]。

近年来, 国内外很多高校和科研机构针对船舶焊接的自动化水平的提高做了大量的工作^[6-8], 但国内外尚少有关于不连续焊缝(流水孔)自动识别跟踪与焊接的报道。基于此, 针对船舶制造中的

* 国家高技术研究发展计划资助项目(2013AA041003)。20180903 收到初稿, 20190726 收到修改稿

不连续折线焊缝和其他焊接场合(比如起重机横梁, 大型储油罐), 设计开发了自主移动焊接机器人, 该焊接机器人体积小、重量轻、适于人工提携、可在狭小空间灵活运动且具有自动跟踪焊缝等功能。在完成焊接任务的同时, 把工人从复杂恶劣的焊接环境中解放出来, 降低焊接成本、提高焊接质量。对开发的系统软硬件进行了测试, 结果表明, 该机器人系统能够完成狭小空间不连续折线焊缝的焊接需求, 为类似焊接环境和机器人设计制造提供了借鉴。

1 系统结构及建模

1.1 系统硬件结构及工作原理

移动机器人实物如图 1 所示。该机器人结构紧凑、体积小, 外形尺寸为 260 mm×350 mm×465 mm, 质量约为 15 kg, 能自主移动、便于提携, 适用于狭小空间焊接作业。系统采用研华工控主板 PCM3362, 数据采集卡为 ART2932, 图像采集卡为大恒 VT111, 运动控制卡采用 ART1020, 所有板卡及端子板都封装在机器人本体内。机器人采用两后轮独立驱动, 可差速转向, 前置万向球随动。

图 1 移动机器人系统硬件图

系统采用旋转电弧和激光视觉双传感方式进行焊缝识别跟踪, 旋转电弧用于焊接状态下的焊缝跟踪, 激光视觉传感器用于停弧状态下的焊缝跟踪, 同时完成流水孔特征点和类型识别, 从而控制停弧和起弧动作。机器人的前端安装了超声波传感器, 用于检测前方障碍物, 同时用来触发折线焊缝转弯信号。焊接开始时, 霍尔传感器实时采集焊接电流信号, 经 A/D 转换后送计算机处理, 得出偏差信息, 偏差送控制器进行决策得出滑块的控制量, 控制小车和滑块运动, 从而实现焊缝跟踪。

激光视觉传感器主要用于实时采集焊缝图像信息, 经系列图像处理, 实时识别是否有流水孔。若有, 则需识别流水孔特征点及孔的类型以指导停弧和起弧动作, 同时完成流水孔段的焊缝跟踪以及给出焊缝拐点触发信号。

1.2 系统建模

假设机器人只对水平面上的焊缝进行跟踪焊接, 由移动机器人和十字滑块协调运动来完成焊缝跟踪。假设移动机器人没有侧向滑动并设定承载路面为光滑平面, 采用差速驱动的方式进行转弯运动, 轮子运动无打滑只做纯滚动的情况下建立小车车体部分的运动学模型^[9]。

图 2 为移动机器人运动学模型图, 其坐标系的建立如图所示, 机器人坐标系与固定坐标系之间夹角为 θ ; L_x , L_y 为 O_1 在坐标系 xyz 中的位置; 从固定坐标系的原点 O , 经沿 x , y 平移矩阵 T_1 , T_2 , 旋转矩阵 T_3 , 最后变换到电弧传感器底部即焊嘴。其变换过程为

$$X = T_1 T_2 T_3 X_1 \quad (1)$$

即

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

化简后有

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & L_x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & L_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

图 2 系统运动学模型

设电弧传感器的底部即焊嘴 P 点的坐标为 $\{P: 0, l, 0\}$, 代入式(3), 有

$$\begin{cases} x = L_x - l \sin \theta \\ y = L_y + l \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中, l 为滑块的伸出量。

对式(4)求导, 可得焊嘴的速度方程

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta - \dot{l} \sin \theta - \dot{\theta} l \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta + \dot{l} \cos \theta - \dot{\theta} l \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

又 $\dot{\theta} = w$, 焊嘴运动学模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -l \cos \theta \\ \sin \theta & -l \sin \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{l} \sin \theta \\ \dot{l} \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

当 $l=0$ 时, 有

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = w \end{cases} \quad (7)$$

此时代表的是移动小车左轮中心的运动学方程。

2 轨迹规划

2.1 焊接要求

图 3 为折线焊缝的示意图, 焊枪从 A 点开始焊接, 至 B 点, 机器人本体开始转弯, 十字滑块伸出, 焊枪沿 BC 焊接, 至 C 点, 焊枪从伸出切换至缩进, 沿着 CD 焊接, 至 D 点, 机器人本体停止旋转, 直线行走, 焊接 DE 段。焊接过程中要求焊枪沿焊缝方向的线速度始终恒定不变。

图 3 折线焊缝示意图

2.2 十字滑块轨迹规划

在不连续折线焊缝跟踪焊接中, 实时焊缝跟踪用来进行微调, 需要对滑块和机器本体的运动进行事先规划。焊接时, 滑块的控制量为旋转电弧传感器焊缝跟踪实时控制量和规划量叠加。滑块规划示意图如图 4 所示。

滑块的规划采用分段方式。从 A 点到 D 点分为 n 段, n 为从 A 点到 D 点的采用次数, 实际应用中采样周期设置为 300 ms。令 $|OB| = L_2$, $|OC| = L_1$, 可得

$$\begin{cases} L_1 \cos(n-1)\theta = L_x \\ L_2 \cos n\theta = L_x \end{cases} \quad (8)$$

对应采样周期内滑块的伸出量为

$$\Delta L = L_2 - L_1 = L_x \left(\frac{1}{\cos n\theta} - \frac{1}{\cos(n-1)\theta} \right) \quad (9)$$

式中, $\theta = \pi / 4n$ 。

图 4 滑块轨迹规划示意图

仿真后得出滑块轨迹规划曲线如图 5 所示。

图 5 滑块轨迹规划曲线图

2.3 机器人本体运动分析

在机器人运动规划前, 需要对其旋转方式进行选择, 考虑三种转弯方式下滑块的伸出最大量, 最终选择左轮为旋转中心, 右轮后退的转弯方式。

机器人本体运动规划示意图如图 6 所示, 以机器人的左轮中心原点建立直角坐标系 Oxy , 原点离焊缝的距离分别为 L_x , L_y 。假设机器人当前转过的角度为 θ , 则焊枪前端坐标为

$$\begin{cases} x_t = -L_x \\ y_t = L_x \tan \theta \end{cases} \quad (10)$$

对 y_t 求导数, 可得

$$v = y_t' = L_x \frac{1}{\cos^2 \theta} \theta' = L_x \frac{\omega}{\cos^2 \theta} \quad (11)$$

转换有

$$\omega = \frac{v \cos^2 \theta}{L_x} \quad (12)$$

由于焊接过程中, 焊枪沿焊缝的方向上的速度始终未 v , 所以

$$\cos \theta = \frac{L_x}{\sqrt{L_x^2 + v^2 t^2}} \quad (13)$$

联立式(12)、(13), 得小车旋转的角速度为

$$\omega = \frac{L_x v}{L_x^2 + v^2 t^2} \quad (14)$$

设焊枪伸出长度为 r , 则

$$r = \sqrt{v^2 t^2 + L_x^2} \quad (15)$$

求导, 可得到水平滑块的伸出速度为

$$v_1 = r' = \frac{v^2 t}{\sqrt{v^2 t^2 + L_x^2}} \quad (16)$$

当滑块运动到前 45° 时, 机器人本体的速度方程为

$$\begin{cases} \omega = \frac{L_x v}{L_x^2 + v^2 t^2} \\ v_1 = \frac{v^2 t}{\sqrt{v^2 t^2 + L_x^2}} \end{cases} \quad (17)$$

图 6 机器人本体路径规划示意图

对后 45° 同样分析, 仿真后, 可得出机器人本体右轮运动曲线如图 7 所示。在实际应用中, 采样周期为 300 ms, 因此采样点个数为 $n = t / 0.3$ 。

图 7 机器人右轮速度曲线图

2.4 拐点识别

如图 3 所示的折线焊缝中, 焊枪焊接至 C 点后需改变运行方向, 使其沿焊缝方向上的运动速度保持为 v , 因此系统需检测出拐点 C 的位置。拐点的检测可分为有孔和无孔两种情况进行。图 8、9 分别为无流水孔和有流水孔焊接状态下采集到的焊缝图像, 从图中可以看出, 无孔时激光条纹是连续的, 有孔时激光条纹是断开的, 并且孔的缺口越大, 则

激光条纹的断开越长, 两者之间的对应关系可以通过像素和实际距离的标定获得, 精度可达 1 mm。

图 8 无流水孔焊缝图像

图 9 有流水孔焊缝图像

图 10 为带有流水孔的直角角焊缝焊接结果, 经多处焊缝横向切面分析, 横纵向焊缝高度偏差均小于 1 mm, 满足系统跟踪精度要求。分析可知, 焊枪离工件的距离变化会引起焊缝图像中激光条纹在图像中的横坐标变化。焊接过程中实时检测焊缝图像中竖直激光条纹的横坐标, 随着焊枪的运动, 激光条纹反映在图像中的位置也发生变化, 当焊枪到达拐点, 图像中的激光条纹横坐标也处于拐点。如图 11 中 A 点所示。此方法适用于工件拐点有孔或无孔

图 10 有流水孔直角焊缝焊接结果

图 11 拐点检测结果图

的情况。当工件拐点有孔时,还有一种更加简便的方法,那就是检测到焊缝从有孔进入到无孔的瞬间,认为是焊枪到达了拐点。对应的,如流水孔开在工件的后 45°,也可用相应的方法处理。

3 系统跟踪控制

系统在整个跟踪焊接过程中,需要多个传感器同时进行工作。如果跟踪直线焊缝,则只需要利用旋转电弧传感器进行焊缝跟踪,采用参数自调整模糊控制得出系统控制量,从而使得焊枪跟踪上焊缝。与此同时激光视觉传感器实时检测是否有流水孔,如此时检测到有流水孔,则在对应的位置控制熄弧和起弧动作,熄弧后旋转电弧传感器无法进行焊缝跟踪,由激光视觉传感器完成跟踪任务。移动机器人控制方法如图 12 所示。

图 12 移动机器人控制方法

若跟踪折线焊缝,此时需要机器人本体和十字滑块的规划量和旋转电弧实时跟踪控制量相叠加完成焊缝跟踪。激光传感器用来检测焊缝的特征点信息,包括流水孔的起始和终止点、流水孔的类型以及折线的拐点。红外传感器被安装在横向滑块中,用以测量滑块的伸缩量。

4 现场试验

利用设计的移动机器人软硬件系统在某船厂进行了现场焊接试验,所用焊机为 Panasonic 全数字逆变焊机 YD-500GR,焊丝为药芯焊丝 1.6 mm,焊接电流 260 A,焊接电压 25 V, 80%Ar+20%CO₂ 混合气体保护,气体流量为 15 L/min,焊接速度为 40 cm/min^[10]。图 13 为现场焊接照片,图 14 为有流水孔直角焊缝焊接结果图,可以看出焊接机器人能够自动跟踪焊缝,同时自动识别流水孔,并在流水孔

段自动熄弧和起弧。对流水孔的特征点测量分析,发现识别偏差均小于 3.0 mm,满足识别精度要求。

图 13 移动机器人焊接图

图 14 生产现场焊接结果图

5 结论

(1) 采用嵌入式工控机为处理单元的自主移动焊接机器人结构紧凑、重量轻、体积小,适用狭小空间现场焊接作业,为自主移动机器人小型化设计提供借鉴。

(2) 采用旋转电弧和激光视觉双传感的方式,解决了焊缝偏差识别、流水孔特征点和类型识别、拐点识别等功能,为焊接控制领域多传感方式提供了应用借鉴。

参 考 文 献

- [1] 郭亮,张华,高延峰. 船舱流水孔自动识别跟踪焊接系统[J]. 焊接学报, 2015, 36(6): 14-18.
GUO Liang, ZHANG Hua, GAO Yanfeng. study of automatic recognition and tracking welding system for cabin drain hole[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(6): 14-18.
- [2] THARAKESHWAR A, GHOSAL A. A three-wheeled mobile robot for traversing uneven terrain without slip: Simulation and experiments[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2013, 41(1): 60-78.
- [3] LI L, LIN B Q, ZOU Y B. Study on seam tracking system

- based on stripe type sensor and welding robot[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015(5): 26-33.
- [4] LIANG Guanhao, LUO Qingsheng, GE Zhuo. Novel real-time seam tracking algorithm based on vector angle and least square method[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2017, 26(2): 150-157.
- [5] DILTHEY U, WILMS G, SEVIM A M. Welding and sensor application with rotating torch[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2013, 32(4): 356-360.
- [6] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1-11.
WANG Tianmiao, TAO Yong. Research status and industrialization development strategy of Chinese industrial robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-11.
- [7] 靳全胜, 李杰. 焊接机器人技术研究与应用现状[J]. 轻工科技, 2018, 34(2): 36-37.
JING Quansheng, LI Jie. Research and application status of welding robot technology[J]. Light Industry Science and Technology, 2018, 34(2): 36-37.
- [8] KLIMCHIK A, AMBIEHL A, GARNIES, et al. Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 48: 12-29.
- [9] 李清伟. 狭小空间移动焊接机器人角焊缝跟踪的动力学控制[J]. 焊接学报, 2014, 35(12): 85-88.
LI Qingwei. Dynamic control of mobile robot working in narrow space for weld seam tracking[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(12): 85-88.
- [10] 朱杰, 苏娜, 杨峰, 等. 船体分段机器人角焊工艺研究[J]. 焊接, 2015(3): 18-22.
ZHU Jie, SU Na, YANG Feng, et al. Robot fillet welding process for hull blocks[J]. Welding&Joining, 2015(3): 18-22.

作者简介: 郭亮, 男, 1979 年生, 博士研究生。主要研究方向为机器视觉与智能控制。

E-mail: acumen@nchu.edu.cn

张华(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为焊接自动化与智能控制。

E-mail: huazhang@yeah.net