

文章编号: 1002-0446(2007)03-0256-05

基于示教与视觉纠偏的机器人自动焊接方法研究*

鄢治国^{1,2}, 徐德¹, 李原³, 谭民¹

(1 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学实验室, 北京 100080

2 中国科学院研究生院, 北京 100049 3 北京理工大学信息科学技术学院, 北京 100081)

摘要: 给出了一种示教与纠偏相结合的焊缝跟踪方法, 用于实现机器人的自动焊接. 针对传统的示教再现机器人, 由激光视觉传感器测量实际路径与示教路径之间的偏差. 机器人控制器根据示教路径和偏差, 对焊枪的运动方向和位置进行调整, 实现焊缝跟踪. 利用六自由度机器人和激光结构光视觉传感器设计了实验系统, 对所提方法进行了实验. 实验结果验证了该方法的有效性.

关键词: 视觉传感器; 图像处理; 焊缝跟踪

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Automated Robotic Welding Based on Teaching and Visual Correction

YAN Zhiguo^{1,2}, XU De¹, LI Yuan³, TAN Min¹

(1. Key Laboratory of Complex Systems and Intelligent Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A method combining teaching and visual correction for weld seam tracking is presented to realize robotic automatic welding. In this method, a laser-based vision sensor is applied to traditional teaching and playback welding robot to measure deviations between the teaching path and the real path, then the robot controller adjusts the moving direction and position of the welding torch according to the deviations and teaching path, hence the seam tracking function can be fulfilled. Experiments have been conducted with an experimental system consisting of a 6-DOF robot and a laser-based vision sensor, and the experimental results demonstrate the validity of the proposed method.

Keywords vision sensor; image processing; weld seam tracking

1 引言 (Introduction)

焊接具有烟尘多、热辐射大等特点, 是一种劳动条件较差的工作. 将机器人技术应用于焊接领域, 可以减轻焊工的劳动强度, 保证焊接质量, 提高焊接效率. 目前, 大部分焊接机器人是示教再现机器人. 这种机器人只能简单重复示教的轨迹和动作, 在工件焊缝与示教路径发生偏差的情况下, 很容易导致焊接失败. 因此, 研发焊缝跟踪系统是进一步提高焊接自动化程度的重要途径. 文 [1] 介绍了焊缝跟踪系统的研究现状及发展趋势, 同时也对相关的传感技术做了介绍. 目前, 可应用于焊缝信息获取的传感器主要有电弧传感器、超声波传感器、红外传感器以及视

觉传感器等. 其中, 视觉传感器以其高灵敏度、高精度, 抗电磁干扰, 与工件无接触, 获得焊缝信息丰富等优点, 受到广泛的关注, 成为焊缝跟踪传感器研究的热点. 视觉传感技术可分为主动视觉和被动视觉两种, 主动视觉需要辅助光源提供帮助, 而被动视觉则无此需要. 文 [2~7] 分别就主动视觉和被动视觉在焊缝跟踪中的应用进行了研究. 以激光结构光作为辅助光源的视觉传感器, 与无辅助光源的视觉传感器相比, 采集到的焊缝图像的特征更加明显, 图像处理也更加方便. 因此, 激光结构光视觉传感器被认为是一种很有发展前景的焊缝跟踪传感器. 科研工作者在这方面做了大量的工作, 开发出了一些基于

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60672039).

收稿日期: 2006-05-29

视觉传感器的焊缝跟踪系统^[8-10]. 这些视觉传感跟踪系统, 在示教再现机器人上应用还有一定困难. 为解决示教再现机器人自动焊接过程中的焊缝跟踪问题, 我们提出了这样一种方法: 将自主研发的激光结构光视觉传感器, 应用到能够接收外来偏差信号并能做出相应调整的示教再现焊接机器人上, 使机器人能够根据视觉传感器所获得的焊枪与焊缝的偏差信息来调整焊枪的位置, 实现焊枪在焊接过程中准确地沿着焊缝的方向前进. 采用这种方法, 焊接生产厂家只需要在原有的示教再现机器人基础上新增视觉传感器即可, 从而在提高焊接自动化程度的同时, 也有效地利用了资源, 极大地降低了生产成本. 因此, 该方法在工业焊接领域具有广泛的应用前景.

2 机器人焊接系统构成 (Configuration of the robotic welding system)

为了在机器人自动焊接过程中实现视觉纠偏, 我们设计了一套机器人焊接系统, 其硬件由六自由度机器人本体、机器人控制器、示教编程器、摄像机、激光器、图像采集与处理单元、电焊机电源、送丝机、焊枪等构成, 如图 1 所示. 按照功能, 可将本系统分为机器人模块、视觉模块和焊接模块.

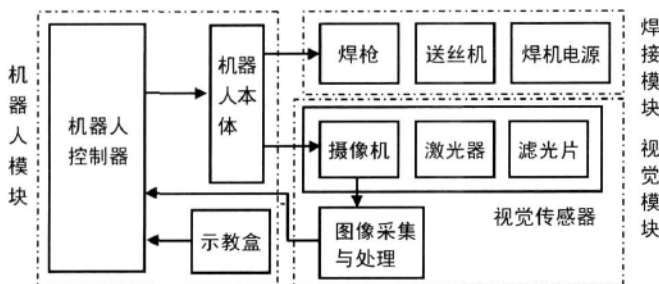


图 1 机器人焊接系统示意图

Fig 1 Structure of the welding robot system

机器人模块包括六自由度机器人本体、示教编程器、机器人控制器. 在机器人本体的末端, 加装焊枪和视觉传感器. 示教编程器是一个手持操作盒, 可以实现对机器人系统的一些参数设置以及示教编程功能. 机器人控制器根据接收到的轨迹特征参数, 完成在线运动规划, 并对机器人关节进行速度和位置控制. 同时, 机器人传感器基板集成在机器人控制器里, 本焊接系统的视觉模块和机器人模块正是通过这个基板连接起来.

视觉模块包含视觉传感器、图像采集卡和图像处理单元几部分. 其中, 视觉传感器由摄像机、激光

器、防溅挡板和滤光片等构成, 滤光片安装在摄像机镜头之前, 滤除杂光干扰. 视觉传感器固定在机器人末端的法兰盘上, 在焊枪的前面约 20 cm 处, 其结构参见文 [11]. 激光器和摄像机之间成一定角度. 激光器发出的激光平面投射到工件表面, 形成一条激光条纹, 该条纹的形状反映了焊缝的形状信息. 由于滤光片只允许激光波长附近的光透过, 所以摄像机通过滤光片采集到的图像只有激光条纹, 而没有焊件等背景图像. 这样, 可以简化图像处理, 提高图像处理速度. 图像采集卡将摄像机采集到的图像信息转化为数字信号后, 传给图像处理单元并进行图像处理, 得到焊缝的特征点. 利用特征点的位置, 可以形成焊缝偏差数据, 传送给机器人控制器.

焊接模块包含电焊机电源、送丝机、焊枪等. 焊枪固定在机器人末端法兰盘上. 调整视觉传感器的安装角度, 使得在焊接过程中, 激光器发出的激光条纹在焊枪前方大约 10 cm 处. 如果焊枪尖与焊缝间发生偏离, 那么机器人控制器就会根据视觉传感器得到的偏差信号对焊枪进行调整, 确保在焊接过程中焊枪保持在焊缝上.

在机器人运动时, 焊枪和视觉传感器随着机器人一起运动, 其它器件位置固定. 焊接模块和视觉模块, 均通过机器人控制器与机器人模块集成在一起.

3 视觉纠偏工作原理 (Principle of visual correction)

3.1 自动焊接控制系统

焊接系统在焊接前需要对机器人运动路径进行示教. 在完成示教后, 开始焊接前, 当焊枪移动到焊缝的起点时, 进行起始点处激光条纹图像的处理, 将处理得到的图像特征点作为参考特征点 (u_b, v_d) . 由于机器人控制器中的传感器基板的输入要求是电压信号, 所以这个图像参考特征点需要转化为电压参考特征点 $(V_{y,b}, V_{z,d})$. 焊缝的起点需要精确示教, 否则容易导致焊接失败. 在焊接过程中, 视觉传感器采集激光条纹图像, 并通过图像采集卡将图像数据传送到图像处理单元中进行图像处理, 得到当前图像的特征点 (u, v) , 然后转化为当前电压特征点 (V_y, V_z) . 当前电压特征点与电压参考特征点的偏差 $(\Delta V_y, \Delta V_z)$, 能够近似地反映出当前焊枪尖与当前焊缝中心的偏差. 机器人控制器根据这个偏差, 通过一定的控制规律对末端进行调整, 使焊枪始终沿着焊缝方向前进, 完成沿焊缝的自动焊接. 图 2 是自动焊接控制系统的原理框图.

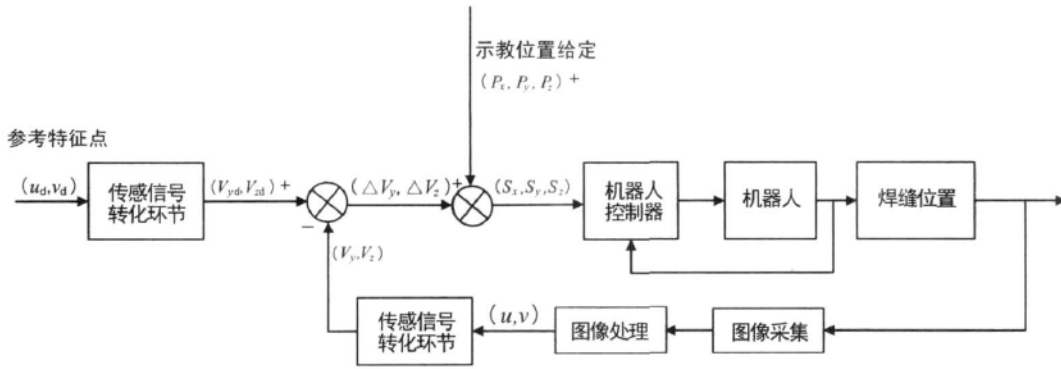


图 2 自动焊接控制系统原理框图

Fig 2 Framework of the automated welding control system

3 2 视觉位置偏差反馈

视觉模块向机器人控制器提供的位置偏差信号,是根据摄像机采集的图像经过处理获得的.如图2所示,视觉位置反馈由图像采集、图像处理和信号转换环节构成.其中,图像采集环节由摄像机和图像采集卡完成,其过程已经在视觉模块中进行了介绍.下面简要介绍图像处理和信号转换环节.

3 2 1 图像处理

图像处理环节是视觉模块中最重要的部分.摄像机采集到激光条纹图像后,通过图像采集卡将图像数据传送到图像处理单元进行图像处理.图像处理算法由确定焊缝区域、自适应阈值计算、提取条纹轮廓、Hough变换得到主直线、计算特征点等步骤构成,其流程图如图3所示.各个步骤的细节此处从略,可参见文[4 11].

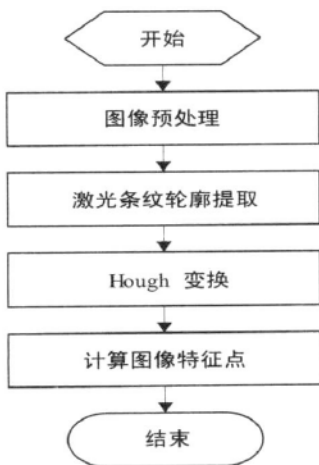


图 3 图像处理算法的流程图

Fig 3 Flow of the image processing algorithm

3 2 2 信号转换

完成焊缝跟踪功能需要两个通道:一个通道根

据输入的传感信号对焊枪进行上下调整,另一通道根据传感信号对焊枪进行左右调整,这两个通道的传感信号分别与图像特征点坐标的两个分量 u 、 v 相对应.由于机器人控制器中的传感器基板的输入是电压信号,所以需要将图像特征点的坐标转化为对应的电压信号.通常,摄像机采集的图像尺寸为 640×480 像素.传感器基板的电压信号输入定义在 $0 \sim 10$ V,则图像坐标到电压信号的转化如式(1)所示:

$$\begin{cases} V_y = \frac{10}{480}v \\ V_z = \frac{10}{480}u \end{cases} \quad (1)$$

其中, (u, v) 为当前的图像特征点坐标, V_y 和 V_z 分别是输入到机器人控制器的电压偏差信号.利用式(1),传感信号转化环节将特征点图像坐标转化为电压信号.

3 3 机器人控制器的偏差调整策略

机器人末端采用工具坐标系.通过调整机器人末端的姿态,使 Y 轴正方向为沿竖直方向向下,沿着垂直法兰盘向前的方向为 Z 轴正向,并使机器人末端在焊接过程中保持这个姿态不变.机器人控制器接收到的电压信号 (V_y, V_z) 与电压参考信号 (V_{y0}, V_{z0}) 之间的偏差 $(\Delta V_y, \Delta V_z)$ 反映了焊枪尖相对于焊缝在 Y 轴方向和 Z 轴方向上的偏差.机器人控制器根据得到的电压偏差信号,输出相应的末端偏移量使焊枪尖沿着焊缝中心前进.图4给出了 Y 轴输入电压与输出偏移量之间的关系曲线,式(2)和式(3)给出了偏移量的计算公式.

$$C_{yout} = \begin{cases} k_y (V_y - V_b + V_l), & \text{if } V_y \leq V_b - V_l \\ 0 & \text{if } V_b - V_l < V_y \leq V_b + V_l \\ k_y (V_y - V_b - V_l), & \text{if } V_b + V_l < V_y \end{cases} \quad (2)$$

$$C_{zout} = \begin{cases} k_z (V_z - V_b + V_1), & \text{if } V_z \leq V_b - V_1 \\ 0 & \text{if } V_b - V_1 < V_z \leq V_b + V_1 \\ k_z (V_z - V_b - V_1), & \text{if } V_b + V_1 < V_z \end{cases} \quad (3)$$

其中, C_{yout} 、 C_{zout} 分别为机器人控制器输出的 Y 轴和 Z 轴方向的调节量, k_y 、 k_z 分别为 Y 轴和 Z 轴的分辨率, 单位是 mm/V, V_b 、 V_1 分别是偏置电压和死区电压。

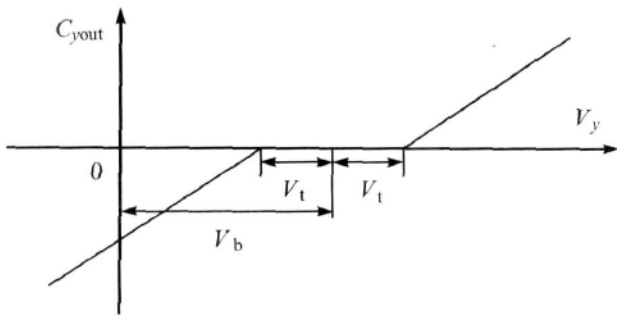


图 4 Y 轴输入电压与输出偏移量之间的关系曲线

Fig 4 Relationship between input voltage and output voltage of Y-axis

4 实验与结果 (Experiment and results)

为了验证本文方法的有效性, 利用图 1 方案构成实验系统, 并进行了示教纠偏的焊缝跟踪实验. 实验系统如图 5 所示, 上图为焊枪在焊缝起始点时的实验系统场景, 下图为机器人末端的特写, 显示了安装在机器人末端的视觉传感器与焊枪之间的关系。

实验中所用的焊接工件是水平放置的钢板, 焊缝是 V 型焊缝, 长约为 80 cm, 沟槽深度和表面宽度分别为 10 mm 和 15 mm. k_y 、 k_z 都设置为 70 mm/V. 为了简化计算, V_b 、 V_1 都设置为 0 为了得到一个可靠的参考图像坐标 (u_b , v_d), 需要在起始段加上一段延迟时间采集图像. 实验中, 这段延迟时间设为 3 s 实验中使用 PC104 嵌入式总线工控机作为图像处理单元, 其配置为主频 533MHz, 内存 128M, 操作系统是 Windows 98 实验系统中的机器人是 Motoman UP6, 其控制器最多可以接收 4 个通道的传感信号输入, 实验中使用了其中两个通道, 接入视觉模块给出的 Y 轴和 Z 轴电压偏差信号。

实验步骤如下:

- 1) 对 UP6 机器人进行路径示教;
- 2) 人为使焊接工件发生偏转, 使焊缝当前的路径跟示教的路径发生偏差, 在这个过程中要保持焊缝的起点不变;

3) 应用视觉传感器对变化后的焊缝进行纠偏跟踪。

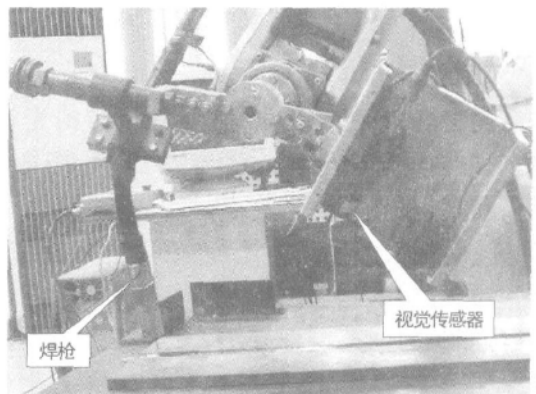


图 5 机器人焊接实验系统

Fig 5 The experimental welding robot system

在这里, 称发生变化前的路径为示教路径, 变化后的焊缝路径为实际路径, 示教纠偏中焊枪的工作路径为运动路径. 图 6 给出了示教与视觉纠偏实验结果, 图中的坐标是在机器人世界坐标系的 X-Y 平面上的坐标. 其中, 示教路径仅对起点和终点进行了示教, 在图 6 中是以“○”标识的直线. 运动路径是在纠偏过程中记录的焊枪轨迹, 在图 6 中是以“*”标识的曲线. 实际路径经过测量获得, 在图 6 中是以“□”标识的直线. 从图中可以看出, 实际路径相对于示教路径发生了偏转, 在路径的终点处两者之间的偏差达到 30 mm 左右. 而运动路径和实际路径基本重合, 两者之间的最大偏差不超过 1 mm, 能够满足实际焊接要求. 另外, 从图中也可以看出, 示教路径和实际路径的起点基本重合, 这是保证焊接精度的前提. 一个错误的参考点将导致运动路径相对于实际路径产生一个近似平行的偏移, 偏移量的大小取决于两个路径起点之间的偏差, 如果这个偏差超过

容忍限度,将导致焊接失败.

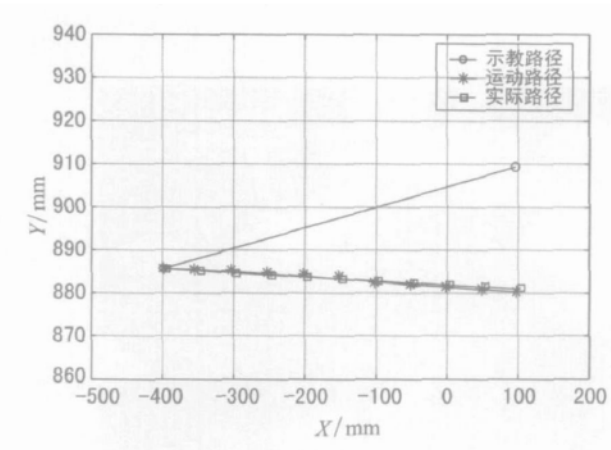


图6 示教与视觉纠偏实验结果

Fig 6 The result of teaching and visual correction experiment

5 结论 (Conclusion)

本文提出的自动焊接方法,将激光结构光视觉传感器应用到示教再现弧焊机器人上,实现焊缝跟踪功能.这种方法具有如下优点:

1) 实验表明,该焊接方法能很好地完成焊缝跟踪功能,其跟踪精度满足生产需要;

2) 与传统的示教再现方法相比,本方法不需要非常精确的示教,因此不需要在示教编程上花费大量的时间,从而提高了生产效率;

3) 本方法可以在当前焊接系统的基础上进行升级改造来实现焊缝跟踪功能.目前,很多生产企业都装配有能接收外来偏差信号的示教再现焊接机器人,只要将这些机器人与激光结构光视觉传感器结合起来,就能组成新的具有焊缝跟踪功能的焊接系统,这将在大大提高焊接自动化程度的同时降低成本,使本方法具有广泛的应用前景.

参考文献 (References)

- [1] 毛鹏军,黄石生,薛家祥,等.弧焊机器人焊缝跟踪系统研究现状及发展趋势[J].电焊机,2001,31(10):9-12,22
- [2] Morgan C G, Burnley J S E, Davey P G. Visual guidance techniques for robot arc welding[A]. Proceedings of the SPIE - Intelligent Robots 3rd International Conference on Robot Vision and Sensory Controls (vol 449) [C]. USA: SPIE, 1983: 615-619.

- [3] Beatlie R J, Cheng S K, Logue P S. The use of vision sensors in multipass welding applications[J]. Welding Journal, 1988, 67(11): 28-33
- [4] Xu D, Jiang Z M, Wang L K, et al. Features extraction for structured light image of weld seam with arc and splash disturbance[A]. Proceedings of the 8th International Conference on Control Automation, Robotics and Vision [C]. New York, NY, USA: IEEE, 2004: 1559-1563
- [5] Xu D, Wang L K, Tan M. Image processing and visual control method for arc welding robot[A]. Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 727-732
- [6] 徐德,赵晓光,涂志国,等.基于结构光立体视觉的焊缝测量[J].焊接学报,2004,25(5):45-48,52
- [7] Li Y, Middle J E, Weldi S M. Machine vision analysis of welding region and its application to seam tracking in arc welding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1993, 207(4): 275-283
- [8] Nayak N, Thompson D, Ray A, et al. Conceptual development of an adaptive real-time seam tracker for welding automation[A]. Proceedings of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. New York, NY, USA: IEEE, 1987: 1019-1024
- [9] Kim J S, Son Y T, Cho H S, et al. Robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding[A]. Proceedings of the 1995 IEEE International Symposium on Intelligent Control [C]. New York, NY, USA: IEEE, 1995: 363-368
- [10] Zhang H, Ding X L, Chen M H, et al. The seam tracking system for submerged arc welding[A]. Proceedings of Robotic Welding Intelligence and Automation LNCIS [C]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2004: 299-314, 151
- [11] 李原,徐德,李涛,等.一种基于激光结构光的焊缝跟踪视觉传感器[J].传感技术学报,2005,18(3):488-492

作者简介:

鄢治国 (1981-),男,博士生.研究领域:智能焊接,图像处理.

徐德 (1965-),男,博士,研究员.研究领域:微光机电系统,智能控制,计算机控制技术.

李原 (1977-),男,博士生.研究领域:焊接机器人,图像处理,模式识别等.