

文章编号: 1000-8152(2001)01-0026-05

计算机视觉在焊缝跟踪控制中的应用*

高向东

黄石生 余英林

(广东工业大学机电工程学院 罗克韦尔自动化实验室·广州, 510090) (华南理工大学机电工程系·广州, 510640)

摘要: 研究一种基于计算机视觉的焊缝跟踪控制系统, 重点论述焊缝图象分割和边缘提取的理论方法, 通过对视觉传感器 CCD 检测到的弧焊区图象进行处理来准确地识别焊缝位置, 从而有效地提高焊缝跟踪精度。

关键词: 计算机视觉; 焊缝跟踪; CCD; 图象处理

文献标识码: A

Application of Computer Vision in the Weld Seam Tracking Control

GAO Xiangdong

(Rockwell Automation Laboratory, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510090, P. R. China)

HUANG Shisheng and YU Yinglin

(Department of Mechatronic Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510640, P. R. China)

Abstract: A control system based on the computer vision for weld seam tracking is proposed. The discussion is mainly focused on the theory and methods of edge-collection and division of weld image. The weld position can be detected accurately through processing the image of arc area collected by the vision sensor CCD (charge-coupled device), and the seam tracking accuracy is enhanced efficiently.

Key words: computer vision; weld seam tracking; CCD; image processing

1 引言(Introduction)

精确的焊缝跟踪是保证焊接质量的首要关键。焊接过程由于存在弧光、飞溅等各种因素, 因而准确地获取焊缝位置较为困难。目前提取焊缝信息的传感器有电弧、机械、温度、超声和光电式传感器等, 其中视觉传感器由于可以远离强光、强热区, 采集信息量大, 因而受到人们的青睐。但是, 当前以视觉传感器构成的焊缝跟踪系统也存在一些问题, 主要是系统抗干扰性不高, 在粗糙的工件表面和强烈弧光干扰下往往误检测, 当焊缝间隙很小时甚至可能无法检测^[1]。本文对焊缝跟踪过程中的计算机视觉技术进行研究, 采用最接近人眼功能的视觉传感器 CCD 直接拍摄电弧来获取焊缝位置信息, 通过图象边缘提取和分割特别是 Marr 算子边缘检测图象处理方法, 有效地解决了焊缝检测的可靠性问题, 保证了焊缝的精确跟踪。

2 试验装置工作原理(Principle of the experimental set)

试验装置主要由 CCD 摄像机、工控机和焊接工

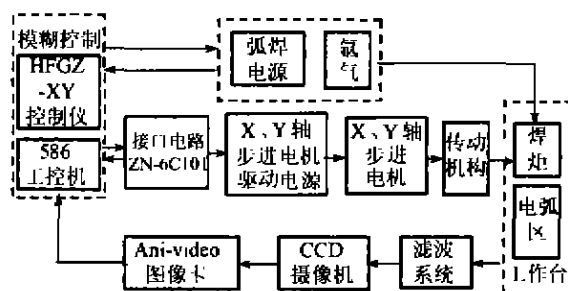


图 1 焊缝跟踪系统结构图

Fig. 1 Structure of seam tracking system

作台几部分组成, 如图 1 所示。工作台用以模拟一 2 关节直角坐标式机器人本体, 焊炬达到空间位置的两个运动 (X, Y) 由直线运动构成, 并由两台步进电机驱动。为减小弧光干扰, 在 CCD 摄像机前安装了滤波系统, 利用电弧和熔池自身光谱辐射, 并通过选择特定的辐射频域, 得到弧焊区图象。电弧区图象以视频信号形式被输入至 Ani-video 图像卡, 工控机对图象进行处理, 得到焊缝偏差信号, 经过模糊推理,

* 基金项目: 国家自然科学基金(59975030)、广东省自然科学基金(980630)、中国博士后科学基金([1999]10 号)、广东省高校博士后科研基金([1999]35 号)、教育部留学回国人员科研基金([1999]363 号)和图象信息处理与智能控制教育部开放研究实验室基金(TKLJ9906)资助项目。

收稿日期: 1999-07-06; 收修改稿日期: 2000-01-03。

由接口电路 ZN-6C101 向步进电机驱动电源发出相应的脉冲频率控制量,实现焊炬运动的控制.图 2 为焊接工作台实物照片.



图 2 焊接工作台实物图

Fig. 2 The weld working table

3 图象处理及焊缝位置检测 (Image processing and detection of weld position)

图 3 为 CCD 摄取的弧焊区原始图象,图象视频信号经图象卡转换为数字信号,用 8 位二进制表示 256 个灰度,0 对应黑色,255 对应白色.用 100×80 个像素对熔池前端的焊缝区域进行处理.在焊缝跟踪系统中,焊炬与 CCD 摄象机为刚性联接,焊接前焊炬在摄象区中的坐标是确定的,因此通过检测焊缝位置即可得到焊缝中心与焊炬的偏差,此偏差作为模糊控制器的输入量.



图 3 弧焊区图象

Fig. 3 Image of arc welding area

图象卡接受 IBM PC BUS 经 I/O 送来的控制字,实现对卡上硬件的控制管理.其主要功能是选择当前工作帧存体,实现图象采集、冻结和伪彩色显示,同时控制帧存体实现图形和图象的覆盖,并按用户指定窗口进行数据传递.

图象处理一般包括量化、图象预处理和图象识别等步骤,量化由图象卡完成,图象处理的主要工作是对焊缝图象进行预处理和图象识别,以期获取焊缝位置的精确信息.图象预处理包括图象变换、图象增强和图象恢复,图象识别包括图象分割和边缘提取等.针对弧焊图象处理,下面重点论述直方图修

正、图象分割和边缘提取等方法.

3.1 直方图修正 (Modification of histogram)

焊缝原始图象由于受到现场干扰,图象的灰度往往与实际焊缝不匹配,需要对图象作预处理,进行图象增强、灰度修正、噪声过滤和畸变校正等.其中,直方图修正是图象增强最常用、最重要的方法之一.利用直方图信息,对灰度分布形式作校正来修正图象灰度,最终达到图象增强的目的.图 4 为焊缝原始图象的灰度值和直方图,它是基于度量空间(灰度分布)的灰度修正方法,直方图修正中具有最优性质的是直方图均衡.

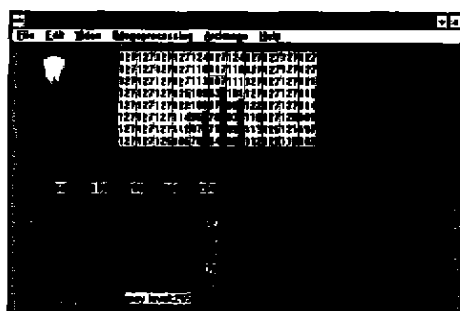


图 4 焊缝图象灰度及直方图

Fig. 4 Image grey scale and histogram of seam

将图象灰度作正规化处理,把焊缝原始图象灰度范围 $[g_{\min}, g_{\max}]$ 压缩至 $[0, 1]$. 设图象 $|f(i, j)|$ 灰度 $g \in [g_{\min}, g_{\max}]$, 作线性变换

$$g' = \frac{g - g_{\min}}{g_{\max} - g_{\min}}, \quad (1)$$

使变换后图象灰度 g' 压缩成 $g' \in [0, 1]$. 取图象变换 T 为以下形式

$$T(g') = \int_0^{g'} P_g(\omega) d\omega, \quad g' \in [0, 1]. \quad (2)$$

式中 $P_g(\omega)$ 为 g' 的分布密度. 经上式变换后可以得到以 $T(g')$ 为灰度的图象, $T(g')$ 在 $[0, 1]$ 均匀分布.

设焊缝图象第 k 级灰度出现的概率为 P_k , 则直方图均衡步骤为:

1) 对焊缝图象总像素数 n 和灰度量化级 m 作统计;

2) 根据式(1)进行灰度线性变换,作灰度直方图 $P_g(g'_k) = n_k/n$;

3) 作累积分布函数 $d_k = T(g'_k) = \sum_{i=0}^k P_g(g'_i)$;

4) 量化间隔校正. 焊缝图象灰度量化级为 m , 每个间隔长度为 $1/(m-1)$, 将 $d_k (k = 0, 1, \dots, m-1)$ 值按接近法归入相应的量化级. 取 d_k 的分布函数, 其服从 $[0, 1]$ 均匀分布. 将 g'_k 灰度变为相对

应的 $d_0, \dots, d_{m-1}$, 获得经直方图校正后 $[0, 1]$ 的正规化焊缝图象;

5) 对式(1) 进行反变换 $d' = g_{\min} + (g_{\max} - g_{\min})d$, 恢复到原焊缝图象灰度范围.

这种直方图均衡为焊缝图象识别打下了坚实的基础.

3.2 轮廓提取(Extraction of profile)

在分析焊缝图象时, 将图象二值化可以提取轮廓而获得图象的几何特征, 对于边缘检测很有效. 定义背景为黑色, 被检物体为白色, 选取适当阈值, 可以得到物体轮廓. 图 5 为焊缝原始图象轮廓提取后的图象, 不过该方法仅适用于二值图象的处理.

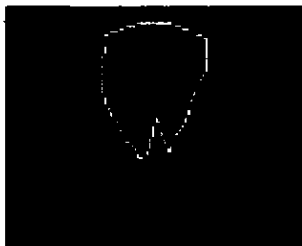


图 5 轮廓提取
Fig. 5 Profile extraction

3.3 图象分割(Image segmentation)

图象分割是将灰度值接近和位置靠近的像素划成一个区域. 为了提取图象区域的形状特征, 往往忽略区域内部信息, 把区域内部像素标以“1”, 把背景标以“0”, 形成二值图象. 对于图 4 的直方图, 将双峰间的谷底灰度值 104 作为阈值, 灰度值大于 104 的像素置为 132, 小于 104 的像素置为 0, 二值化后的图象见图 6 所示. 但不同的焊缝图象, 其阈值往往不同, 因此如何选择正确的阈值在实际焊接过程中较为困难, 焊缝周围的灰度差别不明显, 焊缝的一些重要信息容易被淹没.



图 6 图象二值化
Fig. 6 Binary processing of image

观察图 3, 可以发现焊缝图象大致分为熔池、被弧光照亮的钢板以及焊缝三个区域, 因此, 将图象进行三值分割处理, 灰度值大于 104 的像素置为 132, 分割出熔池, 灰度值小于 70 的像素置为 0, 分割出焊缝, 灰度值介于 70 ~ 104 的像素置为 73, 分割出被

弧光照亮的钢板, 如图 7 所示. 图象横坐标方向有一明显的灰度值变化, 该区域(两个箭头所指之处)就是实际中的焊缝. 对每行中的相邻像素相减, 通过焊缝的行中有四处差值为 N (图象阈值), 第 $2n$ 和 $2n+1$ ($n = 1, 2, \dots$) 次相减值为 N 的位置为“焊缝边缘特征点”, 两个焊缝边缘特征点的中心即为“焊缝中心特征点”. 试验表明, 该方法基本能满足焊缝跟踪要求^[2]. 但不足之处是事先要选定阈值, 当焊接过程中焊缝变形较大时, 仍会对焊缝跟踪精度造成一定影响.

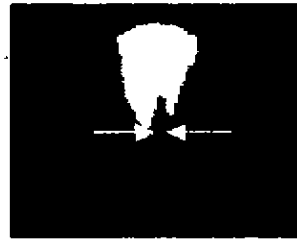


图 7 图象三值比
Fig. 7 Trichotomy of image

3.4 边缘检测算子(Edge detection operator)

检测焊缝位置的关键之一是图象边缘的提取. 常用的边缘检测方法是对原始图象按像素的某邻域构造边缘检测算子, 如梯度算子、Sobel 算子和拉普拉斯算子等, 其基本原理是对图象的每个像素考察它的邻域内灰度的变化, 利用边缘邻近一阶或二阶方向导数变化规律检测边缘.

对于梯度算子, 在图象阶跃边缘点其一阶导数取极值, 并对图象 $|f(i, j)|$ 的每个像素取梯度值

$$D(i, j) = \sqrt{\Delta_x f(i, j)^2 + \Delta_y f(i, j)^2}. \quad (3)$$

式中

$$\Delta_x f(i, j) = f(i, j) - f(i-1, j),$$

$$\Delta_y f(i, j) = f(i, j) - f(i, j-1).$$

适当取门限 G_g , 如果 $D(i, j) > G_g$, 则 (i, j) 点为阶跃状边缘点, 而 $|D(i, j)|$ 为梯度算子的边缘图象.

Sobel 边缘检测算子是对图象 $|f(i, j)|$ 的每个像素, 考察其上、下、左、右邻点灰度的加权差, 与阶跃边缘邻点接近的权大. Sobel 算子可表达为

$$\begin{aligned} S(i, j) = & |(f(i-1, j-1) + 2f(i-1, j) + f(i-1, j+1)) - \\ & (f(i+1, j-1) + 2f(i+1, j) + f(i+1, j+1))| + \\ & |(f(i-1, j-1) + 2f(i, j-1) + f(i+1, j-1)) - \\ & (f(i-1, j+1) + 2f(i, j+1) + f(i+1, j+1))|. \end{aligned} \quad (4)$$

取门限 G_s , 如果 $S(i, j) > G_s$, 则 (i, j) 点为阶跃状边缘点, 而 $|S(i, j)|$ 为边缘图象.

拉普拉斯算子定义为

$$\nabla^2 f(i, j) = \Delta_x^2 f(i, j) + \Delta_y^2 f(i, j). \quad (5)$$

式中

$$\Delta_x^2 f(i, j) = \Delta_x f(i+1, j) - \Delta_x f(i, j),$$

$$\Delta_y^2 f(i, j) = \Delta_y f(i, j+1) - \Delta_y f(i, j).$$

因此式(5)也可写为

$$\nabla^2 f(i, j) = f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) - 4f(i, j). \quad (6)$$

上式是一个与边缘方向无关的边缘点检测算子. 对于阶跃状边缘, 二阶导数在边缘点出现零交叉, 即边缘点两旁二阶导数取异号. 对图象 $\{f(i, j)\}$ 的每个

像素取关于 x 轴方向和 y 轴方向的二阶差分之和, 如果 $\nabla^2 f(i, j)$ 在 (i, j) 点发生零交叉, 则 (i, j) 为阶跃边缘点. 对屋顶状边缘, 在边缘点的二阶导数取极小值, 图象 $\{f(i, j)\}$ 的每个像素取拉普拉斯算子的相反数

$$L(i, j) = -\nabla^2 f(i, j) = -(f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) - 4f(i, j)). \quad (7)$$

则 $|L(i, j)|$ 为边缘图象.

应用以上边缘检测算子, 可以分别得到焊缝原始图象的边缘检测图, 如图 8 所示.

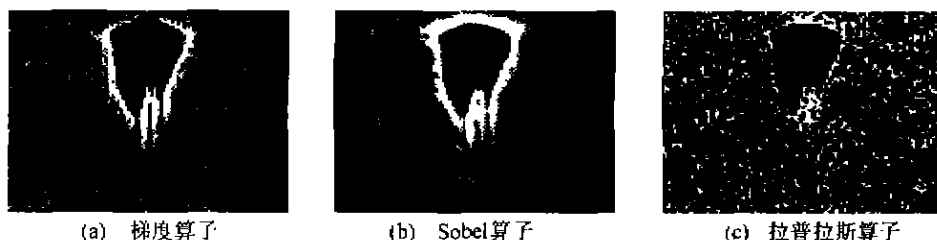


图 8 边缘算子焊缝提取

Fig. 8 Seam detection by edge operator

3.5 Marr 算子焊缝检测方法 (Method of weld detection by Marr operator)

焊缝原始图象常常受到噪声干扰而边缘和噪声在空间域表现为灰度有比较大的起落, 应用上述检测算子进行焊缝边缘检测时容易把噪声当作边缘点检测出来, 而真正的边缘由于受噪声干扰而被忽略. 为此, 本文设计基于 Marr 算子的焊缝边缘检测法, 首先对焊缝原始图象作最佳平滑, 再用拉普拉斯算子对平滑的结果进行零交叉点边缘检测. 对每像素的光强而言, 与像素同一位置的景物点周围对该像素光强度贡献呈正态分布规律.

对于焊缝原始图象, 选择二维正态函数

$$F(r) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right) \exp(-r^2/2\sigma^2). \quad (8)$$

式中, r 是以滤波像素 (i, j) 为中心的极坐标的半径, σ^2 为方差.

对原始图象 $\{f(i, j)\}$ 作卷积, 得到平滑图象

$$Q(i, j) = F(r) * f(i, j). \quad (9)$$

在靠近和平行于边缘(零交叉线)时, $Q(i, j)$ 变化呈线性规律, 与边缘正交的方向 $Q(i, j)$ 的二阶导数斜

率取最大. 考虑到卷积性质, 可以得到

$$H(i, j) = \nabla^2 |Q(i, j)| = \nabla^2 (F(r) * f(i, j)) = \nabla^2 F(r) * f(i, j). \quad (10)$$

式中, $\nabla^2 F(r) = (-1/\pi\sigma^4)(1 - r^2/2\sigma^2)\exp(-r^2/2\sigma^2)$, 求取 $H(i, j)$ 的零交叉点轨迹, 即可得到焊缝图象 $\{f(i, j)\}$ 的边缘.

4 试验与分析 (Experiments and analyzing)

焊缝跟踪试验采用 GTAW(钨极气体保护电弧焊)方法, 焊缝为 I 型坡口, 形状为“弧形”曲线和“折线”. 为了对焊缝图象处理效果进行比较, 焊接过程中分别采用了图象三值分割法和 Marr 算子焊缝边缘检测法. 应用下式计算焊缝的平均跟踪误差:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^P |E_i|}{P}, \quad i = 1, 2, \dots, P. \quad (11)$$

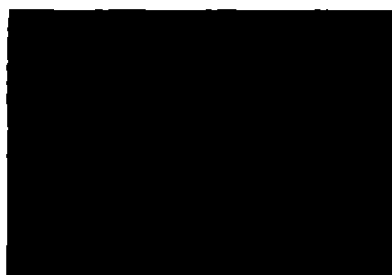
式中 $\bar{E}$ 为焊缝跟踪误差平均值, E_i 为每个采样周期的焊缝跟踪误差, P 为采样数. 表 1 列出了试验条件和试验结果. 图 9 为应用 Marr 算子边缘检测法焊接后的焊缝照片.

表 1 焊缝跟踪试验条件和结果

Table 1 Experimental condition of seam tracking and results

焊缝形状	钢板厚度	氩气流量	焊接电流	焊接速度	跟踪平均误差/mm	
	/mm	/L·min ⁻¹	/A	/mm·s ⁻¹	三值分割法	Marr 算子法
弧形	2.0	8	95	4	0.47	0.31
折线	2.0	8	95	4	0.43	0.28

试验结果表明,与图象三值分割法相比,采用 Marr 算子焊缝边缘检测法可有效提高焊缝跟踪精度.即使在焊前定位偏差较大的情况下,如图 9(a)所示,系统也能迅速地使焊炬对中焊缝,控制系统体现出了较强的鲁棒性.



(a) “弧形”线焊缝



(b) “折线”焊缝

图 9 焊缝照片

Fig. 9 Seam pictures

5 结论(Conclusion)

本文研究计算机视觉在焊缝跟踪控制中的应用,重点论述识别焊缝边缘的图象处理,确定出基于梯度和 Marr 等算子的焊缝边缘检测法.在恶劣的电弧焊条件下,对焊缝信息量进行有效处理,为控制系统提供了可靠的焊缝位置数据,实现了焊缝的精确跟踪.

参考文献(References)

- [1] Suga Y, Muto A and Kumagai M. Automatic tracking of welding line by autonomous mobile robot for welding of plates (tracking of linear and angled welding lines)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), Part C, Tokyo, Japan, 1997, 63 (612): 2918-2924
- [2] Gao Xiangdong, Huang Shisheng and Yu Shiwei. An intelligent control system called HPGZ-XY for weld seam tracking [J]. Robot, 1998, 20(S): 17-23 (in Chinese)

本文作者简介

高向东 1963 年生,博士,副教授.1996 年在日本九州大学留学,研究领域为智能控制应用及光机电一体化.

黄石生 1938 年生,教授,博士生导师.1964 年毕业于华南理工大学,长期从事弧焊机器人,焊接过程智能控制和弧焊电源的教学和科研工作.

余英林 1932 年生,教授,博士生导师.从事神经网络和图象处理等方面的研究.

(上接第 25 页)

- [3] Shyu K and Yan J. Variable-structure model following adaptive control for systems with time-varying delay [J]. Control Theory and Advanced Technology, 1994, 10(4): 513-521
- [4] Gao Weibing and Huo Wei. Base on Stability of Large-Scale Systems, Decentralized Control and Dynamically Hierarchical Control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1990 (in Chinese)
- [5] Chia-chi Chu and Fan-ren Chang. Some results on the problem of decentralized reliable stabilization [J]. Int. J. Control, 1991, 53(6): 1343-1538 (in Chinese)
- [6] Matthews G and De-Cario R. Decentralized tracking for a class of interconnected nonlinear systems using variable structure control [J]. Automatica, 1988, 24(2): 187-193
- [7] Xu X, Wu Y and Huang W. Variable structure control approach of decentralized model-reference adaptive systems [J]. IEE Proc.-D, 1990, 137(5): 302-306
- [8] Wang W J and Lee J L. Decentralized variable structure control design in perturbed nonlinear systems [J]. J. of Dynamic System, Measurement, and Control, 1993, 115(3): 551-554
- [9] Truxal J G. Control Engineer's Handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 1958
- [10] Lin Z. Robust semi-global stabilization of linear systems with imperfect actuators [J]. Systems & Control Letters, 1997, 29: 215-221
- [11] Lin Z. Semi-global stabilization of linear systems with position and rate-

limited actuators [J]. Systems & Control Letters, 1997, 30: 1-11

- [12] Hsu K C. Variable structure control design for uncertain dynamic systems with sector nonlinearities [J]. Automatica, 1988, 24(4): 550-508
- [13] Hsu K C. Decentralized variable-structure control design for uncertain large-scale systems with series nonlinearities [J]. Int. J. Control, 1997, 68(6): 1231-1240
- [14] Gu G X. Stabilizability condition of multivariable uncertain systems via output feedback control [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1990, 35(8): 925-927
- [15] Chen C. Linear System Theory and Design [M]. Holt, USA: Rinehart and Winston, 1984

本文作者简介

刘勤林 1964 年生,解放军信息工程大学副教授.1991 年在哈尔滨工业大学获理学硕士学位,2000 年 3 月在东北大学获工学博士学位.研究方向:复杂系统结构分析,鲁棒控制等.

刘 嫻 1965 年生,解放军信息工程大学副教授,博士生.1992 年在哈尔滨工业大学获理学硕士学位.研究方向:系统分析,军事密码学等.

王继河 1962 年生,东北大学、青岛大学副教授.2000 年 3 月在东北大学获工学博士学位.研究方向:复杂系统结构分析,鲁棒控制等.

张嗣瀛 1925 年生.1948 年毕业于武汉大学机械系.1957 年至 1959 年赴前苏联莫斯科大学数学力学系进修.现为东北大学自动控制系统、青岛大学教授,中国科学院院士.主要研究方向:对策理论及复杂控制系统结构分析.