基于粗定位与组件树的 MAG 焊图像 熔池边缘提取算法^{*}

陈 丹¹,李 静^{1,2},黄元元¹,徐中路¹,张 弢²

(1. 南京航空航天大学 计算机科学与技术学院,南京 210016; 2. 昆山工业技术研究院工业机器人研究所,江苏 昆山 215347)

摘 要:为了得到清晰、可靠的熔池边缘,提出了一种新的基于组件树模型的 MAG 焊图像熔池边缘提取算法。 对获取的焊缝区域图像,使用区域粗定位方法获得关注的熔池区域,输出标准的梯度级图像后,使用组件树模型 提取出熔池边缘。实验证明,借助该模型不仅能够实现 MAG 焊图像熔池边缘提取,并且与 Sobel 变换等方法相 比,有效提高了熔池边缘提取的精度。

关键词:边缘提取;区域粗定位;梯度级图像;组件树模型

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)05-1574-03 doi;10.3969/j.issn.1001-3695.2013.05.077

Weld pool edge extraction method based on passive light via coarse localization and component tree model

CHEN Dan¹, LI Jing^{1,2}, HUANG Yuan-yuan¹, XU Zhong-lu¹, ZHANG Tao²

(1. School of Computer Science & Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Industrial Robot Research Center, Industrial Technology Research Institute, Kunshan Jiangsu 215347, China)

Abstract: In order to get clear and reliable edge of the weld pool, this paper proposed a new weld pool edge extraction method based on passive light via component tree model. It achieved the focused weld pool region by applying region coarse localization method on the welding seam image. It used component tree model to extract the edge of the weld pool according normalized gradient magnitude image. Compared with the traditional method, the experimental result shows that the precision of weld pool extraction is greatly improved.

Key words: edge extraction; region coarse localization; gradient magnitude image; component tree model

现代工业产品(如航空航天产品、桥梁、压力容器、核电设 备等)对焊接质量的要求日益提高,为保证焊接质量和提高生 产率,必须对焊接过程实行质量自动控制^[1]。多年来,在基于 熔池视觉的焊接质量控制方面,国内外焊接工作者进行了大量 的研究工作,但研究主要集中在气体保护焊熔池视觉检测、焊 缝熔宽和熔透控制方面,并取得了阶段性成果^[2-4]。在焊接过 程中,熔池几何尺寸的变化是焊接过程实时状态的最直接反 映,因此焊接熔池边缘特征的视觉传感与图像处理技术便成为 研究焊接过程的关键环节之一^[5]。目前国内外对于利用熔池 图像信息来控制焊接质量的研究,主要集中在 TIG 焊这一类干 扰少、飞溅小的焊接工艺中[6]。近年来,熔化极活性气体保护 (metal arc gas, MAG)焊由于其较高的生产效率而引起工程界 的重视,但由于 MAG 焊焊接过程中需要较大的电流,使得电 弧光非常强烈,加上其焊接过程伴随的熔滴过渡和飞溅干扰, 国内外开展该方面的研究成果较少^[7,8]。因此,研究 MAG 焊 熔池边缘提取算法对焊接过程质量控制具有非常重要的意义。 传统图像处理方法(如阈值法、边缘检测法、数学形态学 法、区域处理法等)在熔池图像处理中都有应用,但是目前的 方法都有一定的局限性^[9]。近来,李静等人^[10]提出了基于区 域定位与 CV 模型的熔池边缘提取方法,初步验证了区域粗定 位对熔池边缘提取的有效性。2010 年 Donoser^[11]提出了一种 新的边缘提取的方法(linked edges as stable region boundaries), 该方法在两个被大家所熟知的数据集(ETHZ 形状分类集和 Weizmann 数据库)中验证过,可以有效地获取图像的边缘。这 两项研究打开了该领域研究的新局面。本文根据 GMAW 焊的 特点,拟在组件树模型的基础上,结合熔池区域粗定位,对由 CCD 摄像机采集到的熔池图像进行熔池的边缘提取,并与 Sobel、CV 主动轮廓模型等边缘提取方法进行了实验比较。

1 熔池图像特征与熔池边缘提取流程

对熔化极气体保护焊的管道打底焊过程中,通过 CCD (charge-coupled device)摄像机和复合滤光技术组成的光学系统实时采集的正面焊缝区域图像进行分析,以实现熔池图像边缘提取。实验的光学系统采用分辨率为 768 × 494 的 CCD 工

收稿日期:2012-08-22;修回日期:2012-09-27 基金项目:基本科研业务费专项科研项目(NS2012136);江苏省企业博士集聚计划资助项目 作者简介:陈丹(1988-),女,安徽宁国人,硕士研究生,主要研究方向为图像处理与边缘检测技术(candyzgg0703@gmail.com);李静(1976-), 女,吉林伊通人,副教授,硕导,博士,主要研究方向为基于机器视觉的焊接过程质量控制;黄元元(1975-),女,陕西西安人,副教授,硕导,博士,主 要研究方向为图像处理与模式识别技术;徐中路(1989-),男,安徽霍邱人,硕士研究生,主要研究方向为图像处理技术;张弢(1984-),男,上海人,中 级工程师,主要研究方向为焊接机器人. 业黑白相机、焦距为 30 mm 的 Computar 镜头、Imagenation 的图 像采集卡,每秒采集 23 帧图像,同时配备一片超红外滤光片消 除弧光干扰。视觉传感器放置于距离焊枪头部 20 cm 处,沿管 道表面焊接处切线方向观察熔池^[12]。

焊接过程中,通过摄像机获得焊缝熔池区域的图像,送到 计算机进行图像处理,从而实现焊接熔池动态信息的检测。典 型的基于被动光的熔池图像如图1所示。由图1可以看出,熔 池图像具有如下特征:a)CCD相机获得的图像为熔池区域与 背景区域对比较强烈的灰度图像;b)熔池区域形状类似水滴 形状,熔池左侧为焊丝区域、右侧为焊缝区域;c)熔池与焊缝 周围亮色为较强烈噪声。从上述特征可以看出,在熔池提取时 不仅应考虑熔池本身的边缘、亮度等信息,还应考虑熔池的几 何结构信息,利用它们之间的相互约束提高熔池边缘提取的准 确度和可靠性。本文提出了基于区域粗定位与组件树模型的 熔池边缘提取算法,首先使用熔池区域初定位获得关注的熔池 区域,随后使用组件树模型提取熔池边缘。

2 基于区域粗定位与组件树模型的熔池边缘提取

2.1 熔池区域粗定位

在提取之前首先要确定需要处理区域的大小,而不是对 CCD 相机收集到的图像的所有部分都进行处理,那样不仅会 占用计算机内存,还会影响实时处理的速度。因此本文采用熔 池区域粗定位的方法获取感兴趣的熔池区域。

对于固定好的光学系统,焊缝的位置与熔池的相对位置都 是基本固定的。由图1可以看出,熔池区域主要集中在图像上 亮度较高的部分,特征比较明显。基于灰度阈值分割的条件, 图像区域的目标和背景之间的灰度值有明显的差别,可以通过 设定阈值来区分^[13]。因此,为了得到熔池的矩形区域,可以通 过对熔池图像的直方图信息进行分析获取所设定的阈值。

熔池区域粗定位最大限度地保留了有用的信息,以获取关注的熔池区域。熔池图像粗定位的矩形框用 $\Omega(x_0, y_0, x_1, y_1)$ 表示,其中 (x_0, y_0) 表示矩形框的左上角点, (x_1, y_1) 表示矩形框的右下角点。 x_0, y_0, x_1, y_1 满足式(1),其中f(x, y)表示图像中坐标为(x, y)的像素点的灰度值,T为通过分析直方图的信息自适应选取的阈值。

ſ	$x_0 = \min\{x \mid f(x, y) > T\}$	
	$y_0 = \min\{y f(x, y) > T\}$	(1)
ĺ	$x_1 = \max \{ x f(x, y) > T \}$	(1)
l	$\gamma_1 = \max\{\gamma f(x, \gamma) > T\}$	

2.2 组件树模型熔池边缘提取

组件树模型利用了一个被描述为组件树的分层数据结构 来获取稳定的边缘检测结果。组件树的概念最初是在统计学 中为了分类和聚类而提出的,后被 Jones^[14]在图像分析领域重 新定义,用于表示灰度级图像中每个图像的组成部分及各组成 部分间的存在关系。构造组件树模型的过程有两个连续的步 骤:a)在熔池粗定位输出定位好的标准化梯度级图像上建立 一个叫做组件树的分层数据结构;b)分析组件树,通过使用简 单的局部形状匹配方法来比较组件树中不同层次区域的形状, 从而获得最稳定的边界。

2.2.1 构造组件树

任何顶点权重图都可以建立组件树,它的每一个节点包含

阈值化梯度级图像后获得的单个连接区域,它被定义为一个三 元组 G = (V, E, I)。其中: V 是一个有限顶点集, 如图像的像素 集 $V \in \mathbb{Z}^2$ 的子集,因此在本文的应用中 $x \in V$,则 x 被表示为 (x_1, x_2) 。*E* 是图上定义相邻关系的边集, Γ 是一个 *V* 到 *V* 子 集的映射,因此对于每一个像素 $x \in V, \Gamma(x) = \{y \in V | (x, y) \in V\}$ E,如果 $y \in \Gamma(x)$,那么x和y相邻。在本文图像设置中,相邻 关系被定义为标准的像素四相邻 $E = \{(x,y) \in V \times V, |x_1 - y_1|\}$ $|+|x_{2} - y_{2}| = 1$ 。*I* 是一个 *V* 到 *D* 的映射,*D* 是一个允许排序 所有点的有限集。在本文中 $D = \{0, 1, \dots, 255\}$,映射 I 被定义 为标准化的按比例放大到一个8位无符号整数范围的灰度级, 灰度级的值 I 是倒置的,一个低值代表高的梯度值。顶点权重 图在 t 层的交叉区域是 $I_t = \{x \in V | I(x) \ge t\}$ 。每个可能的交 叉区域 I_i 是一个被定义为 $G_i = (V, E)$ 的标准无权重图。 E 是 V上的一个对称的、逆自反的二元关系($(x,x) \notin E$ 且(x,y) ∈ *E*⇔(*y*,*x*) ∈ *E*)。只有当 *I*(*x*) ≥*t* 且 *I*(*y*) > =*t* 时,交叉区域 *I*_t 的边E才连接了相邻的像素(x,y)。

如果在点 x 和点 y 之间的点 $P_i \in V$ 存在一条路径 $P = (P_0, P_1, \dots, P_N)$,那么在路径 $(P_i, P_{i+1}) \in E$ 上的每个像素点都 是有效的。若对于任何一个 $x, y \in X$ 是连接的,那么定义 V 的 子集 X 是连接的。当不能再加其他像素 $z \in V$ 与任何一个 $x \in C$ 相连时,连接的组件部分 C 被定义为 V 的最大子集 C。

利用上述定义来实现组件树模型的构造,如图 2 所示。首 先,将熔池粗定位后获得到的梯度图像划分为 nr_levels 个不同 梯度级(即组件树的层数,本文设置 nr_levels 为 20);然后利用 顶点权重图 G 在 $t \in [1, nr_levels]$ 层上的交叉区域 I_t ,计算出 最小层数 $t_{min} = min \{I(x) | x \in V\}$ 和最大层数 $t_{max} = max \{I(x) | x \in V\}$;并在第 $t \in [t_{min}, t_{max}]$ 对应范围内计算出所有的交叉区 域 I_{t1}, I_2, \dots, I_m ,在每一个交叉区域 I_t 里找到连接的组件部分 C_t 。因为 C_t 是嵌套的,且其内在关系被定义为 $\forall x \in C_t$, $\exists y \in C_{t+1}: x = y$,所以获得的连接组成部分 C_t 可以被组合成一个被 定义为组件树的分层数据结构。其中 C_t 作为 t + 1 层的父 节点。



组件树是输入图像灰度级结构的唯一表示。此外,因为本 文只检测大块相邻区域的稳定边界,所以从组件树中删除小于 固定阈值 δ 的区域节点。

2.2.2 分析组件树

本文分析组件树的方法与 Matas 等人^[15]提出的 MSER (maximally stable extremal region)检测类似。MSER 检测直接 在密度图像上建立组件树,通过比较组件树相邻层次上节点的 区域大小来返回最稳定的节点。而本文的方法关注的是区域 间边界稳定性的分析,测量区域间的形状相似度。

本文使用简单的局部形状匹配方法来比较组件树中不同 层次区域的形状以检测出最稳定的边界。首先要计算 C_i 上的 每个像素到 $C_i^{-\Delta}$ 的边界像素序列的最小距离 DT_i ,找到边界 C_i 和 C_i 间的局部匹配,从而找到关联的边界部分 $\overline{C_i} \subseteq C_i$,它满 (2)

足式(2),其中 ϕ 为最大的边界距离。

$$\overline{C_i} \subseteq C_i \longrightarrow \forall x \in \overline{C_i}: DT_i \leq \Phi$$

最后计算区域 C_i 和 $C_j^{I-\Delta}$ 连接部分的稳定值 $\Psi(C_i)$,稳定 参数 Δ 值的提高会避免严格的稳定性限制。N 为匹配像素的 个数。

$$\Psi(C_t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} DT_i(x_n) \text{ where } x_n \in \overline{C_j}$$
(3)

计算组件树每一个节点稳定值 $\Psi(C_i)$,并找出最稳定的边界,将与之相匹配的边界区域作为检测结果输出。

2.2.3 基于区域粗定位与组件树模型的熔池边缘提取

首先对熔池图片使用熔池区域粗定位算法,找出感兴趣的 熔池矩形区域,计算出两个对角点 (x_0, y_0) 和 (x_1, y_1) 。其次在 获得熔池矩形区域内使用组件树模型算法,在[1, m_levels]层 上计算出最小层数 t_{min} 和最大层数 t_{max} ,并在 $t \in [t_{min}, t_{max}]$ 对应 的梯度图像上找到 $n \land 8$ 连通的区域,删除区域大小小于最小 考虑区域 δ 的区域,将 t 层的 8 连通区域联合成交叉区域,并 将其作为下一层区域的父节点。最后计算组件树的每一个节 点的稳定值 $\Psi(C_t)$,找出最稳定的边界作为结果输出。

3 实验结果与分析

为了验证该方法的熔池边缘提取效果,采用基于 CCD 被 动光的 MAG 打底焊系统采集焊缝图像,在 Intel[®] Core[™]2 Duo CPU、2.00 GB 内存的个人台式计算机上,采用 MATLAB 7.0 作 为开发工具,对提出的方法进行了边缘提取实验。实验中有五 个固定参数:熔池阈值 T 设置为 235、最小考虑区域 δ 设置为 1250、稳定参数 Δ 设置为 12、形状相似度 φ 设置为 2、组件树的 层数 nr_levels 设置为 20。给出采用不同方法提取熔池边缘的 实验结果,对比其性能,主要的指标包括处理时间和最终边缘 提取结果。考虑到目前在熔池与焊缝提取中采用的方法主要 是 Sobel 算子等边缘提取算法,因此从获取的序列图像中选取 了三帧图片进行熔池的边缘提取,将本文算法与传统的 Sobel 算子、CV 主动轮廓模型等方法进行了对比实验,所得结果如图 3 所示。图 3 中, (a) 为 Sobel 算子边缘提取结果; (b) 为 CV 主 动轮廓模型边缘提取结果;(c)为组件树模型边缘提取结果; (d)为本文算法边缘提取结果。从图 3 中可以看出, Sobel 算 子、组件树模型容易提取出伪边缘,后续处理耗时,影响正确 率;CV 主动轮廓模型分割精度不高,不适合焊接领域的准确性 需求;本文方法提取边缘精度高,但由于对图像进行了分级处 理,处理时间高于 Sobel 算子边缘提取方法,可以通过减少分 级的数量来提高实时性。



运行时间小于组件树模型,具有更好的实时性。

表1给出了四种方法对同一幅图像的处理时间。由表1 可以看出,本文算法满足实时性的要求。

	表1	各种熔池边缘提取算法的时间性能比较
--	----	-------------------

熔池边缘提取算法	处理时间 t/s	熔池边缘提取算法	处理时间 t/s
Sobel 算子	0.030 839	组件树模型	0.732 640
CV 主动轮廓模型	0.135 502	本文方法	0.470 849

4 结束语

本文提出一种结合区域粗定位与组件树模型的熔池边缘 提取方法,利用该方法对 MAG 管道打底焊中通过 CCD 获取的 图像进行分析,使用该方法实现了对熔池边缘进行实时提取的 目的,并通过对比实验验证了其有效性和可行性。实验结果表 明,与采用 Sobel 变换等方法进行边缘提取相比,在一般情况 下,各算法都能取得较好的边缘提取效果,但是在噪声干扰强 的情况下,本文算法提取的边缘更加清晰完整,在边缘检测中 具有重要的使用价值。

参考文献:

- 王克鸿,游秋榕,沈莹吉.基于视觉的 MAG 焊气孔缺陷图像特征 初步探讨[J].焊接学报,2006,27(12):13-17.
- [2] 王克鸿,汤新臣,刘永,等. 富氫气保焊熔池信息视觉检测方法试 验研究[J]. 机械工程学报,2004,40(6):161-164.
- [3] CHEN S B, LOU Y J, WU L, et al. Intelligent methodology for sensing, modeling and control of pulsed GTAW, part 1: bead-on-plate welding[J]. Welding Journal, 2000, 79(11):151-163.
- ZHAO D B, CHEN S B, WU L, et al. Intelligent control for the double sided shape of the weld pool in pulsed GTAW with wire filler [J].
 Welding Journal, 2001, 80(11):253-260.
- [5] 吴明亮,黄健康,石玗,等.用遗传算法的阈值选取法检测铝合金 MIG 焊熔池边缘[J].兰州理工大学学报,2008,34(2):24-26.
- [6] 赵冬斌,陈善本,吴林,等.填丝脉冲 GTAW 熔池形状定义和图像 处理[J].焊接学报,2001,22(2):5-8.
- [7] 李云峰,赵熹华,黄滨安,等.视觉传感螺旋管埋弧焊内焊缝自动 跟踪系统[J].机械工程学报,2008,44(7):237-240.
- [8] 岳建峰,李亮玉,王天琪,等.基于正面焊接多信息融合的 GMAW 融透控制[J]. 机械工程学报,2009,45(11):283-287.
- [9] 吴明亮,李妍,黄健康,等.基于蚁群算法的铝合金 MIG 焊熔池边 缘检测[J]. 电焊机,2008,38(5):19-21.
- [10] 李静,秦小麟,李芳,等.基于区域粗定位与 Chan-Vese 主动轮廓 模型的 MAG 焊视觉图像熔池边缘提取[J].机械工程学报,2011, 47(12):74-78.
- [11] DONOSER M. Linked edges as stable region boundaries [C]//Proc of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE Press, 2010:1665-1672.
- [12] GOUMEIDANE A B, KHAMADJA M, NACEREDDINE N. Bayesian pressure snake for weld defect detection [C]//Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. Berlin: Springer, 2009:309-319.
- [13] CHEN Hai-yan, LU Jun-hong. The image process technologies in face recognition [C]//Proc of the 2nd International Conference on Information Science and Engineerring. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010:4151-4154
- [14] JONES R. Connected filtering and segmentation using component trees
 [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 75(3): 215-228.
- [15] MATAS J, CHUM O, MARTIN U, et al. Robust wide base-line stereo from maximally stable extremal regions [C]//Proc of British Machine Vision Conference. 2002:384-393.