电弧焊焊接熔池视觉跟踪技术研究

张春莲，张世豪，王中任，吴何畏
湖北文理学院机械工程学院　湖北襄阳　441053

摘要：焊接熔池跟踪技术是焊接自动化领域中的关键核心技术之一，其目的是通过对焊接过程中熔池状态的实时监控，自动调整焊接参数，保证焊接质量。通过搭建管道焊接条件，采用机器人自动焊接的方法，搭配CCD滤光相机采集熔池图像序列，随后通过Halcon软件针对熔池图像序列进行分析，采用帧间差分法、光流法对图像进行跟踪处理。利用VS软件与Halcon混编进行界面设计实现程序窗口的输出。试验结果表明：两种算法对于熔池图像序列的视觉跟踪有较好的显示效果，熔池视觉跟踪研究对于实现自动焊具有实际意义。

关键词：熔池；帧间差分法；光流法；视觉跟踪

Research on visual tracking technology of weld pool in arc welding

ZHANG Chunlian, ZHANG Shihao, WANG Zhongren, WU Hewei
School of Mechanical Engineering, Hubei University of Arts and Sciences, Xiangyang 441053, Hubei, China

Abstract: Welding pool tracking technology is one of the key core technologies in the field of welding automation, and its purpose is to automatically adjust the welding parameters and ensure the welding quality through real-time monitoring of the weld pool status during the welding process. The weld pool image sequence is collected by the method of robot automatic welding, and the CCD filter camera is used to collect the melt pool image sequence, and then the melt pool image sequence is analyzed by Halcon software, and the image is tracked by the inter-frame difference method and optical flow method. VS software was mixed with Halcon for interface design to realize the output of the program window. Experiments results show that the two algorithms have a good display effect for the visual tracking of the weld pool image sequence, and the research on the visual tracking of the melt pool has a promising application prospect for the realization of automatic welding.

Keywords: molten pools; inter-frame difference method; optical flow method; visual tracking

1　序言

焊接是制造业中至关重要的基础工艺之一，广泛应用于汽车、机械制造、建筑、航空航天、能源等多个行业。随着工业生产的发展，对焊接质量、效率和自动化程度的要求越来越高。机器人焊接能够保证焊接参数（如焊接电流、电弧电压、焊接速度等）的一致性，减少人为误差，从而提高焊接质量和稳定性。焊接熔池跟踪技术是焊接自动化领域中的关键核心技术之一，其目的是通过对焊接过程中熔池状态的实时监控，自动调整焊接参数，保证焊接质量。目前，基于视觉传感的焊缝跟踪技术是研究的热点。利用CCD摄像头、线阵CCD传感器等

第一作者：张春莲，在读研究生，主要从事机电一体化控制技术与系统的研究，E-mail：2398187143@qq.com。
通信作者：吴何畏，教授、硕士生导师，主要从事机电一体化、工业自动化系统的研究，E-mail：142602@qq.com。

设备，通过图像处理算法识别焊缝的位置和形状。这种技术能够在焊接过程中实时获取焊缝信息，并通过控制焊接机器人的动作来实现焊缝跟踪。

电弧焊焊接时，焊件在热源作用下形成具有一定形状的液态金属部分称作熔池，同时在弧焊过程中，熔池金属在电弧力的作用下克服自身重力和表面张力从而排向熔池末端，伴随着电弧的向前移动，远离焊接部分金属冷却并凝固成焊缝，焊缝的特征取决于熔池的形状，熔池的形状又与焊接过程中一系列参数的互相影响有关，为此在一定条件下，通过视觉跟踪并处理焊接过程中熔池的形状，及时调整焊接参数及电弧位置，从而确保不偏离待焊位置并获得均匀一致的焊缝形状。

2　熔池视觉跟踪方案设计

熔池视觉跟踪方案设计涉及硬件选型、图像采集、预处理、分割、特征提取、模型建立、实时控制、系统集成、性能评估和用户界面，旨在实现焊接过程中熔池形状的实时监测和控制，提升焊缝质量和焊接效率。

首先通过CCD相机采集熔池图像，利用Halcon软件进行视频处理，提取目标熔池图像序列。Halcon软件的图像处理通常包括阈值处理、轮廓描述和基本图像处理部分。针对一系列熔池图像，采用动态阈值处理方法，通过动态调整阈值来获得最终的区域输出效果，包括处理弧光、模糊和特征不明显等问题，进行熔池特征提取，使用帧间差分法和光流法进行熔池视觉跟踪，通过VS软件进行混合编程分析图像信息，并设计UI人机交互界面，最终判断焊缝质量。

本次试验所采用的硬件系统如图1所示，包括用于图像采集的CCD相机，其参数详见表1。该系统还包括滤光系统（安装于相机镜头前端，以保护镜头免受强光影响）、待焊接管道、焊接小车及焊枪等设备，焊接管道所涉及的焊接参数见表2。小车通过PLC系统控制焊枪和伴随其运动的相机移动。为确保获得清晰的试验数据及图像，每次试验开始前都需对边缘条件和待焊件的位置进行检查。

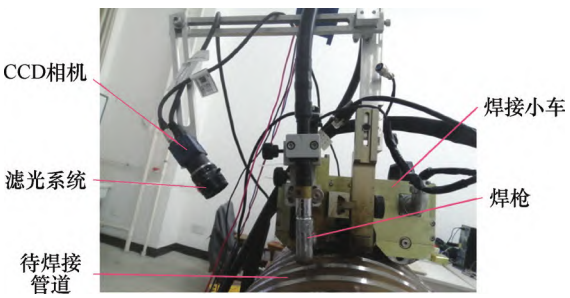


图1　试验硬件系统

表1　相机参数

参数名称	参数数据
像素	1.3MP
帧率/行频/（fps/s）	60
接口	GigE，POE
供电方式	DC6V-26V，POE
图像格式	黑白：Mono8/10/10packed
尺寸（不含镜头座和后壳接口）/mm	29×29×42

表2　管道焊接参数

焊接电流/A	电弧电压/V	焊枪摆速/（mm/s）	焊接速度/（cm/min）	摆幅/mm	焊丝干伸长/mm	焊丝直径/mm
150	17.6	28	14	7	12	1.2

3　捕捉熔池动态图像

帧间差分法和光流法在熔池视觉跟踪的研究中具有各自的优势和适用场景。帧间差分法适用于熔池移动较大或有明显灰度变化的情况，而光流法则适用于追踪熔池细微的运动和形变。

3.1　帧间差分法熔池视觉跟踪流程

帧间差分法是一种通过对视频图像序列相邻两帧做差分运算来获得运动目标轮廓的方法，可以较好地适用于存在多个运动目标和摄像机移动的情形[1]。

进行图像预处理时，将图片中所蕴含的信息分拣出来交给识别模块识别，即消去图像中无关的消息，恢复具有针对性的有用信息，加强有关信息的可检测性并最大限度地简化数据，进而进行特征提取、图像分割、匹配和识别[2, 3]，实现灰度级变换，从而统计灰度直方图，为接下来进行差分选取阈值做准备。

帧间差分法的难点在于熔池阈值的特征点提取，这里选用最大类间方差法进行特征提取，该方法按照图像的灰度特性将图像分为背景和目标两个部分，利用目标区域和背景区域的方差最大思想，达到分割图像的目的。得到合适图像阈值T后，记

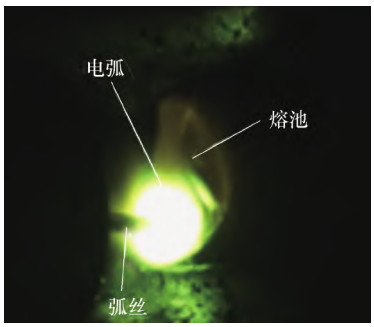
录视频序列中第n帧和第$n+1$帧的图像为f_n和f_{n-1}，两帧对应像素点的灰度值记为$f_n(x, y)$和$f_{n-1}(x, y)$[4]，将两帧图像对应像素点的灰度值相减取其绝对值，得到差分图像Dn，再按照式（1）对每个像素点进行二值化处理，得到二值化图像Rn'。其中，灰度值为255的点视为运动目标点，灰度值为0的点视为背景点；对图像Rn'进行连通性分析，最终可得到含有完整运动目标的图像Rn[5]。

$$Rn'(x,y)=\begin{cases}255, & Dn(x,y)>T\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{1}$$

3.2 帧间差分法熔池跟踪仿真测试

通过Halcon软件读取图像，使用display算子设置窗口的字体属性，dev set算子设置轮廓、颜色和格式属性，然后使用主要算子for I：=1 to NumImage-1 by 1读取熔池序列图像，进行帧间差分法运动目标检测，最后使用rgb1_to_gray将RGB图像转化为灰度图像，处理结果如图2所示。

a）采集的源图像



b）熔池序列图像

c）熔池灰度值图像

图2 图像预处理

使用算子threshold（Image，Region，MinGray，MaxGray）进行图像的区域分割；采用最大类间方差法mean_image找到合适的阈值T，通过阈值T进行区域分割，采用特征直方图选取合适的区域，随后用帧差法进行跟踪、形态学进行二值化图像处理，用closing circle使圆形结构闭合区域，并用算子shape_trans变换区域形状。使用算子select_shape和dev_display找到熔点便于熔池的跟踪，如此往复实现熔池序列图像处理，最后实现熔池图像跟踪。帧差法熔池跟踪结果如图3所示。由图3可知，熔池跟踪效果基本可以实现。

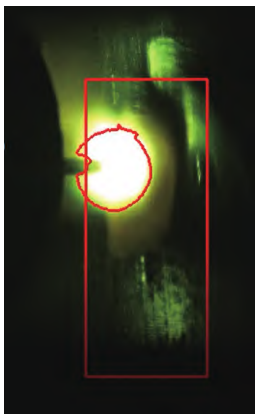


图3 帧差法熔池跟踪结果

3.3 光流法熔池视觉跟踪流程

首先，读取图像并设置窗口位置。然后，定义灰度值的输出模式、region的填充模式，使用rgb1_to_gray算子进行预处理，将熔池的图像序列转化为灰度图像输出，并将RGB图像转化为灰度图像，RGB图像中3个通道是输出图像的前3个通道的传递。

变换公式为

$$\text{Grav}=0.299R+0.587G+0.114B \tag{2}$$

threshold算子是使用全局固定阈值分割图像，在图像画面中挑出在该区间范围内的阈值图像，并将符合这一阈值图像的输出提取出来，为下一步得到熔池区域进行铺垫，其公式为

$$\text{minGray}\leqslant g\leqslant\text{maxGray} \tag{3}$$

使用connection算子将所得到的灰度区域进行分割，使得熔池与背景分割开便于后续的处理。使用select_shape算子对区域内的长度、宽度、圆度、方形度、灰度值等特征进行选择，通过选取特征值来选择其区间，进一步提取所需要的熔池区域。然

后使用shape_trans算子将选取的熔池区域进行凸包性、最大最小外接圆、平行于坐标轴的最小外界矩形等变换，有助于region图像的输出。

考虑到一个像素点I（x，y，t）在第一帧时光的强度，它接下来按照某一dt时刻移动（dx，dy）的距离到下一帧，因为是同一个像素点，光流法是假设它移动前后光强度不变，即

$$I(X,Y,T)=I(X+\mathrm{d}x,Y+\mathrm{d}y,T+\mathrm{d}t) \quad (4)$$

对于上式进行泰勒展开可以得到

$$I(X,Y,T)=I(X,Y,T)+\frac{\partial I}{\partial x}\mathrm{d}x+\frac{\partial I}{\partial y}\mathrm{d}y+\frac{\partial I}{\partial t}\mathrm{d}t+\varepsilon \quad (5)$$

ε表示二阶无穷小，将上列式子化简后每项除以dt，可得到：$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x}\frac{\partial x}{\partial t}+\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}y}\frac{\partial y}{\partial t}+\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}\frac{\partial t}{\partial t}=0$，设$u=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$，$v=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$（$\mu$为$x$方向速度分量，$v$为$y$方向速度分量），令$Ix=\frac{\partial I}{\partial x}$，$Iy=\frac{\partial I}{\partial y}$，$It=\frac{\partial I}{\partial t}$分别表示像素点在$x$、$y$、$t$方向的偏导数，则有：$Ixu+Iyv+It=0$，其中，$Ix$、$Iy$、$It$均可由图像数据求得，其中（$u$，$v$）即为所求光流矢量[6]。

约束方程只有一个，而方程的未知量有两个，这种情况下无法求得u和v的确切值。这种不确定性称为“孔径问题”。此时需要引入另外的约束条件，从不同的角度引入约束条件，导致了不同光流场计算方法，因此按照理论基础与数学方法区别将它们分成4种：基于梯度（微分）的方法、基于匹配的方法、基于能量（频率）的方法、基于相位的方法和神经动力学方法[7]。

针对熔池视觉跟踪，采用基于匹配的方法进行研究，它主要包含两种方法：基于特征和区域，研究采用分割区域，然后根据焊点移动加上熔池移动进行拟合，可以较为准确得到熔池移动轨迹。

3.4 光流法熔池跟踪仿真测试

通过上述图像预处理，对熔池进行光流法跟踪后，最终实现跟踪效果较为良好，基本可以实现熔池跟踪（见图4）。

4 视觉界面设计

1）首导出Halcon中的代码，具体操作是在Halcon主界面的菜单栏中找到“文件”选项里面的“导出”，在VS中选择Windows窗体应用（.NET Framework）进行模板创建，进行项目设置。

2）进行环境配置，将Halcon相关文件放到当

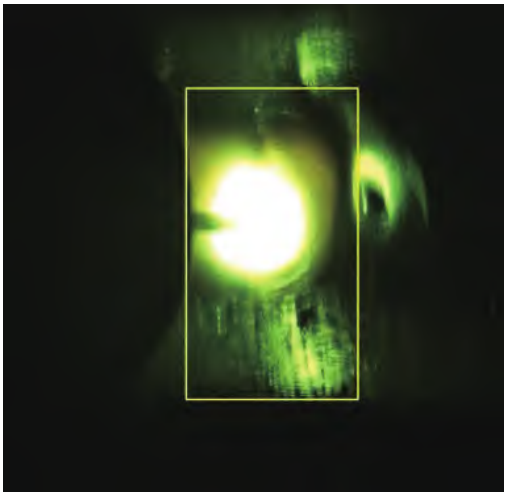


图4 光流法熔池跟踪结果

前目录下，在VS工程中添加halcondotnet.dll，引用halcondotnet.dll命名空间。随后针对该项目进行属性配置，在“C/C++”里的“常规”中添加需要包含的头文件目录路径，然后在“链接器”里的“常规”中添加需要链接的库文件目录路径，分别用分号隔开多个路径即可。

4.1 VS的UI界面设置

（1）VS关于UI界面头文件的设定 图5所示为关于UI界面中按键空间函数在头文件中的定义及触发函数的设定、设计器的变量，以及清除正在使用资源的控制。

```
{
    3 个引用
    partial class Main
    {
        /// <summary>
        /// 必需的设计器变量。
        /// </summary>
        private System.ComponentModel.IContainer components = null;

        /// <summary>
        /// 清理所有正在使用的资源。
        /// </summary>
        /// <param name="disposing">如果应释放托管资源，为 true；否则为 false。</param>
        0 个引用
        protected override void Dispose(bool disposing)
        {
            if (disposing && (components != null))
            {
                components.Dispose();
            }
            base.Dispose(disposing);
        }
```

图5 VS头文件的配置

（2）VS主函数窗口 图6所示为VS主函数窗口的设定，以及每个所需要的控件，如Picturedox控件、Label控件等函数的设置。其中，主函数创建窗口和控件，有利于对函数的简易化操作。

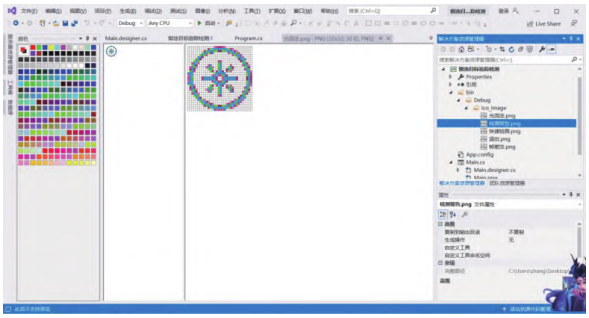
4.2 VS软件界面

完成上述程序编写后，结合个人信息和光流法、帧间差分法相关图标完成界面设计，如图7所示。

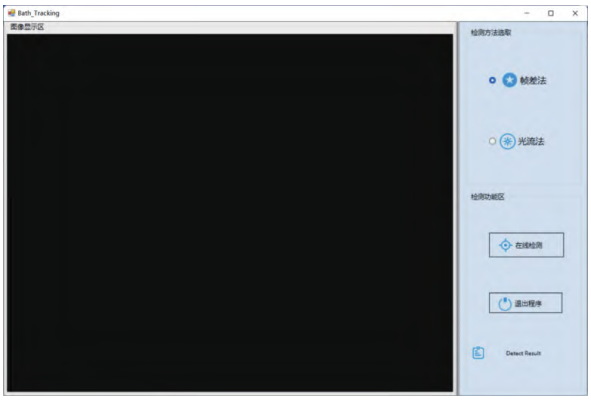
Windows 窗体设计器生成的代码

```
private System.Windows.Forms.SplitContainer splitContainer1;
private System.Windows.Forms.GroupBox groupBox1;
private System.Windows.Forms.GroupBox groupBox2;
private System.Windows.Forms.Button btn_close;
private System.Windows.Forms.Button btn_detect;
private System.Windows.Forms.PictureBox pictureBox_SingleMain;
private System.Windows.Forms.GroupBox groupBox3;
private System.Windows.Forms.RadioButton radioButton2;
private System.Windows.Forms.RadioButton radioButton1;
private System.Windows.Forms.Label label_result;
```

图6　VS主函数窗口的设定



a）操作界面



b）显示界面

图7　界面设计

5　结束语

研究基于焊接管道技术来研究熔池视觉跟踪技术方案，以此为后续焊缝判别提供一些思路。搭建好试验平台，通过CCD相机来采集熔池图像序列，通过Halcon软件进行图像分析处理。本文采用光流法、帧间差分法对熔池图像序列进行跟踪研究。试验结果表明，帧间差分法、光流法能够实现熔池跟踪。通过VS与Halcon软件混编，实现了两种算法对熔池的跟踪并通过UI界面显示跟踪效果。

参考文献：

[1] 闫东升，马晓芬，朱健. 一种视频多运动目标跟踪方法研究[J]. 现代计算机（专业版），2011（18）：17-20.

[2] 尹宾. 块匹配DS算法在视频防抖动中的应用研究[D]. 济南：山东师范大学，2011.

[3] 薛晶滢. 基于GAC模型的交互式图像分割算法研究及应用[D]. 西安：西北大学，2009.

[4] 刘珈铨，侯磊，毕新忠，等. 基于机器视觉的注水泵智能监控方法研究[J]. 石油科学通报，2021，6（2）：282-291.

[5] 葛雯，姜添元. 改进YOLO与Deep sort检测跟踪算法的研究[J]. 计算机仿真，2022，39（5）：186-190.

[6] 生鑫，李争博，付思，等. 燃弧过程中真空旋转电弧轨迹追踪与特性[J]. 电工技术学报，2024，39，（20）：6553-6563.

[7] 李月. 基于光流法和语义分割的视觉SLAM系统研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2023.

MW 20240806

（上接第39页）

研究[J]. 汽车工艺与材料，2019，11（5）：1-5.

[2] 杜行. 新型材料和工艺在汽车轻量化中的应用[J]. 科技创新与应用，2019（5）：148-150.

[3] 刘营凯，沈波，彭星艺，等. 汽车用热成型钢和双相钢电阻点焊可焊性分析[J]. 汽车实用技术，2023，48（3）：154-158.

[4] 潘华，吴岳. DP540双相钢焊接接头组织与拉伸断裂位置研究[J]. 上海金属，2020，42（1）：17-22.

[5] 韩立军，郭院波. 汽车轻量化车身先进连接技术的应用与发展[J]. 金属加工（热加工），2021（4）：1-6.

[6] 李春诚，陈宇，杨波，等. 汽车用高强度双相钢的化学成分和退火温度研究[J]. 金属加工（热加工），2024（4）：19-23.

[7] 韩强，陈沅，麻永林，等. 热轧DP590双相钢接头组织的研究[J]. 焊接技术，2011，40（7）：13-15.

[8] 王秀明，王梓楠. 汽车轮毂加工方法与工艺分析[J]. 金属加工（冷加工），2023（4）：48-51.

[9] 冯毅，路洪洲，黄光杰，等. 铌微合金化对汽车用典型双相钢加工性能的影响研究[J]. 汽车工艺与材料，2022（9）：1-8.

[10] 霍世宗，潘华，丁凯，等. DP540双相轮辋钢焊接接头组织特征及其不均匀变形研究[J]. 上海金属，2019，41（5）：26-31.

MW 20240806