

## 卡尔曼滤波焊缝跟踪控制

高向东, 陈永平, 袁弱男, 李桂华, 陈章兰

(广东工业大学机电工程学院, 广东广州510006)

**摘要:** 在视觉传感的电弧自动焊接过程中, 需要根据视觉信息来控制电弧准确地跟踪焊缝. 由于强烈的弧光干扰, 使得从焊接区图像中直接提取电弧与焊缝的偏差信息十分困难. 为此提出一种利用熔池图像质心和卡尔曼滤波来间接获取电弧与焊缝偏差的方法. 选择熔池图像质心作为状态向量, 建立基于图像质心的状态方程和焊缝位置测量方程. 利用卡尔曼滤波消除过程噪声和测量噪声的影响, 通过对熔池图像质心的状态估计, 准确获取焊缝位置以及电弧与焊缝之间的偏差量, 为自动焊接过程的焊缝跟踪控制提供准确信息. 焊接试验结果表明, 利用卡尔曼滤波方法可有效降低过程噪声和测量噪声的影响, 从而提高焊缝跟踪控制精度.

**关键词:** 焊缝跟踪; 卡尔曼滤波; 熔池图像质心

**中图分类号:** TG316.7 **文献标识码:** A

## Seam tracking control using a Kalman filter

GAO Xiang-dong, CHEN Yong-ping, YUAN Ruo-nan, LI Gui-hua, CHEN Zhang-lan

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology,  
Guangzhou Guangdong 510006, China)

**Abstract:** During an automatic arc welding process which visual sensors are used, the electric arc should be controlled to track the weld seam accurately based on the visual sensing information. However, it is very difficult to acquire the deviation between the electric arc and the weld seam from the welding images because of strong arc disturbance. An approach is proposed that this deviation can be obtained by using the weld pool image centroid and a Kalman filter. The centroid of the weld pool image from a visual sensor is extracted as the measurement eigenvector. Based on the weld pool image centroid, the state equation and the weld position measurement equation are established. The advantages of a Kalman filter is taken to reduce the error of weld detection caused by the process and the measurement noises. Also, the weld position and the deviation between the electric arc and the weld seam can be estimated by using the estimation of the weld pool image centroid state. It can provide the accurate information for seam tracking control during the automatic welding process. Actual welding experimental results have demonstrated the effectiveness that the influence of the process and measurement noises can be reduced and the seam tracking accuracy can be improved by using the Kalman filtering technique.

**Key words:** seam tracking; Kalman filtering; weld pool image centroid

### 1 引言(Introduction)

在自动电弧焊接过程中, 必须控制焊炬使电弧始终对中并跟踪焊缝. 为了精确跟踪焊缝, 首先要通过传感器反馈焊缝位置信息. 由于弧焊过程存在强烈的弧光和噪声等, 给焊缝特征信息的实时传感带来很大困难. 视觉传感器由于其测量精度高、与工件无接触等优点得到广泛研究. 传统方法对焊接区图像进行处理时, 大都是根据图像边缘检测法如Sobel和Laplacian等分析焊缝边缘, 试图直接获取焊缝位置信息<sup>[1]</sup>. 但在多数情况下, 由于弧光噪声的

干扰使得很难获得层次分明的焊缝图像, 所以直接提取焊缝位置信息极为困难. 另外, 传统方法对于焊缝跟踪偏差缺少最优预测, 导致跟踪控制具有较大的滞后性, 影响焊缝跟踪精度.

为此, 提出一种基于卡尔曼滤波视觉传感的焊缝跟踪新方法. 与传统方法直接提取焊缝信息不同, 新方法分析整个焊接区域并提取熔池图像质心坐标, 构成状态向量<sup>[2]</sup>, 建立以图像质心计算焊缝位置的状态方程. 在此基础上, 利用卡尔曼滤波去除系统过程噪声和测量噪声的干扰, 准确获取焊缝位置, 实现

精确的焊缝跟踪自动控制。

## 2 熔池图像质心(Weld pool image centroid)

熔池图像质心是根据图像每行与每列所有像素的坐标及对应的灰度值并考虑权重计算而得,反映了熔池的几何形状及熔池图像的灰度分布信息。设 $i, j$ 分别为图像的行和列,  $g(i, j)$ 为图像 $(i, j)$ 处灰度值,  $m$ 和 $n$ 分别为图像分割后行和列中像素的数量,  $x$ 和 $y$ 为图像行、列方向的质心坐标。则质心计算公式为

$$(x, y) = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m i \times g(i, j)}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j)}, \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m j \times g(i, j)}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j)} \right]. \quad (1)$$

事实上,焊缝偏差与熔池图像质心之间存在必然的内在联系。当电弧与焊缝对中时,熔池的温度场处于一个相对平衡的状态,图像质心则位于图像中心线上;当电弧偏离焊缝时,熔池图像灰度分布的对称性被打破,图像质心将偏离图像中心线,而且电弧偏离焊缝越多,图像质心也将偏离图像中心线越多。所以图像质心的信息直接反映了电弧偏离焊缝的程度。

## 3 质心状态方程和焊缝位置测量方程(Centroid state equation and weld position measurement equation)

为了应用卡尔曼滤波消除焊接过程的噪声影响,必须建立熔池图像质心状态方程和焊缝位置测量方程。为此,以熔池图像质心坐标构成状态向量,该状态向量包括熔池图像质心的当前位置、当前速度和前一采样时刻的位置。

设焊缝处于 $x-y$ 平面,在焊接过程 $k$ 时刻获取图像的质心坐标为 $(x(k), y(k))$ ,在 $k+1$ 时刻为 $(x(k+1), y(k+1))$ ,当图像采样时间为 $T$ ,焊炬在 $x, y$ 方向匀速运动时,可以得到

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + T\dot{x}(k), \\ y(k+1) = y(k) + T\dot{y}(k). \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\dot{x}(k), \dot{y}(k)$ 分别为图像质心在 $k$ 时刻的 $x, y$ 方向上速度。

焊接过程中焊炬在 $x, y$ 方向上的运动受到随机因素干扰相当于随机加速度 $\omega_1(k), \omega_2(k)$ 时<sup>[3]</sup>,质心的运动方程为

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + T\dot{x}(k) + 0.5T^2\omega_1(k), \\ y(k+1) = y(k) + T\dot{y}(k) + 0.5T^2\omega_2(k). \end{cases} \quad (3)$$

$\omega_1(k), \omega_2(k)$ 为 $x, y$ 方向上两个互不相关的随机白噪声序列。当 $k$ 变化时,由于 $x, y$ 方向上运动相互独

立,下面只讨论 $x$ 方向的情况。

引入状态变量  $\begin{cases} x_1(k) = x(k), \\ x_2(k) = \dot{x}(k), \\ x_3(k) = x(k-1), \end{cases}$  构成状态向

量  $\mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix}$ , 它包括图像质心的当前位置、当前速度和前一时刻的位置。 $x$ 方向上的状态方程则为

$$\mathbf{X}(k+1) = \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5T^2\omega_1 \\ T\omega_1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

令  $\Phi(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0.5T^2 \\ T \\ 0 \end{bmatrix}$ , 将系统状态

方程表述为

$$\mathbf{X}(k+1) = \Phi \mathbf{X}(k) + \mathbf{G}\omega(k). \quad (5)$$

为了实现对焊缝的精确跟踪,除了利用图像质心位置测量信息外,还引入了图像质心位移测量信息。令  $\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} x_{pm}(k) \\ x_{dm}(k) \end{bmatrix}$ ,  $x_{pm}(k)$ 为 $k$ 时刻质心位置测量值,  $x_{dm}(k)$ 为 $k$ 时刻质心位移测量值,  $\nu_{xp}(k)$ 和 $\nu_{xd}(k)$ 分别是位置测量噪声及位移测量噪声,此时建立基于质心位置和质心位移的测量方程为

$$\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} x_{pm}(k) \\ x_{dm}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu_{xp}(k) \\ \nu_{xd}(k) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

令  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$ ,  $\boldsymbol{\nu}(k) = \begin{bmatrix} \nu_{xp}(k) \\ \nu_{xd}(k) \end{bmatrix}$ , 系统测量方程可以表述为

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}\mathbf{X}(k) + \boldsymbol{\nu}(k). \quad (7)$$

图像质心的初始位置可在采样 $k=0$ 时刻获得,质心移动速度初始值则在采样 $k=0$ 和 $k=1$ 时刻获得。初始偏移量设为质心位移的初始值,质心位置初始值认为在焊缝的中心线上。

焊缝位置测量方程为

$$\mathbf{S}(k) = \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \mathbf{Z}(k). \quad (8)$$

其中: $s_1(k)$ 为 $x$ 方向焊缝位置,  $s_2(k)$ 为 $x$ 方向焊缝偏差的增量。 $c_1$ 和 $c_2$ 为比例系数。

### 4 卡尔曼滤波算法的应用(Application of Kalman filtering algorithms)

式(5)和(6)中系统噪声 $\omega(k)$ 和测量噪声 $\nu(k)$ 是零均值高斯白噪声, 自协方差分别为 $Q$ 和 $R$ ,  $P(k)$ 为滤波协方差. 则卡尔曼滤波递推算法<sup>[3]</sup>为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{滤波估计方程:} \\ \hat{X}(k) = \\ \Phi \hat{X}(k|k-1) + K[Z(k) - H\hat{X}(k|k-1)]; \\ \text{滤波增益方程:} \\ K(k) = \\ P(k|k-1)H^T[HP(k|k-1)H^T + R]^{-1}, \\ \text{其中 } P(k|k-1) = \Phi P(k-1)\Phi^T + GQG^T; \\ \text{滤波协方差方程:} \\ P = [I - K(k)H]P(k|k-1). \end{array} \right. \quad (9)$$

在根据量测值进行滤波估计时, 滤波计算过程分为3个步骤, 见图1.

**第1步** 在已知 $(k-1)$ 时刻估计值的条件下, 用系统矩阵 $\Phi$ 乘以 $\hat{X}(k-1)$ 得到 $(k-1)$ 时刻对状态向量 $k$ 时刻预测值 $\hat{X}(k|k-1) = \Phi \hat{X}(k-1)$ .

**第2步** 用量测矩阵 $H$ 乘以 $\hat{X}(k|k-1)$ , 得到在 $(k-1)$ 时刻对 $k$ 时刻的测量数据的预测值 $\hat{Z}(k|k-1) = H\Phi \hat{X}(k-1)$ , 再用实测值减去预测值得到残差 $E'(k) = Z(k) - \hat{Z}(k|k-1) = Z(k) - H\Phi \hat{X}(k-1)$ , 然后利用滤波增益矩阵 $K(k)$ 乘以 $E'(k)$ 得到修正量.

**第3步** 将预测值 $\hat{X}(k|k-1)$ 加上修正量 $K(k)E'(k)$ , 得到对状态向量的滤波估计值.

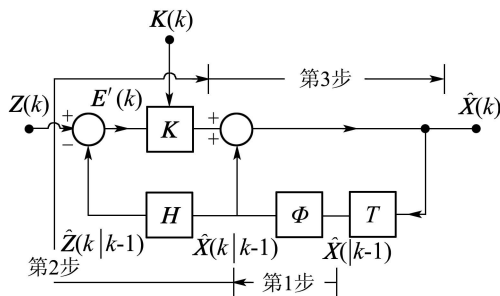


图1 卡尔曼滤波估计计算

Fig. 1 Kalman filtering estimation algorithms

滤波过程中的滤波增益只与 $\Phi, G, Q, R$ 以及滤波协方差矩阵的初值 $P(0)$ 相关, 与估计值、测量值无关, 利用 $K(k) = P(k|k-1)H^T[HP(k|k-1)H^T + R]^{-1}$ 独立于滤波过程离线计算.

### 5 焊接工艺试验(Welding experiments)

通过视觉传感系统摄取熔池图像并计算出图像质心, 利用卡尔曼滤波算法对图像质心进行状态估

计, 准确获取焊缝偏差. 焊接试验工艺条件见表1.

表1 焊接工艺试验条件

Table 1 Welding experimental conditions

焊接方法	焊接区域/材料/ (mm×mm×mm)	保护气流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	电流/ A	速度/ (mm·s)
TIG对接	200×150×2/Q235	7~10	60~90	2.51~4

### 5.1 熔池图像质心与焊缝偏差之间的数学关系(Mathematical relation between welding pool image centroid and seam offset)

熔池图像质心与焊缝位置存在一定的数学关系, 且受到焊缝间隙、焊接电流及焊接速度的影响. 焊炬在图像中的位置是固定的, 为方便起见, 通常分析焊缝偏差 $S_x$ (焊缝中心与焊炬中心之差)与质心偏差 $Z_x$ (质心与焊炬中心之差)的数学关系. 在焊炬垂直于焊件、视觉标定0.06 mm/pixel和表1的条件下, 可得到质心偏差 $Z_x$ 与焊缝偏差 $S_x$ 的关系<sup>[4]</sup>, 如图2所示. 图中不仅可以看出 $Z_x$ 与 $S_x$ 的定量关系, 也很容易看出二者的定性关系. 例如, 当焊缝左偏时, 右半熔池灰度增加, 质心偏差增大. 当焊缝完全落入左半熔池时, 质心偏差最大. 但当焊缝继续左偏时, 左半熔池灰度增加, 则质心偏差反而减小. 当焊缝完全离开熔池(相当于平板堆焊), 质心偏差不再变化.

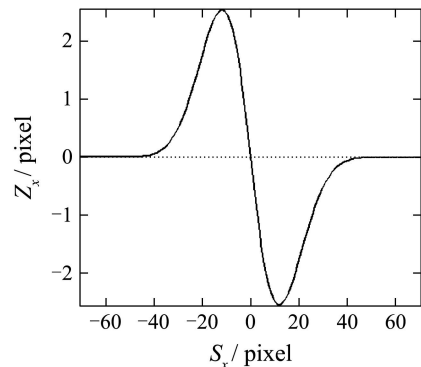


图2 质心偏差与焊缝偏差关系曲线

Fig. 2 Relation curve between centroid-offset and seam offset

改变焊接电流、焊缝间隙和焊接速度等主要焊接参数, 可以得到实验样本数据, 经过多元线性回归模型分析, 得到质心偏差与焊缝偏差之间的数学关系<sup>[4]</sup>:

$$Z(x) = -(0.03035w + 0.1218) \times \sin((0.1415 + 0.0163v - 0.0007I + 0.0023w) \times S_x e^{\frac{|S_x|}{79.4319+8.75v+0.3282I-1.7383w}}), \quad (10)$$

其中:  $Z_x$ 为质心偏差(pixel),  $S_x$ 为焊缝偏差(pixel),  $w$ 为焊缝宽度(pixel,  $w \neq 0$ ),  $v$ 为焊接速度(mm·s<sup>-1</sup>),

$I$ 为焊接电流(A).

### 5.2 卡尔曼滤波试验分析(Experimental analysis of Kalman filtering)

两块待焊钢板由夹具固定在试验工作台上, 由于焊接试验过程中钢板热变形对于焊缝中心位置影响较小, 因此可将焊接前的焊缝中心视作焊接过程中的焊缝中心<sup>[5]</sup>. 焊接前获取焊缝图像并以图像左上角作为像素(pixel)坐标原点, 得到焊缝中心 $x$ 方向上的坐标 $x = 89$ , 该坐标值作为试验的参照点. 试验采样时间40 ms, 图3(a)和3(b)分别为相邻 $t_1$ 和 $t_2$ 时刻的焊接熔池图像, 图中给出了每幅图像 $x$ 方向上的质心坐标值. 由于位移测量噪声为非零均值白噪声, 故试验采用式(4)和(6)进行递推.

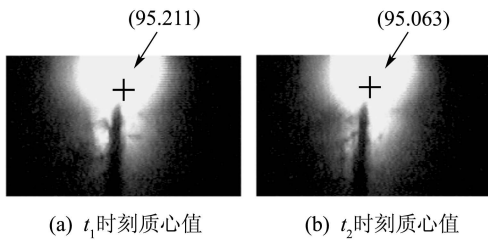


图3 熔池图像质心

Fig. 3 Centroid of weld pool images

为确定滤波状态初值, 可以通过 $t_1$ 和 $t_2$ 的图像质心计算得到. 将 $t_1$ 时刻的图像质心作为初始位置 $x_1(k) = 95.211$ , 在得到 $t_2$ 时刻质心位置95.063之后计算得出移动速度初始值 $x_2(k) = -0.148$ . 根据公式(9), 首先得到 $k = 1$ 时刻状态向量的预测值 $\hat{X}(2|1) = \begin{bmatrix} 95.226 \\ 0.14 \end{bmatrix}$ , 然后计算 $k = 1$ 时刻测量值的预测值,  $\hat{Z}(2|1) = 95.226$ , 此刻的测量值为 $Z(2|1) = 95.063$ , 得到测量值的滤波值 $\hat{Z}(k) = H\hat{X}(k) = 95.1664$ , 完成一次滤波, 然后依次递推, 完成所有试验数据的滤波计算.

图4为熔池图像质心测量值、滤波值以及焊缝中心值的试验结果, 图中质心测量值曲线为控制系统直接利用图像质心信息控制焊炬跟踪焊缝的结果, 质心滤波值曲线为控制系统利用图像质心滤波后的信息控制焊炬跟踪焊缝的结果. 焊接起始时焊炬偏离焊缝较多, 这一点从图3(a)和3(b)也能看出, 因此图像质心变化范围也比较大, 但图像质心测量值和预测值均能较快地逼近实际焊缝中心.

为了更好地分析跟踪误差, 对图4的误差分析从80个采样点开始, 分析结果如图5所示. 对图5中滤波误差(虚线)与测量误差(实线)进行比较, 测量误差的协方差为1.4186, 滤波估计误差的协方差为1.3692. 明显看出, 噪声干扰经过滤波后可以得到了较大的抑制. 实际焊接结果表明, 以图像质心为

跟踪控制对象的控制系统在对质心数据应用卡尔曼滤波之后可以较好地减小噪声影响, 有效提高焊缝跟踪精度.

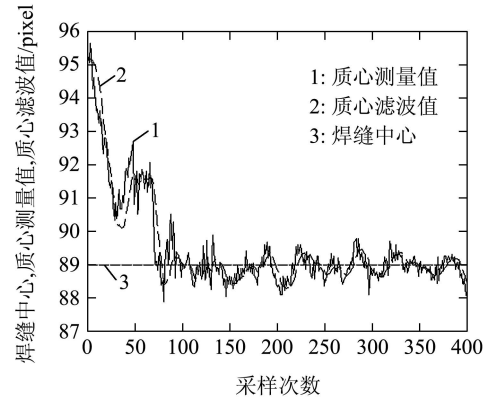


图4 焊缝中心、测量值与滤波值的比较

Fig. 4 Comparison of measurement value, filtering value and weld center

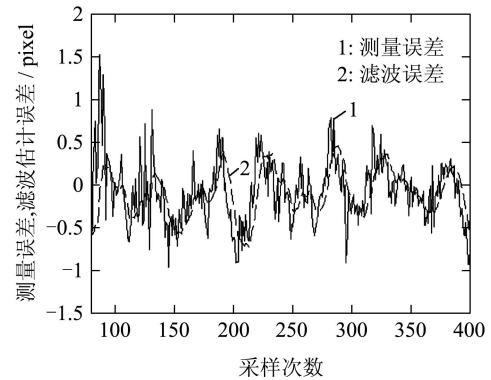


图5 测量误差与滤波误差

Fig. 5 Measurement error and filtering error

## 6 结论(Conclusion)

针对基于视觉传感的焊缝跟踪控制系统, 利用熔池图像质心值和卡尔曼滤波技术可以减小测量噪声和过程噪声对焊缝跟踪偏差的影响. 通过建立熔池图像质心状态向量, 利用卡尔曼滤波实现对图像质心的状态估计, 为自动焊接控制系统提供准确的焊缝位置测量信息. 试验结果论证了该方法的有效性.

## 参考文献(References):

[1] KUO H C, WU L J. An image tracking system for welded seams using fuzzy logic[J]. *J of Materials Processing Technology*, 2002, 120(1-3): 169 - 185.  
 [2] 高向东, 罗锡柱. 一种基于图像质心的焊缝跟踪新方法[J]. *焊接学报*, 2003, 24(6): 15 - 18.  
 (GAO Xiangdong, SUCK J N. A novel method for seam tracking based upon image centroid[J]. *Trans of the China Welding Institution*, 2003, 24(6): 15 - 18.)