

## 核相关/卡尔曼滤波焊缝路径识别新方法研究

杜健准, 张艳喜, 王静静, 高向东\*

广东工业大学广东省焊接工程技术研究中心, 广东 广州 510006

**摘要** 针对线激光视觉传感的焊缝跟踪系统在焊接过程中易受弧光、飞溅等噪声干扰而出现焊缝位置识别精度不高的问题,本研究团队提出了一种基于核相关/卡尔曼滤波算法的焊缝路径识别方法。利用图像处理方法提取焊缝中心区域,在焊接过程中利用核相关滤波(KCF)算法实时定位焊缝中心,根据响应图峰值旁瓣比(PSR)对焊缝目标模板进行自适应更新,以提高模板的抗干扰能力。采用状态扩增法建立带有色观测噪声的焊缝中心位置的卡尔曼滤波模型,对焊缝中心进行最优估计,进一步提高系统在强噪声环境下的焊缝路径识别精度。分别进行对接焊缝和搭接焊缝路径识别试验,试验结果表明:所提算法能在有强烈弧光和飞溅的工况下实现焊缝路径的准确识别,识别误差能分别控制在 0.137 mm 和 0.105 mm 以内。

**关键词** 激光技术; 图像处理; 焊缝跟踪; 卡尔曼滤波; 核相关滤波

**中图分类号** TG409

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL202249.0202009

## 1 引言

焊缝识别与跟踪是实现焊接自动化的重要基础<sup>[1]</sup>。面向焊缝跟踪的激光视觉传感器具有视觉信息丰富、采集过程稳定、与工件无接触等优点,因此在工程中被广泛运用<sup>[2]</sup>。减小激光条纹与焊接熔池的距离有利于提高跟踪精度,但同时视觉传感器采集到的焊缝图像会受到更加强烈的弧光和飞溅噪声的干扰,在这种环境下,大部分焊缝图像处理算法将会失效。因此,在强噪声干扰下实现精准与稳定的焊缝跟踪一直是学科研究的热点<sup>[3-4]</sup>。

在焊缝中心位置的检测方面,研究人员通常采用图像处理算法提取与分析激光条纹的几何特征,最终获得焊缝位置信息。文献[5]采用一种方向模板与脊线跟踪相结合的方法来提取激光条纹的中心线,然后利用斜率分析法和最小二乘法提取焊缝特征点;文献[6]利用目标跟踪方法搜索焊缝区域,在焊缝区域内运用序列灰度重心法提取条纹的中心线,然后采用双阈值递归最小二乘法拟合条纹中心线;文献[7]利用快速图像分割算法对焊缝图像进行区域分割,然后采用卷积神经网络(CNN)识别焊缝

区域,在识别区域内根据激光条纹的形态特征搜索焊缝特征点。然而,传统的焊缝图像特征提取算法要求激光条纹的成像质量较高,当噪声干扰严重时,利用此类算法进行焊缝识别容易出现较大误差。近年来,目标跟踪领域取得了长足发展,这使其应用于焊缝跟踪成为可能。文献[8]提出了一种基于方向直方图特征的粒子滤波 V 型焊缝跟踪算法,该算法能在有弧光和飞溅的工况下精确计算出焊缝特征点的位置;文献[9]通过深度卷积网络对焊缝图像进行特征提取,然后联合分层的相关滤波器对焊缝位置进行检测,取得了良好的效果。上述目标跟踪算法框架在强噪声环境下具有较高的焊缝位置识别精度,但算法的复杂度较高,需要配备高性能工业计算机进行运算,综合成本较高。

核相关滤波(KCF)目标跟踪算法具有良好的准确性和实时性,利用该算法可以实现焊接过程中焊缝中心区域的定位。然而,复杂的焊接环境充斥着弧光、飞溅等强噪声,在长时间的强噪声干扰下,核相关滤波算法难以始终准确地定位焊缝中心。针对这一问题,本研究团队提出了一种基于核相关/卡尔曼滤波算法的焊缝路径识别方法。首先利用图像处

收稿日期: 2021-05-31; 修回日期: 2021-06-22; 录用日期: 2021-07-08

基金项目: 广州市科技计划(202002020068, 202002030147)

通信作者: \*gaoxd666@126.com

理方法在焊缝图像中自动检测焊缝中心区域,然后利用核相关滤波定位焊缝中心区域,并根据滤波响应峰值旁瓣比(PSR)对焊缝目标模板进行自适应更新,从而提高模板对焊接噪声的抗性。同时,构建焊缝中心位置卡尔曼滤波模型,采用状态扩增法处理有色观测噪声,对传感图像中的焊缝中心位置进行最优估计,最终实现焊缝路径的准确识别。

## 2 试验系统

试验系统主体部件包括线激光视觉传感器、图像处理模块、两轴运动平台、电弧焊接设备,如图 1 所

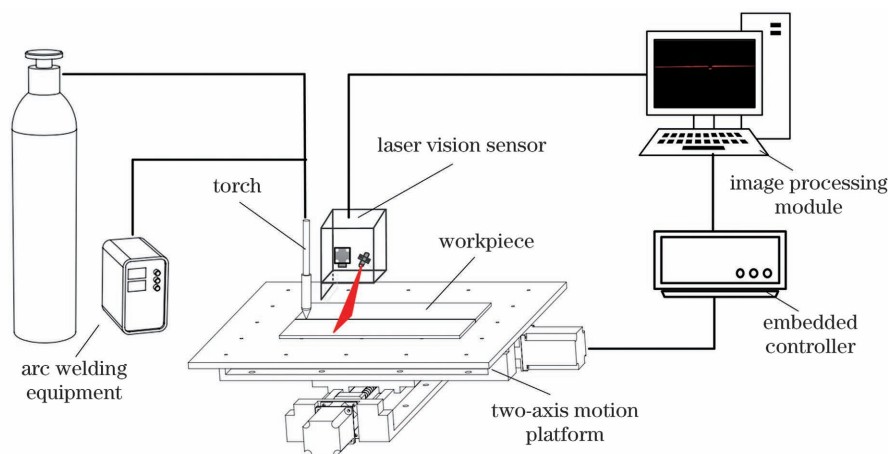


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experiment system

## 3 核相关/卡尔曼滤波算法

### 3.1 提取焊缝中心区域

焊接前的焊缝图像如图 2(a)所示,其受到噪声干扰的程度较低,因此可采用图像处理方法自动提取焊缝中心区域。图 2(b)所示为焊接过程中的焊缝图像,可见,焊缝图像受到焊接过程中弧光和飞溅等强烈噪声的污染,焊缝中心位置的识别难度较大。本文利用核相关滤波算法进行焊缝的定位。图 3 所示为利用图像处理方法提取对接焊缝中心区域的流

示。线激光视觉传感器沿焊接方向安装于焊枪前侧,其主要由单线激光发生器和 CMOS(complementary metal oxide semiconductor)工业相机组成。试验时,将待焊接工件固定在两轴运动平台上,将波长为 650 nm 的线激光投射到工件表面,工业相机实时采集携带焊缝形态信息的激光条纹图像,通过高速数据线将图像信号传输到图像处理模块,再利用智能识别算法准确定位图像中的焊缝位置,由此计算出焊缝位置的像素偏差。参考文献[10]的标定方法获得视觉传感器的测量分辨率为 0.073 mm/pixel,通过转换关系可以求解当前时刻焊缝位置的实际偏差。

程图。首先利用中值滤波去除图像中的多余噪点,如图 3(a)所示。然后采用灰度重心法在滤波后的图像上提取激光条纹的中心线,并连接中心线上的各点。从图 3(b)可以看出,连接线上相邻两点在焊缝处的纵向位置变化明显,因此可以根据相邻点纵坐标的差分值得提取焊缝两侧的特征点,提取结果如图 3(c)所示。根据两侧特征点提取焊缝中心位置的特征点,随后以该特征点为中心生成尺寸为 80 pixel×60 pixel 的矩形框,该矩形框为焊缝中心区域,如图 3(d)所示。

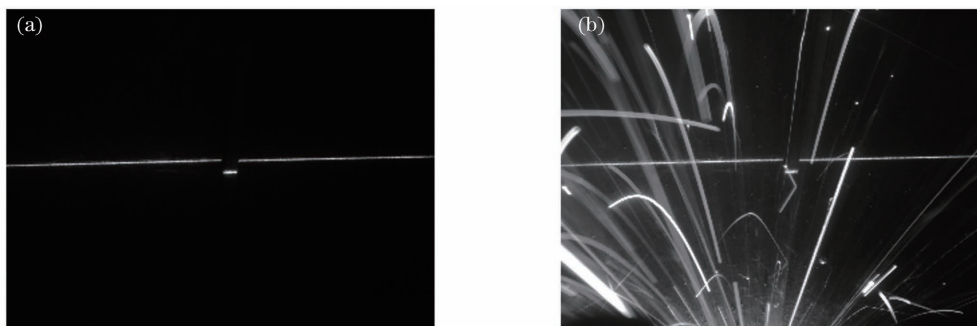


图 2 焊接前和焊接过程中的焊缝图像。(a)焊接前;(b)焊接过程中

Fig. 2 Images of weld before and during welding. (a) Before welding; (b) during welding

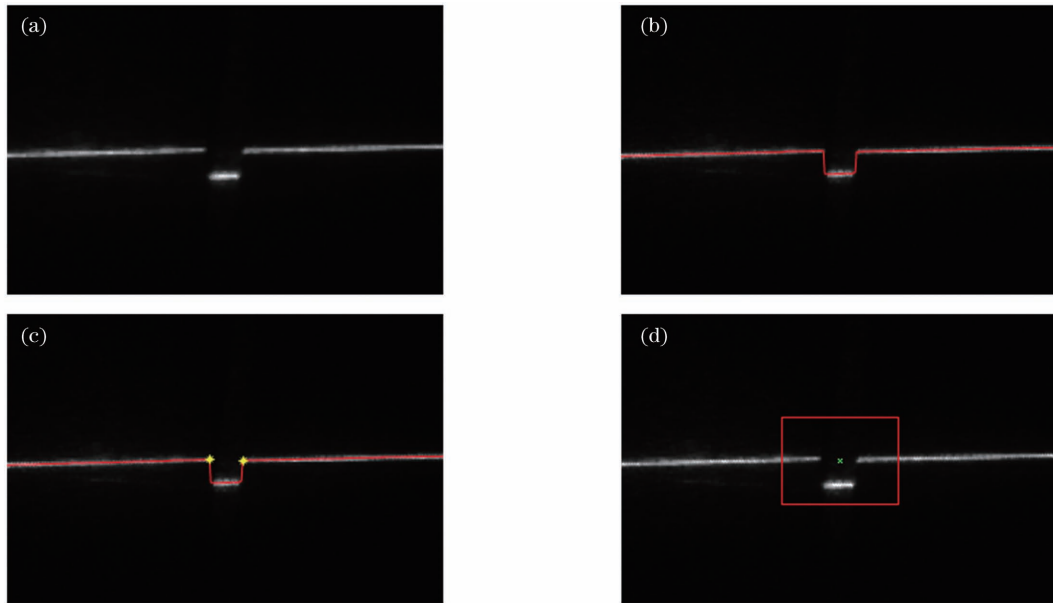


图 3 提取焊缝中心区域流程图。(a)中值滤波;(b)提取激光条纹中心线;(c)提取焊缝特征点;(d)确定焊缝中心区域

Fig. 3 Flow chart of weld center area extraction. (a) Median filtering; (b) centerline extraction of laser stripe; (c) extraction of weld feature points; (d) identification of weld center area

### 3.2 核相关滤波算法

核相关滤波算法的主要内容是训练一个分类器对目标进行识别,将提取的焊缝中心区域作为初始目标,对初始目标进行循环移位,以构造大量训练样本;然后采用岭回归方法训练分类器,同时引入核函数,以增强分类器对目标的识别能力<sup>[11-12]</sup>。对于新输入的焊缝图像,分类器根据特征相关程度进行目标和背景的判别,从而实现焊缝图像目标的识别和定位。

在分类器的训练过程中构造线性回归函数  $f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}$ , 求取权重向量  $\mathbf{w}$ , 使损失函数最小。对应的损失函数为<sup>[11]</sup>

$$\min_{\mathbf{w}} \sum_i [f(\mathbf{x}_i) - y_i]^2 + \lambda \|\mathbf{w}\|^2, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}_i$  为第  $i$  个训练样本;  $y_i$  为样本  $\mathbf{x}_i$  对应的训练标签;  $\lambda$  为正则化系数。

为增强目标分类器的分类能力,引入核函数,将低维度的训练数据通过  $\phi(\mathbf{x})$  映射到高维特征空间,构建鲁棒性更强的回归函数。映射后,  $\mathbf{w}$  的表达式为<sup>[12]</sup>

$$\mathbf{w} = \sum_i \alpha_i \phi(\mathbf{x}_i), \quad (2)$$

式中:  $\alpha_i$  为分类器参数  $\alpha$  中的元素。

映射后新的回归函数如(3)式所示,此时原问题由对向量  $\mathbf{w}$  的求解转化为对向量  $\alpha$  的求解<sup>[12]</sup>。

$$f(\mathbf{z}) = \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{z}) = \sum_i \alpha_i \phi^T(\mathbf{x}_i) \phi(\mathbf{z}) = \alpha^T \phi(\mathbf{X}) \phi(\mathbf{z}). \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{z}$  为新输入的焊缝图像区域;  $\mathbf{X}$  为训练样本组

成的矩阵。令  $\mathbf{K} = \phi(\mathbf{X}) \phi(\mathbf{X})^T$  为训练样本的核函数矩阵,则该矩阵的元素  $k(i, j) = \phi(\mathbf{x}_i) \phi(\mathbf{x}_j)^T$  为核函数。根据文献[13],可得到  $\alpha$  的解为

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{\mathbf{y}}}{\hat{\mathbf{k}}^{xx} + \lambda \delta}. \quad (4)$$

式中:  $\hat{\alpha}$  表示  $\alpha$  的傅里叶变换;  $\mathbf{k}^{xx}$  表示  $\mathbf{K}$  中的第一行向量;  $\hat{\mathbf{k}}^{xx}$ 、 $\hat{\mathbf{y}}$  分别为  $\mathbf{k}^{xx}$ 、 $\mathbf{y}$  的傅里叶变换;  $\delta$  为全 1 的行向量。

对于新输入的焊缝图像区域  $\mathbf{z}$ , 通过循环移位建立候选样本。候选样本的核矩阵为<sup>[13]</sup>

$$\mathbf{K}^z = C(\mathbf{k}^{xz}), \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{x}$  表示训练样本;  $\mathbf{k}^{xz}$  为矩阵  $\mathbf{K}^z$  的第一行;  $C$  表示循环移位。可以求得输入图像在所有候选区域目标位置的滤波响应值为<sup>[13]</sup>

$$f(\mathbf{z}) = F^{-1}(\hat{\mathbf{k}}^{xz} \odot \hat{\alpha}). \quad (6)$$

式中:  $F^{-1}$  表示傅里叶逆变换。识别的焊缝中心区域位置  $(u_t, v_t)$  对应  $f(\mathbf{z})$  的最大值,即响应图的峰值位置,表示为

$$(u_t, v_t) = \max f(\mathbf{z}). \quad (7)$$

得到焊缝中心区域的新位置后,需要对焊缝目标模板进行更新,更新公式为<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} \hat{\alpha}_m = (1 - \eta) \hat{\alpha}_{m-1} + \eta \alpha_m, \\ \hat{\mathbf{z}}_m = (1 - \eta) \hat{\mathbf{z}}_{m-1} + \eta \mathbf{z}_m \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $\hat{\alpha}_m$  为当前帧更新后的分类器参数;  $m$  为帧数;  $\hat{\mathbf{z}}_m$  为当前帧更新后的焊缝中心区域特征;  $\eta$  表示更新

速率, 试验中  $\eta$  取值为 0.03;  $\alpha_m$  为当前帧求解的分类器参数;  $z_m$  为当前帧求解的焊缝中心区域特征。

### 3.3 自适应焊缝目标模板更新策略

焊接过程中视觉传感器采集的焊缝图像会受到不同强度噪声的污染, 不同强度噪声下的焊缝图像及其滤波响应图分别如图 4 所示。由图 4(a) 可以看出, 在轻微噪声下的焊缝图像中, 激光条纹的轮廓比较清

晰。图 4(b) 为轻微噪声下的焊缝图像对应的滤波响应图, 响应图呈单峰分布, 且峰值比较稳定。强噪声干扰下的焊缝图像如图 4(c) 所示, 激光条纹区域受到飞溅等环境噪声的污染, 从而大幅增加了焊缝中心位置的识别难度; 该环境下的滤波响应图如图 4(d) 所示, 可以看出此时响应图的峰值急剧下降, 焊缝图像目标区域相对于背景区域的响应值不太突出。

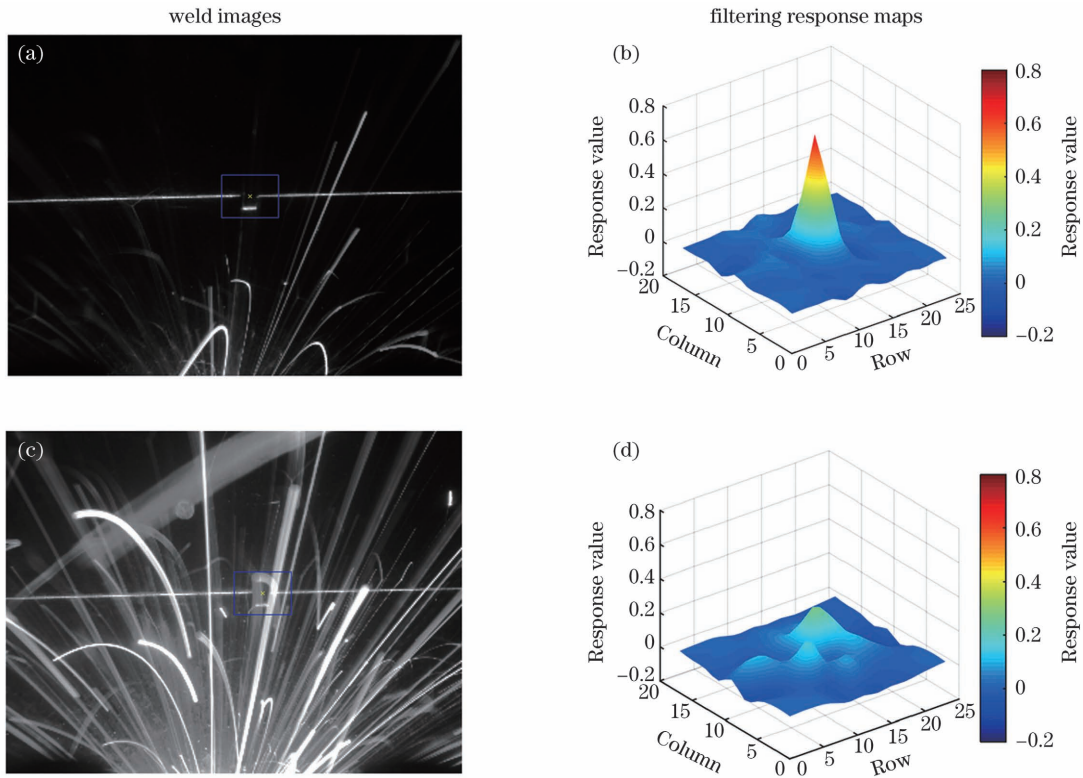


图 4 不同强度噪声下的焊缝图像及其滤波响应图。(a)(b)轻微噪声下的焊缝图像及相应的滤波响应图;(c)(d)强噪声下的焊缝图像及相应的滤波响应图

Fig. 4 Weld images and corresponding filtering response maps under noise of different intensities. (a)(b) Weld image interfered by slight noise and corresponding filtering response map; (c)(d) weld image interfered by strong noise and corresponding filtering response map

综合以上分析, 引入峰值旁瓣比来描述当前焊缝图像中的噪声强度。峰值旁瓣比的表达式为<sup>[14]</sup>

$$R_{ps} = \frac{f_{\max} - \mu_f}{\sigma_f}, \quad (9)$$

式中:  $f_{\max}$  表示滤波响应峰值;  $\mu_f$  和  $\sigma_f$  分别表示滤波响应图的平均值和标准差。合理的模板更新策略可以提高目标跟踪的准确性和稳定性<sup>[15]</sup>。正常情况下, 核相关滤波无条件地更新每一帧目标模板, 当背景干扰严重或跟踪出现偏差时更新目标模板; 引入的噪声信息容易污染焊缝目标模板, 使分类器的判别能力降低, 从而使跟踪精度下降。因此, 本研究团队提出了一种焊缝目标模板自适应更新策略。该策略的具体过程如下: 对于输入的每一帧焊缝图像,

按(9)式计算当前时刻滤波响应图的峰值旁瓣比  $R_{ps}$ , 并将其与给定的阈值  $T$  进行比较, 以判定焊缝目标模板是否需要更新。若  $R_{ps}$  低于给定的阈值  $T$ , 则焊缝目标模板不进行更新, 否则, 焊缝目标模板按(8)式进行正常更新。由此可使模板在跟踪过程中更好地适应焊缝的形变, 同时又能减少模板对焊接噪声的错误学习, 提高模板的抗干扰能力。在试验中, 阈值  $T$  的取值十分重要, 会影响到焊缝识别算法的性能。多次对比试验证明  $T$  设置为 8 时具有良好的效果。

### 3.4 焊缝中心位置卡尔曼滤波

#### 3.4.1 焊缝中心位置滤波过程

卡尔曼滤波作为一种递推的状态估计算法, 不

依赖于焊缝图像的特征信息,而是根据状态信息对焊缝中心的真实位置进行最优估计,因此具有很强的抗干扰能力。以下是焊缝中心位置的滤波过程。

在焊缝图像像素坐标系中描述焊缝中心位置,因焊缝像素偏差主要发生在图像横轴上,故而只对横轴上的焊缝位置进行分析。定义  $u_k$ 、 $u_{k+1}$  分别是  $k$ 、 $k+1$  时刻焊缝中心位置的像素坐标值,  $\hat{u}_k$  为  $k$  时刻焊缝中心位置的速率,于是焊缝中心位置在相邻时刻的关系式为

$$u_{k+1} = u_k + t\hat{u}_k + 0.5t^2\omega_k, \quad (10)$$

式中:  $t$  为采样周期;  $\omega_k$  为  $k$  时刻随机加速度的大小。

根据(10)式建立系统的状态方程和观测方程,即

$$\mathbf{U}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_k \\ \hat{u}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5t^2 \\ t \end{bmatrix} \omega_k = \mathbf{A}\mathbf{U}_k + \mathbf{B}\omega_k, \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{U}_{k+1}$ 、 $\mathbf{U}_k$  分别为  $k+1$ 、 $k$  时刻焊缝中心位置状态向量;  $\mathbf{A}$  为状态转移矩阵;  $\mathbf{B}$  为动态噪声驱动矩阵。

$$Z_k = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} u_k \\ \hat{u}_k \end{bmatrix} + V_k = \mathbf{H}\mathbf{U}_k + V_k, \quad (12)$$

式中:  $Z_k$ 、 $V_k$  分别为  $k$  时刻焊缝中心位置的观测值和观测噪声;  $\mathbf{H}$  为观测矩阵。

卡尔曼滤波器根据状态模型预测焊缝中心的位置信息,预测公式为<sup>[16]</sup>

$$\bar{\mathbf{U}}_k = \mathbf{A}\hat{\mathbf{U}}_{k-1}, \quad (13)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_k = \mathbf{A}\hat{\mathbf{P}}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{Q}\mathbf{B}^T, \quad (14)$$

式中:  $\bar{\mathbf{U}}_k$  为  $k$  时刻预测的焊缝位置状态向量;  $\hat{\mathbf{U}}_{k-1}$  为  $k-1$  时刻焊缝位置状态向量的最优估计;  $\bar{\mathbf{P}}_k$  为与  $\bar{\mathbf{U}}_k$  对应的协方差;  $\hat{\mathbf{P}}_{k-1}$  为与  $\hat{\mathbf{U}}_{k-1}$  对应的协方差;  $\mathbf{Q}$  为过程噪声协方差矩阵。

利用核相关滤波求解  $k$  时刻焊缝中心位置的观测值,并结合预测阶段的先验估计值更新卡尔曼滤波器,得到当前时刻焊缝中心位置状态参数的后验估计。更新公式为

$$\mathbf{G}_k = \bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}, \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{U}}_k = \bar{\mathbf{U}}_k + \mathbf{G}_k (Z_k - \mathbf{H}\bar{\mathbf{U}}_k), \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{G}_k \mathbf{H}) \bar{\mathbf{P}}_k, \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{G}_k$  为增益矩阵;  $\mathbf{R}$  为观测噪声的协方差矩阵;  $\hat{\mathbf{U}}_k$ 、 $\hat{\mathbf{P}}_k$  分别为  $k$  时刻焊缝位置状态向量的最优估计及其对应的协方差;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

### 3.4.2 观测噪声分析及建模

观测噪声可以分为两部分:一部分噪声源于视觉传感器成像过程中受到的光、电、磁、热等因素的

干扰,这类噪声是典型的相关色噪声<sup>[17]</sup>;另一部分噪声对焊缝位置观测值的影响表现为随机性,属于非相关白噪声。于是,焊缝位置观测值可以表示为<sup>[18]</sup>

$$Z_k = \mathbf{H}\mathbf{U}_k + v_k + \eta_k. \quad (18)$$

式中:  $v_k$  为有色观测噪声;  $\eta_k$  为观测白噪声。

标准卡尔曼滤波算法无法直接应用于存在有色观测噪声的场合,具有一定的局限性。因此,本文采用状态扩增法处理有色观测噪声,以降低有色观测噪声对焊缝位置识别精度的影响。假设有色观测噪声服从一阶自回归模型,由白噪声序列驱动生成自相关色噪声,即

$$v_k = \psi v_{k-1} + \xi_{k-1}, \quad (19)$$

式中:  $\psi$  为相关系数;  $\xi_{k-1}$  是均值为零的高斯白噪声。

通过扩展状态向量,将有色观测噪声加入状态向量,于是新的状态方程和观测方程分别为

$$\mathbf{U}_k^* = \mathbf{A}^* \mathbf{U}_{k-1}^* + \mathbf{B}^* \mathbf{W}_k^*, \quad (20)$$

$$Z_k^* = \mathbf{H}^* \mathbf{U}_k^* + \eta_k, \quad (21)$$

式中:  $\mathbf{U}_k^* = [u_k \quad v_k]^T$ ,  $\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & \psi \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}$ ,

$\mathbf{W}_k^* = \begin{bmatrix} \omega_k \\ \xi_k \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{H}^* = [\mathbf{H} \quad \mathbf{I}]$ 。按(13)~(17)式进行

标准卡尔曼滤波,就可以实现有色观测噪声条件下焊缝中心位置的最优估计。

### 3.5 核相关/卡尔曼滤波算法流程

针对焊缝中心的定位,核相关/卡尔曼滤波算法在核相关滤波算法的基础上加入抗干扰的焊缝目标模板自适应更新机制,同时建立卡尔曼滤波模型对焊缝位置进行最优估计,以进一步提高算法在强噪声环境下焊缝路径的识别精度。另外,核相关滤波和卡尔曼滤波均具有运算速度快、节省计算资源的优势,从而保证了核相关/卡尔曼滤波算法具有良好的实时性。该算法的具体流程如下:

- 1) 初始化核相关滤波器,利用图像处理方法提取焊缝中心区域,确定焊缝图像目标;
- 2) 初始化卡尔曼滤波器,建立焊缝位置参数滤波模型;
- 3) 读取下一帧焊缝图像,利用核相关滤波算法实时定位当前焊缝中心观测位置  $y_1$ ;
- 4) 计算当前时刻滤波响应的峰值旁瓣比  $R_{ps}$ ,若  $R_{ps}$  小于给定的阈值  $T$ ,焊缝目标模板不进行更新,否则进行正常更新;
- 5) 将  $y_1$  作为观测值输入卡尔曼滤波器,并预

测当前焊缝中心的最优位置  $\hat{y}_1$ , 之后返回步骤 3)。

### 4 焊缝路径识别试验及分析

为了验证焊缝路径识别算法的性能, 本研究团队分别进行了对接焊缝和搭接焊缝的路径识别试验, 所选焊件尺寸规格为  $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ , 焊件材料为 Q235 钢, 焊接方法为二氧化碳保护焊。图 5 展示了焊缝路径识别试验方案, 倾斜摆放焊件, 焊缝真实位置呈斜线分布。开启焊机后, 控制焊枪沿水平 ( $x$  方向) 焊接路径前进, 同时视觉传

感器采集焊缝图像并计算焊缝中心的位置信息。焊接方向与焊缝路径如图 5(a) 所示, 焊缝起点位于原点  $o$  处, 焊缝终点位于偏离焊接路径的  $10\text{ mm}$  处, 焊接路径为  $100\text{ mm}$ , 焊枪移动速度为  $2\text{ mm/s}$ , 传感器采集图像周期为  $200\text{ ms}$ , 共采集 250 帧焊缝激光条纹图像。对接焊缝实物图如图 5(b) 所示, 焊接试验工艺参数如表 1 所示。对每帧图像进行处理, 并计算对应的焊缝中心位置, 汇总焊缝位置数据得到识别的焊缝路径。在试验中, 噪声协方差  $Q = [0.01, 0; 0, 0.01]$ , 相关系数  $\psi = 0.5$ , 观测噪声  $\eta_k$  的方差设定为 5。

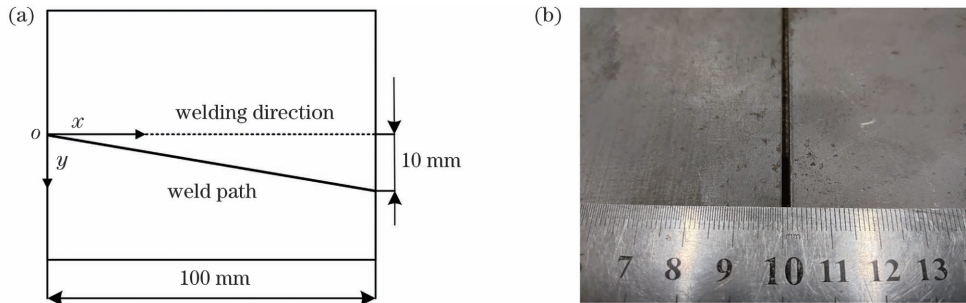


图 5 焊缝路径识别试验方案。(a) 焊接方向与焊缝路径; (b) 对接焊缝实物图

Fig. 5 Experimental scheme of weld path identification. (a) Welding direction and actual weld path; (b) actual image of butted weld

表 1 焊接试验工艺参数

Table 1 Process parameters of welding experiment

Parameter	Value
Welding speed / ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	2
Welding current / A	200
Welding voltage / V	25
Wire speed / ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	1.6
Wire diameter / mm	1

本文采用对比试验, 在相同的试验环境下分别采用核相关滤波算法和核相关/卡尔曼滤波算法进行焊缝路径的识别。图 6 按时间序列展示了两种算法对接焊缝路径的识别结果, 采集的图片均来自焊接现场, 图中符号“ $\times$ ”标记了焊缝特征点所在位置。由一系列图片可知, 在焊接开始前, 两种算法在理想环境下均能准确识别目标, 如图 6(a)、(d) 所示。

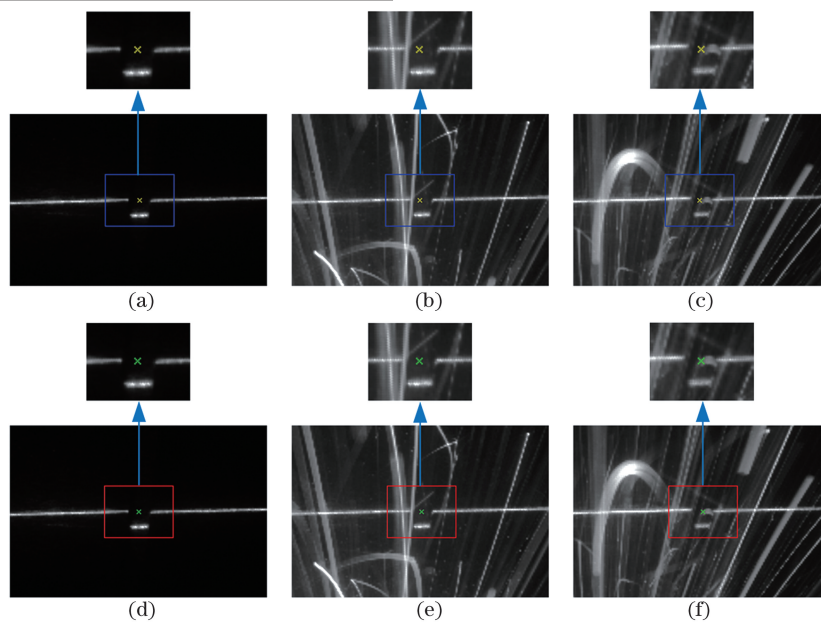


图 6 对接焊缝路径识别结果。(a)~(c) 核相关滤波算法; (d)~(f) 所提算法

Fig. 6 Butted weld path identification results. (a)~(c) KCF algorithm; (d)~(f) proposed algorithm

图 6(b)、(c)、(e)、(f) 为开启焊机后的焊缝图像识别结果, 可以发现: 在识别过程中出现了强噪声干扰; 在强噪声干扰下, 核相关滤波算法产生了较大的识别误差, 识别的目标中心相对于焊缝中心出现了一定程度的偏离, 而所提算法(核相关/卡尔曼滤波算法)的识别效果良好, 能准确定位焊缝中心。另外,

图 7 展示了核相关/卡尔曼滤波算法识别搭接焊缝路径的结果, 可以看出, 所提算法对搭接焊缝同样有着良好的识别效果。综上所述, 在有大量弧光、飞溅等强烈噪声干扰的焊接过程中, 核相关/卡尔曼滤波算法比核相关滤波算法的表现更佳, 能持续稳健地识别焊缝中心位置。

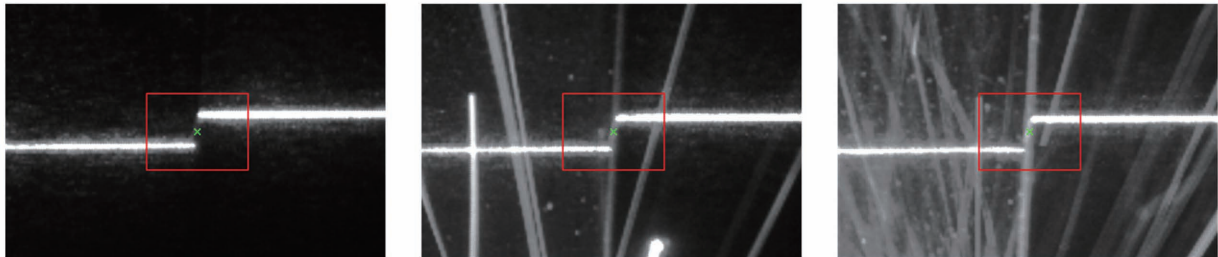


图 7 搭接焊缝路径识别结果  
Fig. 7 Lapped weld path identification results

为了进一步对比核相关滤波算法与核相关/卡尔曼滤波算法在强噪声环境下的识别效果, 接下来对焊缝路径识别结果进行定量分析。分别计算两种算法

识别焊缝中心位置的绝对误差, 对接焊缝的识别路径和识别误差对比分别如图 8(a)、(b) 所示, 搭接焊缝的识别路径和识别误差对比分别如图 9(a)、(b) 所示。

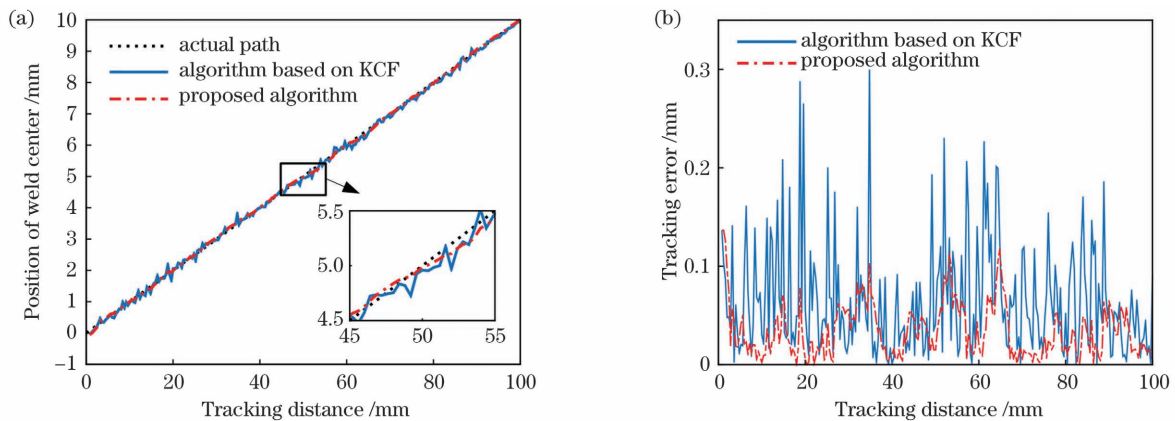


图 8 对接焊缝路径识别结果的定量对比。(a) 识别路径的对比; (b) 识别误差的对比

Fig. 8 Quantitative comparison for butted weld path identification. (a) Comparison of identified weld paths; (b) comparison of identification errors

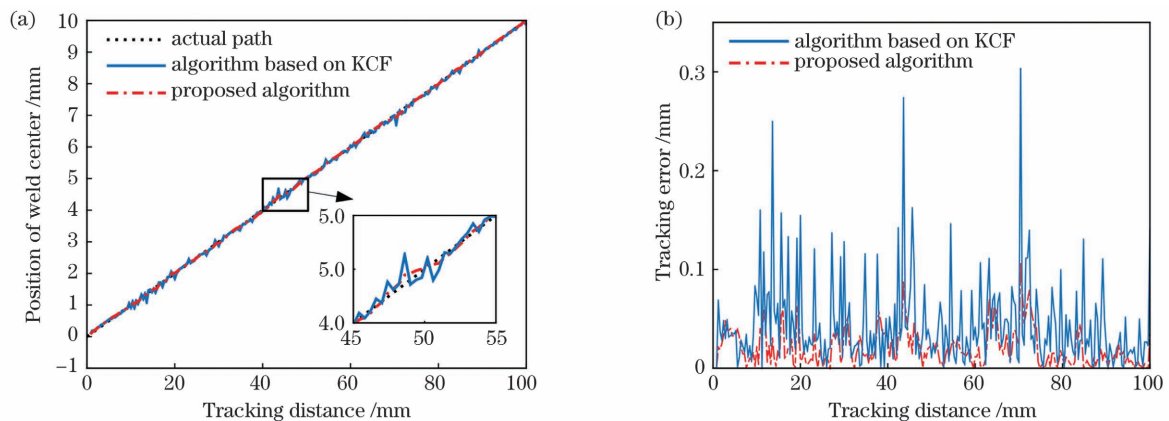


图 9 搭接焊缝路径识别的定量对比。(a) 识别路径对比; (b) 识别误差对比

Fig. 9 Quantitative comparison for lapped weld path identification. (a) Comparison of identified weld paths; (b) comparison of identification errors

表 2 为对接焊缝路径识别试验数据的统计情况,表 3 为搭接焊缝路径识别试验数据的统计情况。结合识别结果和数据进行分析,可以发现,所提算法能有效减小焊缝位置的识别误差,对接焊缝路径的识别误差可以控制在 0.137 mm 以内,搭接焊缝路径的识别误差可以控制在 0.105 mm 以内。另外,对于单帧焊缝图像,所提算法的平均运行时间为 67.868 ms,完全满足工业实时检测的需求。

表 2 对接焊缝路径识别试验数据的统计情况

Table 2 Statistics of experimental data for butted weld path identification unit: mm

Algorithm	Mean absolute error	Maximum absolute error	Standard deviation
KCF	0.065	0.308	0.056
Proposed algorithm	0.034	0.137	0.027

表 3 搭接焊缝路径识别试验数据的统计情况

Table 3 Statistics of experimental data for lapped weld path identification unit: mm

Algorithm	Mean absolute error	Maximum absolute error	Standard deviation
KCF	0.044	0.314	0.044
Proposed algorithm	0.021	0.105	0.018

## 5 结 论

为了提高焊接强噪声环境下焊缝路径的识别精度,本研究团队提出了一种基于核相关/卡尔曼滤波算法的焊缝路径识别方法。该算法根据相关滤波响应的峰值旁瓣比进行焊缝目标模板的自适应更新,可以减少焊接噪声干扰下目标模板的错误更新,提高模板的抗干扰能力。在路径识别过程中利用卡尔曼滤波算法对焊缝中心位置进行递推式最优估计,同时考虑到实际焊接过程存在有色观测噪声,采用状态扩增法处理有色观测噪声,以降低噪声对焊缝中心位置测量的影响。试验结果表明,核相关/卡尔曼滤波算法能准确、稳定地识别对接焊缝和搭接焊缝的中心位置,识别误差可分别控制在 0.137 mm 和 0.105 mm 以内,满足工程上大多数焊接的要求。

## 参 考 文 献

- [1] Gao X D, Chen Y Q, You D Y, et al. Detection of micro gap weld joint by using magneto-optical imaging and Kalman filtering compensated with RBF neural network[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 84: 570-583.
- [2] Guo J C, Zhu Z M, Yu Y F, et al. Research and application of visual sensing technology based on laser structured light in welding industry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1200001. 郭吉昌, 朱志明, 于英飞, 等. 焊接领域激光结构光视觉传感技术的研究及应用[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1200001.
- [3] Jia Z W, Wang T Q, He J J, et al. Real-time spatial intersecting seam tracking based on laser vision stereo sensor[J]. Measurement, 2020, 149: 106987.
- [4] Zou Y B, Chen T. Laser vision seam tracking system based on image processing and continuous convolution operator tracker [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 105: 141-149.
- [5] Lü X, Gu D X, Wang Y D, et al. Feature extraction of welding seam image based on laser vision [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11): 4715-4724.
- [6] Li X H, Li X D, Khyam M O, et al. Robust welding seam tracking and recognition [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(17): 5609-5617.
- [7] Du R Q, Xu Y L, Hou Z, et al. Strong noise image processing for vision-based seam tracking in robotic gas metal arc welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5/6/7/8): 2135-2149.
- [8] Yang G W, Yan S M, Wang Y Z. V-shaped seam tracking based on particle filter with histogram of oriented gradient [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0702002. 杨国威, 闫树明, 王以忠. 基于方向梯度直方图粒子滤波的 V 型焊缝跟踪 [J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0702002.
- [9] Zou Y B, Zhou W L, Chen X Z. Research of laser vision seam detection and tracking system based on depth hierarchical feature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402009. 邹焱燧, 周卫林, 陈向志. 基于深度分层特征的激光视觉焊缝检测与跟踪系统研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402009.
- [10] Ma B, Huang Y J, Zhang Y X, et al. Side-surface form analysis of arc additive manufacturing based on laser vision sensing system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102005. 马波, 黄怡洁, 张艳喜, 等. 激光视觉传感系统的电弧增材制造侧表面成形分析 [J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102005.
- [11] Dong C, Zheng B, Li B, et al. Shiptarget tracking with improved kernelized correlation filters [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(4): 911-921. 董超, 郑兵, 李彬, 等. 改进核相关滤波器的海上船只目标跟踪 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 911-921.



- [12] He R, Lai J Z, Lü P, et al. A robust visual target tracking method based on improved kernel correlation filter in complex environment [J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(6): 71-78.  
何容, 赖际舟, 吕品, 等. 复杂环境下一种基于改进核相关滤波的视觉鲁棒目标跟踪方法[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(6): 71-78.
- [13] Henriques J F, Caseiro R, Martins P, et al. High-speed tracking with kernelized correlation filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(3): 583-596.
- [14] Wang W, Wang C P, Li J, et al. Correlation filter tracking based on feature fusing and model adaptive updating [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 2059-2066.  
王晔, 王春平, 李军, 等. 特征融合和模型自适应更新相结合的相关滤波目标跟踪[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 2059-2066.
- [15] Fan S Y, Guan H, Hou Z Q, et al. Visual object tracking method based on model update strategy by Bhattacharyya coefficient judging [J]. Application Research of Computers, 2017, 34(3): 915-919.  
范舜奕, 管桦, 侯志强, 等. 利用巴氏系数判定模型更新的视觉跟踪算法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(3): 915-919.
- [16] Shi R Q, Li J, Zhang B, et al. Fusion measurement method for NO<sub>x</sub> concentration of flue gas based on Kalman filter[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(24): 63-69.  
石饶桥, 李健, 张彪, 等. 基于卡尔曼滤波的烟气 NO<sub>x</sub> 浓度融合测量方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(24): 63-69.
- [17] Gao X D, Mo L, Xiao Z L, et al. Micro-gap weld tracking based on Kalman filtering of magneto-optical images [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(4): 67-72.  
高向东, 莫玲, 萧振林, 等. 微间隙焊缝磁光成像卡尔曼滤波跟踪算法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(4): 67-72.
- [18] Liu Y, Zhao Z Y, Ding Q X, et al. Robust state estimation for systems with colored measurement noise [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(2): 293-295, 300.  
柳毅, 赵振宇, 丁全心, 等. 带有色观测噪声的系统状态参数鲁棒估计[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(2): 293-295, 300.

## Weld Path Identification Based on Kernel Correlation/Kalman Filters

Du Jianzhun, Zhang Yanxi, Wang Jingjing, Gao Xiangdong\*

*Guangdong Provincial Welding Engineering Technology Research Center, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China*

### Abstract

**Objective** Identifying and tracking weld is important for efficient automatic welding. Among the numerous sensing methods for weld tracking, the laser vision sensing method has been widely adopted because of its high detection precision, rich visual information and stable transmission. Arc lights, spatters and other interferences, which affect online identification of the actual position of the weld, exist in the actual welding environment. An image processing algorithm is used to extract and analyse the geometric features of the laser stripe and obtain the position information of the weld center. This type of algorithm requires high imaging quality of the laser stripe image, and when the noise is severe, causing large identification errors is easy. The kernel correlation filter target tracking algorithm can be adopted to locate the area of the weld center in real-time during welding. However, maintaining accurate weld center location in long-term interference of strong noises is difficult for the kernel correlation filter algorithm. To improve the quality of automatic welding, the vision sensor must accurately identify the weld path. This paper describes a new method for identifying weld paths based on kernel correlation/Kalman filters. Under the interference of strong welding noises, this weld path identification method can accurately and stably locate the weld center. We hope that our innovative approach provides the basis for the online identification of the weld path in the automatic welding.

**Methods** A weld path identification method based on the kernel correlation/Kalman filters algorithm is proposed. An image processing method is adopted to automatically extract the area of the weld center before welding. During welding, the kernel correlation filter algorithm is used to locate the weld center in real-time. To improve the anti-interference ability of the target template of weld, the template is adaptively updated based on the response map's

peak sidelobe ratio. To further improve the identification accuracy of the weld path in the strong noise environment, a state amplification method is used to establish the Kalman filtering model of the position of weld center with colored observation noises, and the optimal position of weld center is estimated. The path identification experiments of the butted weld and the lapped weld are conducted to verify the performance of the proposed algorithm.

**Results and Discussions** After comparing the images of weld before and during welding, we find that the image before welding is less disturbed by noises, so we design an image processing method to automatically extract the area of the weld center (Fig. 3). The extracted area is then used as the target in welding, and the kernel correlation filter algorithm is used to locate the target. The target's position is determined by the response map's peak position. We compare the response maps under different noise intensities and find that the slight noise response map has a single peak with a relatively stable main peak value. The strong noise response map, however, has multiple peaks and its main peak value is reduced (Fig. 4). To reduce the contamination of weld target template by noises, the peak-sidelobe ratio is introduced to describe the noise intensity of the weld image, and the weld target template is updated according to the set threshold of the peak-sidelobe ratio. Considering the weld center measurement information contains process and observation noises, a Kalman filtering model with colored observation noises is established to eliminate the influence of noises and obtain the best estimation of the weld center. The weld target identified using the kernel correlation filter algorithm deviates in the path identification experiment of the butted weld owing to the interference of strong noises, and the proposed algorithm can maintain accurate identification of the weld center (Fig. 6). Experimental results for lapped weld path identification show that the proposed algorithm can also accurately locate the lapped weld's center position (Fig. 7). The identification errors of the butted weld and the lapped weld can be controlled within 0.137 and 0.105 mm, respectively (Table 2, Table 3), and the method demonstrates decent robustness.

**Conclusions** This paper has proposed a method to realise weld path identification. Before welding, the area of the weld center is automatically extracted from the image of the weld. Based on the kernel correlation filter algorithm, the area of the weld center can be located in real-time during welding. To reduce noise contamination of the weld target template, the template is updated based on the response map's peak sidelobe ratio. Specifically, the peak sidelobe ratio is compared with the set threshold to determine template update. A Kalman filtering model of the position of the weld center is established to get the optimal estimation of the weld center and the state amplification method is adopted to process the colored observation noises. The experimental results show that the proposed method can accurately and stably identify the center position of the butted weld and the lapped weld, and the identification errors can be controlled within 0.137 and 0.105 mm, respectively, meeting the requirements of identifying the weld path with high accuracy.

**Key words** laser technique; image processing; weld tracking; Kalman filtering; kernel correlation filter