

色噪声下卡尔曼滤波焊缝跟踪算法与试验研究

高向东¹, 仲训杲¹, 游德勇¹, KATAYAMA Seiji²

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006; 2. 大阪大学 接合科学研究所, 日本 大阪 567-0047)

摘要: 精确控制激光束使其始终对中并跟踪焊缝是保证激光焊接质量的前提. 以大功率光纤激光焊接Type304不锈钢为试验对象, 研究一种有色噪声环境下应用卡尔曼滤波最优状态估计预测激光束与焊缝路径偏差的方法. 使用高速红外视觉传感器摄取焊接区红外热像, 提取焊缝位置参数并构成状态向量, 建立基于焊缝位置参数的系统状态方程和焊缝位置测量方程. 针对系统动态噪声为有色噪声, 通过扩展状态变量的方法建立有色噪声环境下的卡尔曼滤波算法, 对焊缝位置进行最优状态估计并得到最小均方差条件下的焊缝偏差最优预测值, 消除系统噪声对焊缝偏差测量的影响. 焊接试验结果表明新方法可有效抑制有色噪声干扰并提高焊缝跟踪精度.

关键词: 焊缝跟踪; 色噪声; 卡尔曼滤波; 大功率光纤激光焊

中图分类号: TG316.7 **文献标识码:** A

Application of Kalman filter with colored noises to the experiment of seam tracking

GAO Xiang-dong¹, ZHONG Xun-gao¹, YOU De-yong¹, KATAYAMA Seiji²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China;

2. Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Osaka 567-0047, Japan)

Abstract: Accurately controlling the laser beam to follow the welding path is the prerequisite for successful laser welding quality. During laser butt-joint welding of Type 304 austenitic stainless steel plate with a high power continuous wave fiber laser, an approach is investigated to estimate the seam offset between the laser beam and the weld by using the Kalman filter(KF) optimal state estimation in the presence of colored noises. An infrared sensitive high-speed video camera is used to capture the dynamic images of molten pools. The weld position parameters from a molten pool thermal image are extracted as a state eigenvector which includes the current weld position, the variation of weld position and the weld position at previous sampling time. The state-equation based on the weld position parameters, and the measurement-equation for the weld position are established. Considering that the system dynamic noises were colored noises, we develop a KF with colored noises by augmenting the state variables. Therefore, the optimal prediction of the seam offset can be obtained through the optimal state estimation of weld position under the least squares condition. Also, this KF is applied to reduce the error of weld position detection caused by the dynamic noise and the measurement noise; thus, the seam offset between the laser beam and the weld is estimated accurately. Actual welding experiments demonstrate that the seam tracking accuracy can be promoted and the disturbance influence from the colored noises can be reduced by using the Kalman filter with variable augmentation.

Key words: seam tracking; colored noises; Kalman filter; high-power fiber laser welding

1 引言(Introduction)

精确的焊缝跟踪是保证焊接质量的前提. 在激光焊接过程中, 必须控制激光束始终对中并跟踪焊缝. 最具代表性的焊缝跟踪方法为结构光视觉法, 将结构光横跨于焊缝表面, 当焊缝有一定间隙或坡口时, 结构光将产生变形. 通过摄像机采集结构光并经过图像处理可实现焊缝位置测量^[1,2]. 但对于大功率光纤激光深熔焊, 焊缝间隙很小且没有坡口, 传统的结构光视觉传感无法识别焊缝, 且对于焊缝跟踪偏差

缺少最优预测功能, 导致跟踪控制存在滞后性, 影响焊缝跟踪实时性与跟踪精度.

热过程伴随着整个激光焊接, 热辐射蕴涵着激光束与焊缝的对中或偏离信息. 为此, 使用高速红外视觉传感器摄取焊接区热像, 研究一种基于红外视觉传感的焊缝跟踪算法. 考虑到焊接过程噪声多为色噪声, 探索在色噪声环境下的卡尔曼滤波焊缝偏差预测新方法. 从红外热像中提取焊缝特征参数并构成状态向量, 建立基于焊缝特征参数的状态扩展方

程与焊缝位置测量方程,在此基础上应用卡尔曼滤波对焊缝特征参数进行状态最优估计,减小系统动态噪声与测量噪声引起的焊缝位置测量误差,得到激光束偏离焊缝位置的最佳预测值,为焊缝的纠偏提供实时有效的控制参量.

2 焊缝位置参数与焊缝偏差(Weld position parameters and seam offset)

试验装置见文献[3],以10 kW大功率光纤激光深熔焊接Type304不锈钢为研究对象,通过高速视觉传感器摄取熔池红外热像,提取焊缝特征参数并计算激光束与焊缝中心的偏差值.焊接试验条件如表1所示.

表1 焊接工艺试验条件

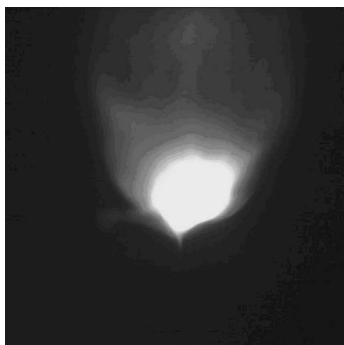
Table 1 Welding experimental conditions

激光功率	光斑直径	焊接速度	氩气流量
10 kW	200 μm	2.5 m/min	20 L/min
摄像速率	滤波波长	焊接方式	
1000 帧/s	960 nm~990 nm	对接焊	

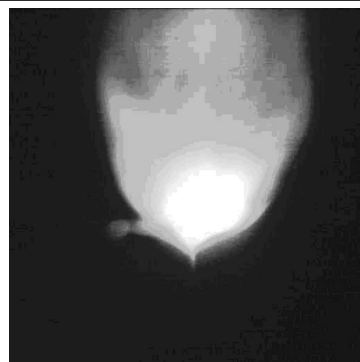
2.1 焊缝位置参数(Weld position parameters)

分析焊接区域红外动态序列图像,在熔池前端存在焊缝特征,如图1(a)所示.为准确识别焊缝位置,通过灰度拉伸得到熔池前端明显的焊缝信息,如图1(b)所示.可以发现,熔池突出角即对应焊缝位置,提取其坐标值并定义为焊缝位置参数.

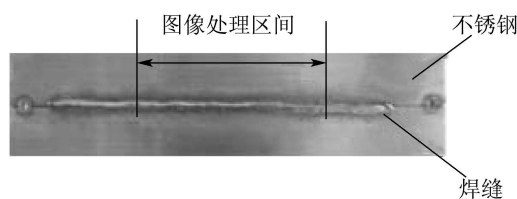
为充分反映工业现场焊缝偏差实际情况,焊接实验采用斜偏焊缝路径,激光束斜跨焊缝,焊接后试件见图1(c).由于已知激光束运动轨迹,因此可计算出每个采样时刻的焊缝偏差.截取焊缝偏差 $[-0.277\text{ mm}, +0.277\text{ mm}]$ 区间1000帧连续红外图像序列,计算其焊缝位置坐标值,得到焊缝位置参数测量值.



(a) 原始图像



(b) 灰度拉伸后的图像



(c) 焊接后试件

图1 大功率光纤激光焊接熔池图像和焊接试件
Fig. 1 Weldment and molten pool images of high-power fiber laser welding

2.2 焊缝偏差(Seam offset)

焊缝偏差即焊缝与激光束之间的偏差,它与焊缝位置参数之间的关系可表示为

$$E_i = b \times (a_i - c), \quad i = 1, 2, \dots, 1000, \quad (1)$$

其中: $b = 1\text{ mm}/114\text{ pixel}$ 为视觉传感器标定值, a_i 为各采样时刻的焊缝位置参数, c 为激光束在图像中的位置坐标,本试验中 $c = 268$.

由焊缝位置参数计算得到的焊缝偏差测量值如图2所示,可以看出焊缝偏差测量值与焊缝偏差实际值较接近.图中: n 为采样次数.由于焊接过程系统动态噪声和测量噪声使焊缝偏差测量值有一定的波动性.

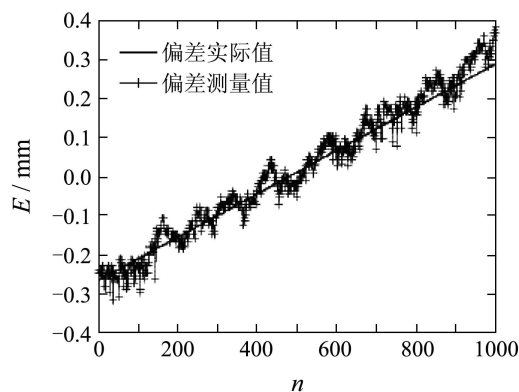


图2 焊缝偏差测量值和实际值

Fig. 2 Measuring and actual value of seam offset

3 系统状态方程和焊缝位置测量方程 (State equation and weld position measurement equation)

在应用卡尔曼滤波进行焊缝位置状态预测之前, 必须建立焊缝特征参数状态方程和焊缝偏差测量方程. 焊接过程中焊件相对于激光束在X-Y平面上运动, k 时刻焊缝位置为 $(x(k), y(k))$, $k+1$ 时刻焊缝位置为 $(x(k+1), y(k+1))$, 采样时间为 T , 随机干扰相当于随机加速度 $w_x(k)$ 和 $w_y(k)$ 的影响^[4], 焊缝位置参数的运动方程为

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

其中: $\dot{x}(k)$ 和 $\dot{y}(k)$ 分别为焊缝位置参数在X-Y方向上的运动速度, 由于X与Y方向上运动相互独立且焊缝偏差主要在X方向, 因此只考虑X方向情况.

以焊缝位置参数当前值, 当前变化量及前一时刻焊缝位置参数值构成状态向量, 即

$$\mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix},$$

其中 $\begin{cases} x_1(k) = x(k), \\ x_2(k) = \dot{x}(k), \\ x_3(k) = x(k-1), \end{cases}$ 得到系统状态方程为

$$\mathbf{X}(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5T^2 \\ T \\ 0 \end{bmatrix} w_x(k). \quad (3)$$

令

$$\phi(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma}(k+1, k) = \begin{bmatrix} 0.5T^2 \\ T \\ 0 \end{bmatrix},$$

则式(3)可表示为

$$\mathbf{X}(k+1) = \phi(k+1, k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{\Gamma}(k+1, k)w_x(k), \quad (4)$$

其中: $\phi(k+1, k)$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{\Gamma}(k+1, k)$ 为系统动态噪声驱动矩阵, $w_x(k)$ 为系统动态噪声.

以熔池红外图像焊缝位置参数及其位移量为测量信息. 令 $\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} x_p(k) \\ \Delta x(k) \end{bmatrix}$, $x_p(k)$ 为 k 时刻焊缝位置参数测量值, $\Delta x(k)$ 其位移测量值, 则焊缝位置及位移测量方程为

$$\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{xp}(k) \\ v_{\Delta x}(k) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: $v_{xp}(k)$ 为焊缝位置参数测量噪声, $v_{\delta}(k)$ 为位移测量噪声.

令 $\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{V}(k) = \begin{bmatrix} v_{xp}(k) \\ v_{\Delta x}(k) \end{bmatrix}$, 则式(5)可以表示为

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k), \quad (6)$$

其中: $\mathbf{H}(k)$ 为测量矩阵, $\mathbf{V}(k)$ 为测量噪声矩阵.

4 色噪声下的卡尔曼滤波模型(Kalman filtering model with colored noises)

实际焊接过程中动态噪声 $w_x(k)$ 并非白噪声, 而是系统所产生的相关色噪声. 此时状态方程和焊缝位置测量方程无法直接应用卡尔曼滤波^[5], 需要将色噪声白化以满足卡尔曼滤波要求.

设 $w_x(k)$ 是由白噪声序列 $\xi(k)$ 所驱动の色噪声, 且服从AR(Auto-regressive)模型^[6], 即满足

$$w_x(k) = \Pi(k, k-1)w_x(k-1) + \xi(k-1). \quad (7)$$

令扩展维数后的增广状态向量为

$$\mathbf{X}^*(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(k) \\ w_x(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \end{bmatrix},$$

则在色噪声下系统状态方程与焊缝位置测量方程为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{X}(k+1) \\ w_x(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi(k+1, k) & \mathbf{\Gamma}(k+1, k) \\ 0 & \Pi(k+1, k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}(k) \\ w_x(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \xi(k), \\ \mathbf{Z}(k) = [\mathbf{H}(k) \quad 0] \begin{bmatrix} \mathbf{X}(k) \\ w_x(k) \end{bmatrix} + \mathbf{V}(k). \end{cases} \quad (8)$$

设

$$w_x(k) = 0.5w_x(k-1) + \xi(k-1), \quad (9)$$

此时系统状态方程与焊缝位置测量方程为

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \dot{x}(k+1) \\ x(k) \\ w_x(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0.5T^2 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}}_{\psi(k+1, k)} \underbrace{\begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ x(k-1) \\ w_x(k) \end{bmatrix}}_{\mathbf{X}^*(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{E}(k+1, k)} \xi(k), \quad (10)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_p(k) \\ \Delta x(k) \end{bmatrix}}_{Z(k)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}}_{H^*(k)} \underbrace{\begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ x(k-1) \\ w_x(k) \end{bmatrix}}_{X^*(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} v_{xp}(k) \\ v_{\Delta x}(k) \end{bmatrix}}_{V(k)}, \quad (11)$$

式中: $\xi(k)$ 和 $V(k)$ 是互不相关均值为零的高斯白噪声(阵), 其相应的自协方差(阵)分别为 $Q(k)$ 和 $R(k)$.

当动态噪声为色噪声时, 通过以上扩展状态向量维数的方法, 状态方程可按白噪声情况下应用卡尔曼滤波算法进行处理, 其系统信号模型及卡尔曼滤波模型如图3所示.

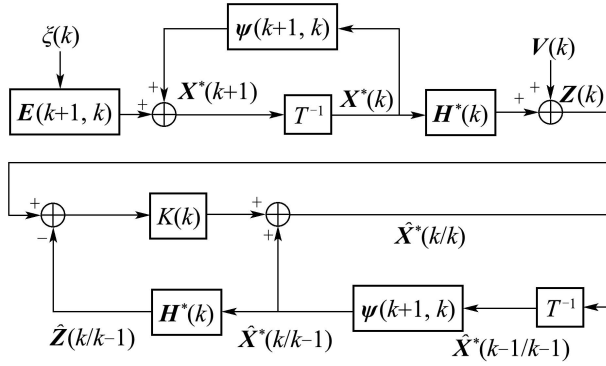


图3 卡尔曼滤波算法流程

Fig. 3 Schematic of Kalman filtering estimation algorithms

5 试验及结果分析(Experiments and analysis of experimental results)

卡尔曼滤波应用于焊缝跟踪控制中的主要作用是减小系统动态噪声和测量噪声影响, 在满足估计误差最小方差条件下预测焊缝偏差, 实现预测跟踪.

为了确定滤波状态初始值, 将起始时刻相邻两帧图像的焊缝位置参数作为状态初值并计算位移初值, 在系统动态噪声和测量噪声的影响下相邻时刻焊缝位置参数在10个像素点以内随机波动, 取系统动态噪声初值 $w_x(0) = 5$, 此时滤波状态初始值

$$X^*(0/0_-) = [239 \ 1 \ 238 \ 5]^T.$$

计算 $k = 1$ 时刻的状态一步预测值

$$\hat{X}^*(1/0) = [242.5 \ 6 \ 239 \ 2.5]^T,$$

$k = 1$ 时刻测量值 $Z(1) = [239 \ 0]^T$, 计算测量值的预测值

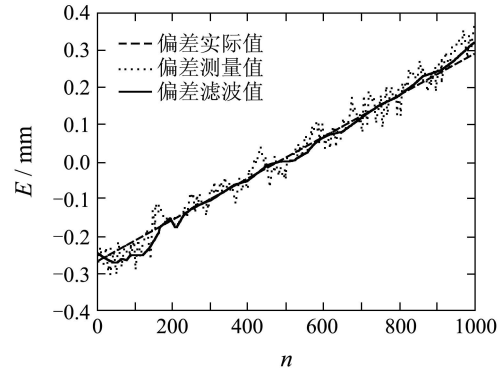
$$\hat{Z}(1/0) = [242.5 \ 3.5]^T,$$

可得到状态最佳滤波值为

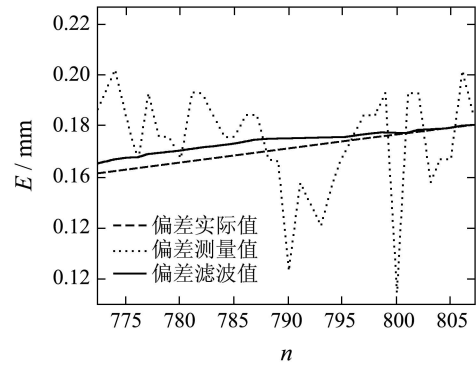
$$\hat{X}^* = [239.45 \ 4.6364 \ 237.18 \ 2.3636]^T,$$

此时完成一次滤波, 然后依次递推完成所有试验数据的滤波计算.

图4为卡尔曼滤波试验结果, 与焊缝位置偏差测量值(虚线)相比, 焊缝位置偏差滤波值(实线)更接近偏差实际值(点线). 这说明通过对红外图像焊缝位置参数的状态估计而计算出的焊缝偏差接近实际偏差值.



(a) 全局图



(b) 局部放大图

图4 焊缝偏差实际值, 测量值与滤波值

Fig. 4 Comparison of true value, measurement value and filtering value of seam offset

为了更好地检验卡尔曼滤波的有效性, 用式(12)计算相对实际焊缝偏差值的误差量:

$$e_i = |\gamma_i| - |\eta_i|, \quad i = 1, 2, \dots, 1000, \quad (12)$$

其中: γ_i 为焊缝偏差测量值或滤波值, η_i 为焊缝偏差实际值, 计算结果如图5所示. 测量误差的协方差为 $e_{\text{mea}} = 8.1738 \times 10^{-4}$, 滤波估计误差的协方差 $e_{\text{est}} = 2.3121 \times 10^{-4}$. 可以看出, 相对于焊缝偏差测量值, 焊缝偏差滤波值更接近于实际焊缝偏差, 验证了卡尔曼滤波可有效抑制噪声干扰并提高焊缝跟踪精度.

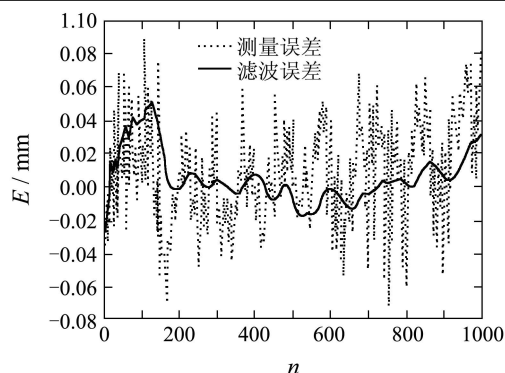


图5 测量误差和滤波误差

Fig. 5 Measurement error and filtering error in comparison with true seam offset

使用奔腾双核、主频 1.86 GHz 处理器、内存 1 GB 计算机, 在 MATLAB 环境中测试处理一帧采样数据消耗时间约为 653.3323 ms. 如果算法直接使用 C 代码编写, 速度可以提升 100~400 倍^[7,8]. 因此, 在线焊接试验中本算法耗时约为 6.533 ms, 此时间内激光束移动量为 0.274 mm, 最大横向偏差约为 0.0274 mm. 若传感器采样频率设定为 100 帧/s 并, 最大纠偏时间不大于 0.196 ms, 能满足实时要求. 考虑到偏差在一定允许范围内不做纠偏处理, 则算法能够更好地满足实时要求.

6 结论(Conclusion)

对于红外视觉传感的大功率光纤激光焊接焊缝跟踪控制系统, 可提取红外热像焊缝位置参数并构成状态向量. 针对系统动态噪声为色噪声, 通过扩增状态向量方法给出系统的状态方程和焊缝位置测量方程. 经过卡尔曼滤波实现对焊缝位置状态最优估计以减小系统动态噪声和测量噪声对焊缝跟踪偏差的影响, 为激光自动焊接控制系统提供精确的焊缝偏差信息, 焊接试验结果验证了该方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] FANG Z J, XU D, TAN M. Visual seam tracking system for butt weld of thin plate[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 49(5/8): 519 – 526.
- [2] XU P Q, TANG X H, YAO S. Application of circular laser vision sensor(CLVs) on welded seam tracking[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 205(1/3): 404 – 410.
- [3] GAO X D, YOU D Y, KATAYAMA S, et al. Visual techniques for real-time seam tracking monitoring during fiber laser welding[C] // *Proceedings of the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing*. Kobe, Japan: JLPS-Japan Laser Processing Society, 2009, (298): 9 – 150.
- [4] HE Y, WANG G H, LU D J, et al. *Multisensor Information Fusion with Applications*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 12 – 15, 206 – 213.
- [5] LIPPIELLO V, SICILIANO B, VILLANI L. Adaptive extended Kalman filtering for visual motion estimation of 3D objects[J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(1): 123 – 134.
- [6] XIONG S S, ZHOU Z Y. Neural filtering of colored noise based on kalman filter structure[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003, 52(2): 742 – 747.
- [7] WANG Z Z, ZHANG Y M. Brightness-based selection and edge detection-based enhancement separation algorithm for low-resolution metal transfer images[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(1): 181 – 187.
- [8] LUO F, WU S J, JIAO L C, et al. Implementation of de-noise DWT chip based on adaptive soft-thresho[C] // *Proceedings of the 5th International Conference on Signal Process.* [S.l.]: [s.n.], 2000, 1: 614 – 618.

作者简介:

高向东 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为机器视觉和自动控制, E-mail: gaofd666@126.com;

仲训泉 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机器视觉和自动控制, E-mail: zhongxungao@foxmail.com;

游德勇 (1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为机器视觉和自动控制, E-mail: s.w.i.m@163.com;

KATAYAMA Seiji (1951—), 男, 教授, 研究方向为激光焊接, E-mail: katayama@jwri.osaka-u.ac.jp.