

文章编号 1004-924X(2013)03-0807-06

显微视觉系统的自动聚焦及控制

周丽平*, 孙志峻, 张 泉

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要:对自动显微镜的自动聚焦评价函数及聚焦控制策略进行了研究。首先,介绍了频域聚焦函数提升小波变换及时域聚焦函数 Sobel-Tenengrad 算子,通过将提升小波变换和 Sobel-Tenengrad 算子有机组合提出了一种新型聚焦评价函数。然后,利用离焦、正焦样本图像对自组织算法进行无监督训练,使用粒子群优化算法加速训练过程,并以经过学习的自组织映射算法作为聚焦控制器。最后,进行了显微视觉自动聚焦实验。实验结果表明:新型组合算子具有单峰性,峰值处变化陡峭,对不同样本、不同倍数物镜均可在正焦位置达到最大值,鲁棒性强;经过学习控制器后平均仅用 7.6 步即可完成自动聚焦,与爬山法相比,该聚焦算法不仅大大提高了聚焦速度且性能稳定,对每幅输入图像处理、识别时间约为 120 ms;满足了显微视觉自动聚焦要求,获得了良好聚焦效果。

关键词:显微视觉;自动聚焦;聚焦策略;离散小波变换;自组织映射;粒子群优化

中图分类号:TH742.9;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0807

Auto-focusing and control of micro-vision system

ZHOU Li-ping*, SUN Zhi-jun, Zhang Quan

(*State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

* *Corresponding author, E-mail:zhouliping85@yahoo.com.cn*

Abstract: The auto-focusing evaluation function and a controller were researched based on an automated microscopy. At first, the Discrete Wavelet Transform (DWT) and Sobel-Tenengrad function were introduced, and a new auto-focusing evaluation function was proposed by combining the DWT with the Sobel-Tenengrad operator. Then, the defocused and focused sample pictures were used to train the Self-organizing Map (SOM) algorithm in a unsupervised method, and the Particle Swarm Optimization (PSO) was used to accelerate the training process. Finally, an auto-focusing experiment was carried out by using the trained SOM controller. The experimental results show that the new auto-focusing function has the characters of single steep peak and strong robustness to different samples and objective lenses. The results also indicate that the SOM based controller only takes 7.6 steps for auto-focusing process on average, and the focusing speed and stability have been greatly improved compared with that using the mountain climbing method. Moreover, it processes or recognizes the input image only for about 120 ms. The proposed method has met the requirements of auto-focusing of micro-vision system, and obtained good results.

Key words: micro vision; auto focus; focused controller; Discrete Wavelet Transform (DWT); Self-organizing Map (SOM); Particle Swarm Optimization (PSO)

收稿日期:2012-11-15;修订日期:2012-12-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175264);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB707602);2009 年度 NSFC-广东联合基金重点项目(No. U0934004)

1 引言

显微视觉被广泛地应用于医学、IC 制造、生物工程、微机电系统装配等领域,具有视场小、景深短等特点。显微视觉须通过聚焦来获取清晰图像。自动聚焦技术是自动控制显微视觉系统的核心功能,是显微视觉高精度测量基础,而准确、快速聚焦又是自动聚焦技术的关键^[1-2]。

自动聚焦可分为两种方式:一是通过激光、红外线或超声波测量物镜与目标之间的距离,根据反馈距离值驱动电机至正焦位置,称为主动式聚焦方式;二是通过图像处理技术获取当前图像信息,利用聚焦评价函数及聚焦策略确定当前处于离焦或正焦状态,并控制电机运动至正焦位置,称为被动式聚焦方式。由于被动式聚焦方式不需要额外的位置传感器,有利于显微视觉小型化和成本控制,因此在实际应用中更加广泛。国内外对被动式自动聚焦技术研究主要集中于聚焦评价函数、聚焦策略及精密控制等 3 个方面^[3-4]。

聚焦评价函数可分为时域函数和频域函数两大类。典型时域函数有灰度差分法、边缘检测法、Sobel-Tenengrad 方法、灰度均方差法等方法;频域函数主要包括傅里叶变换及小波变换等方法。尽管目前已提出的自动聚焦评价函数多达数十种,但并未有公认的最佳方法;爬山法作为经典自动聚焦策略,不能兼顾聚焦速度和精度要求^[5-6]。针对上述问题,本文以南京航空航天大学精密驱动研究所研制的自动显微镜为研究对象,提出了一种新型自动聚焦算法及控制策略,实验结果表明该方法对显微视觉自动聚焦具有良好的效果。

2 聚焦评价函数

理想聚焦评价函数应具备单峰性及峰值明显、无偏性、灵敏度高等特点^[5]。本文通过组合频域函数离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)和时域函数 Sobel-Tenengrad 算子形成一种新型自动聚焦评价函数,具体如下所述:

2.1 DWT 算子

离散小波变换被广泛应用于图像处理各个领域。基于提升算法的小波变换又被称为第二代小波变换,其继承了第一代小波多分辨率的特性,同

时又具有不依赖傅里叶变换、计算速度快、占用内存小等优点。基于提升算法的小波变换过程可分为以下 3 个阶段:分解、预测和更新^[7-11]。

(1)分解:将输入信号 $X(n)$ 根据奇偶性分为两组,分别用 S_{2i+1}^0 和 D_{2i}^0 表示,分解过程如下:

$$S(X(n)) = (D_{2i}^0, S_{2i+1}^0), \quad (1)$$

其中: $i=0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2}$ 。

(2)预测:在基于原始数据相关性的基础上,用偶数序列 D_{2i}^0 的预测值 $P(D_{2i}^0)$ 来预测奇数序列 S_{2i+1}^0 ,并用 S_{2i+1}^1 表示它们的差值:

$$S_{2i+1}^1 = S_{2i+1}^0 - P(D_{2i}^0). \quad (2)$$

(2)更新:为保留原始信号的一些全局特性,构造一个算子 U ,用 S_{2i+1}^1 来更新偶数序列:

$$D_{2i}^1 = D_{2i}^0 + U(S_{2i+1}^1). \quad (3)$$

由于 5/3 提升小波方法具有简单、运算复杂度低等优点而被广泛运用^[7,9],其公式如下,原理图如图 1 所示。

$$S_{2i+1}^1 = S_{2i+1}^0 - [D_{2i}^1 + D_{2i+2}^1]/2, \quad (4)$$

$$D_{2i}^1 = D_{2i}^0 + [S_{2i-1}^1 + S_{2i+1}^1 + 2]/4. \quad (5)$$

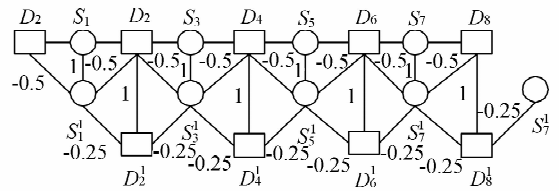


图 1 5/3 提升小波框图

Fig. 1 Diagram of 5/3 DWT

对一幅 $m \times n$ 二维图像 X ,可分别沿着图像行、列方向进行提升小波变换,图像被分为 $\{LL, LH, HL, HH\}$ 4 个子带,由于图像边缘等信息只存在于高频子带中,所以只提取 HH 子带图像 \bar{X} 参与聚焦函数计算:

$$g(\bar{X}) = \sum_{i=n/2j=m/2}^n \sum_{m/2}^m \bar{x}_{i,j}. \quad (6)$$

2.2 Sobel-Tenengrad 算子

Sobel-Tenengrad 算子是较为典型的时域评价函数^[5],对图像 X ,其聚焦函数计算如下所示:

$$S_x = f(x+1, y-1) + f(x+1, y+1) - f(x-1, y-1) - f(x-1, y+1) + 2f(x+1, y) - 2f(x-1, y), \quad (7)$$

$$S_y = f(x-1, y+1) + f(x+1, y+1) - f(x-1, y-1) - f(x+1, y-1) + 2f(x, y+1) - 2f(x, y-1), \quad (8)$$

$$h(X) = \sum_x \sum_y \sqrt{(S_x^2 + S_y^2)} \cong \sum_x \sum_y (|S_x| + |S_y|). \quad (9)$$

2.3 组合算子

在时域中,与离焦图像相比,聚焦图像存在较为锐化的边缘;在频域中,聚焦图像比离焦图像包含更多的信息和细节,即高频分量更多^[7,12]。受被观察物不同、光照强度变化等因素影响,上述5/3提升小波方法及 Sobel-Tenengrad 算子在单独使用时并不总是能获得好的聚焦效果,因此可通过有机结合5/3提升小波方法和 Sobel-Tenengrad 算子,形成一个新型自动聚焦评价算子,表达式见式(10):

$$f(X) = k_1 g(\bar{X}) + k_2 h(X). \quad (10)$$

本文中采用黄金分割法确定5/3提升小波方法和 Sobel-Tenengrad 算子各自的比例因子,即 k_1, k_2 分别取值为 0.62, 0.38。较传统自动聚焦算子,该新型算子由于综合了时域聚焦函数和频域聚焦函数的特性,从而提升了算子的准确度、稳定性,且大幅提高了算子抗噪性能,从而使其能够满足显微视觉自动聚焦实际应用需求。

3 自组织映射聚焦策略

对被动自动聚焦系统,常用的聚焦策略有爬山法等,但其聚焦时间较长。本文将自组织映射算法(Self-Organizing Feature Map, SOM)和粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)有机结合起来形成 SOM-PSO 算法作为自动聚焦控制策略,具体如下所述:

3.1 SOM 算法

SOM 是一类重要的无监督、竞争学习自组织网络^[13]。SOM 学习算法过程如下:

(1)初始化网络单元的权值 ω_i 、学习率 $\eta(t)$ 、邻域半径 $h(t)$ 及迭代次数 T 。

(2)计算输入到各输出节点之间的距离,选择与样本之间的欧氏距离最小的节点作为获胜神经元。

(3)更新学习率 $\eta(t)$ 、邻域半径 $h(t)$ 。

(4)如果满足终止条件,则介绍,否则返回步骤 2 重复计算。

对输入信号 $s = [s_1, s_2, \dots, s_n]$ 与神经元 i 获

得最佳匹配时,它们之间的欧式距离为:

$$b(s) = \min_i \{ \|s - \omega_i\| \}. \quad (11)$$

权值更新公式分别为:

$$\omega_i(t+1) = \omega_i(t) + \eta(t) h_{i,b(s)}(t) (s - \omega_i(t)), \quad (12)$$

其中: $\eta(t)$ 为学习率, $h_{i,b(s)}(t)$ 胜出神经元邻域。

3.2 PSO 优化算法

PSO 是模拟鸟群在迁徙和觅食行为,依靠“自我完善”和“社会学习”来实现寻优。PSO 控制参数少,实现简单,不需要编码和解码过程,因而获得了广泛的应用^[14-15]。粒子群在一个 n 维空间进行搜索,粒子所经历的最好位置为 P_b , 粒子群中所有粒子所经历最好位置为 G_b , 粒子更新公式如下:

$$V^{k+1} = \omega V^k + C_1 R_1 (P_b - X^k) + C_2 R_2 (G_b - X^k), \quad (13)$$

$$X^{k+1} = X^k + V^{k+1}, \quad (14)$$

其中: V^k, X^k 分别表示第 k 次迭代时粒子的速度和位置。 $R_1 R_2$ 是 $[0, 1]$ 之间的随机数, $C_1 C_2$ 是学习因子,一般取 2 左右, ω 为权重因子。

3.3 SOM-PSO 自动聚焦控制器

SOM 算法能够实现无监督自学习功能,但需要大量的样本进行训练,训练时间长,且容易陷入局部最优;而 PSO 算法可以有效解决此类问题,但由于参数初始化随机性,限制了其优化效率。所以,本文先用 SOM 算法对样本进行学习,得到一组权值;然后用此权值初始化 PSO 算法,用 PSO 算法对 SOM 算法学习结果进行优化。该算法保持了 SOM 算法网络自组织的特性,具有不易陷入局部最优;同时克服了 PSO 算法受初始参数随机性影响收敛速度的问题。学习样本应该包含正焦图像、离焦图像等清晰度不同图像,用学习后的 SOM-PSO 算法作为本文聚焦控制器。

图 2 是 SOM-PSO 控制器自动聚焦原理图。开始聚焦时,载物台处于初始位置 P_0 , 驱动 Z 轴电机分别运行步距 $D, 2D$ 至 P_1, P_2 位置,利用本文聚焦评价函数对上述位置图像清晰度进行评价,结果记为 S_0, S_1, S_2 , 运用学习过的 SOM-PSO 自动聚焦控制器预测聚焦位置 P_3 , 驱动电机快速运行至 P_3 , 最后用渐进搜索方式完成准确聚焦,正焦位置为 P_4 。

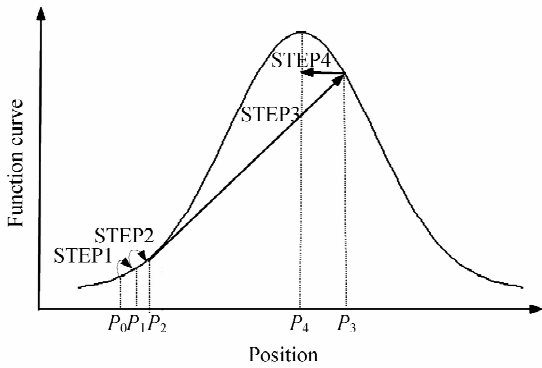


图 2 SOM-PSO 自动聚焦控制器原理

Fig. 2 Principle of SOM-PSO auto-focusing controller

4 实验结果

4.1 实验平台

图 3 是南京航空航天大学精密驱动研究所研制的自动显微镜实物图,该显微镜使用了同轴光源背向照明方式,图像 CCD 传感器为 UC-MOS03,其分辨率为 $2\,048 \times 1\,536$,通过 USB2.0 将图像传输给计算机,并通过计算机显示器显示,显微镜物镜镜头转换器及 Z 轴采用了 TURM-30 型超声电机作为驱动器,实现了物镜镜头自动切换及 Z 轴电动调节。超声电机通过计算机串口向超声电机驱动器发送指令进行控制,相比步进电机,超声电机具有高分辨率、快速响应、断电自锁、体积小等特点,因此应用超声电机作为驱动器的全自动显微镜具有结构紧凑,体积小、运动调节精确等特点。

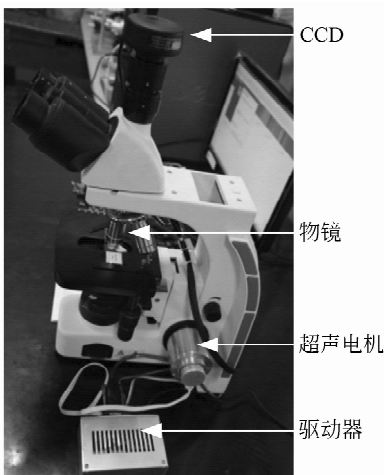


图 3 实验平台实物图

Fig. 3 Objects of experimental system

原始图像分辨率为 $2\,048 \times 1\,536$,为保证自动聚焦实时性,可以选择部分图像像素参与运算,常用做法是通过合理选择聚焦窗口方法来提高图像处理速度。在显微镜实际操作中,需要在不同放大倍数物镜之间切换,因而被观察物体在图像中位置会发生变化,导致难以选择合理聚焦窗口。因此本文利用图像金字塔技术对图像降采样操作,以减小计算负载。

利用人血小板细胞标本 O_1 和光学分辨率尺 O_2 作为测试样本,分别在 $4\times$ 物镜 L_1 , $10\times$ 物镜 L_2 , $40\times$ 物镜 L_3 测试本文 1.3 节所论述的自动聚焦评价函数及 2.3 节中建立的自动聚焦控制器性能。实验所使用的计算机 CPU 为酷睿 i3-2100, 3.1 GHz, 内存为 4 G, 程序在 .net4.0 平台下采用 C# 语言编写。

4.2 自动聚焦评价函数

在上述样本和物镜下,采集不同位置样本图像,利用图像金字塔降采样,降采样后图像分辨率为 256×192 。利用 1.3 节中自动聚焦评价函数计算各个位置样本图像值,归一化后得到的曲线如图 4 所示,每幅图像计算时间约为 72 ms。

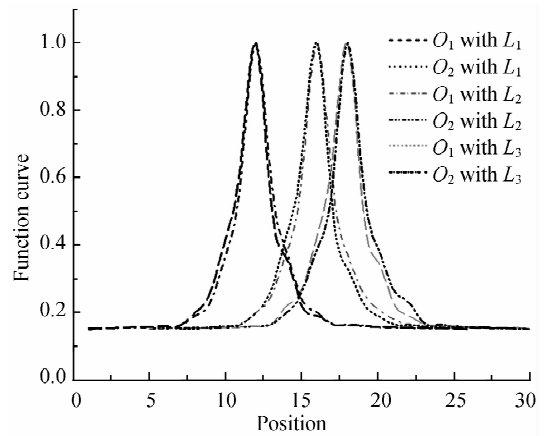


图 4 聚焦函数评价曲线

Fig. 4 Curves of auto-focus measurement function

由图 4 可知,对不同样本、不同倍数物镜,本文自动聚焦评价函数均可在正焦位置得到最大值,在峰值处曲线变化陡峭,灵敏度高且峰值唯一,具备了理想的自动聚焦评价函数无偏性、单峰性等特性。

4.3 自动聚焦实验

SOM 算法二维网络层尺寸设为 10×10 , 输入层节点为 3, 初始学习率 $\eta(t)$ 为 0.2, SOM 迭代

次数设为 20; PSO 算法中参数 C_1 、 C_2 取 2, ω 在取值范围为 $[0.4, 0.9]$, 粒子群规模取 10, 最大迭代次数设为 400, Z 轴电机步进 D 为 $40 \mu\text{m}$ 。运用已成功学习的 SOM-PSO 算法及爬山法作为控制器, 分别在样本 O_1 、 O_2 及微小 IC 芯片、小型杆状超声电机装配体、微纳光纤横断面等样本 $O_3 \sim O_{10}$, 物镜 L_1, L_2, L_3 及 $100\times$ 物镜 L_4 下进行自动聚焦实验, 各重复 10 次, 自动聚焦实验对比结果如表 1 所示。

表 1 正焦位置搜索实验对比

Tab. 1 Comparison of best focused position search

方法	平均步数	最大步数	最小步数	均方差
SOM-PSO	7.6	11	5	1.32
爬山法	18.9	24	14	2.96

表 1 中, 聚焦步数越少意味着从离焦到正焦所需时间越少, SOM-PSO 控制器平均用 7.6 步实现自动聚焦, SOM-PSO 控制器较爬山法大大提高了聚焦速度, 且爬山法受聚焦初始位置影响, 聚焦步数均方差较 SOM-PSO 控制器聚焦步数均方差明显偏大, 显然 SOM-PSO 控制器性能更稳定。图 5 是在样本 O_1 , 物镜 L_2 情况下, 显微镜图像由离焦到正焦的过程, SOM-PSO 控制器仅用了 6 步便实现了自动聚焦, 图中 1、2 分别表示 Z 轴电机步进 D 、 $2D$ 至 P_1 、 P_2 位置样本图像, 3 表示 SOM-PSO 自动聚焦控制器预测聚焦位置 P_3 样本图像, 4、5 表示渐进搜索过程的图像, 6 表示正焦位置 P_4 样本图像。此外, 控制器对每幅输入

图像识别时间约为 48 ms。

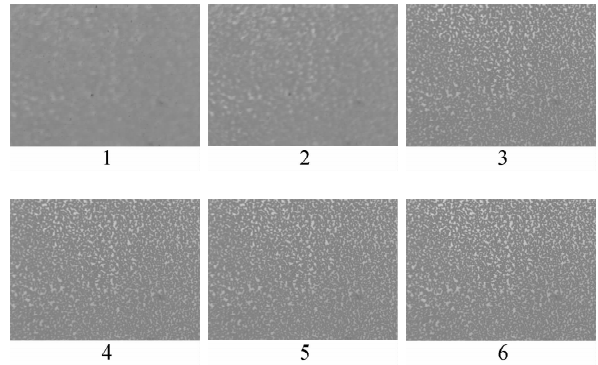


图 5 图像自动聚焦过程

Fig. 5 Process of image auto-focusing

5 结 论

自动聚焦是显微视觉实现高精度测量的首要问题, 而准确、快速的聚焦是自动聚焦问题两大关键技术。本文针对被动聚焦显微视觉系统, 提出了一种频域提升小波算子和时域 Sobel-Tenengrad 算子组合的聚焦评价函数, 实验结果证明: 该算子具备了理想聚焦曲线所具有的单峰性、无偏性、灵敏度高特性, 对不同样本、不同倍数物镜均可在正焦位置达到最大值, 鲁棒性强。利用离焦、正焦样本图像无监督训练 SOM 控制器, 并用 PSO 算法对训练过程进行了加速和优化。结果表明: 经过训练的 SOM-PSO 控制器平均仅用 7.6 步完成聚焦, 相比传统爬山法聚焦策略明显缩短了聚焦时间, 对每幅图像处理、识别时间约为 120 ms, 满足了显微视觉自动聚焦要求, 获得了良好聚焦效果。

参考文献:

- [1] LEE J Y, WANG Y H, LAI L J, et al.. Development of an auto-focus system based on the moiré method [J]. *Measurement*, 2011, 44(10): 1793-1800.
- [2] 段瑞玲, 段惠波, 李庆祥, 等. 基于图像处理的微装配自动调焦系统[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 468-472.
- [3] DUAN R L, DUAN H B, LI Q X, et al.. Micro-assembly auto-focusing system based on image processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):

468-472. (in Chinese)

- [3] 孙明磊, 宗光华, 毕树生. 基于照度优化的自动聚焦技术[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(8): 1508-1514.
- [4] SUN M L, ZONG G H, BI SH SH. Automatic focusing technique based on illumination optimum [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1508-1514. (in Chinese)
- [4] CHEN H C, SHIH T M, CHEN N Z, et al.. A microscope system based on bevel-axial method auto-focus [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 47(5): 47-51.

- [5] 赵辉, 鲍歌堂, 陶卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 531-536.
ZHAO H, BAO G T, TAO W. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 531-536. (in Chinese)
- [6] WEE CH Y, PARAMESRAN R. Measure of image sharpness using eigenvalues [J]. *Information Sciences*, 2007, 177(12): 2533-2552.
- [7] CHEN CH Y, HWANG R CH, CHEN Y J. A passive auto-focus camera control system [J]. *Applied Soft Computing*, 2010, 10(1): 296-303.
- [8] KAUTSKY J, FLUSSER J, ZITOVA B, *et al.*. A new wavelet-based measure of image focus [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, 23(14): 1785-1794.
- [9] LIAO H, MANDAL M K, COCKBURN B F. Efficient architectures for 1-D and 2-D lifting-based wavelet transforms [J]. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2004, 52(5): 1315-1362.
- [10] 王义文, 刘献礼, 谢晖. 基于小波变换的显微图像清晰度评价函数及 3-D 自动调焦技术[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1063-1069.
WANG Y W, LIU X L, XIE H. A wavelet-based focus measure and 3-D auto focusing for microscope images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1063-1069. (in Chinese)
- [11] HUANG J T, SHEN C H, PHOONG S M, *et al.*. Robust measure of image focus in the wavelet domain [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, 23(14): 1785-1794.
- [12] LEE S Y, KUMAR Y, CHO J M, *et al.*. Enhanced autofocus algorithm using robust focus measure and fuzzy reasoning [J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 2008, 18(9): 1237-1246.
- [13] HASAN SH, SHAMSUDDIN M S, YUSOB B B. Enhanced self organizing map(SOM) and particle swarm optimization(PSO) for classification [J]. *Jurnal Generic*, 2010, 5(2): 7-11.
- [14] CHEN CH, HAN W, FANG K L. A hybridized clustering approach using particle swarm optimization for image segmentation [C]. *Audio, Language and Image Processing*, 2008. Shanghai, P.R. China: ICALIP, 2008: 1365-1368.
- [15] CHEN J H, YANG L R, SU M CH. Comparison of SOM-based optimization and particle swarm optimization for minimizing the construction time of a secant pile wall [J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(6): 844-848.

作者简介:



周丽平(1985—),男,江西进贤人,博士研究生,2006年、2008年于南京航空航天大学分别获得学士学位、硕士学位,主要从事图像处理、机器视觉及自动控制方面的研究。E-mail: zhouliping85@yahoo.com.cn



孙志峻(1970—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,2002年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事机电一体化方面的研究。E-mail: meezjsun@nuaa.edu.cn



张泉(1987—),男,山东济南人,博士研究生,2009年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从超声电机驱动的机器人控制方面的研究。E-mail: quanzhang@nuaa.edu.cn