

文章编号 1004-924X(2016)增-0727-06

基于皮肤散射模型的手指静脉图像去模糊化

崔建江¹, 李琦^{1,2}, 薛定宇¹, 李思远¹

(1. 东北大学 信息工程与科学学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 辽宁科技大学 电子信息与工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要:针对手指静脉图像在采集时出现的模糊现象,提出了一种基于去除皮肤散射的手指静脉图像复原算法。根据皮肤光学的实验分析,确定了手指静脉图像采集过程中皮肤对近红外光的散射模型,并自适应地进行手指静脉图像的点扩散函数的估计;再根据得到的点扩散函数采用维纳滤波完成手指静脉图像的复原。采用该算法对3幅手指静脉图像进行了复原,并对复原结果进行了定量分析,结果显示本文算法可将图像的边缘平均梯度提高3.903。最后,将本文算法与3种常用的手指图像增强算法进行了对比。结果表明,相比于直方图均衡化方法、限制对比度自适应直方图均衡化方法(CLAHE)和高频强调滤波方法,本文算法复原得到的静脉的宽度及结构与原图像最为接近,阴影少,静脉失真情况最小,峰值信噪比最高。

关键词:图像处理;手指静脉识别;静脉图像修复;图像增强;去模糊化;点扩散函数

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0727

Finger vein image deblurring method based on skin scattering models

CUI Jian-jiang^{1*}, LI Qi^{1,2}, XUE Ding-yu¹, LI Si-yuan¹

(1. School of Information Science & Engineering,
Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, University of
Science and Technology, Anshan 114051, China)

* Correspondence author, E-mail: cuijianjiang@ise.neu.edu.cn

Abstract: Aiming at the image blur in the near-infrared finger vein recognition, an algorithm for restoration of the finger vein image based on elimination of the skin scattering was put forward. A scattering model against near-infrared light during the collection of finger vein image was established through experimental analysis on the skin optics. Based on the model, the point spread function of the finger vein image was adaptively estimated and then employed to restore the finger vein image by using Wiener filter. Three vein images were restored quantitatively by the proposed algorithm. The result shows that the average gradients of edge of the three images increase to 7.636, 6.877 and 6.750 respectively. Compared with POSHE algorithm, CLAHE algorithm and high-frequency emphasize filter algorithm, the width and structure of the restored vein image is more consistent with those of the o-

收稿日期:2016-05-19;修订日期:2016-06-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61174145)

original image with the minimum shadow and distortion and the highest signal to noise ratio.

Key words: image processing; finger vein recognition; vein image restoration; image enhancement; deblurring; Point Spread Function(PSF)

1 引言

随着信息化的深入,信息安全问题受到社会各界的广泛重视,人体生物特征识别技术得到了飞速发展。其中,手指静脉识别技术因其具有特征唯一、活体有效、人体内部很难被伪造、非接触采样等特点逐渐地成为比较主流的生物识别方法^[1]。

静脉识别的原理是利用静脉血管与肌肉、骨骼等其他人体组织之间对特定波长近红外光的不同程度的吸收特性来进行静脉血管成像。在成像过程中光照环境、个体差异等原因会造成手指静脉图像模糊,影响识别效果,因此需要对手指静脉图像进行增强。杨金峰等人考虑手指静脉的成像特征,进一步深入地研究了基于滤波器的手指静脉图像增强技术^[2-4]。其中文献[3]考虑手指静脉的成像特征,进一步深入地研究了基于滤波器的手指静脉图像增强技术。文献[5]结合 Frangi 滤波和 NSDFB(非下采样方向滤波器组)进行手指静脉图像增强处理,该方法具有较好的增强结果。文献[6]讨论了因光学模糊和皮肤散射产生的低质量手指静脉重建问题,并采用自适应点扩散函数和约束最小二乘方法对图像进行增强。文献[7-8]提出了结合数学形态学和遗传规划的手指静脉图像增强方法,该方法对图像增强问题是通用的。文献[9]对手指静脉图像进行曲波变换分解,得到了相应的曲波系数,然后对每个子带的曲波系数进行自适应阈值处理,再用曲波系数进行图像重构,进而实现图像的增强。文献[10]指出,手指静脉图像增强的性能评估标准研究很有意义,建立该标准后,可以据此对手指静脉图像建立一个相对合理的图像质量度量体系。然而,这些手指静脉图像预处理过程中,没有考虑干扰的产生原因。本文研究了造成手指静脉模糊的产生原因,建立了皮肤散射模型,通过建立点扩散函数,并采用维纳滤波完成了手指静脉图像的去模糊化。

2 手指静脉散射模型

手背和手掌静脉的采集装置多为反射式,而手指静脉的采集通常采用透射式^[11]。在近红外光穿过人手指的过程中,近红外光的一部分会发生折射,一部分会被吸收,还有一部分会发生散射^[12]。散射的近红外光会导致采集到的静脉呈现一定程度的模糊。近红外光散射导致静脉图像模糊的原理如图 1 所示,图中 d 代表静脉深度。

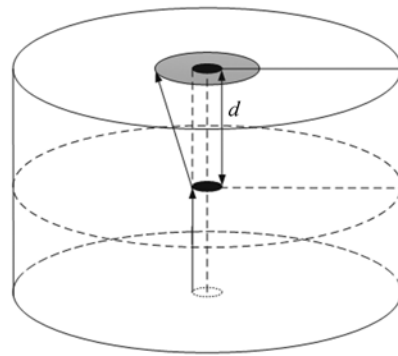


图 1 皮肤散射产生静脉模糊原理图

Fig. 1 Schematic diagram of vein blur caused by skin scattering

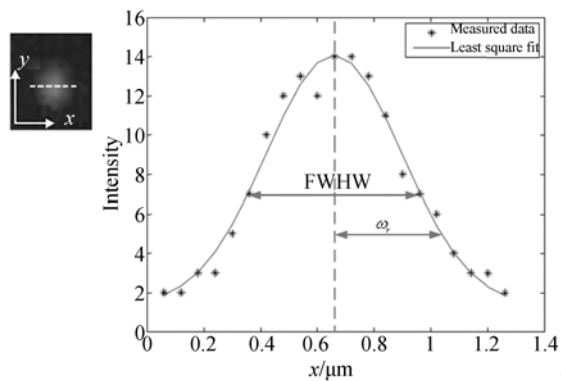


图 2 实验方式获取的皮肤散射模型

Fig. 2 Skin scattering model acquired experimentally

从光学角度研究皮肤散射模型可采用实验的方式获取皮肤的散射模型^[12-13]。文献[14]对比了实验测量方式和理论计算方式获取的皮肤散射模型。如图 2 所示,测量了经历皮肤散射后 x 方向的光强分布。由图可知光强呈高斯分布,并且半高宽度(Full Width Half Maximum,FWHW)约为 $0.6 \mu\text{m}$ 。已知 FWHW,根据式(1)即可得到高斯分布的标准差 σ 。

$$FWHW = \sigma \cdot 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln 2}, \quad (1)$$

光源深度不同,对应的 FWHW 也不同。由于不同人的静脉深度存在差异,因此皮肤散射模型不同。图 3 提供了在 830 nm 的近红外光的条件下获取的不同静脉深度对应的不同 FWHW 数据^[15]。不同人手指静脉的深度均大于 1 mm ^[16],将 $d=0$ 点去掉,得拟合直线 $FWHW=1.724d+2.2$,由式(1)可以得到皮肤散射作用产生的模糊图像的高斯点扩散函数的标准差 σ 与静脉深度 d 的关系:

$$\sigma = 0.7321d + 0.9343. \quad (2)$$

求解模糊的手指静脉图像的点扩散函数是手指静脉图像复原的关键,本文根据皮肤光学的先验知识,将求解模糊手指静脉图像点扩散函数的问题化简为估计每个人手指的静脉深度。如果根据模糊手指静脉图像估计出个体的手指静脉深度即可得出各个模糊手指静脉图像的点扩散函数,进而完成手指静脉图像的复原。

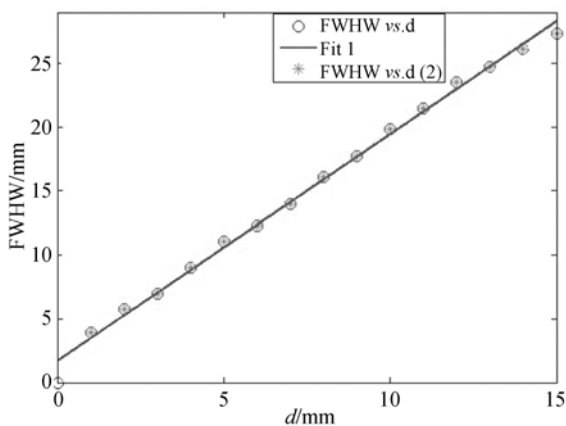


图 3 FWHW 与静脉深度关系的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of relation between FWHW and vein depth

3 手指静脉图像的点扩散函数估计

手指静脉图像点扩散函数的估计思路如图 4 所示,步骤如下:

- (1)对手指静脉图像的静脉进行粗略的分割;
- (2)在分割后的图像中找到一块包含相对规整的手指静脉的区域,这里为了叙述方便,称该区域为 vb1(vein block1);
- (3)找到对应于 vb1 的原图像中的静脉区域,这里称为 vb4,根据 vb4 和理想静脉宽度(宽度采用像素个数计量)人工制作一个理想的(非模糊)的静脉图像,这里称为 vb3;
- (4)取不同的手指静脉深度($1 \sim 15 \text{ mm}$)根据式(4)计算出对应的点扩散函数,利用产生的不同的点扩散函数对 vb3 进行模糊处理,再将不同的模糊图像与 vb4 进行比较。当模糊图像与 vb4 的差距最小时,则认为当前的手指静脉深度即为该个体的手指静脉深度,当前的点扩散函数即为该手指静脉图像的点扩散函数。

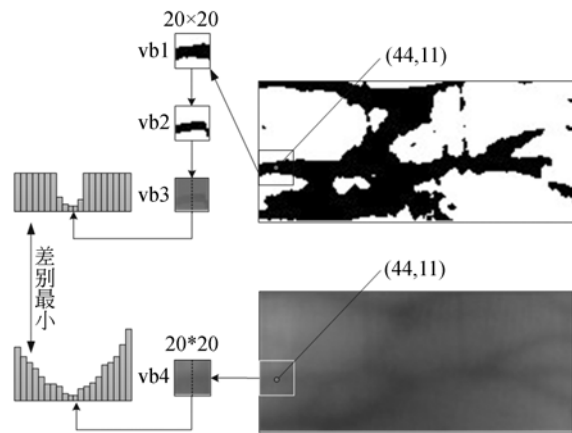


图 4 手指静脉图像点扩散函数估计的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of PSF estimation of finger vein images

4 手指静脉图像去模糊化

采用维纳滤波对手指静脉图像进行复原。维纳滤波的目标是找到一个未污染图像 f 的估计值 \hat{f} ,使它们之间的均方误差最小。误差度量由式(3)给出:

$$e^2 = E\{(f - \hat{f})^2\}, \quad (3)$$

其中 $E\{\}$ 是参数的期望值。这里假定噪声和图像不相关, 其中一个有零均值且估计的灰度级是退化图像灰度级的线性函数。在这些条件下, 式(3)中误差函数的最小值在频域计算式为:

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{H^*(u, v) S_f(u, v)}{S_f(u, v) |H(u, v)|^2 + S_\eta(u, v)} \right] G(u, v) = \left[\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + S_\eta(u, v)/S_f(u, v)} \right] G(u, v) = \left[\frac{1}{|H(u, v)|^2 + S_\eta(u, v)/S_f(u, v)} \right] G(u, v), \quad (4)$$

式中: $H(u, v)$ 为退化函数(即点扩散函数), $H^*(u, v)$ 为 $H(u, v)$ 的复共轭, $|H(u, v)|^2$ 为 $H(u, v)$ 与 $H^*(u, v)$ 的乘积, $S_\eta(u, v)$ 为噪声的功率谱, $S_f(u, v)$ 为未退化图像的功率谱, $G(u, v)$ 是退化图像的变换。不过在维纳滤波时无法估计未退化图像的功率谱等信息, 因此使用的是式(4)的近似表达式, 即:

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{|H(u, v)|^2 + K} \right] G(u, v). \quad (5)$$

实验表明: 式(5)中的 K 取 0.15 时样本库中的各个手指静脉图像的复原效果较好。实验结果如图 4 所示。

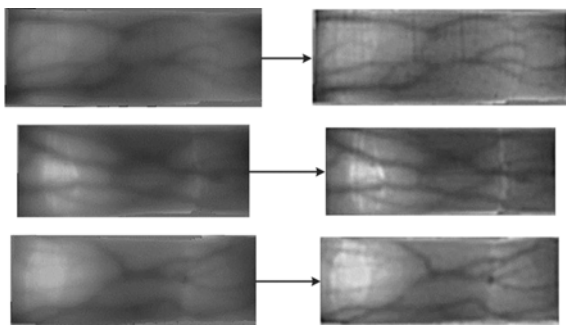


图 5 手指静脉图像的复原结果

Fig. 5 Results of finger vein image restoration

5 手指静脉图像复原结果的分析与对比

5.1 手指静脉图像复原结果的定量分析

由图 5 可知复原后的手指静脉明显清晰于原图像的手指静脉, 通过静脉边缘平均梯度可以定量地度量手指静脉图像复原之后手指静脉图像的清晰度。

如图 6 所示, 取手指静脉上任意中心位置到静脉边缘方向的一系列像素的灰度, 其中像素列的起点 s 为手指静脉中心局部灰度值最低的位置, 像素列的终点 e 为灰度值不再上升的位置。则静脉边缘平均梯度 $\overline{\Delta g}$ 的定义如下:

$$\overline{\Delta g} = \frac{1}{e-s} \sum_{n=s+1}^e (I_{n+1} - I_n), \quad (6)$$

其中: I_{n+1} 为像素相对位置为 $n+1$ 处的灰度值, I_n 为像素相对位置为 n 处的灰度值。静脉边缘平均梯度 $\overline{\Delta g}$ 越大, 静脉边缘越清晰。

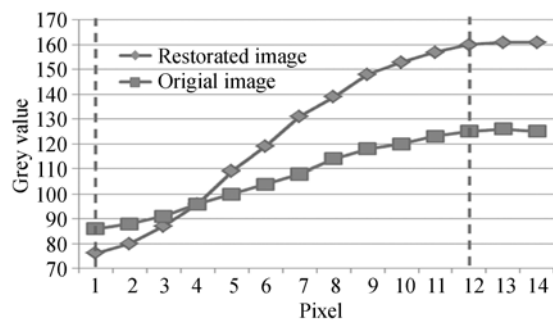


图 6 静脉边缘平均梯度原理图

Fig. 6 Schematic diagram of average gradients of vein edge

分别求取图 5 所示的 3 幅静脉图像的原图像及其复原图像的静脉边缘平均梯度。计算时每幅图像随机选取 5 个静脉像素列分别求取对应的静脉边缘平均梯度, 再求取这 5 个静脉边缘平均梯度的平均值作为整幅图像的静脉边缘平均梯度, 结果如表 1 所示。

表 1 原图与复原图像静脉边缘平均梯度对比

Tab. 1 Comparison of $\overline{\Delta g}$ between original images and restored images

类型	图像 1	图像 2	图像 3
原图像 $\overline{\Delta g}$	545	021	2.867
复原图像 $\overline{\Delta g}$	7.636	6.877	6.750

由表 1 可知, 复原图像静脉边缘的平均梯度显著高于原图像静脉边缘平均梯度, 因此本文提出的基于去除皮肤散射的手指静脉复原算法较好地提高了手指静脉边缘的清晰度。

5.2 手指静脉图像复原结果对比

目前, 解决手指静脉清晰化问题最常采用的

方法为直接对手指静脉图像进行增强,该类方法不考虑造成手指静脉图像不清晰的原因,而是直接采用图像处理技术来增强手指静脉图像的视觉效果,因此该类方法往往会造成手指静脉图像的失真。本文提出的基于去除皮肤散射的手指静脉图像复原算法考虑到导致手指静脉图像不清晰的主要原因——皮肤散射,依据皮肤光学作为先验知识来实现手指静脉图像的复原。

表 2 列出了本算法与 3 种常用的手指静脉图像增强算法对 3 幅手指静脉图像的增强结果。3 种常用的图像增强算法分别为直方图均衡化方法、限制对比度自适应直方图均衡化方法(CLAHE)^[17]和高频强调滤波方法^[18]。定量的对比分析采用峰值信噪比(PSNR)评价,表 3 列出了本算法与 3 种常用方法的 PSNR 对比结果。

表 2 各手指静脉清晰化算法结果对比

Tab. 2 Comparison of qualities of restored images with different finger vein restoration algorithms


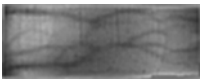
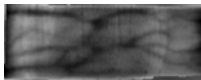

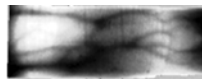


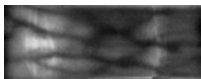
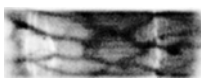
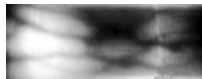
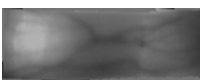
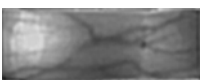
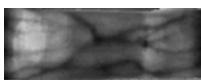

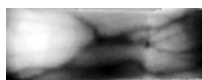
原图像	本文算法	CLAHE	高频强调滤波	直方图均衡化
				
				
				

表 3 表 2 中各原模糊图像去模糊的 PSNR 对比

Tab. 3 PSNR of original blurred images in Tab. 2 and their corresponding deblurred images (dB)

	本文算法	CLAHE	高频强调滤波	直方图均衡化
原图像 1	22.256	20.372	10.995	11.528
原图像 2	24.356	19.985	11.202	12.205
原图像 3	21.196	19.404	12.138	13.303

由表 2 可知,从清晰化后静脉失真的角度,本文算法复原得到的静脉的宽度及结构均与原图像最为接近,因此静脉失真情况最弱;从引入阴影的角度,高频强调滤波和直方图均衡化方法较为明显地引入了阴影,这将不利于手指静脉的分割,本文算法和 CLAHE 算法在此角度表现得较好;从引入噪声的角度,高频强调滤波引入了较多的噪声,本文算法也引入了一定的噪声,引入的噪声将

在后续静脉分割处理中被去除。由表 3 实验结果可知,本文算法的峰值信噪比最高,去模糊化的效果最好。

6 结 论

本文提出了一种基于去除皮肤散射的手指静脉图像复原算法,根据皮肤光学的先验知识分析了手指静脉图像采集过程中皮肤对近红外光的散射模型。该算法根据先验知识和模糊的手指静脉图像自适应地进行手指静脉图像的点扩散函数的估计,根据得到的点扩散函数采用维纳滤波完成了手指静脉图像的复原。该算法从分析导致手指静脉图像模糊的原因出发设计手指静脉图像的复原方法,因而更有针对性地实现了较优的手指静脉图像的清晰化,实验对比结果表明该算法具有良好的去模糊化性能。

参考文献:

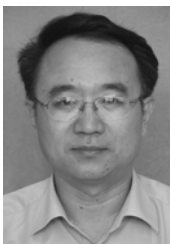
[1] 崔建江,贾旭,刘晶,等. 基于计盒维数和多小波的

静脉图像特征提取[J]. 东北大学学报(自然科学版),2010,31(10):1397-1400.

CUI J J, JIA X, LIU J, *et al.*. Vein image feature extraction based on box counting dimension and

- multiple wavelets[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2010, 31 (10): 1397-1400. (in Chinese)
- [2] YANG J F, YANG J L. Multi-channel Gabor filter design for finger-vein image enhancement[C]. *Proceedings of the 5th International Conference on Image and Graphics*, Xian, P. R. China; ICIG, 2009: 87-91.
- [3] ZHANG J, YANG J F. Finger-vein image enhancement based on combination of gray-level grouping and circular Gabor filter[C]. *Proceedings of the International Conference on Information Engineering and Computer Science*, Wuhan, P. R. China; ICIECS, 2009: 1-4.
- [4] YANG J F, YAN M F. An improved method for finger-vein image enhancement[C]. *Proceedings of the 2010 IEEE 10th International Conference on Signal Processing*, Beijing, P. R. China; ICSP, 2010: 1706-1709.
- [5] YANG J F, YANG J L, SHI Y H. Combination of Gabor wavelets and circular Gabor filter for finger-vein extraction[C]. *Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Computing*, Ulsan, South Korea; ICIC, 2009: 346-354.
- [6] LEE E C, KANG R P. Image restoration of skin scattering and optical blurring for finger vein recognition[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(7): 816-828.
- [7] WANG J, TAN Y. A novel genetic programming algorithm for designing morphological image analysis method[C]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Swarm Intelligence*, Chongqing, P. R. China; ICSI, 2011: 549-558.
- [8] WANG J, TAN Y. Morphological image enhancement procedure design by using genetic programming[C]. *Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, Dublin, Ireland; GECCO, 2011: 1435-1442.
- [9] ZHANF Z B, MA S L, HAN X. Multiscale feature extraction of finger-vein patterns based on curvelets and local interconnection structure neural network [C]. *Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition*, Hong Kong, P. R. China; ICPR 2006: 145-148.
- [10] OLSEN M A, HARTUNG D, BUSCH C. Contrast enhancement and metrics for biometric vein pattern recognition[C]. *Proceedings of the 6th International Conference on Intelligent Computing*, Changsha, P. R. China; ICIC 2010: 425-434.
- [11] 秦斌. 手静脉身份识别技术[J]. *现代电子技术*, 2011, 34(4): 169-177.
- QIN B. Hand Vein Identification Technique[J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, 34(4): 169-177. (in Chinese)
- [12] 陈荣, 黄宝华, 王月云. 皮肤的光学模型[J]. *激光生物学报*, 2005, 14(6): 401-404.
- CHEN R, HUANG B H, WANG Y Y. The optical model of human skin [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2005, 14(6): 401-404. (in Chinese)
- [13] 李晖, 谢树森, 陆祖康. 生物组织的可见光与近红外光散射模型[J]. *光学学报*, 1999, 19(12): 1661-1666.
- LI H, XIE S S, LU Z K. A New Model of the Light Scattering in Biological Tissue for Visible and Near Infrared Region [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(12): 1661-1666. (in Chinese)
- [14] GEMERT M J C V, JACQUES S L, STERENBORG H J C M. Skin Optics[J]. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 1989, 36 (12): 1146-1154.
- [15] SHIMIZU K, TOCHIO K, KATO Y. Improvement of transcutaneous fluorescent images with a depth-dependent point-spread function[J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(11): 2154-2161.
- [16] 龚玮, 谢树森. 皮肤的光学模型和光学性质[J]. *中国激光医学杂志*, 2010, 2(19): 114-118.
- GONG W, XIE S S. Optical Model and Optical Properties of Human Skin [J]. *Chinese Journal of Laser Medicine & Surgery*, 2010, 2 (19): 114-118. (in Chinese)
- [17] 张冬梅. 低质量手指静脉图像增强[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2010.
- ZHANG D M. *Low Quality Finger Vein Image Enhancement* [D]. Chongqing: chongqing university of technology, 2010. (in Chinese)
- [18] 高晓燕, 马军山, 吴佳杰. 手指静脉图像增强算法研究[J]. *光学仪器*, 2010, 32(4): 29-32.
- GAO X Y, MA J S, WU J J. The research of finger-vein image enhancement algorithm [J]. *Optical Instruments*, 2010, 32(4): 29-32. (in Chinese)

作者简介:



崔建江(1964—),男,吉林德惠人,博士(后),副教授,1998年、2006年于东北大学分别获得硕士、博士学位,主要从事工业过程控制、计算机仿真和数字图像处理等方面的科研工作。E-mail: cuijianjiang@ise. neu. edu. cn