

基于激光散斑分形维数的表面粗糙度测量方法

陈苏婷 张 勇 胡海锋

南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044

摘要 采用激光照射粗糙工件表面形成散斑图像,通过自相关函数分析散斑图像的二阶统计特性,使用分形算法提取散斑图像自相关函数矩阵的参数,建立分形维数与表面粗糙度对应的样本集合。用最小二乘法多项式拟合该样本集合,得到散斑图像与表面粗糙度值间的多项式关系。实验结果表明,基于激光散斑分形维数的表面粗糙度测量方法是可行的且适用于在线高精度粗糙度检测,在检测时间上从数十秒级提高到秒级,检测精度达到微米级。

关键词 测量;散斑图像;表面粗糙度;自相关函数;分形维

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0408002

Surface Roughness Measurement Based on Fractal Dimension of Laser Speckle

Chen Suting Zhang Yong Hu Haifeng

Jiangsu Key Laboratory of Meteorologic Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract The speckle images of rough surface formed by laser irradiation of workpiece are analyzed using an autocorrelation function to obtain two-order statistical properties. Some parameters of the autocorrelation function are extracted from the speckle images using a fractal algorithm, and a sample set between the fractal dimension and the surface roughness is established and fitted by the least squares polynomial method. The experimental results show that the proposed surface roughness measurement method based on the fractal dimension of laser speckle is feasible and suitable for online high precision roughness detection. The detection time is shortened from tens of seconds to seconds and the detection accuracy reaches to micrometer scale.

Key words measurement; speckle images; surface roughness; autocorrelation function; fractal dimension

OCIS codes 120.6150; 120.6660; 100.2000

1 引 言

表面粗糙度是描述物体表面的重要形状参数,对机械工件的性能和寿命有很大的影响,主要表现在对工件的摩擦和磨损、疲劳强度、抗腐蚀性及零件间的配合性等方面的影响。表面粗糙度测量在机械加工等工程领域具有重要地位,传统的非在线检测方法有比较法、针描法^[1]、光学干涉法^[2]、光学散射法^[3]和显微镜法^[4]等。

随着机器视觉成像方法在表面粗糙度测量方向的应用^[5-6],利用视觉成像的图像分析表面粗糙度的非接触式测量方法受到越来越多关注。当用激光照射粗糙表面时观察面上将出现散斑图像,激光散斑图像的统计特性与表面粗糙度密切相关,通过统计方法分析散斑的强度分布、对比度和散斑运动规律等特性^[7]研究出了表面粗糙度的非接触式激光散斑分类测量方法^[8]。激光散斑分类法因其非接触和高灵敏度的优点成为现代表面粗糙度测量的重要方法^[9]。基于激光散斑图像提取表面粗糙度,一般采用亮暗对比分析法^[10-11]、纹理分析法^[12-13]和相关分析法^[14-15]分析激光散斑图像的特性。其中,对比度分析法是根据图像的对比度特性分析表面粗糙度,纹理分析法是从激光散斑图像中提取图像的纹理特性分析表面粗糙度,相关分析法是通过分

收稿日期: 2014-08-06; 收到修改稿日期: 2014-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(61302188)、中国博士后科学基金(2011M500940)、中国博士后特别资助基金(2012T50510)、江苏省六大人才高峰资助项目(2013-DZXX-020)、江苏省高校自然科学基金重大基础研究项目(12KJA510001)

作者简介: 陈苏婷(1980—),女,博士,副教授,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: sutingchen27@163.com

析激光散斑图像的相关特性分析表面粗糙度。虽然,国内外众多学者对粗糙度做了大量研究,但研究主要集中在表面粗糙度与散斑图像的参数变化趋势的关系上,而没有建立明确的函数关系,无法通过散斑图像获取粗糙度值。

由于金属表面加工工艺众多,选取平磨工艺加工的标准样块为研究对象,采用自相关函数和分形维数算法分析激光散斑图像特征。通过自相关函数分析散斑图像的二阶统计特性,基于分形算法提取散斑图像自相关函数矩阵的参数,建立与表面粗糙度对应的样本集合,最后用最小二乘法多项式曲线拟合该样本集合,构建散斑图像与表面粗糙度值间的数学函数关系。对于其他工艺加工的金属表面粗糙度的测量,只需按照所提方法进行实验并拟合出相应数学公式即可达到测量的目的。

2 基本原理

为通过激光散斑图像实现高精度工件表面粗糙度值的测量,以标准表面粗糙度平磨样块为研究对象,提出基于自相关函数的分形维算法处理散斑图像,提取工件表面粗糙度相关的参数,对所获得参数代入表面粗糙度数学模型函数即可获得工件表面的粗糙度值,整个处理流程如图1所示。

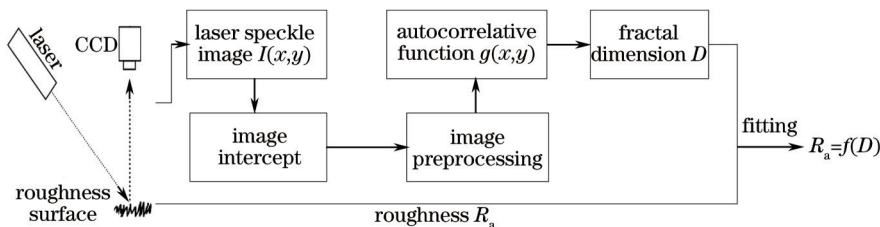


图1 基于分形维数的激光散斑图像粗糙度处理流程

Fig.1 Flowchart of image roughness processing for laser speckle based on fractal dimension

实验装置激光器以固定角度照射样块表面,电荷耦合元件(CCD)相机垂直于粗糙表面采集样块表面的散斑图像。采集的激光散斑图像 $I(x,y)$ 经过图像截取和预处理得到有效散斑图像。然后,通过离散的自相关函数运算进一步获取自相关函数 $g(x,y)$ 。由于运用自相关函数处理图像得到的自相关函数矩阵只能通过数据的变化趋势对比分析工件的表面粗糙度,为进一步提供对表面特征分析的度量,提出分形维算法提取与工件表面粗糙度相关的参数。在此基础上,提取自相关函数的分形维数 D ,并最终拟合出粗糙度值 R_a 与分形维数 D 之间的函数关系。

分形维粗糙度处理如图2所示,获取的激光散斑图像首先经过边缘检测、二值化处理、膨胀填充和定位技术确定 CCD 相机图像的散斑区域,然后经滤波除噪和图像增强实现预处理。预处理后的有效散斑截取图像通过自相关处理和分形维参数提取,最终建立该参数与粗糙度值之间的数学模型,从而计算出粗糙度值。

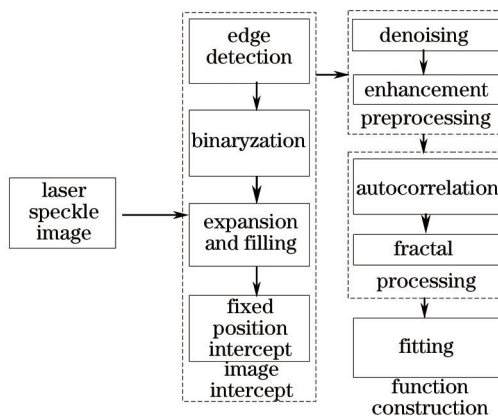


图2 分形维粗糙度处理

Fig.2 Image roughness processing based on fractal dimension

2.1 图像截取与预处理

图2中的图像截取模块是通过边缘检测、二值化、膨胀、填充和定位技术确定CCD相机图像的散斑区域,然后根据质心及八方向极值点^[16]确定的最小矩形截取有效散斑图像。截取后的散斑图像须进行滤波预处理。考虑到维纳滤波将信号和都视为随机信号,基于最小均方误差作为最优准则,采用维纳滤波滤除散斑图像噪声,来增强散斑图像的固有特性。通过上述截取和预处理后,不同粗糙度值样块的有效散斑图像如图3所示,可见散斑图像的散斑特性随着粗糙度值 R_a 而变化,表明散斑特性和表面粗糙度存在联系。

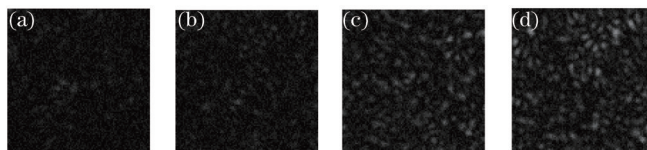


图3 不同粗糙度值标准样块的散斑图像。(a) $R_a=0.012 \mu\text{m}$; (b) $R_a=0.025 \mu\text{m}$; (c) $R_a=0.05 \mu\text{m}$; (d) $R_a=0.10 \mu\text{m}$

Fig.3 Speckle images of standard sample pieces with different roughnesses. (a) $R_a=0.012 \mu\text{m}$; (b) $R_a=0.025 \mu\text{m}$; (c) $R_a=0.05 \mu\text{m}$; (d) $R_a=0.10 \mu\text{m}$

2.2 自相关处理

自相关函数法^[15]是分析激光散斑图像散斑特性的一种二阶统计方法,其中光强分布的自相关函数为

$$G(i_1, j_1; i_2, j_2) = \langle I(i_1, j_1) I(i_2, j_2) \rangle, \quad (1)$$

式中 $I(i_1, j_1)$ 和 $I(i_2, j_2)$ 分别为散斑图像上任意两点的强度,符号 $\langle \rangle$ 表示求统计平均值。

根据光学和散斑统计学可知:

$$G(\Delta i, \Delta j) = \langle I \rangle^2 [1 + \exp(\Delta i^2 + \Delta j^2) / S^2], \quad (2)$$

式中 $\Delta i = |i_2 - i_1|$, $\Delta j = |j_2 - j_1|$, $\langle I \rangle$ 表示光强分布, S 表示散斑的统计半径。

在分析散斑图像和表面粗糙度的关系时,根据采样定律可进一步得到离散自相关函数为

$$G(l, m) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j) I(i + l, j + m), \quad (3)$$

式中 l 和 m 表示在图像 i 和 j 方向的像素偏移量, N 和 M 为图像在 i 和 j 方向的总像素数。

对(3)式进行归一化处理得:

$$g(i, j) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j) I(i + l, j + m)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j)^2}. \quad (4)$$

按(4)式分别对图3中散斑图像计算不同像素偏移量时的归一化离散自相关函数,并构造在 i 和 j 方向(分别选取0~20个像素偏移量)计算生成的归一化离散自相关函数的三维分布图,如图4所示。可见,当偏移量越小时自相关函数值越大,在偏移一定距离即大于散斑的平均尺寸时自相关函数值迅速减小,说明自相关函数峰值具有随偏移量增加而下降的趋势。

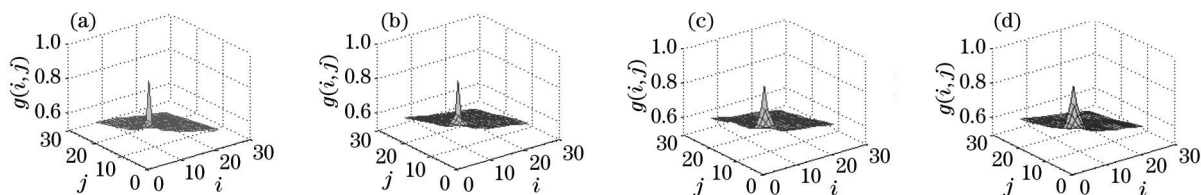


图4 散斑图像的归一化离散自相关函数分布。(a) $R_a=0.012 \mu\text{m}$; (b) $R_a=0.025 \mu\text{m}$; (c) $R_a=0.05 \mu\text{m}$; (d) $R_a=0.1 \mu\text{m}$

Fig.4 Three-dimensional distributions of normalized discrete autocorrelation function for speckle images with different surface roughnesses. (a) $R_a=0.012 \mu\text{m}$; (b) $R_a=0.025 \mu\text{m}$; (c) $R_a=0.05 \mu\text{m}$; (d) $R_a=0.1 \mu\text{m}$

为进一步观察随偏移量变大自相关函数值下降的趋势,从图4中分别提取在 i 和 j 方向1~6个像素偏移距离的离散自相关函数值,如图5所示。可见自相关函数随着 i 和 j 方向偏移像素距离增加而下降,而且这种趋势随着表面粗糙度的增大而变缓。很明显,从2~3像素偏移距离的自相关函数分布能明确区分不同粗

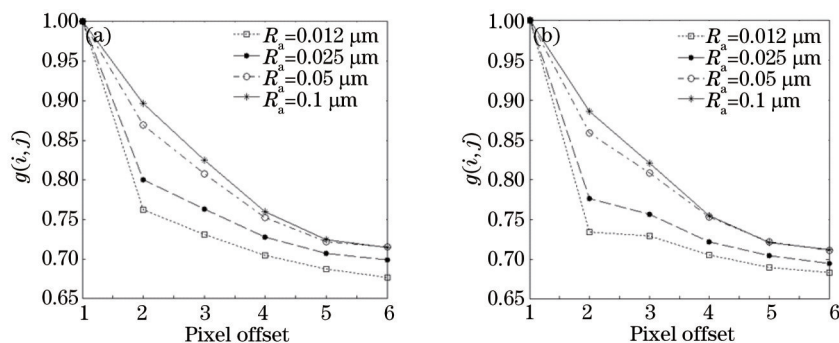


图5 归一化离散自相关函数图像。(a) i 方向; (b) j 方向

Fig.5 Normalized discrete autocorrelation function image. (a) i direction; (b) j direction

粗糙度大小;在大于3个像素偏移距离后,单方向不同粗糙度归一化离散自相关函数下降趋于缓和。

2.3 分形维数

分形度量与概率统计方法密切相关,分形维提供了对表面特征分析的度量,可有效反映表面的复杂度、不规则性和粗糙度。定义构造函数如下:

$$S(\tau i) = 2[G(0,0) - G(\tau i,0)], \quad (5)$$

式中 G 为(3)式所定义的离散自相关函数,这里只取图像 i 方向的像素偏移; $\tau i = \frac{L}{N} \times (i - 1)$, L 表示测量范围, $i = 1, 2, 3, \dots, N$ (N 为图像 i 方向的像素值,即最大的像素偏移量)。由分形理论可知:

$$S(\tau i) = K \tau i^{(4-2D)}, \quad (6)$$

式中 K 为常数, D 为分形维数。对上式两边取对数为

$$\ln[S(\tau i)] = \ln K + (4 - 2D) \ln(\tau i), \quad (7)$$

(7)式在双对数坐标下为直线,取直线的斜率 $\alpha = 4 - 2D$,截距 $\beta = \ln K$ 。则分形维数为

$$D = \frac{4 - \alpha}{2}. \quad (8)$$

根据上式计算不同粗糙度散斑图像的离散自相关函数矩阵的分形维数 D 如图6中所示,可见,不同表面粗糙度 R_a 对应不同自相关函数矩阵的分形维数 D ,分形维数 D 随粗糙度 R_a 变大而变大,其整体变化趋势和离散自相关函数的变化趋势基本相同。因此,分形维数 D 参数可用于描述表面粗糙度的值 R_a ,只要建立分形维数 D 与表面粗糙度值 R_a 的样本,通过曲线拟合的方法可建立分形维数 D 和表面粗糙度 R_a 的函数关系。

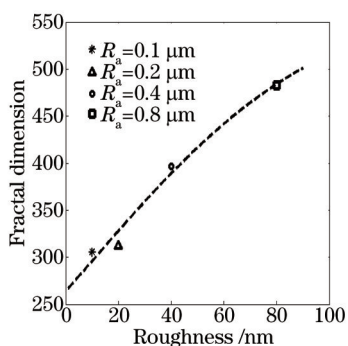


图6 分形维样本点及最小二乘拟合曲线图像

Fig.6 Fractal dimension sample points and least square fit curve image

2.4 分形维数与粗糙度的函数

采用最小二乘法来拟合表面粗糙度 R_a 与分形维数 D 的数学函数模型,其具体步骤为:

1) 采集样板图像并计算参数信息,用该参数和样板的粗糙度值组成样本集合 (R_{ai}, D_i) 其中 $i = 0, 1, 2, \dots$, 样本点尽可能多采集,其中 R_{ai} 为粗糙度值, D_i 为图像处理的分形参数值。

2) 选取样本集满足的经验函数为

$$y = \frac{1}{a + be^{-x}}, \quad (9)$$

式中 a 表示常数项, b 表示系数, e 表示自然底数。

3) 采用最小二乘法拟合样本集合, 求出最小距离平方和的曲线函数, 根据所拟合的函数取反函数, 即可建立工件表面粗糙度的数学模型函数关系。

实验采用 4 种规格标准样块提取样本点, 运用最小二乘法对样本集合进行多项式拟合(见图 6 虚线), 得到表面粗糙度值 R_a 和分形维数 D 之间的数学关系式为

$$R_a = \frac{100}{16.86 + 20.77e^{-0.017D}}. \quad (10)$$

在计算粗糙度值时, 把图像处理提取的分形维数代入上述数学模型即可得到工件表面粗糙度。

3 实验验证

实验采用粗糙度值分别为 0.1、0.2、0.4、0.8 μm 的不同标准样块, 用激光照射获取它们的激光散斑图像。由于图像的获取过程中存在不确定性, 故每个样块分别照射 7 次, 对每个图像求其分形维数值, 并求出平均值, 以减小实验随机误差。表 1 所示为各粗糙度值样块对应的 7 组分形维数值。

表 1 标准样块分形维数及其均值

Table 1 Fractal dimension and its average of standard sample pieces

Roughness $R_a / \mu\text{m}$	Fractal dimension D							Average
0.1	3.0552	3.0421	3.0396	3.0536	3.0509	3.0487	3.0523	3.0489
0.2	3.1221	3.1403	3.1283	3.1376	3.1328	3.1302	3.1337	3.1321
0.4	3.9652	3.9487	3.9574	3.9613	3.9433	3.9515	3.9601	3.9554
0.8	4.8286	4.8246	4.8238	4.8297	4.8364	4.8329	4.8318	4.8296

将表 1 分形维数值带入(10)式即可得出样块的粗糙度测量值, 如表 2 所示, 相对误差最大为 6.20%, 最小为 0.79%, 在误差允许范围内。进一步分析可得, 随着粗糙度值的增大, 相对误差减小, 测量精度显著提高。这是因为当粗糙度值增大时, 散斑的尺寸即所占像素点数随之增大, 使得在对图像滤波时误差减小; 另外, 随着对散斑图像处理时像素距离取值的减小, 自相关矩阵中下降趋势明显的区域所占整个矩阵的比例随之加大, 因此在分形处理时分形维数误差也随之减小。与目前传统检测表面粗糙度的针描法对比, 本方法具有非接触、方便快捷、效率高等优点, 将极大提高表面粗糙度测量的效率。

表 2 标准样块表面粗糙度反演结果

Table 2 Inverse calculated results of standard samples with different roughnesses

Roughness $R_a / \mu\text{m}$	Average / μm	Absolute error / μm	Relative error / %
0.1	0.1062	0.0062	6.20
0.2	0.1913	0.0087	4.36
0.4	0.4130	0.0130	3.25
0.8	0.7927	0.0063	0.79

4 结 论

基于自相关函数分析散斑图像的二阶统计特性, 采用分形维分析离散自相关函数矩阵, 用最小二乘法拟合分形参数与表面粗糙度的函数关系。通过不同粗糙度标准样块实验验证得到结论如下:

1) 散斑图像的散斑特性与粗糙度密切相关, 由于在偏移一定距离即大于散斑的平均尺寸时导致自相关函数值减小, 自相关函数峰值随偏移量增加而下降。

2) 分形维数参数可用于描述表面粗糙度, 且随着对散斑图像处理时像素距离取值的减小, 分形维数误差也随之减小, 满足 $R_a = \frac{100}{16.86 + 20.77e^{-0.017D}}$ 函数关系。

3) 实验验证表明随着粗糙度值的增大而相对误差减小, 最大相对误差为 6.20%, 在误差允许范围内。

基于激光散斑分形维数的表面粗糙度测量方法对提高工件表面粗糙度检测的效率和精度具有重要意义。

实验针对平磨工艺加工的金属表面,下一步的研究将扩展实验对象,针对多种加工工艺的金属表面分别进行实验,并通过相关数学方法进行实验数据处理,去除加工工艺的相关性,建立统一的数学模型,实现各种工艺加工的金属表面粗糙度测量。

参 考 文 献

- 1 D J White. Stylus contact method for surface metrology in the ascendancy[J]. *Measurement and Control*, 1998, 31(2): 48-50.
- 2 Kandpal H C, Mehta D S, Vaishya J S. Simple method for measurement of surface roughness using spectral interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(3): 139-148.
- 3 Liu Chen, Lu Rongsheng, Chen Lei, *et al.*. Progress of surface roughness measurement based on optical method[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(4): 495-500.
刘 晨, 卢荣胜, 陈 磊, 等. 基于光学法表面粗糙度的测量研究进展[J]. *半导体光电*, 2010, 31(4): 495-500.
- 4 Sun Dale, Wu Qiong, Liu Changsheng, *et al.*. Application of laser scanning confocal microscopy in roughness characterization of worn surface[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(9): 1410-1414.
孙大乐, 吴 琼, 刘常升, 等. 激光共聚焦显微镜在磨损表面粗糙度表征中的应用[J]. *中国激光*, 2008, 35(9): 1410-1414.
- 5 Sodhi M S, Tiliouine K. Surface roughness monitoring using computer vision[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36(7): 817-828.
- 6 Shahabi H H, Ratnam M M. Noncontact roughness measurement of turned parts using machine vision[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 46(1-4): 275-284.
- 7 Zhu Yuanqing, Qu Xinghua, Zhang Fumin, *et al.*. Infrared laser scattering characteristics of machining surfaces[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(24): 244201.
朱元庆, 曲兴华, 张福民, 等. 实际加工表面红外激光散射特性的实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(24): 244201.
- 8 Xu Meifang, Shi Yunbo, Gao Wenhong, *et al.*. surface roughness measurement of screen for laser projection display[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0108005.
徐美芳, 石云波, 高文宏, 等. 激光投影显示屏表面粗糙度的测量[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0108005.
- 9 Xu Gang, Dai Yutang, Xiao Xiang. Study on mathematical modeling and experiment of ultrashort laser polishing micro-processing [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0603003.
徐 刚, 戴玉堂, 肖 翔. 超短激光抛光微加工的数学建模与实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0603003.
- 10 Tehvaleva L, Markhvida I, Zeng H, *et al.*. Surface roughness measurement by speckle contrast under the illumination of light with arbitrary spectral profile[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(7): 774-778.
- 11 Meireles J B, Da Silva L, Caetano D P, *et al.*. Effect of metallic surface roughness on the speckle pattern formation at diffraction plane[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(12): 1731-1734.
- 12 Kayahan E, Oktem H, Hacizade F, *et al.*. Measurement of surface roughness of metals using binary speckle image analysis[J]. *Tribology International*, 2010, 43(1): 307-311.
- 13 Wang Qinghua, Lu Rongsheng, Yang Lei, *et al.*. Grinding surface roughness measurement based on the spatial filtering of speckle pattern texture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2324-2328.
汪庆花, 卢荣胜, 杨 蕾, 等. 基于散斑图纹理空域滤波的磨削表面粗糙度测量[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2324-2328.
- 14 Hamed A M, Saady M. Computation of surface roughness using optical correlation[J]. *Pramana*, 2007, 68(5): 831-842.
- 15 Dhanasekar B, Mohan N K, Bhaduri B, *et al.*. Evaluation of surface roughness based on monochromatic speckle correlation using image processing[J]. *Precision Engineering*, 2008, 32(3): 196-206.
- 16 Wu Tao. Feature field - based evolution method for image segmentation[J]. *Computer Science*, 2014, 41(6): 167-173.
吴 涛. 利用特征场进化的图像分割方法[J]. *计算机科学*, 2014, 41(6): 167-173.

栏目编辑: 张 雁