

文章编号: 0253-2239(2010)08-2324-05

基于散斑图纹理空域滤波的磨削表面粗糙度测量

汪庆花 卢荣胜 杨 蕾 雷丽巧

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要 粗糙表面的激光散射会引起表面散斑图的强度分布, 这种分布图包含了关于表面几何和物理性质的大量信息。对磨削表面形成的散斑图进行了基于空域滤波的纹理分析, 提取出与粗糙度(R_a)成良好单调关系的参数。即对散斑图像进行基于窗口分形布朗运动模型的三类向量[归一化分辨率范围向量, 归一化的像素对数目向量, 和归一化的多分辨率强度差分向量(NMSID)]的提取, 再进行 NMSID 向量滤波变换, 对变换后的图像分别进行去零(去灰度值为零的像素点)前与去零后的统计分析。结果显示, 去零后的能量和新熵两个特征量与 R_a 成良好单调关系。

关键词 散斑; 表面粗糙度; 纹理分析; 空域滤波

中图分类号 TP751.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103008.2324

Grinding Surface Roughness Measurement Based on the Spatial Filtering of Speckle Pattern Texture

Wang Qinghua Lu Rongsheng Yang Lei Lei Liqiao

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract Surface speckle pattern intensity distribution resulting from laser light scattering from a rough surface contains various information about the geometrical and physical properties of the surface. A texture analysis method based on spatial filtering is used to analyze speckle patterns of grinding surface. The feature parameters of speckle texture with a good monotonic relation related to the surface roughness (R_a) are extracted. The basic principle of the texture analysis is to extract three types of vectors based on fractional Brownian motion model of window speckle images, which are the normalized scale range vector, the normalized pixel pair number vector, and the normalized multiscale intensity difference (NMSID) vector, then to make a NMSID vector transformation for speckle patterns, and finally statistically to investigate both the transformed images with zero gray pixels and the transformed images without zero gray pixels. The analysis results show that both texture features energy and new entropy of the transformed images have a good monotonic relation with surface roughness value R_a .

Key words speckle pattern; surface roughness; texture analysis; spatial filtering

1 引 言

表面粗糙度测量对于生产质量控制非常重要, 但目前大多数测量技术, 如接触触针法、光学干涉测量法、显微镜方法、光学散射法和激光散斑法等常用于非在线测量^[1~6]。近年来, 随着机器视觉成像方

法的表面测量技术的发展, 采用视觉成像这种非接触手段, 从成像的纹理图案中, 分析表面粗糙度的量值大小, 受到了许多学者的关注^[7~9], 并逐渐成为物体表面粗糙度在线测量的一个新的手段。

用视觉成像的手段提取表面粗糙度, 在数值处

收稿日期: 2009-10-15; 收到修改稿日期: 2009-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(50875074), 安徽省自然科学基金(070414149)和 HFUT 创新群体基金(2007HGXC0040)资助课题。

作者简介: 汪庆花(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电信息工程方面的研究。E-mail: wang.qh1986@gmail.com

导师简介: 卢荣胜(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事视觉、图像处理、激光与光电检测技术等方面的研究。

E-mail: rslu@hfut.edu.cn

理上一般采用对比度分析法、相关分析法和纹理分析法^[10~15],对比度分析法常用于分析非常粗糙的表面,而相关分析法需要两幅以上的视觉图像,因此该方法用于运动表面的在线测量有一定的难度。纹理分析方法是当今图像处理领域里一个非常热的研究领域,其重点在于从图像中提取纹理特征。鉴于物体表面的激光散斑视觉图像含有大量的物体表面信息,散斑图像虽然是一种随机分布的图像,但也是一种纹理图案。近年来,在视觉成像表面粗糙度测量的研究过程中,利用共生矩阵计算机纹理分析的方法,对激光散斑纹理图像的特征与表面粗糙度的关系进行了大量的研究,发现激光散斑纹理共生矩阵中的某些纹理特征与表面粗糙度的量值之间具有良好的单调对应关系^[16]。但是,纹理分析有 4 大类方法:统计分析法、几何方法、基于模型的方法和信号处理方法,每种分析方法将提取出纹理图像中不同的纹理特征,且纹理特征的种类非常繁多。那么,除了激光散斑纹理图像共生矩阵中的某些纹理特征与表面粗糙度有特定的联系外,还有哪些特征能够反映物体表面粗糙的量值大小,能够用于在线测量物体表面粗糙度,目前人们对它的认识还很少。

本文以金属表面磨削加工为研究对象,基于空域滤波的纹理分析方法,研究金属磨削表面激光散斑纹理图像中的纹理特征与表面粗糙度(R_a)之间的对应关系。

2 散斑的获取

获取散斑有两种方式,一种是在自由空间形成的散斑图叫做客观散斑;另一种通过一个透镜收集散射光再把光集中到屏幕上形成的散斑图叫做主观散斑。采取第一种方式,原理如图 1 所示。由一台数字照相机和一台 35 mW,波长为 $660 \mu\text{m}$ 的半导

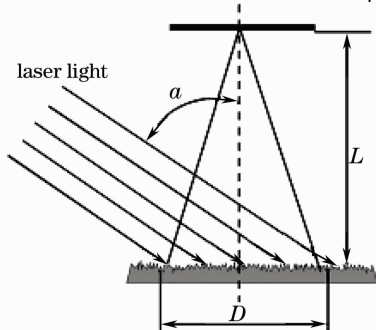


图 1 获取散斑图的实验装置

Fig. 1 Basic scheme of the speckle pattern formation and the experimental setup

体激光器构建成。照相机位于样品的法线方向,入射角要尽可能小,以减少表面粗糙度计算时表面微结构方向的影响。在这装置里,角度约为 10° 。图 2 为由图 1 得到的源自标准磨削表面粗糙度样品的不同散斑图。可以看到,随 R_a 递增,散斑图的对比度在变化,而图像信号接近饱和。这表示散斑图的纹理特性与表面粗糙度存在着某种联系。

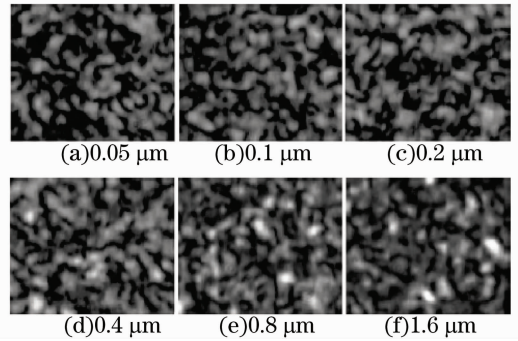


图 2 散斑图随样品粗糙度改变而改变

Fig. 2 Speckle pattern variations against the specimen surface roughness

3 空域滤波

对图 2 的散斑图,利用分形布朗运动模型(FBM)用于分维数计算时提出的三类向量进行分析,这三类向量是: \mathbf{X}_{NSR} , \mathbf{Y}_{NPN} ,和 $\mathbf{Z}_{\text{NMSID}}$ ^[17]。其中, \mathbf{X}_{NSR} 是归一化分辨率范围向量。 $\mathbf{X}_{\text{NSR}} = [U(1), U(2), \dots, U(k), \dots, U(n)]$, k 是整数, $U(k) = k$ 。对于一幅 $M \times M$ 的图像,令 $n = M$,则 $\mathbf{X}_{\text{NSR}} = [1, 2, 3, 4, 5, \dots, M]$ 。 \mathbf{Y}_{NPN} 是归一化的像素对数目向量。 $\mathbf{Y}_{\text{NPN}} = [V(1), V(2), \dots, V(k), \dots, V(n)]$,其中 $V(k)$ 是总的像素对距离 Δr 满足 $k \leq \Delta r < k+1$ 的像素对数目。 $\mathbf{Z}_{\text{NMSID}}$ 是归一化的多分辨率强度差分向量, $\mathbf{Z}_{\text{NMSID}} = [W(1), W(2), \dots, W(k), \dots, W(n)]$,它由每个参考分辨率下的像素对的强度的差分平均值组成。其中, $W(k)$ 是所有距离的整数部分为 $U(k)$ 的像素对的强度差分绝对值的平均,即:

$$W(k) = \frac{\sum_{x_1=1}^M \sum_{y_1=1}^M \sum_{x_2=1}^M \sum_{y_2=1}^M |I(x_2, y_2) - I(x_1, y_1)|}{V(K)}$$

而 x_1, y_1, x_2 与 y_2 满足:

$$U(k) \leq \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} < U(k+1)$$

或 $k \leq \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} < k+1$, 因为 $U(k) = k, U(k+1) = k+1$ 。

令 $E(\Delta I_{\Delta r})$ 为散斑图中所有满足距离为 Δr 的像素对强度之差的绝对值的平均,则 Δr 与 $E(\Delta I_{\Delta r})$

显然分别对应于 \mathbf{X}_{NSR} 和 $\mathbf{Z}_{\text{NMSID}}$ 向量。这里取 $M=5$ ，然后用 5×5 的窗口对散斑图里的每个像素点进行以其为中心的 5×5 空域滤波。具体是指，以某个像素点为中心，选定其周围的 5×5 图像窗口，对此窗口进行基于 FBM 的 Δr 与 $E(\Delta I_{\Delta r})$ 向量提取。即 Δr 为 $(1, 2, 3, 4, 5)$ ，而 $E(\Delta I_{\Delta r})$ 相应地为 $[W(1), W(2), W(3), W(4), W(5)]$ 。

提取出 $E(\Delta I_{\Delta r})$ 后，以 $W(5)$ 取代原来的像素

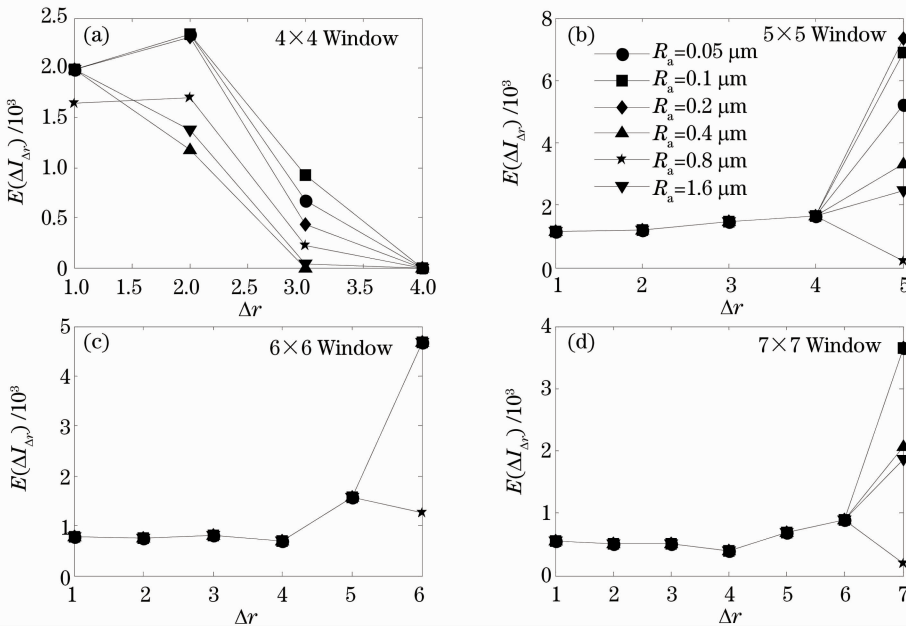


图 3 各窗口下的 $E(\Delta I_{\Delta r}) - \Delta r$ 关系曲线

Fig. 3 $E(\Delta I_{\Delta r}) - \Delta r$ relation curves under various windows

对散斑图中的每个像素点都以这样的方式处理，原散斑图就转换成了各像素点的 $W(5)$ 值的灰度图像了。而之所以选择 5×5 窗口，是因为该窗口有明显区别粗糙度的 $E(\Delta I_{\Delta r}) - \Delta r$ 曲线段， $E(\Delta I_{\Delta r})$ 在 $W(4) \leq \Delta r \leq W(5)$ 时随粗糙度 R_a 值不同是明显分开的。图 3(a), (c) 和 (d) 显示的分别是 4×4 , 6×6 与 7×7 窗口下的 $E(\Delta I_{\Delta r})$ 与 Δr 的关系曲线。由图可知， 4×4 窗口在处 $W(3)$ 分开较明显，但考虑到窗口过小，不能较全面反应局部散斑性质，实验证明此点不能区别粗糙度 (R_a)； 6×6 窗口只在 $W(6)$ 分成两部分；而 7×7 窗口也只在 $W(7)$ 分成三部分，不能用以提取粗糙度。对于 $n \times n$ 窗口，当 n 在 $8 \sim 10$ 之间， $E(\Delta I_{\Delta r}) - \Delta r$ 曲线段对应不同粗糙度几乎不分开，而在 $n > 10$ 以后，已完全一致。

截取原散斑图 150×150 方块，对其进行上述空域滤波，图 4 所示的是不同粗糙度对应的结果变换图。很明显，变换图的灰暗区域（灰度值为零或接近零的区域）随 R_a 增大而增多。这种区别有助于提取

值。如图 3(b) 所示，是 R_a 分别为 $0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8$ 与 $1.6 \mu\text{m}$ 的磨削表面散斑图里某像素点 5×5 窗口下 $E(\Delta I_{\Delta r})$ 与 Δr 的关系曲线。可以看到，不同的粗糙度 R_a 对应明显不同的 $W(5)$ 值，实验结果证明其他像素点的关系曲线也有相似特性。因此，用 $W(5)$ 代替原灰度值是可取的，可以区别出粗糙度。

出可以表征粗糙度的纹理特征参数。

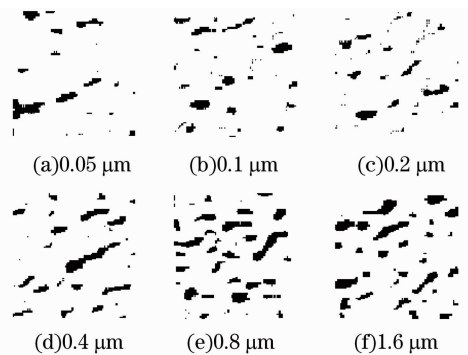


图 4 5×5 窗口空域滤波变换图

Fig. 4 Spatial filtered transformed image under 5×5 window

4 粗糙度提取

得到各粗糙度下表面散斑图所对应的空域滤波以后的变换图后，就要对这些变换图进行适当处理，提取出可以表征粗糙度的参数。本部分主要对变换

图进行两种方式的处理,即去零前和去零后的统计分析。所谓零域,即变换图中灰度值为零的区域,也就是黑色区域。

4.1 去零前的统计分析

去零前分析是指不去除黑色区域(即零点)直接对变换图进行统计分析,分别提取方差、能量、熵和新熵四个特征。它们的各自定义是:

$$\text{方差: } f_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [f(i,j) - u]^2;$$

$$\text{能量: } f_2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f(i,j)^2;$$

$$\text{熵: } f_3 = - \sum_{i=0}^{\max \text{ level}} p_i \times \lg p_i;$$

$$\text{新熵: } f_4 = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f(i,j) \times \lg f(i,j)。$$

其中 $f(i,j)$ 为 $M \times N$ 窗口里的散斑像素灰度值,这里 $M=N=100$; u 为 $M \times N$ 窗口里的像素灰度的平

均值, p_i 是 $M \times N$ 图像窗口对应的灰度直方图的因子,即灰度级为 i 的像素点数, $\max \text{ level}$ 为最大的灰度级。

对每一幅散斑变换图都提取以上四个特征,这样就得到了各特征在不同粗糙度下的值,然后建立各特征与粗糙度 R_a 的关系曲线,如图 5 所示。由图可知,方差特征在 R_a 为 $0.1 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 范围内,与 R_a 有比较好的单调性关系;能量特征亦然;熵特征单调性范围约为 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$,以上三个特征与 R_a 的曲线在其单调性范围内都是呈递增趋势的。新熵的单调性范围也是 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$,但它与 R_a 的关系曲线是递减的。理论上,在单调性范围内,只要计算出一幅散斑图的以上任何一个特征值,就可由该特征与 R_a 的标准化关系曲线得到 R_a 值进行粗糙度的在线测量。

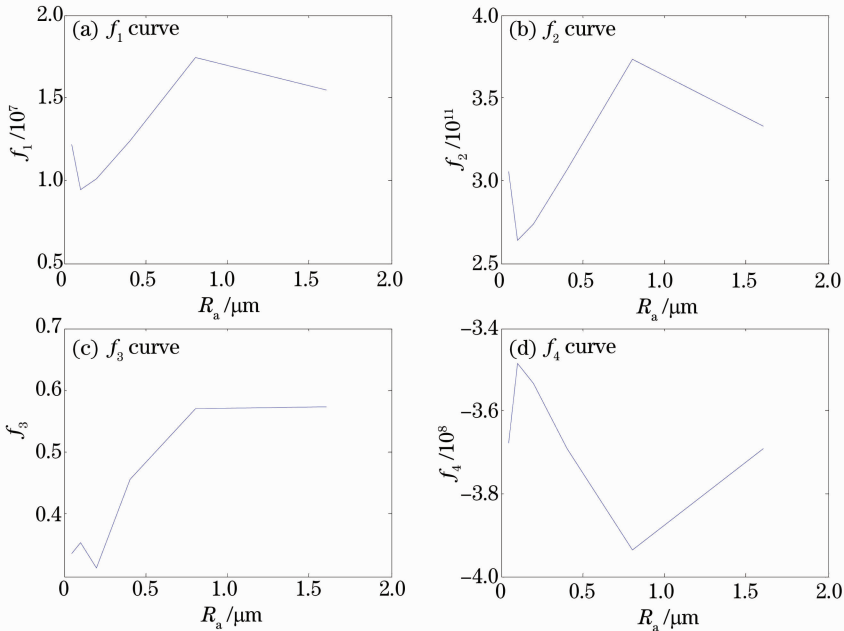


图 5 R_a 与去零前各特征的关系曲线

Fig. 5 Relation curves between R_a and the four features with zero gray pixels

然而实验证明, R_a 与去零前的各特征的关系曲线随着所截取散斑图的不同会发生稍许变化,也就是说单调区间可能发生变化,这说明以上几个纹理特征不具有稳定性。因为这种不稳定性,用于实际测量是有困难的。

4.2 去零后的统计分析

由于散斑图变换后有许多零点,并且不同粗糙度的零域面积大小明显不同,因此可以考虑去掉变换图的零值区域,再对其进行统计分析,设置阈值(灰度级 256 时可 0)。将原变换图的近零域去

掉,然后置于一维数组,再提取能量 f_2 和 f_4 新熵两个特征。如图 6 所示,去零后的两特征曲线发生了显著变化:转折点发生改变。两曲线在整个 R_a 为 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 分别呈递减、递增的趋势。这意味着可以利用该曲线段进行 R_a 为 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 范围内的表面粗糙度测量。

实验还证明,去零后的能量与新熵两个特征具有稳定性,即无论怎样截图, R_a 与此二者的关系曲线单调性保持不变。因此去零后的能量和新熵纹理特征是潜在的可用于实际表面粗糙度测量的特征量。

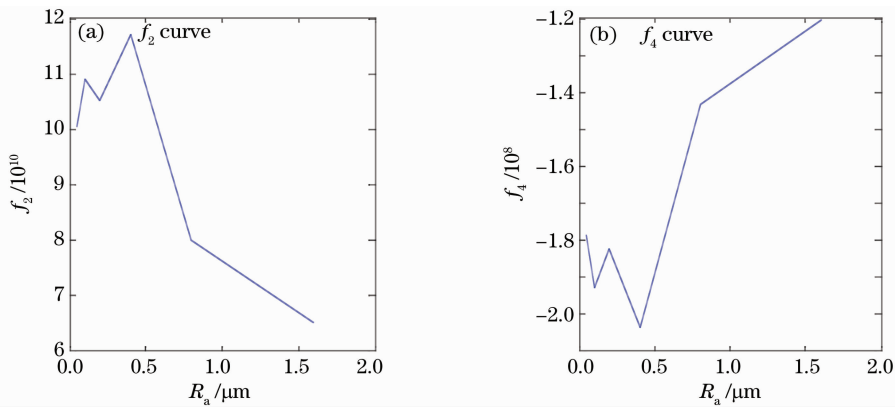


图 6 R_a 与去零后的能量与新熵特征的关系曲线

Fig. 6 Relation curves between R_a and energy and new-entropy feature without zero gray pixels

5 结 论

通过研究表面散斑纹理图,对其进行空域滤波的纹理分析,已经提出一种新的表面粗糙度测量技术。主要以 5×5 窗口滤波为例,对散斑图进行基于 FBM 模式的向量提取,再进行 NMSID 向量滤波变换,对变换后的图像分别进行去零前后的统计分析,提取方差、能量、熵与新熵等特征,建立各特征与粗糙度 R_a 的关系曲线,获得了比较好的可以表征 R_a 的纹理特征,即去零后的能量与新熵。另外,窗口大小可以变换,一般来说,在测量范围和灵敏度符合期望的情况下,为避免计算量过多,应尽量选择小的窗口进行滤波。

从磨削表面粗糙度样品实验的结果看,该技术将对粗糙度 R_a 为 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的磨削表面的粗糙度特征化很有效。对于由不同材料组成的和由不同方法加工的不同物体表面来说,能够用这种方法特征化的粗糙度的范围可能不同。因此,该表面粗糙度测量技术需要提前标定。

此外,该技术实验设备装置简单,是一种潜在的可被用于在线表面粗糙度测量的良好手段。

参 考 文 献

- 1 D. J. White. Stylus contact method for surface metrology in the ascendancy[J]. *Meas. Control*, 1998, **31**(2): 48~50
- 2 J. M. Bennett. Recent development in surface roughness characterization[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1992, **3**(12): 1119~1127
- 3 M. Gupta, S. Raman. Machine vision assisted characterized of machined surface[J]. *Int. J. Prod. Res.*, 2001, **39**(4): 759~784
- 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 Hou Haihong, Shen Jian, Zhang Dawei *et al.*. Study on surface

roughness of substrates under different cleaning techniques by total integrated scatter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1560~1562

侯海虹, 沈健, 张大伟等. 利用总积分散射仪研究不同清洗技术下的基片表面粗糙度[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1560~1562

- 6 B. Ruffing. Application of speckle-correlation methods to surface-roughness measurement: a theoretical study[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(8): 1297~1304
- 7 S. I. Chang, J. S. Ravathur. Computer vision based non-contact surface roughness assessment using wavelet transform and response surface methodology[J]. *Quality Engineering*, 2005, **17**(3): 435~451
- 8 R. Kumar, P. Kulashekar, B. Dhanasekar *et al.*. Application of digital image magnification for surface roughness evaluation using machine vision[J]. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 2005, **45**(2): 228~234
- 9 M. B. Kiran, B. Ramamoorthy, V. Radhakrishnan. Evaluation of surface roughness by vision system[J]. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 1998, **38**(5-6): 685~690
- 10 L. C. Leonard, V. Toal. Roughness measurement of metallic surfaces based on the laser speckle contrast method[J]. *Opt. & Lasers in Eng.*, 1998, **30**(5): 433~440
- 11 S. L. Toh, C. Quan, K. C. Woo *et al.*. Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2001, **33**(6): 427~434
- 12 C. Joenathan, R. Torroba, R. Henao. Surface roughness effects in dual beam illumination speckle interferometers—Theoretical study[J]. *Optic*, 2001, **112**(4): 163~158
- 13 Liu Hengbiao, Liu Chengling. Experimental research on surface roughness measurement using angular-speckle correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 698~701
刘恒彪, 刘成林. 角度散斑相关方法表面粗糙度测量实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 698~701
- 14 G. A. AlKindi, R. M. Baul, K. F. Gill. An application of machine vision in the automated inspection of engineering surfaces [J]. *Int. J. Prod. Res.*, 1992, **30**(2): 241~253
- 15 E. S. Gadelmawla. A vision system for surface roughness characterization using the gray level co-occurrence matrix[J]. *NDT & E International*, 2004, **37**(7): 577~588
- 16 R. S. Lu, G. Y. Tian. Grinding surface roughness measurement based on the co-occurrence matrix of speckle pattern texture[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(35): 8839~8847
- 17 C. C. Chen, J. S. Daponte, M. Fox. Fractal feature analysis and classification in medical imaging[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1989, **8**(2): 134~142