

基于灰度共生矩阵的连续多幅散斑图像纹理

郭冰 周晨波 赵亚伟 王刚

(烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005)

摘要 采用激光散斑的实验方法, 拍摄了连续多幅不同加工工艺、不同表面粗糙度标准样块的散斑图像。利用基于灰度共生矩阵的纹理分析方法对图像的4个特征参数——角二阶矩、惯性矩、相关性和熵进行了计算、统计与分析。研究表明, 连续多幅激光散斑图像的各种参数取值会有波动, 但整体趋于平稳; 验证了表面粗糙度和特征参数之间存在着规律性的曲线关系; 进一步消除了外界干扰和装置随时间的动态不确定性, 使得实验结果更可靠, 同时扩大了表面粗糙度和4个特征参量之间的关系数据库, 验证了激光散斑的方法对测量表面粗糙度具有较高的可信度。

关键词 图像处理; 纹理; 灰度共生矩阵; 连续; 激光散斑

中图分类号 TN247, O436.2 OCIS 100.2960 290.0290 文献标识码 A

Texture of Continuous Image Based on Gray Co-Occurrence Matrix

Guo Bing Zhou Chenbo Zhao Yawei Wang Gang

(College of Electro-Optical Information, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract A large number of continuous speckle images with different processing techniques and different surface roughness are taken using the laser speckle measurement method. Through the texture analysis method based on gray-level co-occurrence matrix, four characteristic parameters of the images, angle of second-order moment, moment of inertia, relevance and entropy are calculated and analyzed. The research indicates that, the parameters values of the continuous laser speckle images are stable with little fluctuation and the regular relationship curves of the parameters and surface roughness are testified and verified. Outside interference and dynamic uncertainty of the device over time are eliminated, making results more reliable. The relation database of the parameters and surface roughness is expanded at the same time, and the laser speckle measurement method having high precision measurement of surface roughness is testified.

Key words image processing; texture; gray co-occurrence matrix; continuous; laser speckle

1 引言

表面粗糙度是表征和评定产品表面形貌的重要参数, 对产品的使用性能和寿命有较大的影响^[1], 其测量方法可分为接触式测量和非接触式测量^[2]。传统的机械触针法就是接触式测量的主要方法之一, 该方法易损伤被测表面, 遗漏表面高频信息, 不能很好地满足现代工业高自动化程度对在线测量的要求^[3]; 非接触式测量具有非接触、无损、高精度、高灵敏度和实时快速等优点^[4], 可以更准确地进行在线测量。非接触式测量方式中常用的有激光散斑法、光切法、实时全息法、像散测定法、光外差法、光学传感器法等^[5]。因为散斑具有的特殊性质, 激光散斑法广泛应用在非接触光学测试技术中。激光散斑是激光高相干性在粗糙表面相干的一种现象, 表现为激光照射到粗糙表面时, 在散射体附近光场中可以观察或照相记录到呈现

收稿日期: 2009-04-28; 收到修改稿日期: 2009-07-20

作者简介: 郭冰(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电测量技术方面的研究。E-mail: gb1985521@126.com

导师简介: 周晨波(1955—), 男, 教授, 主要从事光电工程、光学检测和图像处理等方面的研究。

E-mail: cbzbergen@163.com

颗粒状, 一些细小的任意分布的呈现颗粒状的亮暗斑^[6]。

目前有利用自相关函数法对表面粗糙度标准样块激光散斑图像的研究, 对激光散斑参量与探测角度关系的研究, 对表面粗糙度参数值 R_a 与散射特征值 S_0 关系的研究, 对灰度共生矩阵的 3 个参数生成方向、生成步长和图像灰度级对其生成的影响从而影响表面粗糙度测量的研究, 对表面粗糙度标准样块的单幅散斑图像纹理的研究等, 而对平面表面粗糙度标准样块的连续多幅散斑图像的纹理研究较为少见。为了进一步消除外界干扰和装置如电源、光源随时间的动态不确定性, 有别于在空间条件上取多个点的实验方法, 本文采用激光散斑测量实验技术获得大量的连续图像, 利用基于灰度矩阵的纹理分析方法对图像进行处理, 寻求激光散斑测量表面粗糙度的数据处理的有效途径。

2 基于灰度共生矩阵的纹理研究方法

纹理特征的分析方法, 大致可分为统计方法、结构方法和频谱法。实验中采用基于灰度共生矩阵的分析方法, 属于统计方法。纹理是灰度的分布在空间位置上的反复交替变化而形成的, 因而在图像空间中相隔某个距离的两个像素之间会存在一定的灰度关系。所以, 研究图像中两个像素灰度级的联合分布的统计形式才能更好地反映纹理中灰度级空间相关性的规律。通过这种方式得到的纹理特征称为二次统计量。这种思想正是灰度共生矩阵的基础。

若一幅图像 f 由水平方向的 N_x 个像素、垂直方向的 N_y 个像素组成, 像素的最大灰度为 N_g , 记: $L_x = \{1, 2, \dots, N_x\}$, $L_y = \{1, 2, \dots, N_y\}$, $G = \{1, 2, \dots, N_g\}$, 则可把待纹理分析的图像 f 理解为从 $L_x \times L_y$ 到 G 的一个变换, 即对 $L_x \times L_y$ 中的每一个点对应一个属于 f 的灰度, 可表示为 $f: L_x \times L_y \rightarrow G$ 。若图像原始灰度矩阵中任意两像素的值可用 i, j 表示^[7], 则灰度共生矩阵描述了在图像中, 在 θ 方向上, 距离为 d 的一对像元分别具有灰度 i 和 j 的出现概率。将灰度共生矩阵的元素记为: $[P(i, j, d, \theta)]$, 则 $0, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 方向上的位置关系分别表示为:

$$P(i, j, d, 0) = \#[(k, l), (m, n)] \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y), k - m = 0, |l - n| = d, \quad (1)$$

$$P(i, j, d, 45^\circ) = \#[(k, l), (m, n)] \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y), (k - m = d, l - n = -d) \text{ or } (k - m = -d, l - n = d), \quad (2)$$

$$P(i, j, d, 90^\circ) = \#[(k, l), (m, n)] \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y), |k - m| = d, l - n = 0, \quad (3)$$

$$P(i, j, d, 135^\circ) = \#[(k, l), (m, n)] \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y), (k - m = d, l - n = d) \text{ or } (k - m = -d, l - n = -d) \quad (4)$$

(1)~(4)式满足 $f(k, l) = i, f(m, n) = j$, 记号 $\#(X)$ 表示集合 X 的元素数。为方便分析, 矩阵元素常用概率值表示, 对灰度共生矩阵进行正规化处理得到

$$P(i, j, d, \theta) / R \Rightarrow \hat{P}(i, j, d, \theta) \quad (5)$$

Haralick 曾经提出用于分析灰度共生矩阵的 28 个特征参数作为图像纹理分析的特征量。本文给出 4 个常用的特征参数:

1) 角二阶矩(能量) $E = \sum_i \sum_j [\hat{P}(i, j)]^2$, 用来度量图像灰度分布均匀性, 也称为能量。当灰度共生矩阵

的元素分布较集中于对角线时, 可以说明从局部区域观察图像的灰度分布是较均匀的。从图像整体来观察, 粗纹理角二阶矩 E 较大, 即粗纹理含有的能量较多; 反之, 细纹理角二阶矩 E 较小。

2) 惯性矩(对比度) $I = \sum_i \sum_j (i - j)^2 \hat{P}(i, j)$, 反映临近像素的反差, 可以理解为图像的清晰度, 即纹理

清晰程度。在图像中, 纹理的沟纹越深, 则它的对比度越大, 图像的视觉效果越清晰。

3) 相关性 $C = \left\{ \sum_i \sum_j [ij\hat{P}(i,j) - \mu_x\mu_y] \right\} / (\sigma_x^2\sigma_y^2)$ ，用来衡量灰度共生矩阵的元素在行方向或列方向上的相似程度。式中

$$\mu_x = \sum_i \sum_j i\hat{P}(i,j), \quad \mu_y = \sum_i \sum_j j\hat{P}(i,j), \quad \sigma_x^2 = \sum_i \sum_j (i - \mu_x)^2 \hat{P}(i,j), \quad \sigma_y^2 = \sum_i \sum_j (j - \mu_y)^2 \hat{P}(i,j),$$

μ_x 和 μ_y 为均值， σ_x^2 和 σ_y^2 为方差。由对称性可知： $\mu_x = \mu_y = \mu$ ， $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$ 。

4) 熵 $H = \sum_i \sum_j \hat{P}(i,j) \lg \hat{P}(i,j)$ ，熵值表明图像的复杂程度，是图像具有信息量的度量。若图像没有任何纹理，那么灰度共生矩阵几乎为零阵，该图像的熵值接近为 0；若图像充满着细纹理，那么灰度共生矩阵的值近似相等，该图像的熵值最大；若图像分布着较少的纹理，该图像的熵值较小。

3 实验及结果分析

以输出功率为 2 mW，波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为光源，分别照射加工工艺为平磨、研磨的 GB6060.2-85 表面粗糙度标准样块(共 8 块，每种加工工艺对应着 4 个不同粗糙度样块)，相干光经标准样块散射后，产生散斑，用 CCD 采集图像。实验装置如图 1 所示，实验用到的表面粗糙度标准样块如图 2 所示。

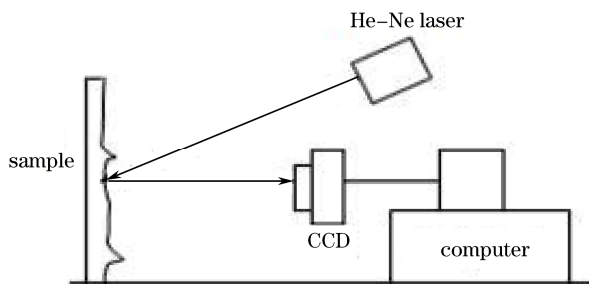


图1 实验装置图
Fig.1 Experimental setup

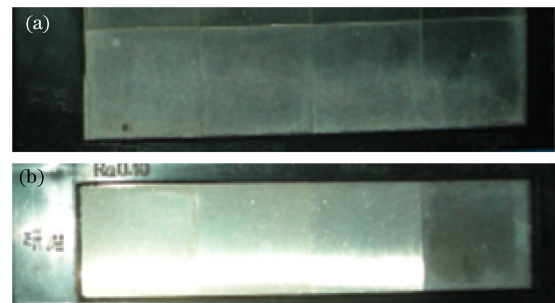


图2 表面粗糙度标准样块。(a)平磨样块；(b)研磨样块
Fig.2 Standard samples of surface roughness. (a)face grinding samples; (b)grinding samples

以平磨、研磨加工工艺的平面标准样块作为研究对象，其中每种样块对应着 4 种不同的表面粗糙度；以每个加工样块的中心点为研究点，进行图像采集。瞬态连续采集 24 幅散斑图像，随机抽样，抽取其中的 6 幅进行图像处理；时间间隔为 3 s，连续采集 6 幅散斑图像，全部进行图像处理。实验给出了 2 种采集方法下的平磨 $R_a=0.4 \mu\text{m}$ 加工样块中心点的部分激光散斑图像，如图 3 所示。

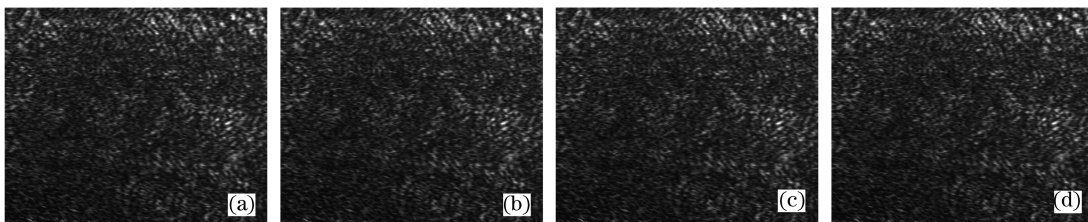
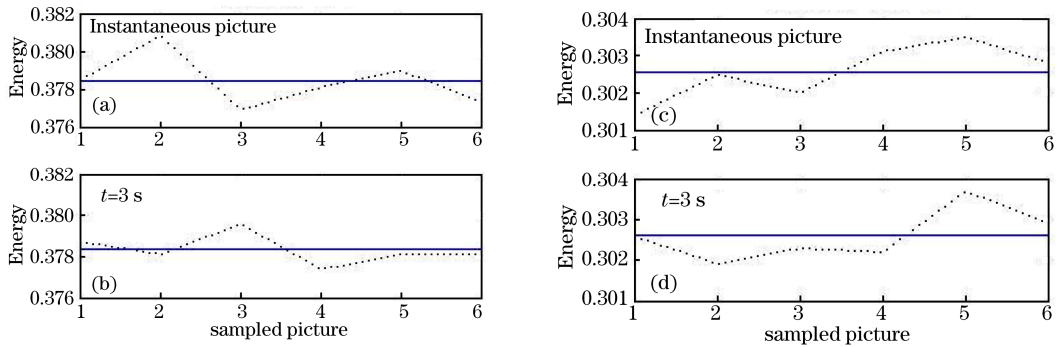


图3 平磨样块的散斑图像。(a),(b)瞬态采集的两幅图；(c),(d)时间间隔 $t=3 \text{ s}$ 采集的两幅图
Fig.3 Speckle images of face grinding samples. (a),(b) two instantaneous images; (c),(d) two images with 3 s time interval

利用灰度共生矩阵，可求出每幅图像所对应的 4 个特征参量 E 、 I 、 C 和 H 的值，并计算出每种采集方法下，每个标准样块其 6 个 E 、 I 、 C 和 H 值各自的算术平均值。给出了两种采集方法下的平磨 $R_a=0.1 \mu\text{m}$ 的 $E-t$ 图和研磨 $R_a=0.012 \mu\text{m}$ 的 $E-t$ 图，分别如图 4 和图 5 所示。同时给出了平磨 $R_a=0.1 \mu\text{m}$ 和研磨 $R_a=0.012 \mu\text{m}$ 的标准样块在时间间隔为 3 s 下，连续采集的 6 幅散斑图像的 4 个特征参量的值，分别如表 1 和表 2 所示。

图4 两种采集方法下平磨样块 $R_a=0.1 \mu\text{m}$ (a,b)与 $0.2 \mu\text{m}$ (c,d)的 $E-t$ 图Fig.4 Relationship between E and t of face grinding samples with $R_a=0.1 \mu\text{m}$ (a,b) and $0.012 \mu\text{m}$ (c,d) using two image acquisition methods表1 平磨样块 $R_a=0.1 \mu\text{m}$ 的特征参量值Table 1 Characteristic parameter value of face grinding samples with $R_a=0.1 \mu\text{m}$

Energy	Moment of inertia	Relevance	Entropy
0.3787	0.1836	1.5398	1.5205
0.3781	0.1843	1.5401	1.5220
0.3796	0.1833	1.5412	1.5188
0.3774	0.1847	1.5323	1.5248
0.3781	0.1844	1.5369	1.5225
0.3781	0.1838	1.5377	1.5216

表2 研磨样块 $R_a=0.012 \mu\text{m}$ 的特征参量值Table 2 Characteristic parameter value of grinding samples with $R_a=0.012 \mu\text{m}$

Energy	Moment of inertia	Relevance	Entropy
0.3026	0.1564	1.4112	1.5477
0.3019	0.1581	1.4179	1.5492
0.3023	0.1575	1.4204	1.5472
0.3022	0.1578	1.4201	1.5478
0.3037	0.1565	1.4306	1.5425
0.3029	0.1567	1.4235	1.5449

以图4为例进行分析。首先,可以看到,图4(a)的 $E-t$ 图反映出特征参量 E 随时间的变化是有小幅波动的,并且是围绕平均值展开的。观察图4(b)的 $E-t$ 图可以得出相同的结论。其次,比较2种不同时间条件下采集的图像的 E 值的平均值,瞬态下 E 的平均值是 0.378433,有时间间隔 $t=3 \text{ s}$ 采集下的 E 的平均值是 0.378333,两者仅相差 0.0001,在实验误差允许的范围之内。通过这两个方面可以得出结论:对于同一种实验品粗糙表面,在连续多幅的采集下,激光散斑图像的各种参数各自的取值会因为外界干扰和装置随时间的动态不确定性等因素有波动,但是整体趋于平稳,时间不是影响图像特征量取值的主要因素。因此,可以利用在瞬态下取连续多幅图求平均值的方法来提高实验的可靠性。图4(c,d)显示了此结论对于研磨标准样块依旧成立。

综合分析提取的所有图像的特征参量值,选取瞬态采集下求得的平均值为代表值,分别画出平磨加工平面样块和研磨加工平面样块的散斑图像的灰度共生矩阵其四个特征参数随粗糙度 R_a 的变化曲线,曲线如图5所示。

分析图5中的变化曲线,可以得到平磨加工平面和研磨加工平面的激光散斑图像与纹理特征有如下规律:随着平磨标准样块的表面粗糙度 R_a 的增大,角二阶矩 E 和相关性 C 逐渐减小的,这说明图像的纹理越来越细,其含有的能量逐渐减少,并且图像中行和列的相似程度也逐渐减小;惯性矩 I 和熵 H 逐渐增大,图像的清晰程度逐渐增大,视觉效果越清晰,并且图像具有的信息量也逐渐增多。这与在单一时间下采集

的实验结果吻合。

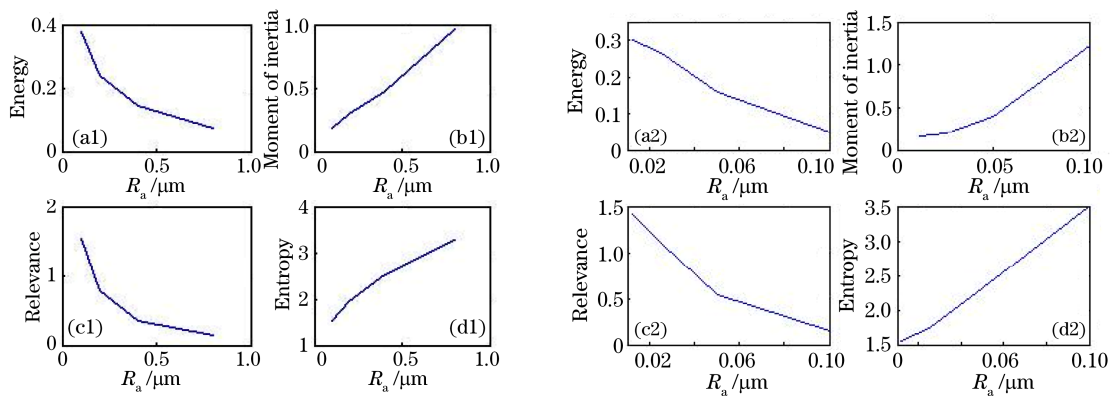


图5 平磨样块(a1~d1)与研磨样块(a2~d2)共生矩阵特征参数变化曲线

Fig.5 Curves of co-occurrence matrix's characteristic parameters for face grinding samples(a1~d1) and grinding samples(a2~d2)

4 结 论

利用激光-CCD 实验装置,采用激光散斑的实验方法进行了平面表面粗糙度标准样块的图像采集,采取了瞬态和时间间隔为 $t=3$ s 的连续采集方法。利用灰度共生矩阵的分析方法对图像进行了纹理研究,获得了表征表面粗糙度信息的 4 个特征参数的取值。对数值进行统计发现:对于同一种表面粗糙度标准样块,在连续多幅的采集下,激光散斑图像的各种参数的取值会因为外界干扰和装置如电源、光源随时间的不确定性等因素有波动,但是整体趋于平稳,时间不是影响图像特征量取值的主要因素。因此,可以利用在瞬态下取连续多幅图求平均值的方法来提高实验的可靠性。同时选取瞬态采集下求得的平均值为代表值,建立起了同一加工工艺下不同表面粗糙度的比较样块,其特征参数与表面粗糙度的关系曲线,进一步扩大了表面粗糙度和 4 个特征参量之间的关系数据库。

本研究仅涉及到国家标准范围。在此基础上,可以进一步结合多点测量的方法,建立更大容量的表面粗糙度和 4 个特征参量之间的关系数据库。随着激光技术和图像处理技术的蓬勃发展^[8],激光散斑测量表面粗糙度也会朝着高速度、高精度、高灵敏度和高实用性的方向发展^[9]。

参 考 文 献

- 1 Fu Fenglan, Tan Haiyan. Real time measurement of the part surface roughness using laser technique[J]. *Laser Infrared*, 2007, **37**(5): 412~414
付风岚, 谭海艳. 零件表面粗糙度的激光在线测量[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(5): 412~414
- 2 Yuan Changliang, Ding Zhihua, Wu Wentang. Surface Roughness and Its Measurement[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1989. 1~4
袁长良, 丁志华, 武文堂. 表面粗糙度及其测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 1~4
- 3 Huang Jiyang. The System of Electronic Speckle Correlation and The Measurement of Surface Roughness [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. 26~27
黄继阳. 电子散斑相关系统及对表面粗糙度的测量[D]. 重庆: 重庆大学, 2006. 26~27
- 4 Wang Wenzhuo, Li Dayong, Chen Jie. A survey of the research on non-contact surface roughness measuring method[J]. *J. Mechanical Engineer*, 2004, **161**(11): 6~8
王文卓, 李大勇, 陈捷. 表面粗糙度非接触式测量技术研究概况[J]. *机械工程师*, 2004, **161**(11): 6~8
- 5 Liu Bin, Feng Qibo, Kuang Cuifang. Survey of measurement methods for surface roughness[J]. *Opt. Instrum.*, 2004, **26**(5): 54~58
刘斌, 冯其波, 匡萃方. 表面粗糙度测量方法综述[J]. *光学仪器*, 2004, **26**(5): 54~58
- 6 Wu Dexin, Shen Xihua. The research of laser shearography in NDT[J]. *Dev. Innovation Machinery Electrical Prod.*, 2008, **21**(2): 125~128

- 吴德新, 沈锡华. 激光散斑无损检测技术的研究[J]. 机电产品开与创新, 2008, **21**(2): 125~128
- 7 Mehran Yazdi, Kazem Gheysari. A new approach for the fingerprint classification based on gray-level co-occurrence matrix[J]. *Proc. World Academy Sci., Eng. Technol.*, 2008, **30**: 930~933
- 8 Dai Ye, Yu Bingkun, Qiu Jianrong. Research progress of laser induced functional crystals in glass[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(6): 33~40
- 戴 晔, 余昺鲲, 邱建荣. 激光在玻璃内诱导功能晶体新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(6): 33~40
- 9 Shang Jianhua, He Yan, Chen Weibiao. Laser sonar detecting technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(2): 59~63
- 尚建华, 贺 岩, 陈卫标. 激光声纳探测技术[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(2): 59~63