

基于机器视觉的平磨表面粗糙度检测

时小军 张小辉 胡仲翔 滕家绪

(装甲兵工程学院装备再制造工程系, 北京 100072)

摘要 为了对平磨表面粗糙度进行快速在线检测, 基于机器视觉原理提出了一种平磨表面粗糙度检测方法, 研究了平磨表面粗糙度评定参数。该方法利用 CCD 提取粗糙度 R_a 在 $0.1 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 之间的平磨表面图像, 运用中值滤波、图像边缘增强和图像二值化等对图像进行预处理, 然后通过特征参数提取平磨表面粗糙度信息。试验结果表明, 在入射光强为 $0.7 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^4 \text{ lux}$ 、入射角为 $30^\circ \sim 50^\circ$ 时, 均方根(RMS)差随 R_a 的减小而不断减小。当光源入射角在 30° , $R_a > 0.3 \mu\text{m}$ 的情况下, 陡峭度与 R_a 具有良好的相关性; 当光源入射角在 50° , $R_a > 0.4 \mu\text{m}$ 的情况下, 陡峭度与 R_a 具有良好的相关性。

关键词 机器视觉; 粗糙度测量; 图像处理; 平磨表面

中图分类号 TP242.6+2 TN911.73 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0320

Measurement of Plane Grinding Surface Roughness Based on Machine Vision

Shi Xiaojun Zhang Xiaohui Hu Zhongxiang Teng Jiayu

(Academy of Armored Forces Engineering, Faculty of Equipment Remanufacture Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract Based on the machine vision technique, a method for measuring the three-dimensional parameters of plane grinding surface roughness is put forward for fast and on-line roughness measurement on plane grinding surface. In this method, the plane grinding surface image with R_a ranging from 0.1 to $1.6 \mu\text{m}$ is acquired by CCD and stored in the computer. Firstly, the mid-value filtering, the edge strengthen and the image binary conversion are used to pre-processing the image, and then the values of plane grinding surface roughness are got through characteristic acquisition. It is proved by the initial experiment that the three-dimensional evaluation method put forward in the paper is feasible. When incident intensity is between $0.7 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^4 \text{ lux}$, incident angle is between 30° and 50° , root mean square value decreases with the increment of R_a . When incident angle is around 30° and $R_a > 0.3 \mu\text{m}$, the kurtosis and R_a have good correlation; When incident angle is 50° and $R_a > 0.4 \mu\text{m}$, the kurtosis and R_a also have good correlation.

Key words machine vision; roughness measurement; image processing; plane grinding surface

1 引 言

粗糙度是平磨表面质量评价的重要指标之一, 平磨表面质量的好坏将直接影响其使用寿命和使用性能。多年来, 平磨表面粗糙度的测量主要通过触针式轮廓仪和比较样块实现。触针式轮廓仪虽然能够实现精确测量, 但由于仪器精密、笨重, 并不适合现场测量和快速检测, 而比较样块易受人为因素影响, 并不理想。

数字图像处理技术是近年来兴起的测量技术,

无需接触、测量速度快、范围大、成本相对较低^[1]。将数字图像处理技术引入平磨检测领域, 探索利用数字图像处理技术检测平磨表面粗糙度的方法, 取得了初步成果。

2 系统总体方案设计

平磨表面粗糙度测量系统包括图像采集、图像处理、图像输出三大模块, 如图 1 所示。被测试件由平行光源提供适当的光照条件, 其光学图像由数

数码相机采集后送入计算机；原始图像经自主开发的图像处理软件分析、处理后，相应的结果将进行显示、保存或打印。

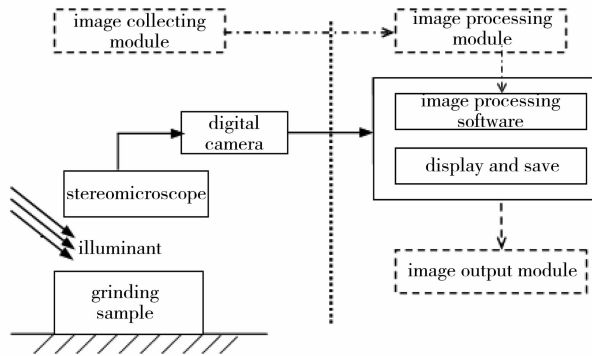


图 1 测量系统组成框图

Fig.1 Block diagram of measuring system

图像采集模块是整个测量系统的基础，它主要包括照明系统、X、Y 二向实验台、体视显微镜、数码相机及专用接口设备。图像采集模块的工作是对被测试件的原始图像进行采集。

图像处理模块是测量系统的核心部分。图像的管理、处理与分析由计算机及相关程序来完成。由图像采集模块采集到的原始图像送入到计算机后，先进行图像预处理以改善图像的质量和效果，而后根据不同的测量目的选择适当算法，编写相应的程序对图像进行处理、分析、计算，以得到期望的结果图像或数据。本系统的图像处理模块对原始图像进行由灰度处理、图像滤波、图像增强，使用 Visual C++ 编制表面粗糙度软件进行参数计算。

图像输出模块显示图像处理及计算的结果，也包括数据的保存、打印等功能，它可方便地与外界交换信息。

3 平磨表面图像预处理

3.1 中值滤波

任何一幅未经处理的原始图像，都存在一定程度的噪声干扰。在实验中，由于视场光强不均匀、外界光的干扰，以及试样表面的划痕、斑点等，噪声更是复杂多样，使得图像模糊、特征减弱，为以后的参数分析带来困难。因此，对这些噪声进行预处理变得非常重要。中值滤波是一种较好的非线性滤波方法，可以很好地克服最小均方滤波、均值滤波所带来的图像细节模糊，对滤除脉冲干扰及图像扫描噪声更为有效。二维中值滤波的窗口形状和尺寸对滤波效果影响较大，本系统采用了 3×3 方形窗口，滤波前、后的效果如图 2(a)和(b)所示。

3.2 图像边缘增强

相机 CCD 在对平磨表面取样时，由于入射光发生衍射，图像变得模糊，与此同时，图像经过传输和转换后，质量也会下降，这时就需要对图像进行增强处理，以便突出边缘信息，为后续的二值化处理打下良好的基础。图像增强方法很多，采用拉普拉斯运算法，这是最常用的图像增强方法之一，它通过模板运算使得图像变得更加清晰。应用拉普拉斯算子对原图处理后效果如图 2(c)所示。

3.3 二值化处理

二值化处理的主要目的是将图像中有意义的特征或者需要应用的特征提取出来，如何选择合适的阈值就成为特征分离的重点。常用的阈值确定方法包括全局阈值法、自适应阈值法和最佳阈值法三种。本实验采用自适应阈值法，以选取图像的灰度均值作为理想阈值。处理后效果如图 2(d)所示。

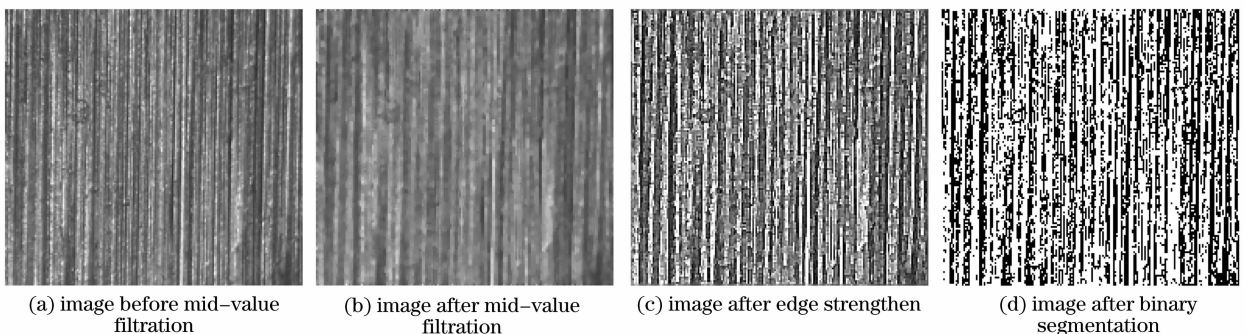


图 2 某磨削表面图像中值滤波处理的效果

Fig.2 Images of a grinding before and after mid-value filtering

4 平磨表面特征参数

基于数字图像处理技术的表面粗糙度三维评价

参数目前仍处于研究探讨阶段，尚未有正式的标准，但已经频繁出现在文献中^[2~5]。随着图像处理

技术的日益成熟和三维表面评价的需要,基于数字图像处理的表面粗糙度评定研究取得了不少成果。Luk 等^[6]利用灰度直方图理论提出了基于统计方法的幅值、均值和通过触针方法测定 R_a 的相关值。Al-Kindi 等^[7]根据灰度图像扫描线上的灰度峰点数量和灰度峰点的空间分布情况,提出了一种粗糙度参数。Du-Ming Tsai 等^[8]对铸件表面灰度图像和二值图像进行二维傅里叶变换,以评估铸件表面的粗糙度($R_a > 10 \mu\text{m}$)。Jason 等^[9]扫描了表面的散射类型,利用模拟和数字式电子装置测量每一个探测器上的入射光强,最后计算反射光强和总的入射光强,以计算表面粗糙度($R_a > 20 \mu\text{m}$)。Bradley^[10]利用光纤探测器通过测量入射光和反射光相位的变化评定表面的粗糙程度。英国伯明翰大学受欧共体资助开发出一套包含 14 个粗糙度参数在内的三维参数组^[11]。

作者经过研究,提出了表征平磨表面粗糙度的两个特征参数。

4.1 均方根差 S_q

均方根(RMS)差是直方图灰度概率的方差表示。其数值越大,则对应的表面纹理变化越剧烈。反之,均方根差越小,则对应的表面纹理变化越均匀。

表 1 不同测量条件下均方根差 S_q 与 R_a 值相关性

Table 1 Correlation of S_q and R_a under different experiment conditions

Incident angle	Incident intensity	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9	Sample 10	Correlation value with R_a
30°	High	318	280	276	278	254	0.9385
	Medium	280	219	214	197	192	0.9589
	Low	254	222	172	132	129	0.9552
50°	High	316	310	248	244	199	0.8962
	Medium	310	240	224	220	184	0.9711
	Low	260	238	168	157	122	0.9459
70°	High	216	200	294	290	212	0.4467
	Medium	238	206	195	198	170	0.9447
	Low	230	154	180	122	106	0.8708
$R_a / \mu\text{m}$		1.584	0.877	0.409	0.306	0.141	—

从表 1 可知,在大多情况下,平磨表面均方根差随着 R_a 的增大,总体上表现为增大的趋势。但其稳定性又受到了光线入射角度和入射光强的影响。一般情况下,在入射光强为 $0.7 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^4 \text{lux}$ 、入射角 $30^\circ \sim 50^\circ$ 时,均方根差随着表面粗糙度的增加迅速增大,如图 3(a) 所示。

由表 2 可以看出,当光源入射角度为 30° , $R_a > 0.3 \mu\text{m}$ 的情况下,陡峭度与 R_a 具有良好的相

4.2 陡峭度 S_{ku}

利用数字图像处理技术评定工件表面粗糙度,高度方向上的测量也是一个重要内容。在采集平磨表面图像的过程中,光线以较大角度入射时,试件表面峰点和谷底平坦区较亮,其余区域则较暗。经过阈值分割后的亮点、暗点区域面积之比即可在统计意义上表征平磨表面在垂直方向和水平方向上的粗糙程度^[4]。

5 试验及结果分析

通过由平行光源、体视显微镜、数码相机、计算机组成的图像采集系统,获取了不同实验条件下平磨样块的表面图像。通过相关系数表征三维参数与 R_a 之间的相关程度。

其数学表达式为

$$\rho_{XY} = \frac{E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}}$$

其中 X, Y 分别为样块 6 到样块 10 之间的 S_q, R_a 值。计算粗糙度特征参数值如表 1 所示。其中强光: $1.8 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^4 \text{lux}$; 中等光: $1.2 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^4 \text{lux}$; 弱光: $7 \times 10^3 \sim 7.5 \times 10^3 \text{lux}$ 。

关性,如图 3(b) 所示;当光源入射角为 50° , $R_a > 0.4 \mu\text{m}$ 的情况下,陡峭度与 R_a 具有良好的相关性,如图 3(c) 所示;当光源入射角为 70° 时,陡峭度与 R_a 之间的关系变得模糊不清。

总之,在光源入射角小于 50° , R_a 限制在一定范围内时,陡峭度值随着表面粗糙度的减小而增大。与此同时,光源入射角适当减小, R_a 适用范围扩大。

表2 不同测量条件下陡峭度 S_{ku} 与 R_a 值的相关性

Table 2 Correlation of S_{ku} and R_a under different experiment conditions

Incident angle	Incident intensity	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9	Sample 10	Correlation value with R_a
30°	High	0.6955	0.8109	0.8725	0.9013	0.7671	0.9981
	Medium	0.8171	0.8352	0.9335	0.9488	0.9073	0.9178
	Low	0.9484	0.9518	1.0939	1.3386	0.9966	0.7687
50°	High	0.6268	0.6381	0.6682	0.6494	0.6813	0.9311
	Medium	0.6531	0.7423	0.7603	0.6861	0.7739	0.9691
	Low	0.8328	0.8708	0.9951	0.7512	0.8833	0.9152
70°	High	0.6972	0.6509	0.6638	0.6128	0.8039	—
	Medium	0.7479	0.6687	0.6701	0.6321	0.9215	—
	Low	0.9217	0.8574	0.8141	0.7942	1.1736	—
$R_a / \mu\text{m}$		1.584	0.877	0.409	0.306	0.141	—

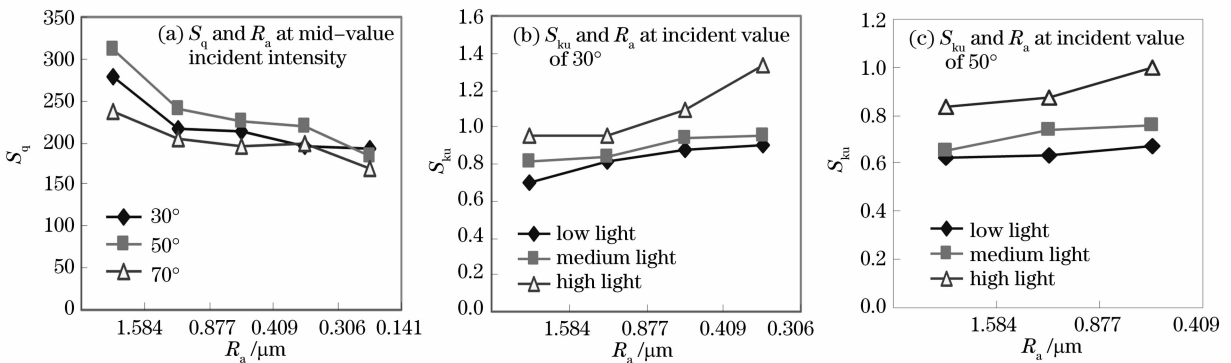


图3 R_q 、 S_{ku} 与 R_a 的相关曲线

Fig. 3 The correlation curve of R_q , S_{ku} and R_a

6 结 论

研究了基于数字图像处理技术的平磨表面粗糙度特征参数,包括均方根差和陡峭度。基于图像处理技术的特征参数值容易受光源入射角度和入射光强等测量条件的影响,此外,测量对实验样块的表面清洁程度要求也较高,应当加以注意。

由平行光源、粗糙度测量软件和输出设备组成的平磨表面粗糙度检测系统,可以实现图像中值滤波、图像边缘增强和阈值分割等预处理操作,表征平磨表面的粗糙程度。经标准平磨粗糙度样块测试表明,该系统可快速表征平磨表面的粗糙程度,在一定粗糙度范围内,特征参数值与 R_a 有较好的对应关系。

参 考 文 献

- 1 Wang Yaonan, Li Shu, Mao Jianxu. Computer Image Processing and Identification Technique [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001, 55~173
王耀南,李树,毛建旭. 计算机图像处理与识别技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001, 55~173
- 2 Dong W P, Sullivan P J, Stout K J. Comprehensive study of parameters for characterization 3-D surface topography-III [J]. *Wear*, 1994, **178**: 29~43
- 3 Dong W P, Sullivan P J, Stout K J. Comprehensive study of

- parameters for characterization 3-D surface topography-III [J]. *Wear*, 1994, **178**: 45~60
- 4 Li Dayong, Wang Wenzhuo, Shi Dequan. Automatic measurement of casting surface roughness based on digital image processing [J]. *Foundry*, 2007, **156**(9): 963~966
李大勇,王文卓,石德全. 基于数字图像处理的铸造表面粗糙度自动检测 [J]. *铸造*, 2007, **156**(9): 963~966
- 5 Li Dayong, Wang Wenzhuo, Chen Jie. The 3D evaluation method of casting surface roughness based on digital imaging [J]. *China Foundry Machinery and Technology*, 2007, **4**: 16~19
李大勇,王文卓,陈捷. 铸造表面粗糙度数字图像三维评价方法研究 [J]. *中国铸造装备与技术*, 2007, **4**: 16~19
- 6 F. Luk, V. Hyunh, W. North. Measurement of surface roughness by a machine vision system [J]. *Scientific Instruments*, 1989, **22**: 977~980
- 7 G. A. A. Kindi, R. M. Baul, K. F. Gill. An application of machine vision in the automated inspection of engineering surfaces [J]. *International Journal of Production Research*, 1992, **2**: 241~253
- 8 D. M. Tsai, C. F. Tseng. Surface roughness classification for castings [J]. *Pattern Recognition*, 1984, **32**: 389~405
- 9 D. G. Jason, J. M. Rourke, A. C. Bell. High-speed surface roughness measurement [J]. *Transactions of ASME*, 1984, **34**(106): 34~39
- 10 C. Bradlev, J. Bohlmann, S. Kurada. A fiber optic sensor for surface roughness measurement [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1998, **120**: 359~367
- 11 Stout, K. J. Sullivan, P. J. Dong *et al.*. The Development of Methods for the Characterization of Roughness in Three Dimensions [M]. Commission of the European Communities, 1993, 112~113