

3D Surface Topography Analysis Using Image Processing Technology in NC*

Huiqun Chen

Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen
Email: chqleo@126.com

Received: Aug. 3rd, 2013; revised: Sep. 2nd, 2013; accepted: Sep. 10th, 2013

Copyright © 2013 Huiqun Chen. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Huiqun Chen. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Topography of machined surface affects many of workpiece's technical performance and function to a large degree in NC machining. Surface topography is one of the important research topics in surface science. Studies show that machined surface has some fractal characteristics such as randomness, disorder, self-similarity, self-affine and multiscale. Surface topography influences the mechanical properties, physical properties and the rate of finished products. Under certain situations, processing quality of optical elements is detected by detecting 3D micro topography of optical surface. The surface of the workpiece is observed by placing on the focal plane of optical microscope. If there are obvious defects on the workpiece surface, several focus images from this workpiece surface are acquired and processed by moving the optical microscope up and down several times. According to the result of image processing, we judge whether a workpiece is conformed to machining requirements. An image processing software based on MATLAB2012 language is proposed in this paper, which achieves processing and analysis for several focus images, then fitting the 3D surface topography.

Keywords: Surface Topography; Image Processing; MATLAB

数控加工中 3D 表面形貌数字图像处理技术*

陈慧群

深圳信息职业技术学院, 深圳
Email: chqleo@126.com

收稿日期: 2013 年 8 月 3 日; 修回日期: 2013 年 9 月 2 日; 录用日期: 2013 年 9 月 10 日

摘要: 在数控加工中, 加工表面的几何形貌特性在很大程度上影响着它的许多技术性能和使用功能。开展对加工表面形貌的研究是表面科学中重要的研究课题之一。研究表明, 工程表面具有随机性、无序性、自相似性、自仿射性和多尺度性等分形特性。表面形貌影响光学元件的机械性能、物理性能、成品率; 在特定应用场合下, 通过检测光学元件表面三维微观形貌来检测光学元件的加工质量。将工件表面置于光学显微镜焦面上观测, 如观测到工件表面某处存在明显缺陷, 通过光学显微镜上下数次微移动, 对工件表面该处采集多幅对焦图像并进行图像处理, 根据处理结果判别工件是否符合加工要求。文中提出了一种基于 MATLAB2012 高级语言编写的图像处理软件, 实现对数幅对焦图像进行分析处理进而拟合出表面微观形貌的三维图形。

关键词: 表面形貌; 图像处理; MATLAB

*资助信息: 广东省教育科研“十二五”规划 2012 年度研究项目(2012 JK291), 2013 年广东省高职教育机械制造类专业教学指导委员会教学改革项目。

1. 引言

在数控加工中，表面粗糙度是衡量已加工表面质量的重要指标之一。为寻求最佳切削参数以控制表面粗糙度，人们越来越希望以较少的实验建立精度较高的表面粗糙度预测模型，从而摆脱传统上依靠经验公式或查阅手册来确定加工参数的被动局面，并在实际加工前得到最佳的加工方案^[1]。表面形貌可以反映出光学元器件的成品率、性能(主要是物理性能、机械性能)^[2,3]，因此，通过检测光学元器件 3D 表面微观形貌来检测光学元器件的工具加工质量^[4]。目前，微观表面形貌的检测有很多种方法，随着显微镜放大倍数与分辨率的提高，可采用高倍显微镜结合数字图像处理技术准确地检测出微观形貌^[5,6]。MATALAB 软件方便实现 VC 接口^[7]，在 MATALAB 中调用 VC 代码数据传输非常方便，非常容易实现图像处理一些复杂算法，编程效率极高。

2. 图像检测法原理

图 1 是图像检测法原理图示。加工工件表面与光学显微镜的焦平面始终保持在一个水平面上，图像检测原理如下：对加工工件表面进行扫描测量时，通过 CCD 图像传感器先把光学影像转化为数字图像信号，再把图像信号传送到计算机上进行处理和软件分析。固定加工工件的工作台可作前后左右四个方向移动，光学显微镜可上下两个方位调节。在对加工工件扫描检测过程中，如发现加工工件表面某处存在裂纹、凹坑、划痕等明显缺陷时，可通过光学显微镜上下数次

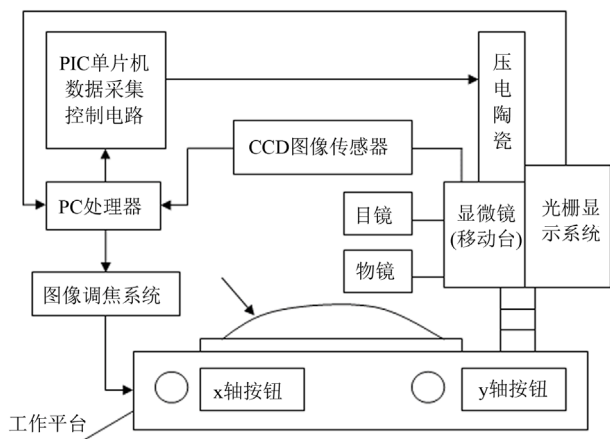


Figure 1. Principle of image detection method
图 1. 图像检测法原理

微移动调焦，在加工工件表面有缺陷处多采集些对焦图像，经过图像处理分析拟合出工件三维微观形貌，进而可以判断工件表面形貌是否达到预期的加工质量要求。

3. 灰度差分析法

灰度差分析法又称微分算法^[8]，以间隔为 dl ，灰度差为 i 的灰度差概率分布函数 $f(i,dl)$ 为基础，构造统计量作为纹理度量的统计纹理分析方法，是目前二维图像较成熟的检测技术的算法。采用 CCD 图像传感器采集到二维图像是一个二维矩阵，二维图像灰度值函数可表达为：

$$F(x,y) = P(x,y) f_1(\sqrt{x^2+y^2}) f_2(\sqrt{x^2+y^2}) \quad (1)$$

沿 x 方向求微分，微分峰值检测法的理论特性计算过程为：

$$\Psi(S) = \frac{\partial F(x,y)}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad S = \frac{d}{d_m}$$

$$\begin{cases} \text{当 } 0 < S < 1 \text{ 时,} \\ \Psi(S) = \frac{\Psi}{S^2} [(1+S^2)P(S) - (1-S^2)Q(S)] \\ \text{当 } S = 1 \text{ 时,} \quad \Psi(S) = 2T \\ \text{当 } S > 1 \text{ 时,} \quad \Psi(S) = \frac{T}{S} [(1+S^2)P(S) - (1-S^2)Q(S)] \end{cases} \quad (2)$$

其中 T 为常数， d 为物方离焦量， d_m 为半焦深， $R(S)$ 、 $Q(S)$ 分别为 Legendre 形式下的第一、第二类全椭圆积分，定义为：

$$R(S) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1-S^2 \sin^2 \theta}} d\theta, \quad Q(S) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-S^2 \sin^2 \theta} d\theta$$

特性曲线图见图 2，由图可知，检测特性曲线分为抛物曲线、直线、双曲线三个区段。

1) 抛物线区：该段曲线变换缓慢且呈下降趋势，形状呈曲型的抛物线函数规律，当离焦量达到半焦深 d_m 时，检测特性曲线衰减了总幅值的 14% 左右，该值可视为微分峰值检测法的极限灵敏度，在评价电路性能时，可将其视为是否达到设计指标的一个重要参数。

2) 直线区：检测特性曲线在与前段抛物线相接处有一拐点，线性较好，曲线斜率最大。在这里曲线共

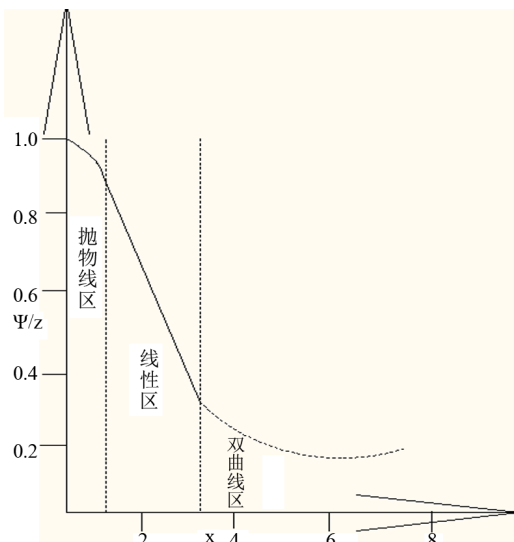


Figure 2. Image detecting characteristic curve
图 2. 图像检测特性曲线

衰减了总幅值的 50% 之多。

3) 双曲线区：将(2)式中最后一表达式以 $S \gg d_m$ 代入，可计算得：

$$\Psi(S) \cong \frac{T'}{d}$$

这是以离焦量为自变量的双曲函数表达式。双曲线规律缓慢的衰减有效地展宽了微分峰值检测方法的检测范围。

事实上，二维图像中每位像素的灰度值与矩阵中每一元素的数值相对应，所谓的微分就是求相邻两位像素的灰度值差值的绝对差值。根据微分峰值检测法的理论特性：若加工工件表面上的某点在显微镜物镜焦面上时，其图像最清晰，即图像中每相邻两位像素的灰度值的绝对差值最大；当该点离显微镜物镜焦面越远，其图像越模糊，即图像中每相邻两位像素的灰度值的绝对差值越小；反之，当该点离显微镜物镜焦面越近，其图像越清晰，即图像中每相邻两位像素的灰度值的绝对差值越大。

4. 图像处理分析

图像获取过程可参看图 1，采用显微镜的分辨率为微米级，当发现工件加工表面存在缺陷时，将显微镜物镜焦面向上移动，直至图像明显由清晰变模糊停止上移；显微镜逐次向下进给 1 μm 获取相应的图像，直至图像明显由清晰变模糊停止下移。

下面以加工工件表面某一点来说明三维微观形貌图像处理过程，如图 3 所示，A 点为工件表面某处微观形貌的最低点，C 点则为最高点，B 点介于 A 点与 C 点之间，显微镜物镜的初始焦面 M_0 位于 C 点上方，显微镜进给 n 个 μm 后，物镜的焦面到达终点焦面 M_n 位置停止移动，终点焦面 M_n 位于 A 点下方。

假定显微镜物镜的焦面位于焦面 M_i 时获得的二维图像矩阵为 M_i 作滤波处理以便去除噪声与抑制波纹度等低频分量^[9]，得到的二维图像矩阵 F_i ，其中每个元素对应于获取图像中的每一像素，去除矩阵 F_i 第一列得到矩阵 P_i ，去除矩阵 F_i 最末一列得到矩阵 H_i ，矩阵 D_i 的元素为二维矩阵图像为 F_i 的某一行相邻两位像素灰度值差值的绝对值。矩阵 D_i 与焦面 M_i 相对应，矩阵 D_{i-1} 与焦面 M_{i-1} 相对应，矩阵 D_i 与矩阵 D_{i+1} 相减得到矩阵 R_i ；矩阵 I_i 对矩阵 R_i 二值化。

$$F_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix},$$

$$P_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n-1} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn-1} \end{bmatrix},$$

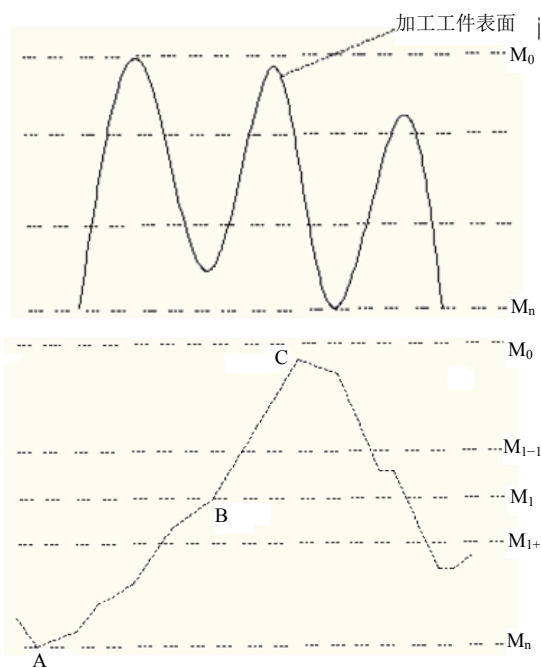


Figure 3. Topography image processing
图 3. 形貌图像处理过程

$$H_i = \begin{bmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14} & \cdots & a_{1n} \\ a_{22} & a_{23} & a_{24} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix},$$

$$D_i = \begin{bmatrix} |a_{11} - a_{12}| & |a_{12} - a_{13}| & |a_{13} - a_{14}| & \cdots & |a_{1n-1} - a_{1n}| \\ |a_{21} - a_{22}| & |a_{22} - a_{23}| & |a_{23} - a_{24}| & \cdots & |a_{2n-1} - a_{2n}| \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |a_{n1} - a_{n2}| & |a_{n2} - a_{n3}| & |a_{n3} - a_{n4}| & \cdots & |a_{nn-1} - a_{nn}| \end{bmatrix}$$

$$R_i = D_i - D_{i-1}$$

$$I_i = im2bw(R_i, 0), \quad I = \sum_1^n I_i \quad (3)$$

矩阵 M_1 、 D_1 、 R_1 、 I_1 与焦面 M_1 相对应， M_2 、 D_2 、 R_2 、 I_2 与焦面 M_2 相对应，其余以此类推。

由于显微镜物镜的焦面从初始焦面 M_0 进到到终点焦面 M_n 的距离短，可以近似认为三维微观形貌上各点在 CCD 摄像头上成像位置不变，与 CCD 摄像机采样获得的二维图像矩阵每一像素相对应。对于微观形貌中 B 点，在矩阵 D_i 、 R_i 、 I_i 与 I 必有一元素与之对应。

显微镜物镜的焦面从初始焦面 M_0 向下进到到焦面 M_1 ，B 点向显微镜物镜的焦面靠近，根据微分算法原理，矩阵 D_0 对应于 B 点的元素比矩阵 D_1 对应于 B 点的元素数值小，矩阵 R_1 对应于 B 点的元素的值为正，矩阵 I_1 对矩阵 R_1 二值化，矩阵 I_1 对应于 B 点的元素的值为 1。依此类推， $I_2, I_3, I_4, \dots, I_i$ 对应于 B 点的元素的值为 1。显微镜物镜的焦面从焦面 M_1 向下进到到焦面 M_{i+1} ，B 点远离显微镜物镜的焦面，根据微分算法原理，矩阵 D_i 对应于 B 点的元素比矩阵 D_{i+1} 对应于 B 点的元素数值大，矩阵 R_{i+1} 对应于 B 点的元素的值为负，矩阵 I_{i+1} 对矩阵 R_{i+1} 二值化，矩阵 I_{i+1} 对应于 B 点的元素的值为 0。依此类推， $I_{i+2}, I_{i+3}, I_{i+4}, \dots, I_n$ 对应于 B 点的元素的值为 0。

矩阵 $I_1, I_2, \dots, I_i, I_n$ 累加得到一个矩阵 I ，矩阵对应于 B 点的元素的值为 i ，即 B 点相对于初始焦面 M_0 的距离为 i 个 μm 。同理，矩阵 I 的其他元素的值均为三维微观形貌上相应的各点相对于初始焦面 M_0 的距离(图 3)。

软件采用 MATLAB2012b 高级语言进行开发，MATLAB2012b 提供了大量数据函数库与句柄图形，适用于矩阵运算以及二维和三维数据的可视化、图像

处理与图形显示^[10]。

将某零件表面置于光学显微镜的焦面，光学显微镜按前文所叙述的方法作上下移动，获取若干幅对焦图像，图 4 为若干幅对焦图像之一。图 5 为本软件系统流程图。采用 MATLAB2012b 高级语言编写图像软件处理的实际效果如图 6 所示。图中 x 表示工件长度， y 表示工件转角有关参数， z 为表面形貌相对初始焦面距离值，由图可见，已加工表面在横向和纵向均能形成波浪状刀痕，其波峰、波谷线不在同一条侧母线上，所以其表面形貌表现为相互错开的波峰、波谷，这样的表面形貌在滑动摩擦副中形成的储油结构比传统加工表面更利于存油，更有利于减小表面摩擦，增加工件使用寿命。

5. 结论

在本文中，提出了一种基于 MATLAB2012b 高级语言编写的图像处理软件，采用微分算法对数幅对焦

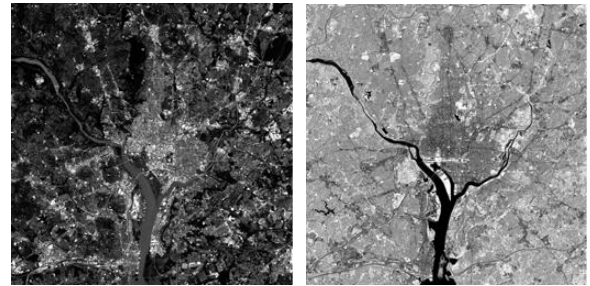


Figure 4. Contrast between grayscale image and focused image
图 4. 灰度图原图与对焦图像对比

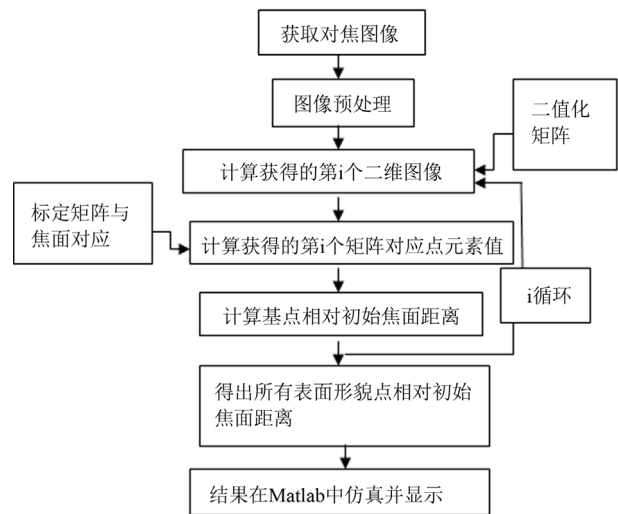


Figure 5. Flow chart of software system
图 5. 软件系统流程图

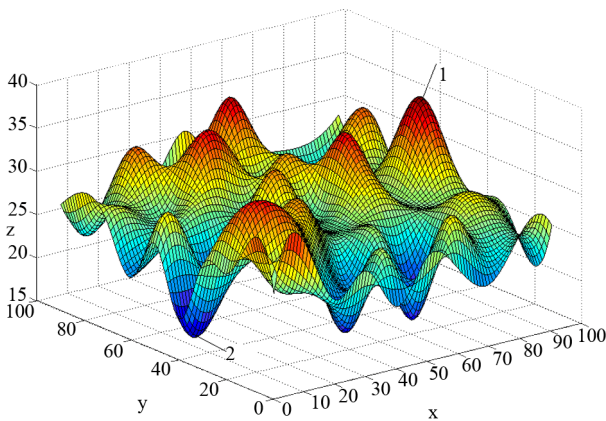


Figure 6. Topography simulation
图 6. 形貌仿真效果图

图像进行处理进而拟合出表面微观形貌的三维图形。MATLAB 是高层次的矩阵/数组语言。具有条件控制、函数调用、数据结构、输入输出、面向对象等程序语言特性，能够实现矩阵运算、矩阵分析等高层次数学算法。图形句相系统是 MTALAB 系统的五个主要部分组成之一，能够完成二维和三维数据图示、图像处理、动画生成、图形显示等功能的高层 MATLAB 命令，也包括用户对图形图像等对象进行特性控制的底层 MATLAB 命令，以及开发 GUI 应用程序的各种工具。由此可见，采用 MATLAB2012 高级语言编写的

图像处理软件，极大简化了程序设计过程，节省了大量的编程时间。

参考文献 (References)

- [1] 黄昆涛, 房丰洲, 宫虎 (2013) 超精密车削表面微观形貌对光学特性的影响. *光学精密工程*, **1**, 101-107.
- [2] Qiao, G., Dong, G. and Zhou, M. (2013) Simulation and assessment of diamond mill grinding wheel topography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **68**, 2085-2093.
- [3] Liu, Z., Jeong, Y. and Menq, C.H. (2013) Calibration of measurement sensitivities of multiple micro-cantilever dynamic modes in atomic force microscopy using a contact detection method. *Review of Scientific Instruments*, **84**, Article ID: 023703.
- [4] 刘海, 李焯, 李妍臻 (2013) 基于图像处理的 PCB 自动检测系统的设计与研究. *电子世界*, **4**, 114-117.
- [5] 翟永平, 刘云辉, 周东翔 等 (2012) 稀疏图像内容情况下显微镜自动聚焦算法. *软件学报*, **5**, 1281-1294.
- [6] Peng, F., Wu, J., Fang, Z., et al. (2013) Modeling and controlling of surface micro-topography feature in micro-ball-end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **67**, 2657-2670.
- [7] 贾慧贤, 刘鸿宇 (2013) MATLAB 和 VC 环境下图像处理效果比较. *科技信息*, **8**, 176-178.
- [8] 李月洁 (2012) 基于纹理和灰度差分相结合的运动检测. *计算机与数字工程*, **11**, 146-164.
- [9] 方以, 郑崇勋, 闫相国 (2005) 显微镜自动聚焦算法的研究. *仪器仪表学报*, *光学技术*, **12**, 1275-1277.
- [10] 彭博栋, 魏福利 (2008) VC6.0 与 MATLAB7.x 混合编程方法研究. *计算机与数字工程*, **9**, 174-178.