

# 基于纹理分析的表面粗糙度等级识别

靳宏磊 张振华 李立源 陈维南  
(东南大学自动化所, 南京 210096)

王兴松  
(东南大学机械工程系, 南京 210096)

**摘要** 提出了一种利用图象纹理分析技术进行机械加工表面粗糙度检测的非接触检测方法. 该方法首先根据统计方差对待测工件的表面粗糙度进行粗分类, 然后, 利用基于 Gabor 滤波器的纹理分类器, 识别待测工件表面粗糙度等级. 该新方法可简单、快速地完成表面粗糙度等级的自动识别, 而且对图象旋转具有不变性, 由于其纹理分类器的参数少, 并且新方法成本低, 参数标定方便, 因而便于现场检测, 如果与机床的控制系统相连, 还可以实现加工的实时闭环控制.

**关键词** 纹理分析 表面粗糙度 计算机视觉 Gabor 滤波器

中图分类号: TP391.41 TG84-39 文献标识码: B 文章编号: 1006-8961(2000)07-0612-04

## Surface Roughness Detection Based on Texture Analysis

JIN Hong-lei, ZHANG Zhen-hua, LI Li-yuan, CHEN Wei-nan  
(Institute of Automation, Southeast University, Nanjing 210096)

WANG Xing-song  
(Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract** With the growing emphasis of industrial automation in manufacturing, vision techniques play an important role in many applications. Since different surfaces have different textures, the techniques of texture analysis can be used for the recognition of surfaces. In this paper, a novel non-contacted approach to measure the roughness of machined surfaces based on texture analysis techniques is presented. When using Gabor filters, it is more complex to classify multiple textural images than to distinguish the texture between two images. According to other related paper and our experiments, the surface of a measured specimen can be classified coarsely according to its gray-level variance. Then, the roughness of the surface can be detected using Gabor filters. We present the method of designing the filters and the experiments show better results as well. The approach can detect the surface roughness automatically and quickly. It is invariant to rotation, and has fewer classifiers. Furthermore the cost of the device for implementing the approach is low and the parameters can be set easily. If the system is connected with the control system of a machine, we can realize real-time close looped control of the machining procedure.

**Keywords** Texture analysis, Surface roughness, Computer vision, Gabor filter

## 0 引言

在机械工业生产中, 产品的工艺水平对表面粗糙度等级(即表面光洁度)有特定要求, 且对一个工件的许多技术性能评价也常常依赖于制件表面特征的状况, 因此在生产中需进行表面粗糙度检测. 通

常, 表面粗糙度的检测方法有触针法、显微干涉法、光切法和印模法等<sup>[1, 2]</sup>. 由于现有的检测方法, 都是通过光学或机械装置测量表面微观形状的一些参数, 然后经人工计算, 来得出表面粗糙度等级, 但它不能实现表面粗糙度等级的自动识别, 并且现有的方法都是用一些专门的光学或机械精密仪器实现的, 其成本较高, 操作不便, 且不易在现场使用. 此

外, 对于机械接触型测量仪器来说, 其接触装置的使用寿命还易受机械磨损的影响, 因此, 需要探寻一种非接触的自动检测方法。

所谓表面粗糙度就是工件表面的微观几何形状误差, 主要是由切削过程中刀具在工件表面上留下的刀痕而产生的<sup>[1,2]</sup>。因此在一定的加工方式下, 某一粗糙度等级, 其相应工件的表面就具有一定的纹理模式。图 1 和图 2 分别为刨床和铣床加工工件的粗糙度标准块的表面纹理图象。从图象上可看出, 该机加工工件表面形成了比较有规律的纹理, 因而可以使用纹理分析的方法对粗糙度进行识别。

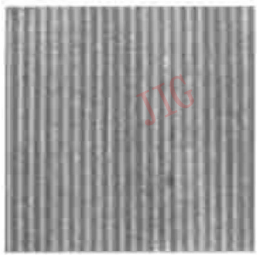


图 1 刨床加工工件

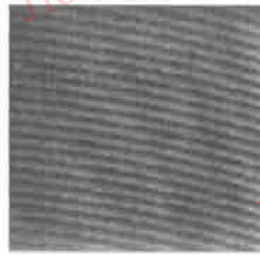


图 2 铣床加工工件

几十年来, 人们提出了许多纹理分析的方法, 总的说来, 纹理分析方法可以分为统计的方法(如共生矩阵)、几何的方法(如纹理基元描述)、模型的方法(如马尔科夫随机场模型和分形模型)以及信号处理方法(小波分析和 Gabor 滤波器的方法)<sup>[3,4]</sup>。对于机加工工件表面粗糙度检测, 文献[5]指出可以采用共生矩阵等纹理分析结合统计的方法进行检测。本文是先利用统计方差参数对待测工件表面粗糙度进行粗分类, 然后利用时频分析方法对粗糙度等级进行识别。实践证明, 这种方法识别准确率在 85% 以上, 标定时间与识别时间均在 1s 以内, 从而实现了机加工工件表面粗糙度等级的自动检测。

## 2 Gabor 滤波器

复 Gabor 滤波器形式为

$$h(x, y) = g(x, y) \exp[-j2\pi(U_x + V_y)] \quad (1)$$

其中

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_g^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_g^2}\right] \quad (2)$$

纹理图象经过 Gabor 滤波器滤波后, 取模得到  $m(x, y)$ , 从文献[6]、[7]可知,  $m(x, y)$  服从 Rician 分布,  $m(x, y)$  再经过 Gaussian 函数  $g_p(x, y)$  平滑后得到的  $m_p(x, y)$ , 且由中心极限定理推得  $m_p(x, y)$  服从 Gaussian 分布。

$$g_p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_p^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_p^2}\right], \sigma_p \gg \sigma_g$$

我们将公式(1)中的 Gabor 滤波器进行修正, 改写成极坐标形式

$$h(\rho, \theta) = g(\rho, \theta) \exp[-j2\pi\rho_0\rho] \quad (3)$$

其中,  $g(\rho, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma_g^2}\right]$ ,  $\rho_0$  为中心频率点, 即修改后的 Gabor 滤波器在频域半平面上为环状滤波器。

## 2 表面粗糙度等级识别

如果直接使用 Gabor 滤波器来对纹理图象进行识别, 就要同时使用多个分类器来处理图象, 即同时用多个 Gabor 滤波器对图象进行卷积运算<sup>[8,9]</sup>, 因而计算量将很大, 其实时性难以保证。

从文献[5]的研究以及根据我们的实验可以知道, 随着工件表面粗糙程度的增加, 图象象素灰度方差也随之增大。对于某一加工方式下的某一粗糙度等级, 其灰度方差会落入一定的范围, 并呈正态分布, 而同一加工方式下相邻粗糙度等级的灰度方差分布可能会相互覆盖, 但相间粗糙度等级的灰度方差分布一般相交程度很小。表 1 是在实验室中, 用方差参数获得的铣床加工的 4 个等级标准粗糙度样块的分类结果。

表 1 粗分类准确率

粗糙度 ( $\mu\text{m}$ )	单位: %			
	$R_a=20$ ( $\nabla 3$ )	$R_a=10$ ( $\nabla 4$ )	$R_a=5$ ( $\nabla 5$ )	$R_a=2.5$ ( $\nabla 6$ )
$R_a=20$	98.15	1.85	0	0
$R_a=10$	3.25	96.75	0	0
$R_a=5$	0	0.85	62.05	37.1
$R_a=2.5$	0	0	43.5	56.5

从表中可以看出, 仅用方差参数不能很好地将粗糙度等级识别出来, 但可以用方差对图象先进行粗分类, 即将图象分为几个大类, 而每个大类含有 2~3 个相邻粗糙度等级, 对于每一大类的 2~3 个粗糙度等级, 再使用基于 Gabor 滤波器的时频分析方法进行识别。

粗分类的方法如下:

设某一加工方式下的连续  $m$  个粗糙度等级的方差分布分别服从  $N(\mu, \sigma^2)$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ , 对于待测工件表面图象, 先计算给定窗口内的灰度方差, 并设为  $x$ , 按 Bayes 最小风险决策<sup>[10]</sup>,  $x$  属于第  $i$  类的判别函数为

$$g_i(x) = -\frac{1}{2\sigma_i^2}x^2 + \frac{\mu_i}{\sigma_i^2}x - \frac{\mu_i^2}{2\sigma_i^2} - \frac{1}{2}\ln\sigma_i^2 \quad (4)$$

设有  $i_1$  满足

$$i_1 = \arg \left| \max_{i \in [1, m]} g_i(x) \right|$$

并有  $i_2 \in \{i_1 - 1, i_1 + 1\}$ , 且

$$i_2 = \arg \left| \max_{i \in [i_1 - 1, i_1 + 1]} g_i(x) \right|$$

则可将待测工件的表面粗糙度等级粗分为  $\{i_1, i_2\}$  大类.

其细分类问题用基于 Gabor 滤波器的时频分析技术解决. 以下就每一大类含两个粗糙度等级的情况进行讨论, 而对于每一大类含有 3 个粗糙度等级的情况也可以类推. 滤波器参数的设计, 采用文献[7]提出的方法. 该方法是在频域空间内找出最有效的分离两种纹理的 Gabor 滤波器, 即一个最有效的二选一带通滤波器, 与其它基于 Gabor 滤波器的纹理分析方法相比, 该方法分离精度高, 所用滤波器数目少, 且计算效率高. 由于该方法是为纹理分割而提出的, 因此它在滤波器设计时需要事先知道待区分纹理的一些特征, 故更适用于二选一的纹理分类. 而在做表面粗糙度等级检测时, 改用式(3)的 Gabor 滤波器, 其识别方法对旋转具有不变性.

该方法原理是设两相邻粗糙度等级的粗糙度标准样块纹理图象为  $i_1(x, y)$  和  $i_2(x, y)$ , 其自相关函数为  $R_1(x, y)$  和  $R_2(x, y)$ , 功率谱密度为  $S_1(\rho_\omega, \theta_\omega)$  和  $S_2(\rho_\omega, \theta_\omega)$ .

当纹理图象  $i_k(x, y), k = 1, 2$ , 经 Gabor 滤波器  $h(\rho_i, \theta)$  滤波后, 对于给定的 Gabor 滤波器参数  $(\rho_0, \sigma_g)$ , 其输出的总能量为

$$P_k(\rho_0) = \iint_{R^2} S_k(\rho_\omega, \theta_\omega) |H(\rho_\omega, \theta_\omega)|^2 d\rho_\omega d\theta_\omega \quad (5)$$

其中,  $k = 1, 2$

文献[7]中证明: 对于任意的 Gabor 滤波器, 其参数为  $(\rho, \sigma_g)$  的输出功率可表示为

$$P_k(\rho) = F \left| w(\rho_i, \theta) \cdot R_k(\rho_i, \theta) \right|$$

式中,  $F$  表示傅里叶变换,  $w(\rho, \theta)$  为窗函数, 定义为

$$w(\rho_i, \theta) = g(\rho_i, \theta) * g(\rho_i, \theta) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_g} \exp \left| -\frac{\rho_i^2}{2(\sqrt{2}\sigma_g)^2} \right| \quad (6)$$

其中,  $P_k(\rho)$  可以通过快速傅里叶变换求取.

而此分类器的设计问题, 就是确定两组滤波器参数  $(\rho_{01}, \sigma_{g1})$  和  $(\rho_{02}, \sigma_{g2})$ , 其要求是使纹理图象  $i_1(x, y)$  和  $i_2(x, y)$  经两组滤波器滤波后, 其能量比分别达到最大, 因而滤波器参数的选择可表示如下:

(1) 对给定粗糙度的标准样块图象  $i_1(x, y)$  和  $i_2(x, y)$ , 计算其自相关函数  $R_1(x, y)$  和  $R_2(x, y)$ ;

(2) 对于给定的  $\sigma_g$ , 用式(6)计算相应的窗函数  $w(\rho_i, \theta)$ ;

(3) 用离散傅里叶变换, 计算  $P_1(\rho)$  和  $P_2(\rho)$ ;

(4) 选择中心频率  $\rho_{01}, \rho_{02}$ , 使它们满足:

$$\rho_{01} = \arg \left| \max_{\rho} \left| \frac{P_1(\rho)}{P_2(\rho)} \right| \right|; \quad \rho_{02} = \arg \left| \max_{\rho} \left| \frac{P_2(\rho)}{P_1(\rho)} \right| \right|$$

(5) 对于所要考虑的  $\sigma_g$ , 重复步骤(2)~(4), 找出最优的参数  $(\rho_{01}, \sigma_{g1}), (\rho_{02}, \sigma_{g2})$ .

滤波器设计好之后, 两相邻粗糙度等级的分类可表示如下:

对于标准粗糙度等级图象, 经滤波后, 得到相应的均值和方差  $(\mu_{ij}, \sigma_{ij})$ , 其中,  $i = i_1, i_2$ , 表示不同粗糙度标准样块的纹理图象;  $j = 1, 2$ , 表示采用不同的 Gabor 滤波器.

对于待测图象  $m_k(x, y), k = 1, 2$ , 本文用马氏距离来定义待测图象与标准图象的差别<sup>[11]</sup>:

$$d_i = \left| \mathbf{m}(x, y) - \boldsymbol{\mu}_i \right|^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \left| \mathbf{m}(x, y) - \boldsymbol{\mu}_i \right|, \quad i = i_1, i_2$$

其中  $d_i$  为待测图象与标准图象  $i$  的马氏距离,  $\boldsymbol{\Sigma}$  是标准图象  $i$  经滤波后的协方差矩阵,  $\mathbf{m}(x, y) = \left| m_1(x, y), m_2(x, y) \right|^T, \boldsymbol{\mu}_i = (\mu_{i1}, \mu_{i2})^T, T$  表示转置. 一般, 根据以上所述设计的这两个滤波器, 在频域上基本不相交, 即可以认为纹理图象经过滤波后所得到的两个图象的相关系数等于 0, 因而马氏距离可写为

$$d_i \approx \sum_{j=1}^2 \frac{|m_j(x, y) - \mu_{ij}|^2}{\sigma_{ij}^2}$$

判别规则为: 如果  $d_{i1} \leq d_{i2}$ , 则待测图象粗糙度等级为  $i_1$ , 否则待测图象粗糙度等级为  $i_2$ .

### 3 实验结果

利用本文提出的方法对机加工工件进行了实验, 工件取自标准机加工工件, 在实验室中用 CPE1000 图象采集系统, MTV-8055MK II CCD 摄像头摄得大小为  $128 \times 128$  像素的标准工件图象, 然后在该图象上, 取  $64 \times 64$  像素图象进行标定, 再对所摄的像素粗糙度等级进行识别, 其工件粗糙度等级准确度是以像素计算的(实验中  $\sigma_p = 2\sigma_g$ ). 表 2 是刨床加工工件的 3 个表面粗糙度等级识别结果, 对表中 3 个粗糙度等级没有进行粗分类; 表 3 是铣床加工的工件表面粗糙度等级识别结果, 但对此工件

先粗分为两大类,其粗分类结果可见表 1. 为了说明本文方法的效果,同时在表 2、表 3 中还附上了文献 [5] 使用方差以及共生矩阵中熵这一参数所得到的识别结果(每一象素点参数是从  $20 \times 20$  象素的矩阵中获得). 从表上可见,本文方法的识别准确率除个别粗糙度级别低于文献 [5] 方法外,其余均高于文献 [5] 方法.

表 2 刨床粗糙度等级的识别准确率 单位: %

粗糙度等级	$R_a = 20\mu\text{m}$ (▽3)	$R_a = 10\mu\text{m}$ (▽4)	$R_a = 5\mu\text{m}$ (▽5)
准确率(本文)	99.7	99.1	92.8
准确率(文献[5])	90.78	97.15	90.97

表 3 铣床粗糙度等级的识别准确率 单位: %

粗糙度等级	$R_a = 20\mu\text{m}$ (▽3)	$R_a = 10\mu\text{m}$ (▽4)	$R_a = 5\mu\text{m}$ (▽5)	$R_a = 2.5\mu\text{m}$ (▽6)
准确率(本文)	98.35	98.96	87.27	81.81
准确率(文献[5])	98.15	96.75	98.51	46.51

我们使用 C 语言在奔腾计算机上实现了本文的识别算法,该识别算法对  $128 \times 128$  象素图象的识别所用时间小于 1s,而参数设定的时间为 1s 左右.

## 4 结束语

先利用统计方差将待测工件进行粗分类,然后利用时频分析方法对机加工工件的表面粗糙度等级进行了识别实验,从实验结果看,本文方法达到了令人满意的效果,并实现了表面粗糙度等级的自动识别. 本文使用的方法具有旋转不变性,且参数选择简单、运算、识别速度快,参数的选取可以离线获得,如果与机床的控制系统相连接,还可以实现机加工的实时闭环控制. 对于更高精度等级的工件,它的纹理特性逐渐减弱,因此需要进一步改进本文提出的算法或者改进实验工具,以适应更高精度等级粗糙度的识别. 本方法还可以应用于其它应用领域或对其它应用具有一定借鉴作用.

## 参 考 文 献

1 毛起广. 表面粗糙度的评定和测量. 北京:机械工业出版社, 1991.

- 2 瞿绪圣. 表面粗糙度测量. 北京:中国计量出版社, 1989.
- 3 郑南宁. 计算机视觉与模式识别. 北京:国防工业出版社, 1998.
- 4 赵峰, 赵荣椿. 纹理分割方法综述. 见: '98 中国智能自动化年会论文集, 上海, 1998, 697~ 707.
- 5 Ramana K V, Ramamoorthy B. Statistical methods to compare the texture surfaces of machined surface. PR., 1996, 29(9): 1447~ 1460.
- 6 Dunn D, Higgins W E. Optical Gabor filters for texture segmentation. IEEE Trans on IP., 1995, 4(6): 947~ 964.
- 7 Weldon T P, Higgins W E, Dunn D. Efficient Gabor filter for texture segmentation. PR., 1996, 29(12): 2005~ 2015.
- 8 Jain A K, Farrokhnia F. Unsupervised texture segmentation using Gabor filters. PR, 1991, 24(12): 1167~ 1186.
- 9 Azencott R, Wang J P, Younes L. Texture classification using windowed fourier filters. IEEE Trans on PAMI., 1997, 19(2): 148~ 152.
- 10 Duda R O, Hart P R. Pattern classification and scene analysis. New York: John Wiley & Sons, 1973.
- 11 方开泰. 实用多元统计分析. 上海:华东师范大学出版社, 1989.



靳宏磊 1992 年毕业于国防科技大学自动控制系,并获学士学位,1995 年获东南大学自动化所硕士学位. 现为东南大学自动化所在读博士生. 研究领域为图象处理、模式识别、计算机视觉.

张振华 1995 年毕业于东南大学自动控制系,获学士学位. 现为东南大学自动化所硕士研究生. 主要研究方向为计算机视觉、图象处理、多媒体.

李立源 1963 年生,1988 年毕业于东南大学电子工程系,获硕士学位. 现为东南大学自动化所副教授. 感兴趣的研究领域有模式识别、人工智能计算机视觉.

陈维南 1960 年毕业于南京工学院. 现为东南大学教授、博士生导师,江苏省自动化学会理事长. 目前主要从事计算机视觉、图象处理、智能控制等方面的研究. 专著有《计算机控制技术》,已发表论文 50 余篇.

王兴松 1991 年获浙江大学机械系硕士学位. 现为东南大学机械系副教授. 研究方向为机电一体化、机器人.