

机械加工零件表面纹理缺陷检测

黎明 马聪 杨小芹

(南昌航空工业学院测试与控制工程系, 南昌 330034)

摘要 在一些对机械加工零件表面的加工精度和表面质量要求较高的自动化工业中,对机械加工零件表面纹理缺陷进行可靠的、有效的检测和分析可以大大地提高生产加工的自动化水平。为了能够对机械加工零件表面进行可靠、有效的检测,根据机械加工零件表面的纹理特点,设计了一种新的图像频域滤波器,用于增强缺陷纹理图像和抑制背景纹理对缺陷纹理检测的干扰,再通过图像分割的方法实现了缺陷纹理和背景纹理的分割。实验结果显示,这种方法检测速度较快,尤其适用于机械精加工零件表面纹理缺陷的准实时检测。

关键词 图像滤波 缺陷检测 图像分割

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)03-0318-05

Detection of Texture Defects for Machined Surface

LI Ming, MA Cong, YANG Xiao-qin

(Dept. of Test and Control Engineering, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034)

Abstract Surface inspection for quality control is the most important part of today's highly competitive industrial production. There are a great number of manufacturing processes where inspection for surface finishing or surface defects is attempted; steel strip, hot steel slabs, plastic plates, painted surfaces, wooden surfaces, profiles and etc. But the surface inspection is usually a bottleneck in many production processes. Reliable and effective detection of machined surface defects is of great importance in automatic industry that needs high surface aesthetics and machined precision, it can obviously enhance the entire efficiency for the automatic manufacturing. A novel image filter has been developed in this paper, it transforms the original image via FFT and then filters out those Fourier areas which Fourier energy concentrates on. These Fourier areas correspond to the background texture on machined directions. The method can enhance the texture defects and reduce the effect of background texture by analyzing the texture features of machined surfaces. Then the texture defects can be easily detected through the segmentation of defects and background. The experimental results have shown that the method can obtain precise results and high detection speed.

Keywords Image filter, Defects detection, Image segmentation

1 引言

在当今高度竞争的工业生产过程中,机械零件表面检测技术作为一种产品质量控制的重要手段,被广泛地用于工业过程的质量控制,而在机械加工自动化行业,由于加工过程的刀具行程的变化、材料的本身特性、振动、刀具的损伤以及抛光处理不恰当等,都会在机械加工零件表面形成凹痕、擦伤、外观

变形、方向不正、不理想的反光特性等等缺陷。虽然对于这些微小的缺陷,特别是纹理缺陷,通常人眼对其反应很灵活和敏感,比较容易识别,但是由于这些缺陷类型难以用数学描述,致使使用计算机进行自动视觉检测较为困难,因此进行可靠和稳定的纹理缺陷检测并分类,仍然具有挑战性,并具有重要使用意义。

对于机械加工零件表面计算机视觉纹理缺陷检测的研究现状,文献[1]做了较为详细的介绍,并建

立了一种可以对纹理缺陷进行检测分类的典型系统,其包括如下相互连接的 5 个子系统:(1)图像采集系统;(2)纹理缺陷检测系统;(3)特征提取子系统;(4)特征分析子系统;(5)分类子系统。

文献[2]介绍了一种皮制品表面纹理缺陷检测系统,该系统工作过程实际上就是在了一幅纹理图像上实现缺陷目标搜索的过程,这种搜索过程造成了检测时间较长。文献[3]详细地介绍了多种基于统计分析的机械加工零件表面纹理缺陷检测方法,而文献[4]则提出了一种基于空间点模版匹配的纹理缺陷检测方法。文献[5]是采用自相关函数和谱分析相结合的方法对三维纹理缺陷的识别进行了尝试。

在本文中,通过研究机械加工零件表面的纹理特点,特别是机械加工零件表面的纹理方向性较强的特征,提出了一种新的计算较为简单的纹理缺陷检测方法,即首先对图像进行傅里叶变换,并通过设计滤波器来去除纹理的方向性,再通过傅立叶反变换来得到一幅新的图像,然后再对新图像进行阈值分割,即可得到缺陷目标的二值图像,最后通过图像形态学运算方法去除掉纹理分割噪声和干扰,以实现缺陷目标与背景纹理的分离。试验结果表明,本方法较适用于机械加工零件表面纹理缺陷的实时检测。

2 机械加工表面纹理缺陷检测系统框图

本文提出的纹理缺陷检测系统如图 1 所示,其检测过程是首先采用荧光(fluorescent)光源系统、显微镜和 CCD 摄像机将机械加工零件表面纹理图像采集到计算机,然后通过快速傅里叶变换 FFT 计

算其频谱图像,同时采用频域滤波器来增强缺陷纹理图像和抑制背景纹理,再通过快速傅里叶反变换 IFFT 将其还原成空间域图像,最后采用图像分割的方法和图像形态学运算实现缺陷纹理和背景纹理的分离。

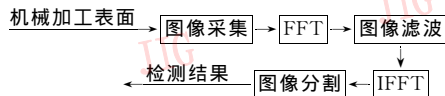


图 1 纹理缺陷检测系统框图

3 机械加工零件表面纹理特征分析

机械加工过程,如铣削、磨削、刨削工艺加工出的零件表面,由于刀具行程的影响,在加工零件表面上会形成各种纹理,图 2 显示的是一些典型的纹理,其纹理的方向性较强,且多为条纹状分布。

对图 2 所示的机械加工零件表面图像做傅里叶变换进行频谱分析,其得到的对应频谱幅值图如图 3 所示。

从图 3 可以看出,由于图像的能量主要分布在纹理主方向的垂直方向上,故这些区域像素点的频谱幅值较大。由于傅里叶变换是线性变换,因此空域图像的信息可完全无损地保持到频域,其方向纹理的纹理属性,主要集中反映在频谱图中一些与纹理方向垂直的方向上。如果通过频域滤波器对频谱中能量集中区域的能量进行抑制滤波,则这种方向纹理的纹理特征将被大大地削弱,从而可以增强缺陷纹理,以利于识别和分类。以下对纹理特征作理论分析。

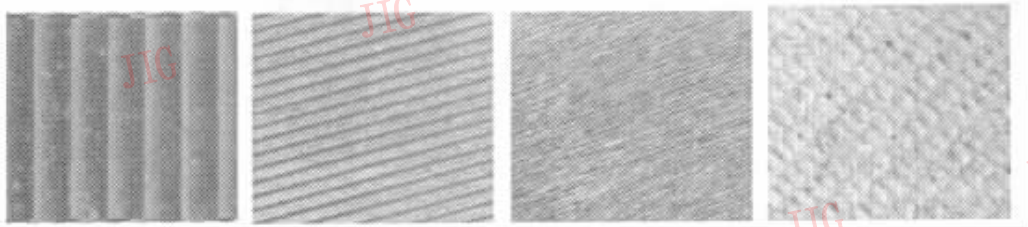


图 2 机械加工零件表面纹理图像

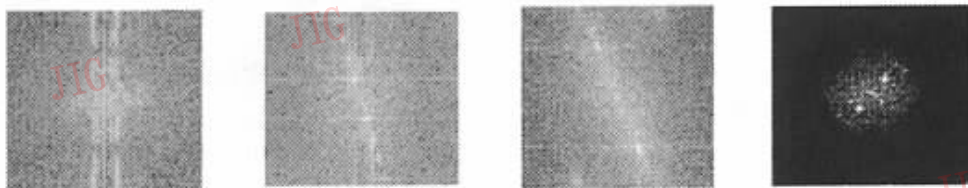


图 3 机械加工零件表面图像的频谱图

对于一幅 $N \times N$ 像素的方向纹理图像 $f(x, y)$, 其傅里叶变换为 $F(u, v)$, 为了简化分析过程, 可通过一幅水平方向的纹理图像来进行分析, 即图像 $f(x, y)$ 的灰度不随 x 位置变化而变化, 也就是

$$f(x, y) = f(y) \quad (1)$$

可将 $f(x, y)$ 分解为 $f(x) \times f(y)$ 的形式, 其中

$$f(x) = 1 \quad (2)$$

设 $F(u)$ 和 $F(v)$ 分别为 $f(x)$ 和 $f(y)$ 的一维傅里叶变换, 则 $f(x, y)$ 的傅里叶变换为

$$\begin{aligned} F(u, v) &= \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp\left(-2j\pi\left(\frac{ux + vy}{N}\right)\right) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \exp\left(-2j\pi\left(\frac{ux}{N}\right)\right) \times \\ &\quad \frac{1}{N} \sum_{y=0}^{N-1} f(y) \exp\left(-2j\pi\left(\frac{vy}{N}\right)\right) \\ &= F(u) \times F(v) \end{aligned} \quad (3)$$

由于

$$F(u) = \delta(u) = \begin{cases} 1 & u = 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

且

$$F(u, v) = \begin{cases} F(v) & u = 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

因此对于一幅水平方向的纹理图像, 其频谱能量全部集中在 $u=0$ 的垂直方向上, 如果令 $u=0$ 的垂直方向上 $F(u, v)=0$, 则整幅图像的能量为 0, 若对其进行傅里叶反变换, 则可去除水平方向的图像纹理特征。

当图像的纹理方向与水平方向存在角度 θ 时, 它相当于是将对应水平方向的纹理图像旋转 θ 角度后得到的图像。由于根据傅里叶变换的性质, 其频谱图像也等于对应的水平方向纹理图像的频谱图像旋转 θ 角, 因而, 与式(1)~式(5)分析相同, 其频谱能量集中在与纹理方向垂直的方向上, 若滤除这些能量, 则可去除对应方向上的图像纹理特性。

类似地有, 当图像中包含多种纹理方向时, 其频谱能量则集中在与这些纹理方向垂直的方向上, 若滤除这些能量, 则可去除对应的这些方向上的图像纹理特性。

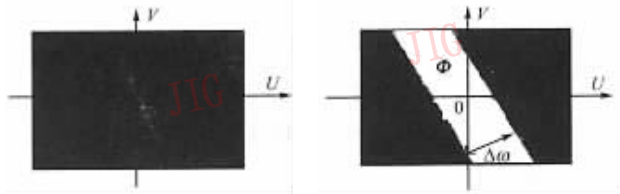
对于机械零件加工过程中产生的表面纹理缺陷, 从缺陷纹理方向来看, 在绝大多数情况下, 缺陷纹理方向与加工过程产生的主纹理方向不一致, 或者缺陷纹理在各种角度上分布较均匀, 方向性不强; 从缺陷纹理的能量来看, 由于缺陷纹理的频谱能量

远小于主纹理的频谱能量, 因此通过找出频谱能量集中的主纹理方向, 并滤除这些主纹理方向的频谱, 就可以有效增强缺陷纹理图像, 再通过图像分割方法就可提取缺陷纹理。

根据上述理论分析, 频域滤波器设计如下

$$H(u, v) = \begin{cases} 0 & (u, v) \in \Phi \\ 1 & (u, v) \notin \Phi \end{cases} \quad (6)$$

其中, Φ 为频谱图像中能量集中的区域。图 4(a) 是一幅纹理图像的频谱图像, 图 4(b) 的空白区域即是能量集中区域 Φ 。以下将图 4(b) 的空白区域称为条形区域。



(a) 傅里叶频谱图像

(b) 能量集中区域

图 4 傅里叶频谱图像的能量集中区域

滤除如图 4(b) 所示的傅里叶频谱图像中宽度为 $\Delta\omega$ 的高幅值频谱带时, 首先需要搜索高幅值频谱带的方向。本文采用类似 Hough 变换的方法, 通过设立 $L \times M$ 个二维阵列累加器, 用于分别记录宽度为 $\Delta\omega_i$ 、中线与横坐标的夹角为 θ_j 的 $L \times M$ 个条形区域的频谱功率(本文中, 频谱功率定义为单位面积内的所有像素点的频谱幅值和)。图 5 显示了第 (i, j) 个条形区域, 其宽度为 $\Delta\omega$, 方向为 θ_j 。与 $L \times M$ 个累加器对应的 $L \times M$ 个条形区域为

$$\begin{bmatrix} (\Delta\omega_1, \theta_1) & \cdots & (\Delta\omega_L, \theta_1) \\ (\Delta\omega_1, \theta_M) & \cdots & (\Delta\omega_L, \theta_M) \end{bmatrix} \quad (7)$$

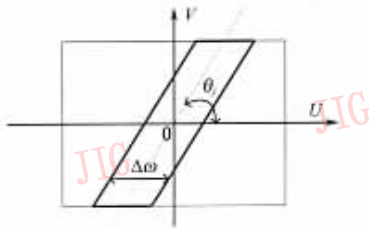


图 5 第 (i, j) 个条形区域

当 $L \times M$ 个累加器在整个图像上累加完成后, 即可求出最大值的累加器, 而与它对应的条形区域 $(\Delta\omega_0, \theta_0)$ 就是傅里叶频谱图像中能量最集中的区域, 此条形区域的中线与横坐标的夹角 θ_0 就是主纹理方向的垂直方向, 然后根据 θ_0 和 $\Delta\omega_0$ 就可设计出

式(6)的频域滤波器。

通过这种方法就可以自动地确定主纹理的方向,当检测物体的位置旋转时,由于滤波器的方向也跟着旋转,因而滤波器总能跟踪到高功率频谱带,并把它滤除掉,也就可实现缺陷检测的旋转不变性。在一般情况下, M 可取 100,条形区域方向角可选择为

$$\theta_j = \left(\frac{360^\circ}{M} \right) \times j; j=1 \sim M, \text{ 而 } L \text{ 可取 } 10 \sim 20, \text{ 条形区域宽度可选择为 } \Delta\omega_i = \frac{i}{200} \sqrt{u_{\max}^2, v_{\max}^2}; i=1 \sim L.$$

当滤除主纹理图像的频域滤波器采用式(6)的矩形时,会产生振铃现象,并容易引起图像模糊,其中可选择的频域滤波器还有 Butterworth、Chebyshev 和 Gaussian 滤波器^[6],在本文的实验中,Butterworth 滤波器的效果较好。

4 缺陷纹理提取方法

对于滤波后的图像,背景纹理图像被抑制,而缺陷纹理图像则被有效增强,然后就可以采用简单的阈值分割方法来区分缺陷纹理和背景纹理。

由于阈值分割后,不仅有缺陷目标,一般还包括噪声点,因而,还要对其进行进一步处理,以消除噪声的影响。考虑到噪声是随机的,其在二值图像上为随机分布的孤立点,而纹理缺陷则有一定的形状。实践证明,对图像进行开运算,不仅可以消除这些孤立点,同时,也可消除由于图像分割而产生的误差。因为开运算是一个先腐蚀、后膨胀的过程,它具有消除细小噪声和平滑较大物体边界的作用。

5 实验结果及讨论

为了验证本文提出的纹理缺陷检测方法的效果,本文采用两类样本图像进行了测试,其中一类是机械加工过程中的铣削、磨削、刨削,再经过抛光等过程自然形成的有纹理缺陷零件的纹理图像;另一类是在无缺陷纹理零件的图像上叠加不同类型的纹理缺陷所形成的图像。纹理缺陷包括不同大小的划痕、瑕疵和玷点等,分别用 A、B 和 C 类表示,即 A: 划痕;B: 瑕疵,面积较小;C: 玷点,面积较大。

对不同类型的纹理缺陷测试试验统计结果如表 1 所示。

表 1 纹理缺陷测试不同方法检测正确率对比

| 缺陷类型 | 本文方法检测正确率 (%) | KHong 方法检测正确率 (%) |
|-------|---------------|-------------------|
| 无缺陷 | 100 | 100 |
| A | 93 | 92 |
| B | 95 | 91 |
| C | 100 | 100 |
| A+B | 89 | 90 |
| A+C | 90 | 88 |
| A+B+C | 89 | 79 |

实验中共有 140 幅机械加工零件表面样本图像,分别属于 7 种纹理缺陷类型,样本图像是机械加工零件表面的显微放大图像,放大倍数为 10 倍,图像尺寸为 256×256 pixels。典型纹理缺陷的检测结果如图 6 所示。

检测结果显示,140 幅图像的检测速度为平均每幅图像 1.13 s,检测系统是在 PentiumIV/2.0G

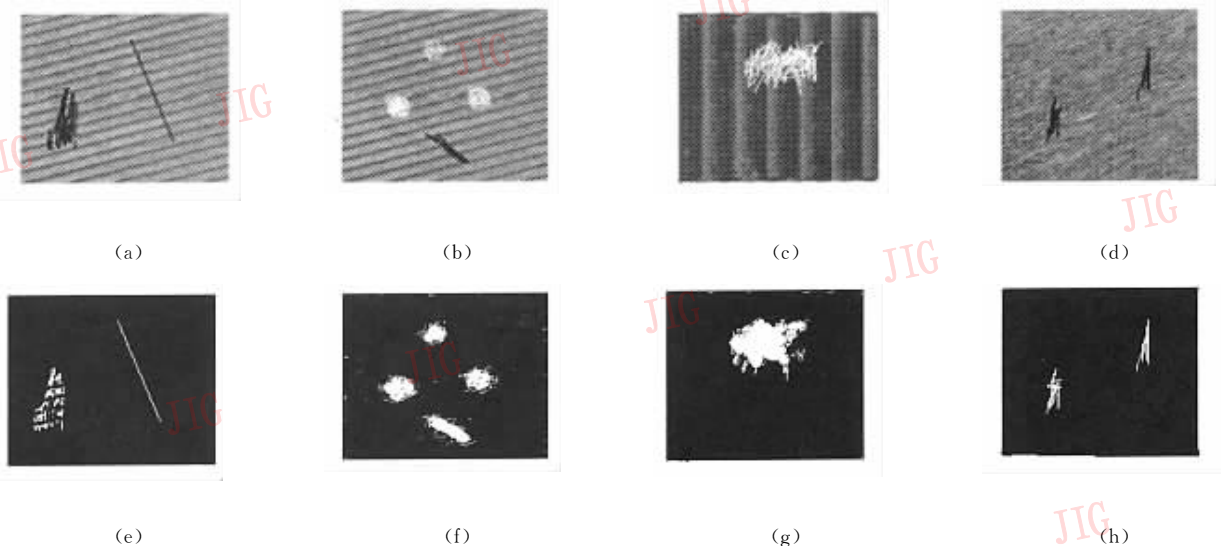


图 6 有缺陷的机械加工表面图像及本文方法检测结果

主频/256MRAM 的微机上实现的。表 1 还列出了文献[2]中的方法(Hong 方法)对这些纹理图像进行检测的结果,对同样的样本图像,文献[2]方法的检测速度为平均每幅图像 6.75 s。表 1 的检测正确率对比表明,对于各种不同类型的纹理缺陷,本文方法的检测正确率大部分均高于文献 2 方法的检测正确率。另外,

(1)由于在瑕疵、沾点的傅里叶频谱中,其表现为随机纹理,通过滤波处理后,不但纹理信息丢失较少,且滤波后图像中的缺陷与背景灰度差距较大,因此,瑕疵、沾点检测正确率较高。

(2)由于划痕存在着方向性,因此当划痕和机械加工纹理方向完全一致时,难以检测到,致使检测能力下降。

(3)本系统检测速度较快,基本能实现准实时检测,检测过程中,FFT 和 IFFT 所耗时间占 90% 以上,如采用硬件计算 FFT 和 IFFT,则检测速度还将大大加快。

本文建立了一种用于机械加工零件表面纹理图像检测的视觉检测系统,并根据机械加工零件表面纹理的特点,提出了一种适合于机械加工零件表面缺陷探测的方法,研究结果表明,这种纹理缺陷检测方法不仅计算量相对较少,而且能基本上达到准实时处理,同时,检测结果的准确率高,因而本文方法具有较强的实用性。

参 考 文 献

1 Brzakovic D, Vujovic N. Designing a defect classification system: A case study[J]. Pattern Recognition. 1996, 29(8): 1401~1419.

- 2 Hong K, Wen W, Nachimuthu A, et al. Achieving automation in leather surface inspection[J]. Computer in Industry. 1997, 34(2):43~54.
- 3 Ramana K V, Ramamoorthy B. Statistical methods to compare the texture features of machined surfaces [J]. Pattern Recognition. 1996, 29(9):1447~1459.
- 4 Lin T Y, Lu S H, Stout K J. Model-based topography characterization of machined surfaces in three dimensions[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(2):239~245.
- 5 Linnett L M, Carmichael D R, Clarke S J. Texture classification using a spatial-point process model[J]. IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing. 1995, 142(1):1~6.
- 6 郑方,徐明星. 信号处理原理[M]. 北京:清华大学出版社,2000: 84~97.



黎明 1965 年生,1990 年和 1997 年先后获南京航空航天大学自动控制系、测试工程系硕士、博士学位,教授、博士生导师。主要从事图像处理、模式识别、神经网络和遗传算法等方面的研究工作。

马聪 1974 年生,2003 年获南昌航空工业学院硕士学位。研究方向为图像处理等。



杨小芹 1964 年生,副教授。主要研究方向为图像处理与模式识别。