

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.039

基于图形处理器的三维表面质量快速评定技术*

曹衍龙 徐朋 金鹭 杨将新

(浙江大学现代制造工程研究所, 杭州 310027)

【摘要】 针对三维表面粗糙度评定中表面测量数据量大且计算复杂度高,常用处理方法不能满足实时测量要求的问题,提出了一种基于图形处理器(GPU)的三维表面形貌测量数据快速评定方法,应用 CUDA 平台开发了基于 GPU 的并行处理算法,在此基础上实现了三维表面质量的快速评定。实验结果表明,该方法在保证计算精度的同时,运算效率提高了 60 倍以上,可满足三维表面质量在线评定的要求。

关键词: 三维形貌 三维评定 图形处理器

中图分类号: TG806; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0219-04

3-D Surface Quality Evaluation Based on Graphics Processing Unit

Cao Yanlong Xu Peng Jin Lu Yang Jiangxin

(Institute of Modern Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

Aimed at achieving real-time evaluation on 3-D surface which is difficult due to the large number of surface information and high computational complexity, a GPU-based fast evaluation method was investigated. Rapid surface quality evaluation was realized by the GPU-based fast evaluation method developed by CUDA. The experimental results indicate that the method can significantly improve the calculation efficiency while ensuring the accuracy. It can meet the requirements of online assessment on 3-D surface quality.

Key words 3-D topography, 3-D evaluation, Graphics processing unit

引言

随着精密加工表面质量的日益提高,二维粗糙度评定参数已经不能全面准确地反映零件表面的形态。三维表面质量评定更能体现工件表面的真实情况,并且其数据是从区域表面而非轮廓轨迹获得的,具有良好的统计特性和更小的误差,因而越来越广泛地应用到表面质量评定中^[1-4]。三维表面质量评定的计算过程运算尺度大、运算更加复杂,造成运算过程的效率低,无法满足实时在线检测的要求,限制了其发展。

图形处理器(graphics processing unit,简称 GPU)近年来发展迅速,由于其与中央处理器(central processing unit,简称 CPU)的设计方式不

同,特别适用于并行处理。目前许多 GPU 开发平台,如 Cg、Sequoia、Brook、CUDA 等都广泛应用于科学计算领域的并行处理过程,均表现出良好的加速性能。

本文提出一种基于 GPU 的三维表面质量快速评定技术,并通过实验对比分析该技术的运算精度和运算速度。

1 三维表面评定技术

在二维粗糙度评定中,使用高斯滤波中线作为评定中线^[5]。在三维表面评定中并没有相应的评定标准,由于高斯滤波可以一次得到表面的波纹度信息且不会发生相位失真问题,所以使用二维高斯滤波器分离出表面粗糙度信息,建立三维表面评定

收稿日期:2011-04-02 修回日期:2011-06-18

*国家自然科学基金资助项目(50975257)和国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB706505)

作者简介:曹衍龙,副教授,主要从事质量工程、检测与控制、精度工程等研究,E-mail:sdcaoyl@zju.edu.cn

的基准面。三维表面质量评定流程如图1所示。

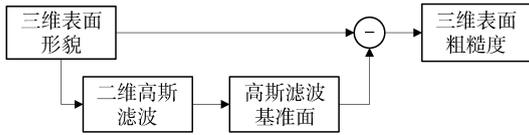


图1 三维表面质量评定流程图

Fig.1 Flowchart of 3-D surface quality evaluation

高斯滤波基准面就是三维表面形貌评定相对于二维表面形貌评定中评定中线的概念。它是表面形貌经过二维高斯滤波器滤波后得到的,利用它可以将三维表面的表面粗糙度分离出来。图1中的二维高斯滤波过程为

$$r(x, y) = h(x, y) * s(x, y) \quad (1)$$

式中 $r(x, y)$ ——滤波得到的高斯滤波基准面

$h(x, y)$ ——表面三维形貌值

$s(x, y)$ ——二维高斯滤波核

常用核函数为

$$s(x, y) = \frac{1}{\alpha^2 \lambda_{xco} \lambda_{yco}} e^{-\pi \left[\left(\frac{x}{\alpha \lambda_{xco}} \right)^2 + \left(\frac{y}{\alpha \lambda_{yco}} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

式中 x, y ——空间域变量

α ——滤波器常量

λ_{xco} ——该滤波器 x 方向上的截止波长

λ_{yco} ——该滤波器 y 方向上的截止波长

当波长为截止波长时,通常要求滤波器的传输

特性为50%,此时 $\alpha = \sqrt{\ln(2/\pi)} = 0.4697$ 。

由于高斯滤波核在边界的加权平均,高斯滤波结果存在边界效应,采用高斯回归滤波^[6]对滤波结果进行处理,即采用高斯权函数

$$\hat{s}(x - \xi, y - \eta) = s(x - \xi, y - \eta) c(x - \xi, y - \eta) = \frac{s(x - \xi, y - \eta)}{\iint s(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta} \quad (3)$$

式中 $c(x - \xi, y - \eta)$ ——校正函数

ξ, η ——积分变量

$$\iint \hat{s}(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = 1$$

实际测量获得的表面往往存在着许多不可预知的畸变,如相对高度远低于被测表面的深谷,这会造成高斯滤波中线不能很好地描绘出被测表面的形状特征和波纹度特征。针对这种情况,使用RK滤波^[7]对深谷现象进行处理,即对表面形貌做两次高斯滤波,利用第一次高斯滤波后的结果值代替表面的深谷信息,然后将剔除深谷的表面信息再做一次高斯滤波进而得到最终的高斯滤波基准面。通过以上处理得到高斯滤波基准面,以此为三维表面质量评定的评定基准面对已测得的表面形貌值进行三维表面质量评定。

2 基于GPU的表面质量快速评定过程

在三维表面质量评定的过程中,RK滤波及高斯回归滤波的运算量大、运算复杂度高,所以其运算效率很低。由于GPU具有良好的并行处理能力,故采用图形处理器开发相应的并行算法,对以上过程进行并行处理。

2.1 CUDA编程模型

统一计算设备架构CUDA将CPU作为主机,GPU作为设备,主机与设备协同工作。主机端负责逻辑性强的事务处理和串行计算,设备端专注于高度线程化的并行处理任务。主机调用内核函数在设备上执行超多线程的运算,设备中每个线程都能独立并行执行一定的程序指令。CUDA通过3层组织来管理线程:一定数量的线程组成线程块,而一定数量的线程块又组成线程网格。拥有多个线程的线程块之间也是并行执行的,每个线程块内的线程之间可以通过共享存储器高速交换数据,方便对公用数据进行保存和计算。本文提出的并行算法就是通过对一系列内核函数的设计实现的。

2.2 评定过程

基于GPU的表面质量快速评定算法流程如图2所示。

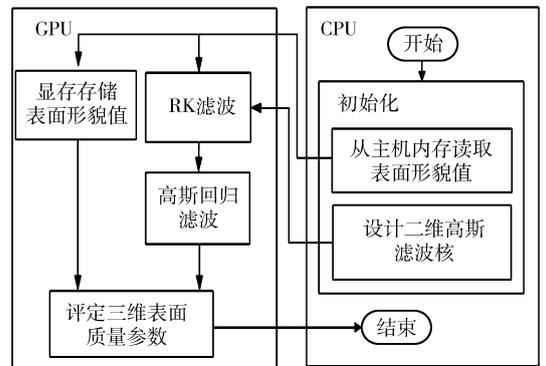


图2 基于GPU的表面质量快速评定算法流程图

Fig.2 Algorithm flow of surface quality evaluation based on GPU

(1) 由表面形貌测量系统得到表面形貌值,并依据式(2)设计二维高斯滤波核,并将形貌信息拷贝至图形处理器显存完成初始化。

(2) 对表面形貌值进行RK滤波得到高斯滤波基准面。假设待评定的表面形貌值数据块大小为 $N \times N$,用于滤波的高斯核函数大小为 $M \times M$ 。根据二维卷积的定义,其滤波后的数据块大小应为 $L \times L$,其中 $L = M + N - 1$ 。

采用FFT算法操作二维高斯滤波,先将数据和滤波核函数补齐为大于 L 且为2的整数幂次方的数

L' ,这一过程使用 GPU 中的纹理存储器进行处理。首先将表面形貌值从内存拷贝至显存的线性存储器,然后拷贝至 CUDA 数组,CUDA 数组是显存的一种定义形式。其次,声明纹理参照系,纹理参照系用来约定读取纹理存储器时所用的坐标和显存中的实际位置之间的关系。再次,绑定 CUDA 数组与声明的纹理参考系。最后,通过内核函数对纹理存储器进行纹理拾取操作。通过这一系列的操作,就能读取纹理坐标所对应的显存位置的数值。由于纹理坐标系可以任意设定,使得整个操作过程更加直观。另外由于补齐数据在显存上操作时存在大量的非合并访问现象,影响 GPU 的运算速率,使用纹理存储器拾取的方法则能够避免这一现象,达到良好的加速效果。

补齐数据后使用 CUFFT 进行 2-D - FFT 处理,CUFFT 利用 CUDA 可进行 1-D、2-D 和 3-D 的 FFT 操作,2-D - FFT 每个方向的维度可以在 [2, 163 84] 中任取。对经过补齐操作的数据和滤波核进行 2-D - FFT 操作得到其频域信息,使用内核函数与上述频域结果相乘再进行反变换完成一次二维高斯滤波。

将第一次滤波后的信息作为基准去除表面深谷信息,再进行一次二维高斯滤波,完成 RK 滤波过程,得到原始的三维表面高斯滤波基准面。

(3) 对原始高斯滤波基准面进行回归滤波,去除边界效应。由式(3)可知,校正函数实际是一系列求和函数,由于数据量比较大,且二维方向上的求和较难实现,将式(3)分解成 x 、 y 两个方向分别进行校正

$$\tilde{s}(x - \xi, y) = \frac{s(x - \xi, y)}{\int s(x - \xi) d\xi} \quad (4)$$

$$\tilde{s}(x, y - \eta) = \frac{s(x, y - \eta)}{\int s(y - \eta) d\eta} \quad (5)$$

利用线程块对单行、列信息进行并行处理。由于使用线性存储器存储二维表面形貌信息,故在按列处理时,其存储形貌信息的显存地址并不连续,存在严重的非合并访问情况,导致运算性能大幅下降。若采用共享存储器避免非合并访问,则易出现因表面形貌信息较多占用过多的共享存储器空间而导致并行活动线程块数量下降,最终导致 GPU 并行处理能力下降。鉴于转置方法在 GPU 上耗时少,本文采用 x 方向和 y 方向分别进行高斯回归函数校正,并通过转置将列信息地址改为连续的,从而避免非合并访问问题。

(4) 通过原表面形貌信息和高斯滤波基准面,

对三维表面质量进行评定。在对表面质量进行评定时涉及到对所有表面偏差值的求和以及排序问题,求和问题较为简单,在此不做赘述。双调排序与待排序序列的特征没有关系,经过一系列操作后总是能得到排序结果,比较适用于并行处理过程。通过对比实验,本文采用双调排序对整个数据块进行排序操作。

目前 CUDA 尚不支持程序的递归操作,且迭代也不适用于并行处理,故需重新设计适用于 CUDA 的双调排序算法。首先,CUDA 的两层并行模式在线程块层和线程网格层其组织结构并不相同,所以不能单纯地将其看成父序列和子序列的关系,需单独设计线程块层和线程网格层的内核函数对其进行双调排序。其次,由于 CUDA 设备以及并行算法具有特殊性,如果数组大小不是 2 的幂次方,需要对该数组进行填充,将其补齐到 2 的幂次方。因为待排序数组为表面形貌值与高斯滤波面的差值,且在表面质量评定过程中需要的是排序之后的序列的首尾值,故对待填充区域进行置零操作并不会影响整体排序结果。完成填充数据和排序内核函数的设计,最后分别在线程块和线程网格内进行双调排序,得到排序结果。

(5) 根据排序和求和的结果,求得三维表面粗糙度评定的参数,并将数据拷贝回计算机内存输出。

3 实验分析

为了对比分析 GPU 并行算法的精度与运算效率,采用 Matlab R2009b 编写基于 CPU 的表面评定算法,采用 MFC + CUDA 联调模式编写基于 GPU 的表面评定算法,并应用粗糙度标准样块进行实验分析。目前 CUDA 构架中单精度浮点数的运算速度远高于双精度浮点数,故评定算法中均采用单精度浮点数进行运算。对比实验所采用的硬件为: Intel Dual-Core 2.80 GHz, NVIDIA Geforce GTS250 显卡, 2 GB RAM。

对 $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ 的粗糙度标准样块进行实验分析,表面形貌特征值由白光干涉测量得到,分析结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,使用 GPU 的数据处理结果相对于 CPU 处理结果其最大相对误差仅为 10^{-6} 左右,计算精度满足要求。使用上述硬件设备处理图 3 表面形貌(350 像素 \times 350 像素)数据(运算 10 次取平均值),CPU 和 GPU 处理时间分别为 1 493.38 ms 和 24.22 ms,加速比为 61.66,有着良好的加速性能。

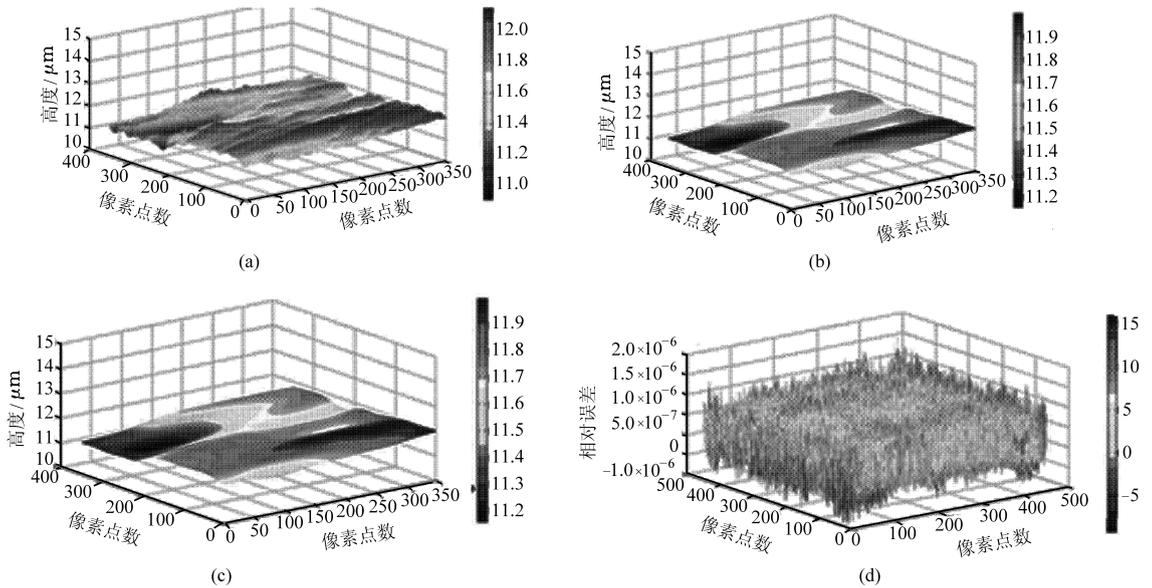


图3 离散表面形貌数据及高斯滤波结果对比

Fig. 3 Discrete data of surface topography and results comparison after Gaussian filtration

(a) 表面测量系统采用白光干涉测量得到的样块表面特征 (b) 采用 CPU 对表面形貌值进行二维高斯滤波的运算结果
(c) 采用 GPU 对表面形貌值进行二维高斯滤波的运算结果 (d) CPU 和 GPU 运算的相对误差

综合表面形貌值和二维高斯滤波基准面对标准样块进行质量评定,得到三维表面评定参数,不失一般性,采用以下常用的评定参数:

表面算术平均偏差

$$S_a = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |E(x_i, y_j)| \quad (6)$$

式中 $E(x_i, y_j)$ ——表面形貌与高斯滤波基准面的偏差

m ——表面 x 方向的点数

n ——表面 y 方向的点数

这一参数类似于二维表面粗糙度评定中的参数 R_a ,表征了在取样区域内轮廓偏距绝对值的算术平均值。

表面最大高度

$$S_z = \max_{\substack{(x,y) \in D \\ (x',y') \in D}} |E(x, y) - E(x', y')| \quad (7)$$

式中 D ——三维粗糙度的评定区域

表面均方根偏差

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E^2(x_i, y_j)} \quad (8)$$

表面十点高度

$$S_{5z} = \frac{\sum_{i=1}^5 |E_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |E_{vi}|}{5} \quad (9)$$

式中 E_{pi} 、 E_{vi} ——评定表面最高和最低的 5 个点偏差

对表面形貌值取 5 组数据进行二维表面评定,

与三维评定参数进行对比,如表 1 所示。

表 1 二维、三维表面评定参数

Tab. 1 Evaluation parameters of 2-D and 3-D surface

评定参数	算术平均偏差	最大高度	均方根偏差	十点高度	
三维	0.063 58	0.850 99	0.081 54	0.815 49	
1	0.048 56	0.300 92	0.062 24	0.289 81	
2	0.058 79	0.384 86	0.075 04	0.327 21	
二维	3	0.052 38	0.395 86	0.070 68	0.366 55
4	0.045 59	0.305 89	0.056 23	0.279 44	
5	0.057 95	0.334 79	0.070 46	0.310 03	

从表中可以看出,被测表面在二维表面粗糙度评定时只能反映表面的局部信息,而三维表面评定则更具有整体性,更能表现被测表面的形貌特征。

4 结束语

相对于二维表面形貌评定,三维表面形貌评定能够描述更多的表面特征,并能从整体上对工件表面的特征进行描述。但是三维表面质量评定存在着计算工作量大的缺点,并不适用于实时性要求高的表面形貌测量系统。提出一种利用 GPU 对三维表面质量进行评定的并行算法,并应用到了表面形貌测量系统的质量评定模块当中,通过实验对比分析,证明该方法在保证评定精度的同时大幅提高了运算速度,可以应用于三维表面形貌的评定。

(下转第 229 页)

- 5 胡志清,李明哲,隋振. 基于连续多点成形原理的旋压成形技术[J]. 农业机械学报,2009,40(12):247~250.
Hu Zhiqing, Li Mingzhe, Sui Zhen. Spinning technology based on principle of continuous multipoint forming [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12):247~250. (in Chinese)
- 6 陈芳雷,张治民,曹亚强. 镁合金汽车轮毂成形工艺及数值模拟[J]. 热加工工艺,2007,36(1):79~81.
Chen Fanglei, Zhang Zhimin, Cao Yaqiang. Forming process and numerical simulation of magnesia alloy auto hub [J]. Hot Working Technology, 2007, 36(1):79~81. (in Chinese)
- 7 钱立军,徐飞. 装备无级变速器的整车前向模型建立与仿真[J]. 农业机械学报,2009,40(7):10~14.
Qian Lijun, Xu Fei. Forward modeling and simulation on vehicle equipped with CVT[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7):10~14. (in Chinese)
- 8 韩佳颖,王太勇,李清. 基于解析计算的螺旋锥齿轮切削仿真算法[J]. 农业机械学报,2010,41(12):223~227.
Han Jiaying, Wang Taiyong, Li Qing. A cutting simulation algorithm of spiral bevel gears based on analytic calculation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):223~227. (in Chinese)
- 9 郭强,严红革,陈振华,等. 铸态 AZ80 镁合金高温热变形行为研究[J]. 塑性工程学报,2006,13(5):26~31.
Guo Qiang, Yan Hongge, Chen Zhenhua, et al. Hot deformation behaviors of as-cast AZ80 magnesium alloy at elevated temperatures[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(5):26~31. (in Chinese)
- 10 刘陶,龙思远. 基于 Deform-3D 的铝合金筒形件旋压成形过程数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2010,30(6):508~510.
Liu Tao, Long Siyuan. Numerical simulation of spinning forming process for aluminum alloy cylindrical workpieces based on the Deform-3D software [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(6):508~510. (in Chinese)
- 11 程秀全,陈家华,夏琴香,等. 无芯模缩径旋压力的有限元数值模拟及试验研究[J]. 塑性工程学报,2007,14(5):38~42.
Cheng Xiuquan, Chen Jiahua, Xia Qinxiang, et al. Finite element numerical simulation and experimental research on the forming force of mandrels neck-spinning with single roller[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(5):38~42. (in Chinese)

(上接第 222 页)

参 考 文 献

- 1 杨培中,蒋寿伟. 表面粗糙度三维评定的研究[J]. 机械设计与研究,2002,18(2):64~67.
Yang Peizhong, Jiang Shouwei. The study on 3D assessment of surface roughness [J]. Machine Design and Research, 2002, 18(2):64~67. (in Chinese)
- 2 曾文涵,高咏生,谢铁邦,等. 三维表面粗糙度高斯滤波快速算法[J]. 计量学报,2003,24(1):10~13.
Zeng Wenhan, Gao Yongsheng, Xie Tiebang, et al. A fast Gauss filtering algorithm for 3D surface roughness [J]. Acta Metrologica Sinica, 2003, 24(1):10~13. (in Chinese)
- 3 陈国强,张维强,彭文静. 研磨表面微观形貌的三维检测及 Areal 表征[J]. 机械设计与研究,2009,25(2):19~22.
Chen Guoqiang, Zhang Weiqiang, Peng Wenjing. Research on the 3-D detection and areal characterization of micro-topography of lapping surface [J]. Machine Design and Research, 2009, 25(2):19~22. (in Chinese)
- 4 Gadelmawla E, Koura M, Maksoud T, et al. Roughness parameters [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123(1):133~145.
- 5 ISO 11562. Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: profile method metrological characteristics of phase correct filters[S]. 1996.
- 6 Brinkmann S, Bodschinna H, Lemke H W. Accessing roughness in three-dimensions using Gaussian regression filtering [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(13~14):2153~2161.
- 7 ISO 13565. Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: profile method; surfaces having stratified functional properties [S]. 1998.