

基于并行小波变换的快速三维面形测量技术

余 程^{1,2} 李思坤¹ 王向朝¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提高小波变换三维面形测量技术中相位信息的解调速度, 依据不同的并行计算原理, 提出两种基于并行一维连续小波变换的光学条纹图快速解调方法。利用多核 CPU 运算平台进行了计算机模拟和实验, 结果表明并行一维连续小波变换光学条纹图相位解调方法相比于串行一维连续小波变换光学条纹图相位解调方法, 在精度不变的同时计算速度显著提高: 对 850 pixel×1000 pixel 大小实测条纹图像解调速度提高了 7.5 倍。并行一维连续小波变换相位解调方法为小波变换三维面形测量技术在实时/瞬态过程三维面形测量中的应用奠定了基础。

关键词 测量; 条纹分析; 并行计算

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0512005

Fast Three-Dimensional Shape Measurement Technique by Means of Wavelet Transform Based on Parallel Computing

Yu Cheng^{1,2} Li Sikun¹ Wang Xiangzhao¹

(¹ Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to improve the speed of phase demodulation in three-dimensional (3D) shape measurement system, according to different theories of parallelism, two different approaches of parallel one-dimensional (1D) continuous wavelet transform fringe pattern demodulation have been proposed. Computer simulation and experiment in multicore CPU computing platform show that, compared to serial phase demodulation, parallel fringe pattern phase demodulation technique keeps the computing precision while the processing speed is significantly improved; the experiment on processing 850 pixel×1000 pixel fringe pattern achieves 7.5 times speedup. Our solutions lay the foundation for the applying of fringe pattern demodulation technique by means of wavelet transform to real-time/transient 3D shape measurement.

Key words measurement; fringe analysis; parallel processing

OCIS codes 120.6650; 100.2650; 200.4960

1 引 言

随着现代信息技术的发展, 实时三维 (3D) 面形测量技术在制造业、医学、计算机科学、国土安全和娱乐等领域都显示出了极为重要的作用。从基于时间飞行法 (TOF) 的测量技术^[1], 到立体视觉和时空立体视觉^[2], 再到结构光投影三维面形测量技

术^[3-5], 实时的三维面形测量技术得到了快速发展^[3]。

在结构光投影三维面形测量技术中, 条纹图是被测物体三维面形信息的载体, 对条纹图进行高精度快速解调是实现实时测量的关键。常用的条纹图像解调方法包括相移法^[6]、傅里叶变换法^[4-5]和小

收稿日期: 2013-12-12; 收到修改稿日期: 2014-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(61205102, 61275207)、科技部国际科技合作专项项目(2011DFR10010)

作者简介: 余 程(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事三维面形测量方面的研究。E-mail: yucheng@siom.ac.cn

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 博士, 研究员, 主要从事信息光电子学和高端光刻机技术方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

波变换法^[7-10]等。和相移法相比,小波变换法只需要采集一幅变形条纹图就能从中获得被测物体的三维面形信息^[11],速度更快。和傅里叶变换法相比,小波变换法具有局部化、多分辨率分析能力和更强的噪声抑制能力,在条纹图存在相位突变或者相位不连续处的相位解调精度更高,适合于处理具有丰富频率成分的条纹图,当被测物体面形变化较复杂时可有效改善重建面形的失真现象^[7-10]。然而,由于小波变换本质上是卷积或者相关,计算速度慢,难以满足实时测量的要求。

对原有算法进行优化改进和采用更适合算法运行的运算平台是提高算法运行速度的两种通用手段。针对一维(1D)连续小波变换速度慢的问题,Gdeisat等^[12-13]用C语言以及快速傅里叶变换对一维连续小波变换算法进行优化改进,将512 pixel×512 pixel图像的处理时间缩减到了1 s。最新的研究表明,通过将C语言编译为硬件描述语言(VHDL),采用可编程门阵列(FPGA)运算平台,能够进一步提高一维连续小波变换条纹图解调方法的运行速度^[14]。

并行计算是一种通过同时使用多重计算资源来加快问题解决速度的计算方式^[15]。它通过将计算任务划分为多个细小分支交由不同计算硬件资源同时处理的方式达到加速目的,可以和其他两种加速手段组合应用。从20世纪70年代开始先后出现了位级并行、指令级并行、数据并行和任务并行的并行计算方式。近年来,随着多核处理器在计算机中的普及,利用多核处理器进行任务并行及数据并行方式的并行计算在算法提速中的应用逐渐增多^[16-17]。

本文针对一维连续小波变换条纹图相位解调方法速度慢的问题,提出了基于并行计算的一维连续小波变换光学条纹图相位解调方法。分别在多核CPU计算机和计算机机群两种平台上,使用Matlab语言实现了基于任务并行以及基于数据并行的两种并行方法,在精度不变的同时显著提高了一维连续小波变换光学条纹图相位解调方法的速度。

2 原 理

2.1 基于小波变换的结构光投影三维面形测量技术

测量光路如图1所示。投影系统投影正弦结构条纹到被测物体表面,CCD相机在另一个角度拍摄的条纹图强度 $I(x,y)$ 可由(1)式表示:

$$I(x,y) = A + B\cos[2\pi fx + \Delta\phi(x,y)], \quad (1)$$

式中 A 为背景光强度, B 为条纹的调制度, f 为投影

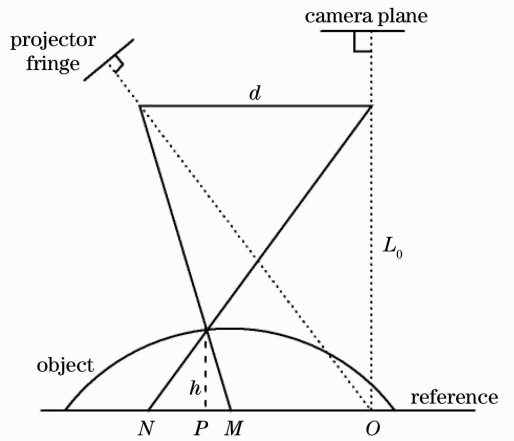


图1 测量系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of measuring system
条纹的在 x 方向的基频, $\Delta\phi(x,y)$ 为被测物体高度调制相位。条纹图沿着结构方向的一维强度信息 $I'(x)$ 与变量 y 无关,如(2)式所示:

$$I'(x) = A + B\cos[2\pi fx + \Delta\phi(x)]. \quad (2)$$

采用复一维小波对其进行连续小波变换:

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} I'(x)\psi_{a,b}^*(x)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} I'(x)\frac{1}{\sqrt{a}}\Psi^*\left(\frac{x-b}{a}\right)dx = \frac{1}{\sqrt{a}}I'(b) \otimes g_a(b), \quad (3)$$

式中 $W(a,b)$ 为小波变换系数, $\psi_{a,b}(x) = \Psi[(x-b)/a]/\sqrt{a}$ 为母波函数 $\Psi(x)$ 的子波函数, a 为尺度因子, b 为平移因子, $\psi_{a,b}^*(x)$ 是 $\psi_{a,b}(x)$ 的复共轭函数,卷积核 $g_a(x) = \Psi^*\left(\frac{-x}{a}\right)$ 。

对于确定的平移因子 b ,小波脊定义为小波变换系数 $W(a,b)$ 的模 $|W(a,b)|$ 随尺度因子 a 变化的最大值。小波脊可由(4)式表示:

$$\text{ridge}(b) = \max[|W(a,b)|]. \quad (4)$$

当选用的母小波函数是Morlet复小波函数时,条纹图的相位可由小波变换系数在各平移因子 b 处的小波脊相位求得^[7]。小波脊处小波变换系数的相位可由(5)式求出:

$$\phi_r(x,y) = \phi_y[\text{ridge}(b)] = \arctan\left\{\frac{\text{Im}[\text{ridge}(b)]}{\text{Re}[\text{ridge}(b)]}\right\}. \quad (5)$$

一维连续小波变换光学条纹图相位解调方法的步骤可以用图2表示,图中彩色点表示小波变换系数 $W(a,b)$ 中平移因子 b 处各尺度 a 对应的最大小波变换系数模值点。输入的图像按照列划分,每列像素

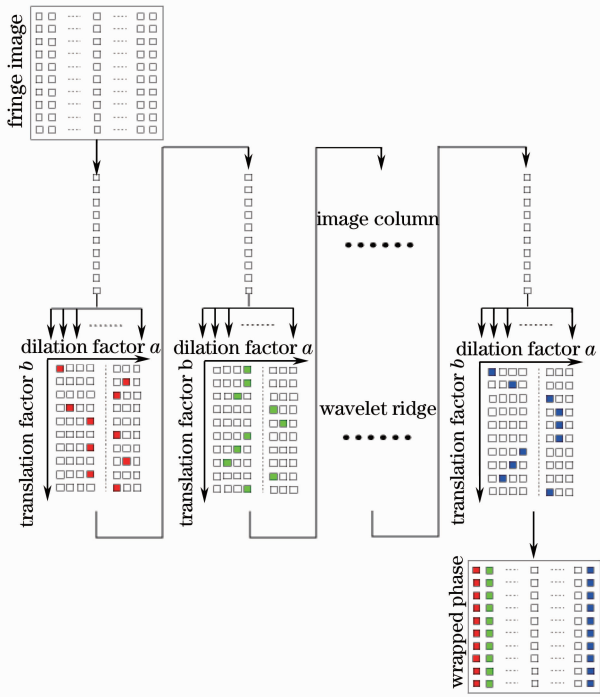


图2 条纹图一维连续小波变换计算流程

Fig. 2 1D continuous wavelet transform operation flow

被视作单独的一维输入信号,求取不同尺度因子的连续小波变换系数后,求小波脊相位。计算过程中总的计算量取决于以下三个因素:1)与图像单列像素的长度相关的单次卷积计算量;2)与所选尺度因子范围相关的卷积循环次数;3)与图像列数相关的小波变换计算循环次数。

移走被测物体,投影正弦结构条纹到参考平面上,对CCD相机获取的参考条纹进行相同的处理,得到参考平面的相位分布 $\phi_0(x, y)$ 。那么,由物体高度引起的相位变化为

$$\Delta\phi = \phi_r(x, y) - \phi_0(x, y), \quad (6)$$

因为(5)式相位计算中用到了反三角函数,所以解调得到的相位截断在 $[-\pi, \pi]$ 之间。用一定的方法进行相位展开后,可以得到其连续的调制相位 $\Delta\phi(x, y)$ 。

在远心光路条件下, $L_0 \gg h(x, y)$,被测物体高度分布与调制相位的关系为

$$h(x, y) = -\frac{L_0}{2\pi fd} \Delta\phi(x, y), \quad (7)$$

式中 L_0 和 d 都为如图1所示系统中的结构参量。

2.2 并行计算

并行计算是一种将很多计算同时执行的计算方式,包含同时性并行和并发性并行两种^[15]。同时性表示两个或两个以上的事件同时发生,并发性表示两个或两个以上的计算在相同的时间间隔内发生,分别对应了资源重复和时间重叠两种实现方法。根

据实现并行的层级由低到高可以分为位级并行,指令级并行,数据并行和任务并行^[18]四种并行计算方式。位级并行是指通过增加字长,来减少处理超过了字长描述范围的变量所需要的指令数目的并行处理方法,是并行计算的最早形式。指令级并行,数据并行和任务并行的原理如图3所示,图中将任务的完成过程等同为包含任务解析的读取(IF)、译码(ID)和对数据操作的执行(EX)、读数(MEM)和写回(WB)共5级指令流水线,每一级由相应的功能模块独立完成。指令级并行为时间重叠的并行方式,数据并行和任务并行主要依靠资源重复的方式实现。

指令级并行是指通过同时地发出和执行指令来提高计算性能的并行处理方法。一个计算机程序本质上就是一条由被处理器执行的指令组成的指令流,相互之间不存在依赖性的指令在执行过程中的顺序并不影响程序运行的结果,因此可以并行地发出和执行指令来提高性能^[18]。如图3(a)所示,假设5个部分的独立执行时间相等,则开始时间和结束时间满足 $t_s = t_e = 5t_r$ 。在重复时间 t_r 内,5个功能模块在执行5个不同任务的相应部分。若任务数目为 n ,则指令级并行运行总时间 $t_p = t_s + (n-4)t_r + t_e$ 。当 n 足够大时。运行时间 $t_p = 4t_r + 4t_r + (n-4)t_r \approx nt_r = \frac{n \cdot 5t_r}{5}$,相对于原始所有指令串行时间 $n \cdot 5t_r$ 得到了5倍的提速效果。进一步来说,假如任务能划分为 K 个部分等时流水线执行,当执行任务数够多时,提速效果为 K 倍。

数据并行是指对于程序循环中固有的并行部分,将数据分布到不同的计算节点上,各个节点进行相同操作的并行处理方法^[18]。如图3(b)所示,在忽略了网络通信时间的前提下,数据并行共用了任务读取译码时间,将多个任务的数据处理完成时间压缩到了仅为单个任务的数据处理时间,理论的提速倍数等于处理单元(PE)的数目 p 。

任务并行是指将任务分配到不同的计算节点,各个节点同时计算任务的并行处理方法。任务并行是通过线程的方式来实现的,每一个线程在不同的节点上同时处理的数据可能相同也可能不同^[18]。如图3(c)所示,任务并行过程包含了多个处理核心,每个单独的核心具备所有功能模块,能独立完成单一任务。与数据并行对数据同时执行相同操作不同,任务并行是同时执行多个不同且不相关的任务来获得提速效果。

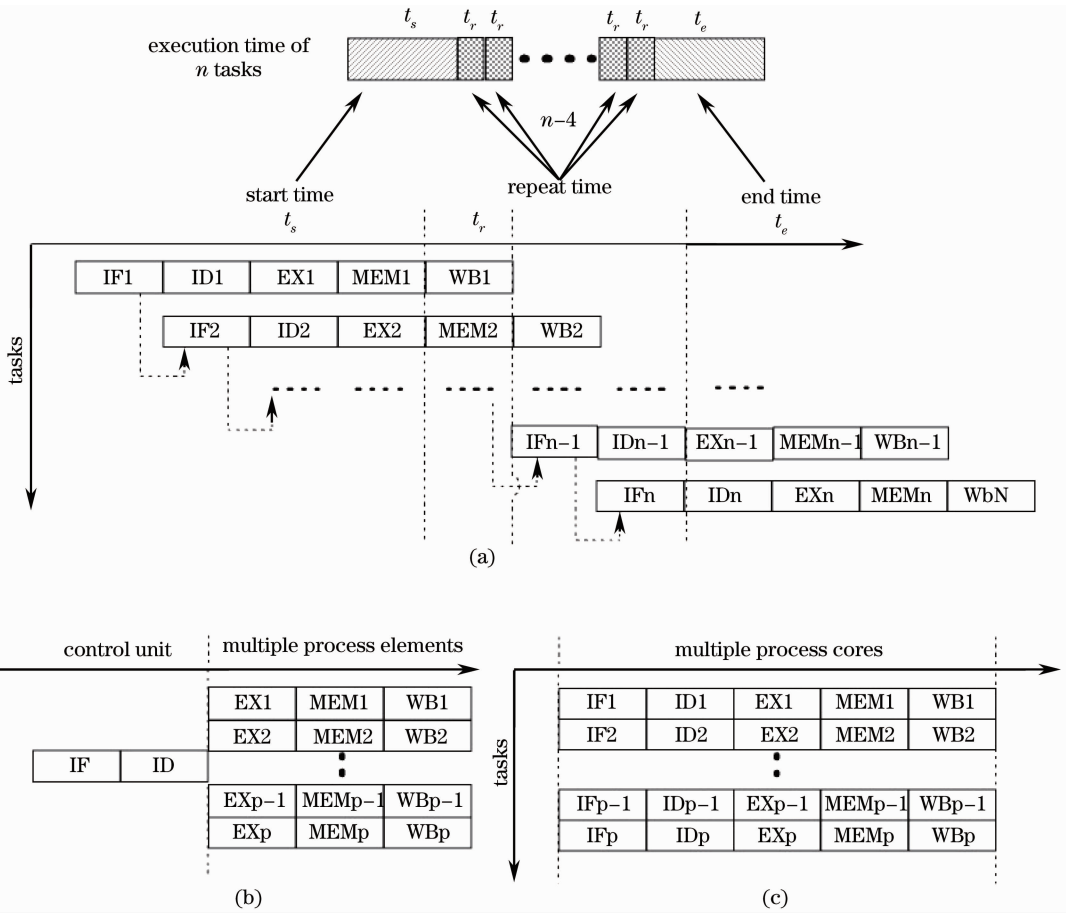


图 3 并行计算原理。(a)指令级并行；(b)数据并行；(c)任务并行

Fig. 3 Mechanism of parallel computing. (a) Instruction parallel; (b) data parallel; (c) task parallel

串行计算任务改为并行计算任务增大了计算机资源的利用率,但产生额外的数据通信。最终得到的并行计算加速效果除了取决于程序本身的可并行比例外,还与核间通信时间以及并行过程中产生的额外计算量有关。

2.3 基于并行一维连续小波变换的条纹图相位解调方法

影响一维连续小波变换光学条纹图相位解调方法计算量的三个因素中,一维信号的连续卷积计算涉及迭代求和过程,数据计算之间存在依赖性,对卷积的并行化由于算法的关系会引入额外的计算量;多尺度循环与列循环都是相互独立的循环运算,可直接做并行化处理。从计算优先级来考虑,多尺度循环包含卷积计算,而列循环包含多尺度循环。考虑到两者的包含关系,多尺度的并行化会引入更多的核间通信次数,增大通信时间,降低加速效果。因此,选择对列循环做并行化处理,对小波变换进行加速。

采用 Matlab 语言编程调用多核处理器中的并行计算资源进行并行计算。当调用的计算核心数为 P 时,依据数据并行原理,如图 4(a)所示,主核心读取大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 的图像后,将图像分割为 P 个大小为 $M \text{ pixel} \times N/P \text{ pixel}$ 的小图像,分布到 P 个核心上进行计算。主核心根据(3)~(5)式同时对 P 个核心发布相位解调操作指令。相位解调结束后将得到的每个截断相位传送回主核心,然后主核心根据条纹图分割成小图像的顺序对 P 个截断相位逆向拼接得到完整的截断相位。当调用的核心数目为 P 时,依据任务并行原理,如图 4(b)所示(图中示例为双核处理模式,同时被处理的图像列数与核心数相同),主核心读取大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 的图像, P 个核心分别从主核心获得 N 列的相位提取任务中单独一列的计算任务,根据(3)~(5)式独立完成相位解调并写回主核心后,再次从主核心获取未完成解调的列任务,执行解调和写回操作,如此循环直到所有 N 列任务完成解调。

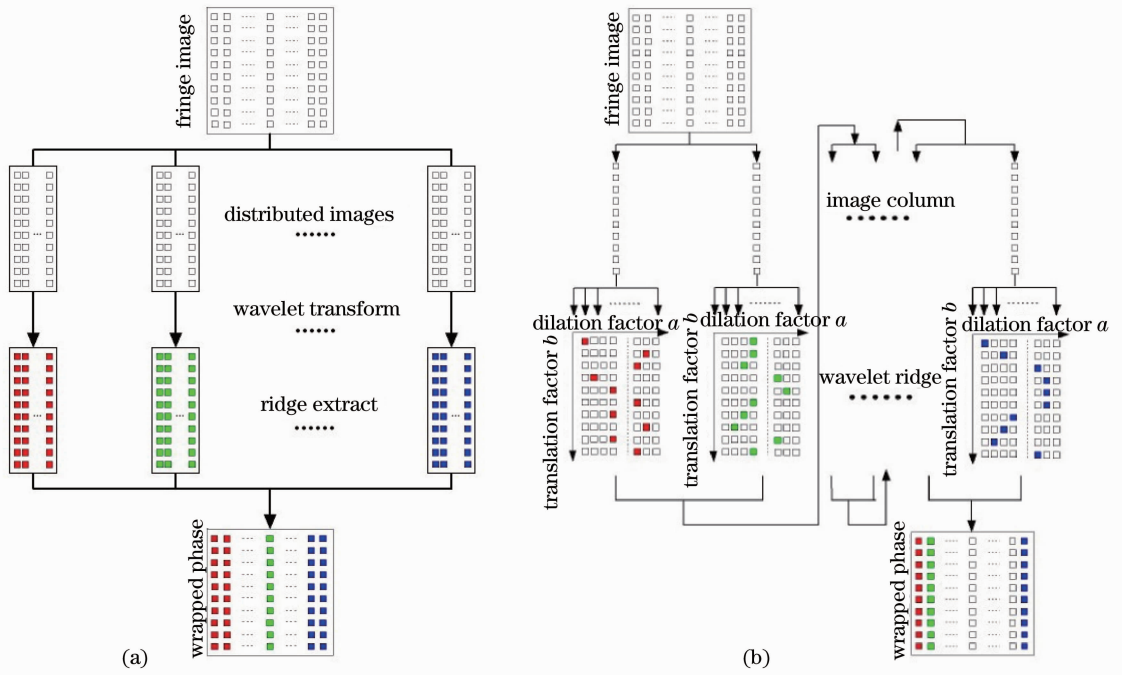


图4 条纹图并行一维连续小波变换计算流程。(a)数据并行处理;(b)任务并行处理

Fig. 4 Fringe pattern parallel 1D continuous wavelet transform operation flow. (a) Data parallel processing; (b) task parallel processing

对于数据并行,主核心与各核心间的总通信次数与核心数目 P 相关,各核心通信量取决于分割后图像大小 $M \text{ pixel} \times N/P \text{ pixel}$,总通信量与 $M \times N$ 相关。对

于任务并行,主核心与各核心间的总通信次数与图像列数 N 相关,各核心的实际通信次数和通信量受各核心间的通信带宽影响,总通信量与 $M \times N$ 相关。

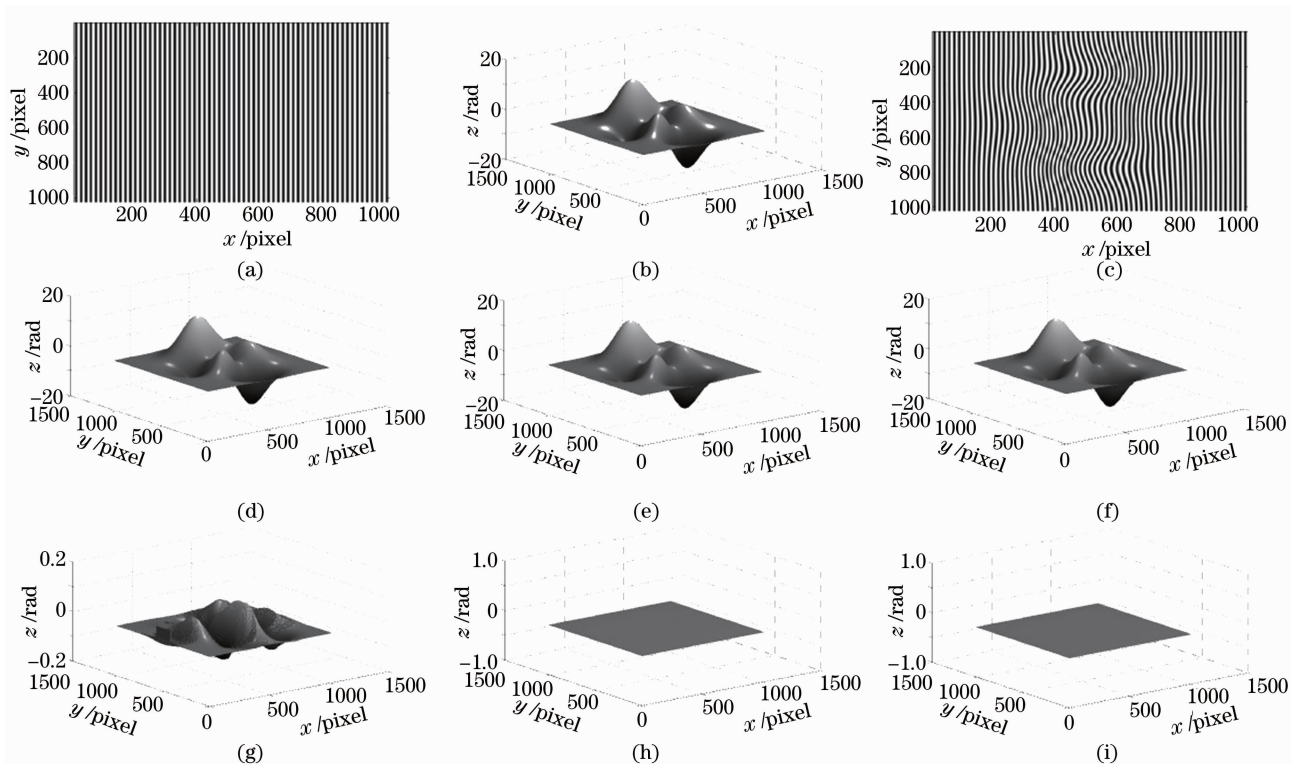


图5 并行一维连续小波变换相位解调模拟

Fig. 5 Simulation for phase extraction by parallel 1D continuous wavelet transform

3 计算机模拟及实验

根据并行一维连续小波变换相位解调原理,对载有三维面形相关相位信息的变形条纹图进行相位解调计算机模拟。模拟参考条纹图像的大小为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,基频 $f=1/16$,如图 5(a)所示;图 5(b)为模拟的调制相位,其峰值为 16.214;参考条纹经调制相位调制得到的变形条纹如图 5(c)所示。模拟过程中采用惠普 z820 系列工作站(CPU 为 Intel Xeon E5-2650 八核双处理器,主频 2.0 GHz,内存 64 G)多核平台进行数据处理;小波尺度因子 a 选取范围为 $[1,40]$ 。

分别使用串行一维连续小波变换条纹图像相位解调方法和任务并行以及数据并行两种不同并行计算方式的一维连续小波变换条纹图像相位解调方法进行条纹图解相,结果分别如图 5(d)~(f)所示。

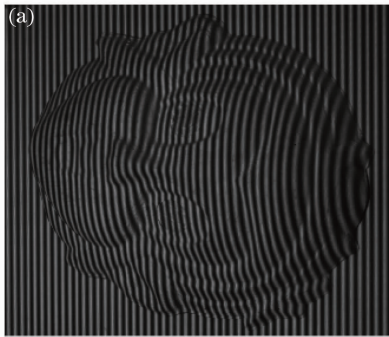


图 5(g)给出了串行一维连续小波变换相位解调误差,误差峰值小于 0.14,相对误差小于 1%。图 5(h)和图 5(i)分别为任务并行以及数据并行两种不同并行计算方式的一维连续小波变换条纹图相位解调方法相对串行一维连续小波变换相位解调方法结果的误差,结果表明并行一维连续小波变换相位解调方法保持了串行一维连续小波变换相位解调方法的精度。

为进一步验证所提方法的有效性,对结构光投影三维面形测量技术中实测的光学条纹图像进行了相位解调。实拍变形条纹图剪裁为 $850 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 的图像,如图 6(a)所示。小波变换尺度因子范围选为 $[1,40]$ 。利用并行一维连续小波变换条纹图相位解调方法对条纹图处理后恢复的被测物体三维面形如图 6(b)所示。



图 6 实验。(a)变形条纹图;(b)恢复的三维面形

Fig. 6 Experiment. (a) Deformed fringe pattern; (b) 3D shape reconstruction

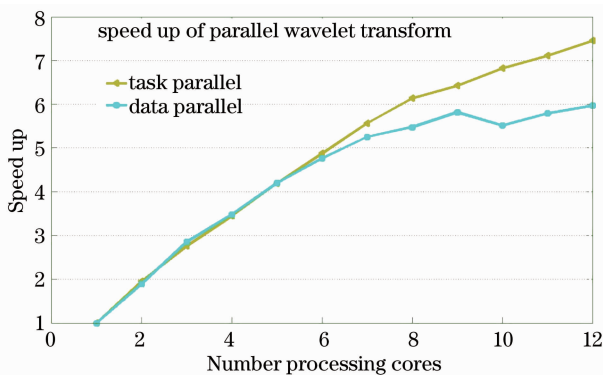


图 7 并行一维连续小波变换相位解调方法提速效果

Fig. 7 Speedup of phase retrieve using parallel 1D continuous wavelet transform

实验所取得的并行一维连续小波变换的加速效果如图 7 所示。两种方法在使用的计算核心数较小时,加速效果相当。随着计算核心数的增加,两种并行方法加速效果均逐渐增大,数据并行的加速效果逐渐低于任务并行加速效果。采用 Matlab 编程的

串行一维连续小波变换方法对实验图条纹图进行了 5 次解调,单次解调时间的均值为 66.6 s,在使用了 12 个处理核心时,任务并行单次解调时间为 8.8 s,取得了 7.5 倍的提速效果,数据并行提速倍数为 6。两种方式实现的主要区别在于核间通信次数以及循环计算之间是否同步。数据并行时多核间计算同步执行,各核心之间的数据由于数据传输顺序,通信带宽等因素影响,不同核心对分割图像的计算时长存在一定差异,最终计算结果的获取需要等待各核心均计算完成后才能执行。在使用较多核心数目时,随着图像分割后的大小变小,单幅分割图计算时长减小,计算完成后的同步等待时间对加速效果的影响开始凸显。任务并行各核心之间异步执行循环,单次循环的结果直接返回主核心。虽然任务并行存在更多的核间通信次数,但单次循环计算任务很小,受通信带宽限制较小的核心计算完已分配任务后能先于其他核心执行下一次的循环,从而减少带宽限

制大的核心的计算任务量,提升计算性能。

使用工作站时,数据并行的最佳加速效果低于任务并行的最佳加速效果。但采用四台计算机(CPU为Intel G630双核,主频2.7 GHz,内存2 G)通过一个高速路由器连接的机群计算平台执行数据并行一维连续小波变换方法时,在处理核心数为8时数据并行依旧是得到了5.3倍的加速效果,而任务并行由于网络通信速度的限制,只得到了不到2倍的加速效果。

表1 并行一维连续小波变换对不同大小条纹图的相位解调加速效果

Table 1 Speedup of phase retrieve using parallel 1D continuous wavelet transform to different sizes of fringe pattern

Image size	Dilation factor: a			
	[1,20]	[1,40]	[1,60]	[1,80]
(TP) 128×128	2.8	3.5	4.1	4.5
(DP) 128×128	1.7	2.1	2.7	3.2
(TP) 256×256	4.0	4.9	5.5	6.1
(DP) 256×256	2.6	3.4	4.3	4.4
(TP) 512×512	5.5	6.5	6.8	7.2
(DP) 512×512	4.0	4.6	5.9	5.7
(TP) 1024×1024	7.2	7.5	8.0	8.1
(DP) 1024×1024	5.9	6.2	6.9	7.7

Note: TP: task parallel; DP: data parallel

实际的并行加速效果还与处理的图像大小和所选取的尺度因子范围有关,采用惠普 z820 系列工作站,调用12个处理核心对不同大小的条纹图在不同尺度因子范围下的加速效果进行了测试,结果如表1所示。随着图像尺寸增大、尺度因子个数增多,由于运算量增多,通信时间在并行化过程中所占的比例减小,并行加速效果不断提升。任务并行方式中对1024 pixel×1024 pixel图像的并行处理,在选取小波因子范围为[1,80]时,加速比达到了8.1。

4 结 论

提出基于数据并行和任务并行的并行一维连续小波变换光学条纹图相位解调技术。在工作站和计算机集群平台上开展了计算机模拟和实验,结果表明并行一维连续小波变换光学条纹图相位解调方法相比于串行一维连续小波变换光学条纹图相位解调方法,在精度不变的同时显著提高了处理速度:对850 pixel×1000 pixel实测条纹图的相位解调速度提高了7.5倍。并行一维连续小波变换光学条纹图相位解调方法的提速效果随着图像的增大和尺度因

子数目的增加而增强。提出的并行一维连续小波变换是一种通用加速方法,若结合底层编程语言对一维连续小波算法进行优化,可以获得更高的实时处理速度,为基于小波变换的三维面形测量技术在实时/瞬态过程三维面形测量中的应用提供了一种新的技术手段。

参 考 文 献

- 1 Yan Cui, Sebastian Schuon, Derek Chan, *et al.*. 3D shape scanning with a time-of-flight camera [C]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on, 2010, 1173-1180.
- 2 L Zhang, B Curless, S M Steven. Spacetime stereo: Shape recovery for dynamic scenes [J]. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003, 2: 376-374.
- 3 Song Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. Opt & Lasers in Eng, 2010, 48(2): 149-158.
- 4 Zhang Qican, Su Xianyu, Cao Yipin, *et al.*. Three-dimensional shape measurement for rotating blade using stroboscopic structured illumination [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(2): 207-211.
张启灿, 苏显渝, 曹益平, 等. 利用频闪结构光测量旋转叶片的三维面形[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 207-211.
- 5 Lu Shijiang, Li Yong, Wang Hui, *et al.*. High-speed and dense 3D shape capture of scene consisting of spatially isolated objects [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(1): 34-39.
卢世江, 李勇, 王辉, 等. 含孤立物体场景的高速、高密度三维面形采集[J]. 光电工程, 2012, 39(1): 34-39.
- 6 Zheng Dongliang, Da Feipeng. Double-step phase-shifting algorithm for fringe-projection measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512004.
郑东亮, 达飞鹏. 双步相移光栅投影测量轮廓术[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512004.
- 7 Li Sikun, Su Xianyu, Chen Wenjing. Wavelet ridge techniques in optical fringe pattern analysis [J]. J Opt Soc Am A, 2010, 27(6): 1245-1254.
- 8 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Apply wavelet transform to phase analysis of spatial carrier fringe pattern [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(4): 454-459.
翁嘉文, 钟金钢. 小波变换在载频条纹相位分析法中的应用研究[J]. 光学学报, 2005, 25(4): 454-459.
- 9 Zhou Xiang, Zhao Hong. Three dimensional profilometry based on Mexican hat wavelet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 197-202.
周翔, 赵宏. 基于Mexican hat小波变换的三维轮廓术[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 197-202.
- 10 Li Sikun, Su Xianyu, Chen Wenjing. A new wavelet transform method for optical carrier-fringe pattern phase reconstruction [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 3060-3065.
李思坤, 苏显渝, 陈文静. 一种新的小波变换空间载频条纹相位重建方法[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3060-3065.
- 11 Cui Shilin, Tian Fei, Li Dehua. Phase retrieval method with continuous wavelet transform based on exponent spacing scales [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0712001.
崔世林, 田斐, 李德华. 基于指数尺度间隔连续小波变换的相位提取算法[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0712001.
- 12 Munther A Gdeisat, Abdulbasit Abid, David R Burton, *et al.*. Spatial and temporal carrier fringe pattern demodulation using the one-dimensional continuous wavelet transform: recent progress,

- challenges, and suggested developments [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2009, 47(12): 1348–1361.
- 13 Abdulbasit Z Abid, Munther A Gdeisat, David R Burton, *et al.*. Fringe pattern analysis using a one-dimensional modified Morlet continuous wavelet transform [C]. *SPIE*, 2008, 7000: 70000Q.
- 14 Abdulbasit Abid. Fringe pattern demodulation using the one-dimensional continuous wavelet transform: field-programmable gate array implementation [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(7): 1468–1471.
- 15 B Wilkinson, M Allen. *Parallel Programming: Techniques and Applications Using Networked Workstations and Parallel Computers* (2nd Edition) [M]. Pearson Prentice Hall, 2005.
- 16 Lu Feng, Enrico Fedrigo, Clémentine Béchet, *et al.*. Computational performance comparison of wavefront reconstruction algorithms for the European Extremely Large Telescope on multi-CPU architecture [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(16): 3564–3583.
- 17 Lu Yinghai, Zhou Hai, Shang Li, *et al.*. Multicore parallelization of min-cost flow for CAD applications [J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits*, 2010, 29(10): 1546–1557.
- 18 D E Singh, J P Singh, A Gupta. *Parallel Computer Architecture* [M]. Elsevier Science Ltd, 1998.

栏目编辑: 何卓铭