

基于剪枝优化算法的反向条纹生成方法

李 雪 张启灿

(四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610064)

摘要 反向条纹投影技术是一种应用于在线或批量、快速而稳定的光学三维面形检测技术,近年来得到广泛关注和应用。提出了一种反向条纹生成的新方法,利用了正向映射变换方法传递坐标以及摄像机坐标系中同名点所在的水平和垂直方向两条等相位线,求解它们的交点就可以得到投影器对应像素点在摄像机坐标系中的位置,再生成待投影的反向条纹。在分析了两条等相位线特点的基础上,提出了求解等相位线交点的优化算法-剪枝优化算法。该算法逐步缩小两条等相位线上有效像素点的规模,直至找到交点周围邻近的4个整像素点,再拟合出两直线方程,联立方程精确解出亚像素精度的交点坐标。并将本剪枝优化算法与文献[10]的主要方法进行了对比分析,计算机模拟实验得到了相位标准差,分别为0.000798 rad和0.0046 rad;实物实验得到的相位标准差分别为0.0431 rad和0.0292 rad。对比结果表明:该优化算法有效提高了反向条纹生成的精度,并且能以较快的速度精确搜索到交点周围4个像素点,减小了反向条纹生成的时间。

关键词 测量;三维测量;反向条纹;正向映射变换;剪枝优化

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1212003

Inverse Fringe Generation Method Based on Pruning Optimization Algorithm

Li Xue Zhang Qican

(Opto-Electronic Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Inverse projected fringe technique is a fast and robust optical three-dimensional (3D) shape inspection technique, which is applied to online or batch inspection. In recent years, people pay more attention to the technique and apply it in many fields. A new method for generating inverse fringe is proposed. This method adopts normal mapping transform relationship to transfer coordinate. Then, it adopts the horizontal and vertical equal phase lines to obtain crosspoint which is the homologous pixel of the pixel on projector plane, so we can get the inverse fringe finally. The pruning optimization algorithm for getting the crosspoint is proposed, based on equal phase lines' characteristic. The algorithm gradually decreases the unnecessary pixels of two equal phase lines. Finally, it can find four nearest pixels of the crosspoint, then the crosspoint can be calculated by solving two linear equations. The algorithm comes to sub-pixel level. The pruning optimization algorithm and the method proposed in Ref. [10] are used in contrast experiments. Standard phase differences in the computer simulation experiment are 0.000798 rad and 0.0046 rad respectively. Standard phase differences in the real experiment are 0.0431 rad and 0.0292 rad, respectively. The conclusion indicates that the optimization algorithm can improve precision of inverse fringe projection effectively, and reduce time consumption by exactly searching four nearest pixels with fast speed.

Key words measurement; three-dimensional measurement; inverse fringe; normal mapping transform; pruning optimization algorithm;

OCIS codes 110.2650; 100.4994; 060.4251; 120.5050

1 引言

在工业生产中,产品的面形差别一般来说很小,

但对产品质量影响很大。由于流水线速度的限制或需检测的产品数量巨大,要求运用的光学检测技术

收稿日期: 2013-06-21; 收到修改稿日期: 2013-07-15

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支撑计划(NCET-11-0357)、四川省学术和技术带头人后备人选培养基金

作者简介: 李 雪(1988—),女,硕士研究生,主要从事光学三维面形测量方面的研究。

E-mail: whatwillyeshudu@163.com

导师简介: 张启灿(1974—),男,教授,硕士生导师,主要从事三维面形测量方面的研究。E-mail: zqc@scu.edu.cn

必须快速稳定。反向条纹投影技术^[1-2]则能够很好地满足上述要求,它是一种快速而稳定的三维面形测量技术,适用于工业产品面形的质量控制。

反向条纹投影技术的概念最早是由 Schönleber 等^[3]在 1997 年提出,在由 Harthong 等^[4]同年提出的反向莫尔中也可以找到相近的思想。同期 Kalms 等^[5]提出自适应条纹的方法,并于 2001 年对反向条纹投影技术进行了完整详尽的理论概括^[6-7],随后 Li 等^[8]对该技术进行了更详尽的综述。

反向条纹投影技术的核心部分是建立投影器坐标系 (l, m) 与摄像机坐标系 (i, j) 之间的坐标映射关系。现有的方法包括逆向映射变换方法和正向映射变换方法。基于最近邻插值、双线性插值和二元三次插值生成反向条纹的方法^[9]属于逆向映射变换方法。它可以把摄像机相位坐标系上的像素点映射到投影器相位坐标系上,根据像素的位置权重分配投影器像素在摄像机坐标系中的位置。正向映射变换方法^[10]则根据投影器相位坐标系 (l, m) 的两套相位分布,直接映射到摄像机相位坐标系中的位置 (i, j) 。

本文提出了一种基于剪枝优化算法的反向条纹

生成方法,利用正向映射变换传递坐标,在摄像机相位坐标系的水平和垂直方向得到两条等相位线,两条等相位线的交点就是投影器像素 (l, m) 在摄像机坐标系中的对应坐标 (i, j) ,在分析了两条等相位线特点的基础上,提出了求解等相位线交点的优化算法——剪枝优化算法。该算法能逐步缩小等相位线上有效数据点的规模,直至找到交点周围邻近的 4 个整像素点,拟合出两直线方程,再联立解方程得到交点,通常是亚像素点。遍历投影器上所有的像素点,得到几何反向传递关系,定义一幅希望在摄像机平面上得到的条纹图,根据几何反向传递关系,从而计算出应投影的反向条纹。

2 反向条纹投影技术原理

传统条纹投影技术一般是把直条纹图投影到物体表面,摄像机记录变形条纹图。而反向条纹投影技术则把这个过程反过来,投影变形条纹图,而在摄像机记录得到直条纹图,如图 1 所示。

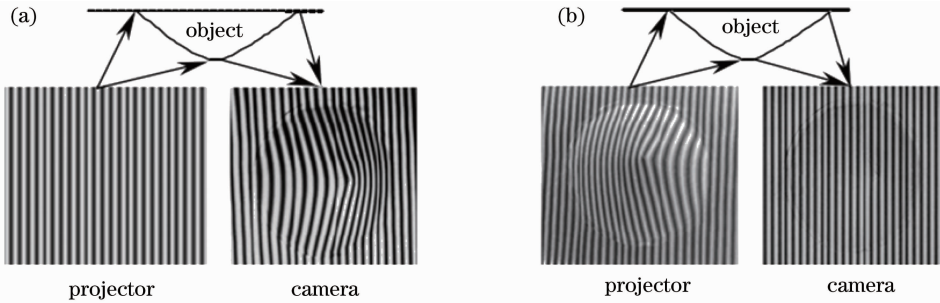


图 1 传统条纹投影和反向条纹投影的区别。(a)传统正弦条纹投影;(b)反向条纹投影

Fig. 1 Differences between traditional and inverse fringe projection. (a) Traditional sine fringe projection; (b) inverse fringe projection

反向条纹投影技术一般可以分为以下几个步骤:

1) 向待测物体投影垂直和水平方向两套标准正弦条纹图,投影器投影的垂直条纹 $I_{Pro,V}$ 和水平条纹 $I_{Pro,H}$ 可表示为

$$I_{Pro,V}(l, m) = 0.5 + 0.5\cos[\varphi_V(l, m)], \quad (1)$$

$$I_{Pro,H}(l, m) = 0.5 + 0.5\cos[\varphi_H(l, m)], \quad (2)$$

式中 φ_V 和 φ_H 分别是投影器投影的垂直条纹和水平条纹的相位分布, $\varphi_V(l, m) = 2\pi ml/p$, $\varphi_H(l, m) = 2\pi l/p$, p 是条纹周期。

从另一角度用摄像机对投影出去的两套标准正弦条纹分别成像,摄像机平面上像素坐标为 (i, j) 的垂直变形条纹 $I_{Cam,V}$ 和水平变形条纹 $I_{Cam,H}$ 可以表示为

$$I_{Cam,V}(i, j) = I_0(i, j)\{1 + \gamma(i, j)\cos[\varphi'_V(i, j)]\}, \quad (3)$$

$$I_{Cam,H}(i, j) = I_0(i, j)\{1 + \gamma(i, j)\cos[\varphi'_H(i, j)]\}, \quad (4)$$

式中 I_0 为背景光强, γ 为条纹调制度。

2) 投影器和摄像机坐标系之间的坐标和强度映射关系,即几何和强度传递关系,表示为

$$\begin{pmatrix} l \\ m \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$I_{Cam}(i, j) = g[I_{Pro}(l, m)]. \quad (6)$$

利用传统条纹投影技术对参考条纹和变形条纹进行相位展开^[11-12]。根据投影器和摄像机的对应像素点有相同的相位这一特点,通过相位映射关系,

可以求出投影器和摄像机像素之间的坐标和强度对应关系,即几何传递关系 f 和强度传递关系 g 。要想在摄像机平面上得到期望的图像 $I_w(i,j)$, 投影器投影的图像 $I_{inv}(l,m)$ 为

$$I_{inv}(l,m) = g^{-1}\{I_w[f^{-1}(l,m)]\}. \quad (7)$$

3) 根据几何反向传递关系 f^{-1} , 得到投影器整像素点对应在摄像机坐标系中的位置。定义一幅期望在摄像机平面上得到的条纹图 $I_w(i,j)$, 计算出应投影的反向条纹, 即 $I_{inv}(l,m)$ 。本文只是为了说明提出算法的可行性, 故仅涉及几何反向传递关系, 暂不考虑强度反向传递关系。

3 正向映射变换方法

正向映射变换方法是将投影器像素点的坐标直接映射到摄像机坐标系中的一种生成反向条纹的方法。

对于投影器上任一像素点 (l,m) , 垂直方向相位为 $\varphi_v(l,m)$, 在摄像机垂直相位图 φ'_v 中找到一系列与 $\varphi_v(l,m)$ 相等的像素点, 通常是亚像素点, 将所有点拟合成一条曲线, 称为等相位线。同样, 根据水平方向相位 $\varphi_h(l,m)$, 在摄像机水平相位图 φ'_h 中找到一系列与 $\varphi_h(l,m)$ 相同的像素点, 拟合出水平方向的等相位线。通过求解垂直等相位线和水平等相位线的交点, 找到投影器像素点 (l,m) 在摄像机坐标系中的位置。正向映射的过程是根据投影器像素点在摄像机坐标系中对应位置, 直接在摄像机期望图像中读取相位值, 即在一个标准相位场中读取相位值, 误差较小。

图 2 是采用正向映射变换方法生成、投影反向条纹的全过程。追踪投影器投影的标准正弦条纹上的一个像素点, 图 2(a) 和 (d) 中的黑点代表被追踪的像素点。图 2(i) 为被测物体, 图 2(b) 和 (e) 是从

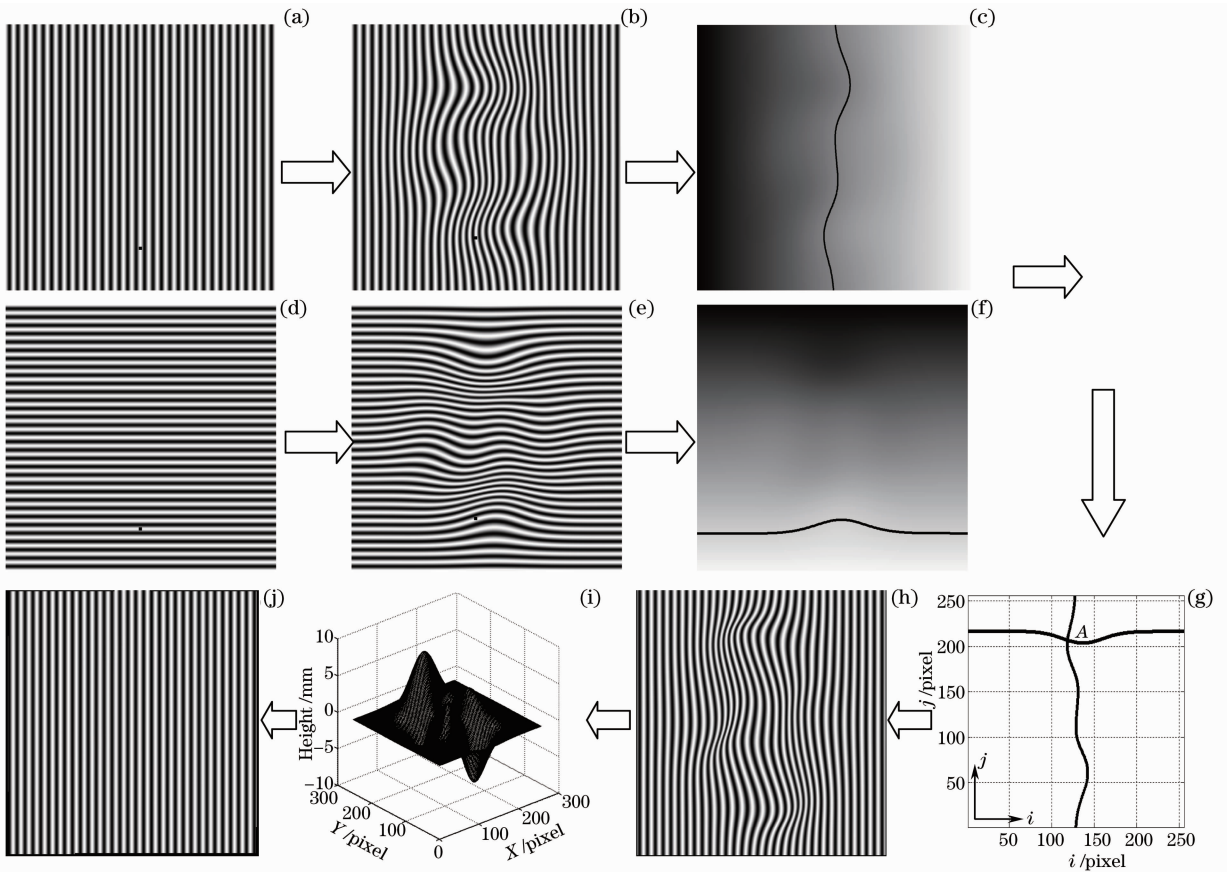


图 2 采用正向映射变换方法生成、投影反向条纹的全过程。(a)标准垂直条纹;(b)垂直变形条纹;(c)垂直展开相位;(d)标准水平条纹;(e)水平变形条纹;(f)水平展开相位;(g)两条等相位线;(h)反向条纹;(i)模拟物体;(j)投影反向条纹后的直条纹

Fig.2 Inverse fringe generation and projection based on normal mapping transform relationship. (a) Standard vertical fringe; (b) deformed vertical fringe; (c) vertical unwrapped phase; (d) standard horizontal fringe; (e) deformed horizontal fringe; (f) horizontal unwrapped phase; (g) two equal phase lines; (h) inverse fringe; (i) simulated object; (j) linear fringe after projecting inverse fringe

另一角度拍摄回来的变形条纹图,从图 2(b)和(e)中可以看出被最追踪像素点的位置因物体高度的调制发生了明显变化。图 2(c)为垂直展开相位图,黑线是与被跟踪点的垂直相位相同的像素点拟合成的垂直等相位线。同样地,根据被跟踪点的水平相位可在图 2(f)水平展开相位图中,拟合得到水平等相位线,如图 2(f)中的黑线所示。在相位坐标图[图 2(g)]中同时显示两条等相位线,显然等相位线的交点 A 即为被跟踪点在摄像机相位坐标系中的位置,通常是亚像素点。遍历投影器上所有的像素点,都可对应找到在摄像机相位坐标系中的位置,即几何反向传递关系。根据期望在摄像机上得到垂直条纹的相位,通过几何反向传递关系,反算出的反向条纹如图 2(h)所示,投影反向条纹到物体上得到直条纹如图 2(j)所示。

生成反向条纹的关键在于得到投影器整像素点对应在摄像机坐标系中的位置,因此交点 A 的位置求解的好坏直接影响反向条纹生成的精度。文献[10]提出求解交点的主要方法是把水平和垂直等相位线上的相位坐标构成两个相位坐标队列,在两个相位坐标排序队列中查找交点,由于查找的位置都在整数像素点上,因此查找的最后只能是找到交点附近的整像素点。此时如果用整像素点的位置直接代替交点,则还不能精确定位交点的坐标。本文采用的方法能比较精确地找到交点周围邻近的 4 个整像素点,再拟合出两直线方程,联立解方程得到交点坐标,为亚像素点。

4 一种基于剪枝优化算法的反向条纹生成方法

剪枝优化是在搜索算法中常常采用的一种优化方法^[13],通过设计遵循一定原则的剪枝判断条件,可以舍弃不必要的节点,保留有效的节点,大大缩短搜索算法运行时间。本文运用剪枝优化过程的思想,针对由于被测物体高度变形引起了相位变化,交点坐标与已知邻近像素点的坐标有较大关联这一大特点,通过设计多次搜索等相位线上最小、最大值的剪枝判断条件,“剪”去等相位线上不必要的像素点,保留有效像素点,不断缩小等相位线的范围。

图 3 是两条等相位线图,在摄像机 $i-j$ 坐标系中,A 点是等相位线的交点。在水平等相位线上任取一点 B 点,坐标表示为 (v, ω) 。在垂直等相位线上任取一点 C 点,坐标表示为 (r, s) 。F 运算符表示求解

水平等相位线在 j 方向上的最小、最大值,并用最小、最大值约束垂直等相位线在 j 方向的取值,剪去最小、最大值之外的垂直等相位线上像素点的运算,用(8)式表示 F 运算关系。G 运算符表示求解垂直等相位线在 i 方向上最小、最大值,并用最小、最大值约束水平等相位线在 i 方向的取值,剪去最小、最大值之外的水平等相位线上像素点的运算,用(9)式表示 G 运算关系。通过多次运算,不断“剪去”两条等相位线在 i 和 j 方向上不必要的像素点:

$$(r, s) = \sum_{k=1}^{2n-1} F_k(v, \omega), \quad (8)$$

$$(v, \omega) = \sum_{k=2}^{2n} G_k(r, s), \quad (9)$$

k 表示进行第 k 次运算,当 $k = 2n$ 时表示进行 G 运算,当 $k = 2n - 1$ 时表示进行 F 运算,总运算次数为 $2n - 1$ 或者 $2n$ 。

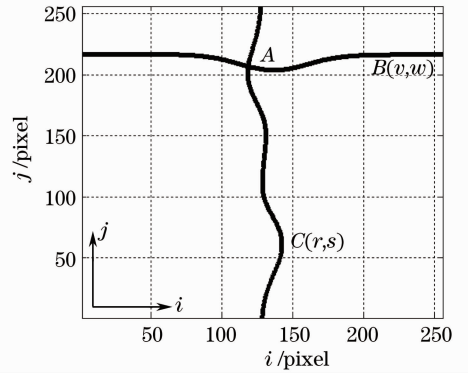


图 3 摄像机平面上的两条等相位线

Fig. 3 Two equal lines on camera plane

图 4 是图 3 两条等相位线图的局部放大图,对图 4 局部放大图中两条等相位线进行剪枝优化,得到下列计算流程:

第一次运算搜索得到水平等相位线纵坐标在 j 方向上的最小值 a 和最大值 b ,对 a 和 b 取整,组成

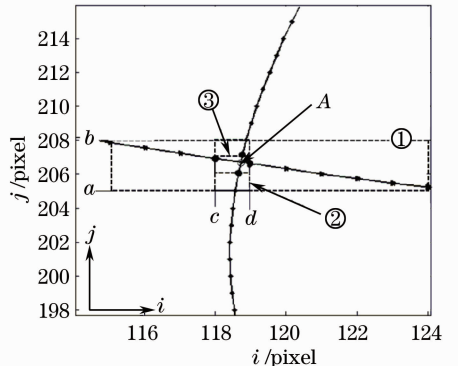


图 4 图 3 的局部放大图

Fig. 4 Detail view of Fig. 3

图中的矩形框①。矩形框内的像素点代表有效像素，矩形框外的像素点被剪除；

同理进行第二次运算搜索得到垂直等相位线横坐标在 i 方向上的最小值 c 和最大值 d ，对 c 和 d 取整，组成矩形框②。剪除水平等相位线在矩形框外的像素点，进一步缩小了有效像素点的规模；

第三次运算搜索得到矩形框③；

第四次运算搜索的结果和第三次的相同，还是得到矩形框③，此时停止搜索，运算结束，则矩形框③内的4个像素点为交点周围邻近的4个整像素点。

如果直接用交点附近的整像素点替代交点，还不

能精确确定交点的位置，降低反向条纹生成的精度，继续通过求两直线方程，联立解方程得到交点 A ，通过方程解析出的交点像素坐标能精确到亚像素级。

5 计算机模拟实验

为了验证基于剪枝优化算法反向条纹的生成方法对于提高精度的有效性，首先用计算机进行了模拟实验，并与文献[10]提到的主要方法进行了对比。实验平台为 Matlab 环境、3.00 GHz 的 CPU 和 3.46 GB 的内存。模拟物体为正弦函数、椭圆函数

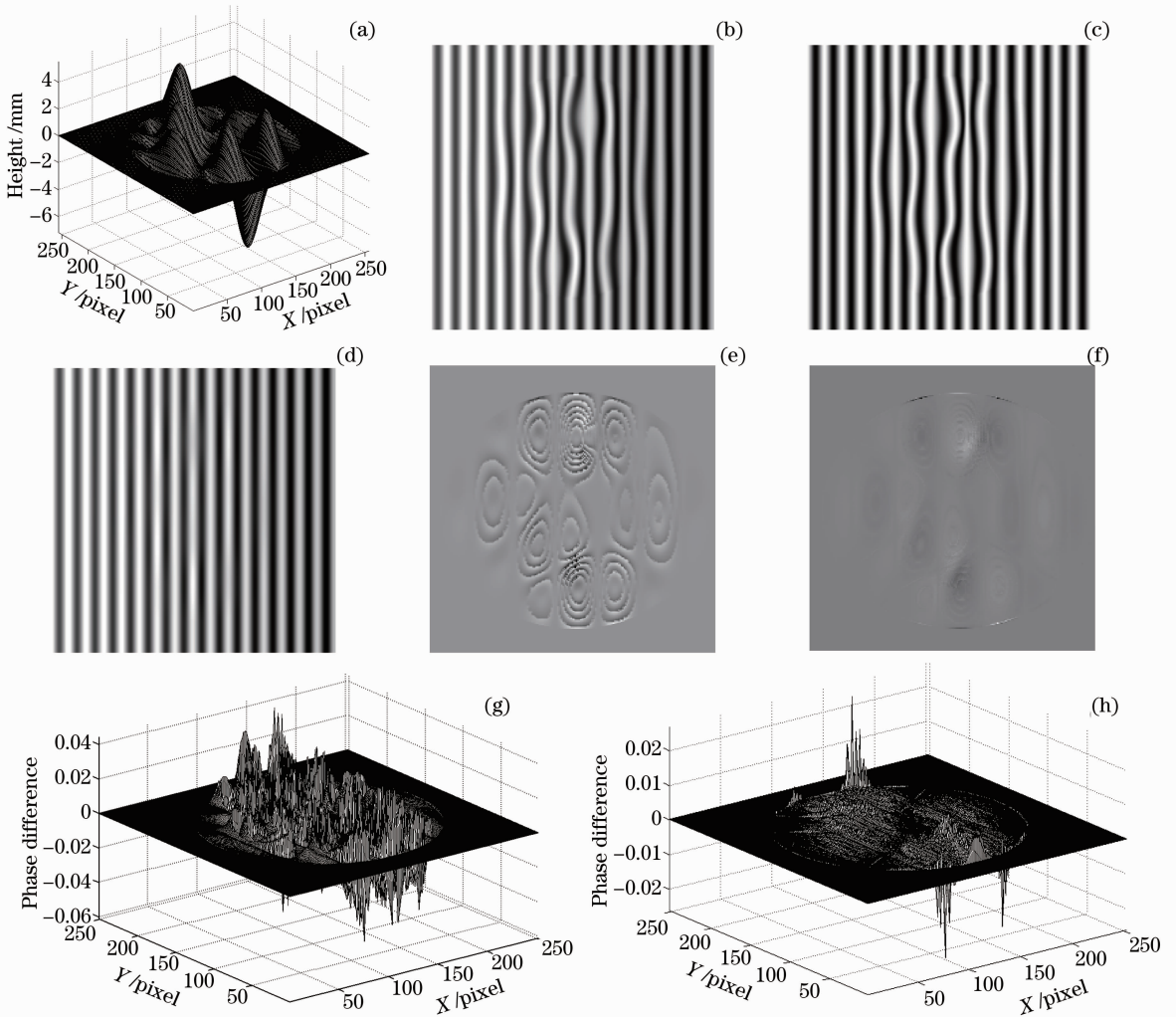


图5 两种方法的计算机模拟实验对比。(a)模拟物体；(b)变形条纹；(c)反向条纹；(d)投射反向条纹后得到的直条纹；(e)采用文献[10]提出方法得到的相位差；(f)采用本文提出方法得到的相位差；(g)采用文献[10]提出方法得到的相位差分布三维网格图；(h)采用本文提出方法得到的相位差分布三维网格图

Fig. 5 Computer simulated comparison of two methods. (a) Simulated object; (b) deformed fringe; (c) inverse fringe; (d) linear fringe after projecting the inverse fringe; (e) figure of phase difference proposed in Ref. [10]; (f) figure of phase difference proposed in this paper; (g) three-dimensional grid of phase difference proposed in Ref. [10]; (h) three-dimensional grid of phase difference proposed in this paper

和 Peaks 函数的组合,大小是 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,如图 5(a)所示,模拟斜投影正拍摄的方式,投影垂直和水平两套标准正弦条纹,条纹周期为 16 pixel ,生成的一幅变形条纹图如图 5(b)所示,采用 4 步相移的相位测量轮廓术得到垂直和水平展开相位^[14-17]。图 5(c)和图 5(d)分别为使用剪枝优化算法生成的垂直反向条纹图和投射反向条纹后得到的直条纹图。取标准正弦条纹上一像素点(61,152),在该点所加物体的高度为 2.83 mm ,用剪枝优化算法方程解析计算得到该像素点在反向条纹图中的位置为(64.462, 155.462),能精确到亚像素级别,更有利于产生精准的反向条纹。

两种方法投影结果和标准正弦条纹的相位差图

表 1 两种方法的计算机模拟实验对比

Table 1 Computer simulated comparison of two methods

	Method proposed in Ref. [10]	Method proposed in this paper
Standard deviation / rad	0.0046	0.000798
Time consumption / s	24.531	18.406

6 实物实验

实验所用的物体为一个塑料瓶的底部,投影器是基于数字微镜器件(DMD)的数字投影器(DLP),分辨率为 $600 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$,CCD 的分辨率为 $480 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$,基于三角测量法,以斜投影正拍摄的方式测量物体,图 6(a)、(b)是投影标准垂直和水平正弦条纹图后拍摄到的变形条纹。图像大小为 $480 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$,期望条纹图是周期为 16 pixel 的标准垂直正弦条纹。用本文剪枝优化算法产生的垂直反向条纹和水平反向条纹分别如图 6(c)、(d)所示。投影反向条纹得后,在摄像机方向拍摄到如图 6(e)、(f)所示的直条纹。为了比较,先按照文献[10]提出的主要方法产生了反向条纹,投影该反向条纹得到直条纹,并计算出它对应的相位分布与标准正弦条纹对应的相位分布二者之差如图 6(g)所示。用本文方法计算的反向投影直条纹

表 2 两种方法的实物实验对比

Table 2 Comparison of two methods using a real object

	Method proposed in Ref. [10]	Method proposed in this paper
Standard deviation / rad	0.0431	0.0292
Time consumption / s	68.9690	50.9395

7 结 论

反向条纹的生成依赖于正向条纹投影获得的被测物体相位分布,在物体高度变化较大、物体边沿以

如图 5(e)、(f)所示。还给出了相位差分布的三维网格图,如图 5(g)、(h)所示,从中可以形象直观地看出;图 5(h)的相位差尤其是图像边缘的相位差远远小于图 5(g)和期望的条纹更加接近。物体在边缘区域梯度变化较快,对应的相位准确性下降,最终导致反向条纹在边缘处有较大误差。表 1 分别列出了用这两种方法产生的反向条纹的投影结果和标准正弦条纹的相位标准差以及产生反向条纹所用的时间,可以看出本文基于剪枝优化算法得到的标准差为 0.000798 rad ,小于文献[10]提出的主要方法的标准差 0.0046 rad ,生成的反向条纹更加精确,也降低了时间花费。

[如图 6(e)所示]对应的相位分布与标准正弦条纹的相位差图^[18]如图 6(h)所示。图 6(i)、(j)分别为图 6(g)、(h)的三维相位差图。明显可以看出图 6(i)的相位误差范围比图 6(j)的大。由于斜投影正拍摄的方式,产生了局部遮挡造成的阴影,如图 6(a)物体右上角所示,致使相位质量不好,在该处引起反向条纹的较大误差。表 2 分别列出了用这两种方法产生的反向条纹投影后的相位分布和标准正弦条纹的相位标准差,以及产生反向条纹的计算时间,可以看出本文基于剪枝优化算法的方法得到的标准差要小于参考文献[10]提出的方法,并且缩短了反向条纹的生成时间,可见本文基于剪枝优化算法的方法能提高反向条纹计算和投影的速度和精度。实物实验中两种方法标准差的差别不大是由于摄像机和投影器分辨率的限制以及镜头低通滤波器的特点,使得部分误差被滤除。

及遮挡阴影区域,相位的预先测量所存在的误差会导致生成的反向条纹在该区域出现较大误差。本文提出了一种基于剪枝优化的反向条纹生成方法,该

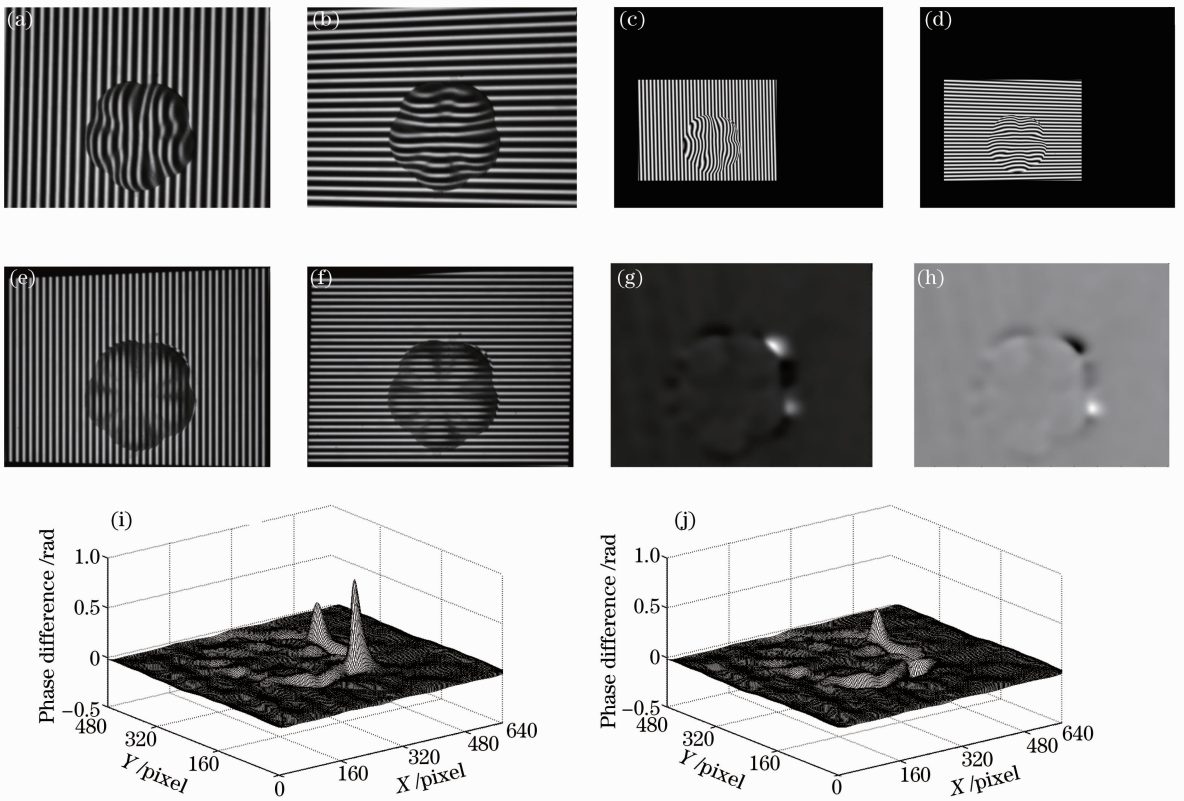


图6 两种方法的实物对比实验。(a)垂直变形条纹;(b)水平变形条纹;(c)垂直反向条纹;(d)水平反向条纹;(e)、(f)投影反向条纹后得到的直条纹;(g)采用文献[10]提出方法得到的相位差图;(h)采用本文提出方法得到的相位差图;(i)文献[10]所用方法的重投影相位差分布;(j)本文方法的重投影相位差分布

Fig. 6 Real object contrast experiment of two methods. (a) Deformed vertical fringe; (b) deformed horizontal fringe; (c) vertical inverse fringe; (d) horizontal inverse fringe; (e), (f) linear fringe after projecting the inverse fringe; (g) figure of phase difference proposed in Ref. [10]; (h) figure of phase difference proposed in this paper; (i) phase difference by the method proposed in Ref. [10]; (j) phase difference by the method proposed in this paper

方法在分析了两条等相位线的交点与交点周围邻近像素点有较大关联这一特点,通过简单的剪枝判断条件不断剪掉等相位线上不必要的像素点,最终找到交点邻近的4个整像素点,因此不必搜索等相位线上每一个像素点,尤其对于像素点较多的等相位线,能够有效地减少搜索时间。通过计算机模拟和实物的对比实验都表明采用剪枝优化算法生成反向条纹是有效的,可以比较准确地找到两等相位曲线的亚像素交点,减少了反向条纹生成时间。

参 考 文 献

- 1 Ayman Mohammad Samara. Enhance Dynamic Range Fringe Projection for Micro-Structure Characterization [M]. Charlotte: University of North Carolina, 2005. 61-72.
- 2 Thorsten Bothe, Wansong Li, Christoph von Kopylow, *et al.*. Object adapted inverse pattern projection-generation, evaluation and applications [C]. SPIE, 2003, 4933: 291-296.
- 3 M Schönleber, H J T-Ziani. Fast and flexible shape control with adapted LCD fringe masks [C]. SPIE, 1997, 3098: 35-42.

- 4 Jacques Harthong, Axel Becker. Inverse moiré[C]. SPIE, 1997, 3098: 2-9.
- 5 Michael K Kalms, Werner Jüptner, Wolfgang Osten. Automatic adaption of projected fringe patterns using a programmable LCD-Projector [C]. SPIE, 1997, 3100: 156-165.
- 6 M K Kaims, Wolfgang Osten, Werner Jüptner. Inverse projected fringe technique [C]. SPIE, 2001, 4317: 505-510.
- 7 M K Kalms, Wolfgang Osten, Werner Jüptner. Active industrial surface inspection with the inverse projected-fringe-technique [C]. SPIE, 2001, 4596: 37-47.
- 8 Li Wansong, Bothe Thorsten, Osten Wolfgang, *et al.*. Object adapted pattern projection-part I: generation of inverse patterns [J]. Opt & Lasers in Eng, 2004, 41(1): 31-50.
- 9 Cai Yuanyuan, Su Xianyu, Li Yong, *et al.*. Inverse fringe projection technique based on the coordinate transformation using cubic interpolation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(5): 85-90.
- 蔡元元, 苏显渝, 李勇等. 基于三次插值坐标变换的反向条纹投影技术[J]. 光电工程, 2006, 33(5): 85-90.
- 10 Xiao Chao, Su Xianyu, Jing Hailong. A new method for generation of inverse projected fringe [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2120-2124.
- 肖朝, 苏显渝, 荆海龙. 一种新的反向投影条纹生成方法的研究[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2120-2124.

- 11 Mao Xianfu, Su Xianyu, Chen Wenjing, *et al.*. Analysis on measurement method of improved Fourier transforms profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1291–1295.
毛先富, 苏显渝, 陈文静, 等. 改进傅里叶变换轮廓术的测量算法研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1291–1295.
- 12 Wen Yongfu, Su Xianyu, Zhang Qican. Universal calculation formula and system calibration method in Fourier transform profilometry [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(8): 2094–2098.
文永富, 苏显渝, 张启灿. 傅里叶变换轮廓术中一种普适的计算公式和系统标定方法[J]. *中国激光*, 2009, 36(8): 2094–2098.
- 13 Yin Hao, Yin Shuyi, He Yuanzhi. Fast search method for optimal beam sequence selection based on pruning optimization [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 35(5): 63–67.
尹浩, 尹术懿, 何元智. 基于剪枝优化的最优波束序列快速搜索方法[J]. *北京邮电大学学报*, 2012, 35(5): 63–67.
- 14 Ye Hongna, Cao Yiping. Phase measuring profilometry based on triangular pattern grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1108001.
叶虹呐, 曹益平. 基于三角形分布光栅的相位测量轮廓术[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1108001.
- 15 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(8): 1162–1166.
李勇, 苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, 26(8): 1162–1166.
- 16 Zhang Qican, Su Xianyu. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010001.
张启灿, 苏显渝. 动态三维面形测量的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010001.
- 17 Liu Yuankun, Su Xianyu, Zhang Qican. A novel phase order self-encoding technique for phase measuring profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1111002.
刘元坤, 苏显渝, 张启灿. 三维成像中相位级次自编码的相位测量方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1111002.
- 18 Gou Houkun, Luo Hui, Kevin Xi, *et al.*. Method of directional adaptive filter for fringe image [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(1): 011004.
郭厚焜, 罗晖, Kevin Xi, 等. 光栅条纹图像方向自适应滤波方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(1): 011004.

栏目编辑: 何卓铭