

文章编号: 0258-7025(2007)01-0099-06

傅里叶变换轮廓术新理论研究

毛先富, 陈文静, 苏显渝

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 采用传统的傅里叶变换轮廓术(FTP), 必须保证投影装置出射光瞳和成像装置入射光瞳的连线与参考面平行, 并且它们的光轴应在同一平面上, 才能得到较为准确的测量结果。改进了傅里叶变换轮廓术测量装置, 从理论上证明了双瞳连线不平行参考面, 且双光轴也不共面时的测量原理, 推导出了新的、适用范围更广泛的相位-高度映射算法, 使实验系统的搭建变得比较容易, 投影装置和成像装置的摆放位置可以随意移动以方便获取全场条纹。所提出的方法为在难以实现双瞳与参考面平行或难以使双轴共面的特殊环境下提供了获得可靠测量结果的途径, 并且传统的傅里叶变换轮廓术测量系统是所提出系统结构的一个特例。计算机模拟及实验均证实了该方法的有效性。

关键词 傅里叶光学; 傅里叶变换轮廓术; 相位高度映射; 相位计算; 条纹处理

中图分类号 O 438.2 **文献标识码** A

Analysis on an Improved Fourier Transform Profilometry

MAO Xian-fu, CHEN Wen-jing, SU Xian-yu

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract In order to obtain the correct height reconstruction of a measured object through the traditional Fourier transform profilometry (FTP), the connecting-line between the exit pupil of the projecting lens and the entrance pupil of the imaging lens must be horizontal and set to parallel to the reference plane. Here an improved optical geometry of FTP is discussed, and a strict theoretical analysis about an improved phase-height mapping formula based on a new description of a reference fringe and a deformed fringe in FTP is proposed in this paper when the location of the exit pupil of the projecting lens and that of the entrance pupil of the imaging lens do not meet the conditions. Employing the new theory, it is easier to obtain the full-field fringe through adjusting either the location of the projector or imaging device. Especially, in some cases, i. e., the connecting-line of the two pupils cannot be set parallel to the reference plane and the required conditions that the projecting and imaging axes must be horizontal cannot be met, the new method offers a flexible way to obtain the reliable height distribution of a measured object. Computer simulations and experiments have proved its correctness.

Key words Fourier optics; Fourier transform profilometry; phase-height mapping; phase calculation; fringe analysis

1 引言

傅里叶变换轮廓术(FTP)在三维面型测量中占有重要的位置, 在工业检测、实物仿型、医学诊断等领域都获得了广泛的运用。自 1983 年被 M. Takeda 等^[1]提出以来, 傅里叶变换轮廓术得到了广泛而深入的研究^[2~12]。但搭建传统的傅里叶变换

轮廓术方法的测量系统时, 要求比较严格: 既需要保证投影装置出瞳与摄像装置入瞳的连线要与参考面平行, 且投影光轴与成像光轴得在一个平面内, 并且交于参考面内的一点(即共面)。不仅搭建较理想的傅里叶变换轮廓术测量系统比较困难, 而且也不利于获取全场条纹。

本文对传统的傅里叶变换轮廓术进行了改进,

收稿日期: 2006-04-17; 收到修改稿日期: 2006-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(60527001)资助项目。

作者简介: 毛先富, 男, 四川人, 硕士研究生, 主要从事信息光学方面的研究。E-mail: mx9971f@163.com

导师简介: 陈文静(1968—), 女, 教授, 主要从事光信息处理、三维测量方面的研究。E-mail: chenwj@email.scu.edu.cn

推导了投影装置与成像装置双瞳不等高且双轴不共面时的条纹获取公式,并推导出新的条纹描述公式及新的高度计算方法。这使得搭建傅里叶变换轮廓术测量装置更为方便,更加灵活,投影装置和成像装置的摆放位置可以随意移动以方便全场条纹的获取,不必刻意校正光轴是否共面。

2 测量原理及理论分析

2.1 通用的条纹计算及相位求解理论

改进的傅里叶变换轮廓术测量光路如图 1 所示,成像系统(CCD 系统)的入瞳 I_{20} 与投影系统(光栅系统)的出瞳 I_1 不在同一水平高度,且成像系统的光轴与投影系统的光轴不共面,分别交参考平面于 O_1, O 两点,此时物面上任一点 D (坐标为 (x, y)) 和参考平面上 C_1 在成像系统上成像于同一点。过 I_1 作与参考面的平行线 $\overline{I_1 H}$ (注意 $\overline{I_1 H}$ 不在纸平面上)。成像系统的入瞳到参考面的距离为 $\overline{I_{20} O_1} = L$, 双瞳连线 $\overline{I_1 I_{20}}$ 与 $\overline{I_1 H}$ 所成的夹角为 α_1 , 光栅出瞳到参考面的垂足为 K, \overline{OK} 及 $\overline{I_1 I_{20}}$ 长度均可测出,设 $\overline{OK} = r, \overline{I_1 I_{20}} = s$ 。

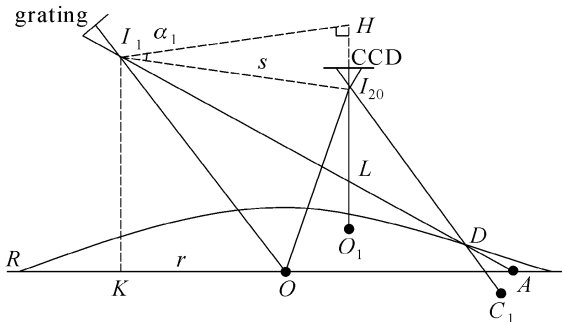


图 1 不共面不等高时测量示意图

Fig. 1 Measuring sketch map of no-coplanar and no-contouring

参考面的条纹光场分布可为

$$I_1(x, y) = I_0 [1 + \cos 2\pi x f(x)], \quad (1)$$

式中 $f(x)$ 为投影光栅在沿 x 方向的空间频率。平行且共面时 $f(x)$ 的计算已由文献[9]给出,表达式为: $f(x) = f \cos\theta (1 - \frac{2x \sin\theta}{I_1 O})$, 其中 f 为光栅频率。

如果不考虑 CCD 的成像质量等问题,非平行不共面与共面情况相比,仅仅相当于图像在 CCD 上成像位置的改变,但每一像素点的相对位置及相位的依赖关系并不改变。条纹的表达方式可以按图 2 所述方法进行推导。如图 2 所示,过 O 点作成像系统的光

轴的平行线,立体几何的证明可转化成平面几何证明。 I_{20} 平移后对应 I_2 , 当 I_{20} 移到 I_2 位置时, C_1 必旋转到 \overline{OA} 连线上的 C 点处,且 C, D, I_2 在一条直线上(作 $\triangle I_2 I_{20} D$ 的相似三角形 $\triangle DCC_1$, 交 \overline{OA} 于 C 点), 过 I_1 作与参考面的平行线交 $\overline{I_2 O}$ 于 G 。设 I_1 和 I_2 间距离为 d 。 $\angle I_2 I_1 G = \alpha$, 由于 $OO_1 HG$ 构成一个矩形, 则 $\overline{HI_{20}} = \overline{GI_2}, \overline{O_1 I_{20}} = \overline{OI_2} = L$ 。由于 $KOGI_1$ 仍是矩形, 易知 $\overline{I_1 G} = \overline{KO} = r$ 。图 2 中 $\triangle I_1 I_{20} H$ 及 $\triangle I_1 I_2 G$ 显示如图 3, 4 所示。由于 $\overline{GI_2} = \overline{HI_{20}} = s \cdot \sin\alpha_1$, 则在 $\triangle I_1 I_2 G$ 中

$$\tan\alpha = \frac{\overline{GI_2}}{\overline{I_1 G}} = \frac{s \cdot \sin\alpha_1}{r}, \quad (2)$$

在 $\triangle I_1 I_2 G$ 中

$$d = \frac{\overline{I_1 G}}{\cos\alpha} = \frac{\overline{KO}}{\cos\alpha} = \frac{r}{\cos\alpha}, \quad (3)$$

由于 $\overline{I_2 G} = \overline{I_{20} H}, \overline{I_{20} H} = s \cdot \sin\alpha_1$, 所以

$$\tan\theta = \frac{\overline{I_1 G}}{\overline{OG}} = \frac{r}{L + s \cdot \sin\alpha_1}, \quad (4)$$

由于在 $\triangle OI_1 G$ 中, $\overline{I_1 O} = r / \sin\theta$, 则

$$f(x) = f \cos\theta \left(1 - \frac{2x \sin\theta}{\overline{I_1 O}} \right) = f \cos\theta \left(1 - \frac{2x \sin^2\theta}{r} \right), \quad (5)$$

将(5)式代入(1)式,可得

$$I_1(x, y) = I_0 \left\{ 1 + \cos \left[2\pi f x \cos\theta \left(1 - \frac{2x \sin^2\theta}{r} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

其中 $\cos\theta, \sin\theta$ 均可由(4)式表示出。

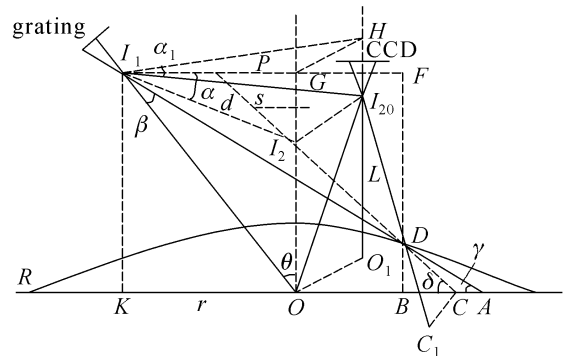


图 2 几何证明示意图

Fig. 2 Geometrical sketch map

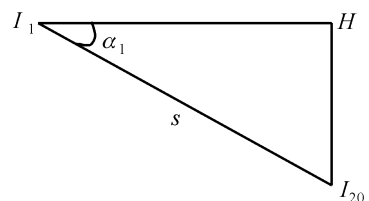
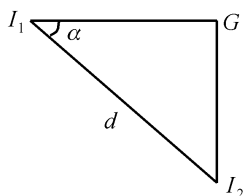


图 3 $\triangle I_1 I_{20} H$ 示意图

Fig. 3 $\triangle I_1 I_{20} H$ sketch map

图4 $\triangle I_1 I_2 G$ 示意图Fig. 4 $\triangle I_1 I_2 G$ sketch map

进而, CCD 采集到的变形光栅光场分布可以表示为

$$I_2(x, y) = I_0 \left\{ 1 + \cos \left[2\pi f x \cos \theta \left(1 - \frac{2x \sin^2 \theta}{r} \right) - \phi(x, y) \right] \right\}, \quad (7)$$

其中 $\phi(x, y) = 2\pi f \cdot \overline{CA} \cdot \cos \theta$ 。

非平行且不共面时, \overline{CA} 的值可通过几何证明给出, 仍如图 2 所示, 延长 \overline{BD} 与 $\overline{I_1 G}$ 线相交于 F , 则

由 $\triangle ABD$, $\triangle DI_1 F$ 的相似可得: $\frac{\overline{AB}}{\overline{BD}} = \frac{\overline{I_1 F}}{\overline{DF}}$, 由

$\triangle BCD$, $\triangle DPF$ 相似得 $\frac{\overline{BC}}{\overline{BD}} = \frac{\overline{PF}}{\overline{DF}}$ 。两式相减可得

$$\frac{\overline{CA}}{\overline{BD}} = \frac{\overline{I_1 P}}{\overline{DF}} = \frac{\overline{I_1 P}}{L + d \sin \alpha - \overline{BD}}, \quad (8)$$

又从 $\triangle PI_2 G$, $\triangle OI_2 C$, $\triangle BCD$ 互为相似三角形可知:

$\frac{\overline{PG}}{\overline{I_2 G}} = \frac{\overline{OC}}{\overline{L}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{BD}} = \frac{x}{L - \overline{BD}}$, 所以

$$\overline{I_1 P} = \overline{I_1 G} - \overline{PG} = d \cos \alpha - \frac{dx \sin \alpha}{L - \overline{BD}}, \quad (9)$$

由(8), (9)式联解并将(2), (3)式代入整理可得

$$\overline{CA} = \frac{\overline{BD}}{L + s \cdot \sin \alpha_1 - \overline{BD}} \left(r - \frac{xs \cdot \sin \alpha_1}{L - \overline{BD}} \right), \quad (10)$$

所以

$$\phi(x, y) = 2\pi f \cos \theta \cdot \frac{\overline{BD}}{L + s \cdot \sin \alpha_1 - \overline{BD}} \left(r - \frac{xs \cdot \sin \alpha_1}{L - \overline{BD}} \right). \quad (11)$$

由(4)式解出 θ , 并将(11)式代入(6)式即可得变形光栅的光场分布。公式(6), (7)表示的参考条纹和变形条纹, 可分别简写为

$$I_1(x, y) = I_0 \{ 1 + \cos[2\pi f_0 x + \phi_0(x, y)] \}, \quad (12)$$

$$I_2(x, y) = I_0 \{ 1 + \cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \}, \quad (13)$$

式中 $\phi_0(x, y)$, $\phi(x, y)$ 分别表示参考面及物面的相位信息, $f_0 = f \cos \theta$ 。分别将(12), (13)式进行傅里叶变换, 选用适当的滤波器, 可将基频滤出, 再作逆傅里叶变换, 即可得参考面及物面的相位 $\phi_0(x, y)$,

$\phi(x, y)$ 。则

$$\Delta \phi(x, y) = \phi(x, y) - \phi_0(x, y). \quad (14)$$

2.2 高度计算

我们再通过几何关系找出双瞳不等高, 双轴不共面时的高度计算公式。当测定 L, s, α_1, r , 且计算出 $\Delta \phi(x, y)$, $\phi_0(x, y)$, f_0 后, 三维物体表面上任一点 D 的高度 \overline{BD} 的解析式可以推导出, 仍如图 2 所示。注意 $\gamma + \beta = 90^\circ - \theta$, 在 $\triangle AOI_1$ 中, 由正弦定理可得

$$\frac{\overline{I_1 O}}{\sin \gamma} = \frac{\overline{AO}}{\cos(\theta + \gamma)}, \quad (15)$$

又在 $\triangle ACD$ 中

$$\frac{\overline{CA}}{\sin(\delta - \gamma)} = \frac{\overline{CD}}{\sin \gamma}, \quad (16)$$

则

$$\sin \gamma = \frac{\overline{I_1 O} \cos \theta}{\sqrt{(\overline{I_1 O} \sin \theta + \overline{AO})^2 + (\overline{I_1 O} \cos \theta)^2}}, \quad (17)$$

而高度

$$h(x, y) = \overline{BD} = \overline{CD} \sin \delta, \quad (18)$$

将(15)~(17)式代入(18)式并整理可得

$$\overline{BD} = \frac{\overline{CA}}{\cot \gamma - \cot \delta}, \quad (19)$$

式中 $\cot \delta = \frac{\overline{OC}}{\overline{L}}$, 而 $\overline{OC} = \frac{\phi_C}{2\pi f_0}$, 其中 ϕ_C 为 D 点对应的参考面上 C 点的相位, 所以

$$\cot \delta = \frac{\phi_C}{2\pi f_0 L}, \quad (20)$$

而由 $\triangle OI_1 G$ 可求出

$$\tan \theta = \frac{d \cos \alpha}{L + d \sin \alpha}, \quad \overline{I_1 O} \cos \theta = L + d \sin \alpha. \quad (21)$$

考虑到 $\overline{OA} = \frac{\phi_A}{2\pi f_0} = \frac{\phi_D}{2\pi f_0}$ (ϕ_D, ϕ_A 分别为三维表面 D 点相位以及对应的参考面上的 A 点相位)。而 $\overline{CA} = |\overline{OA} - \overline{OC}| = \left| \frac{\phi_{DC}}{2\pi f_0} \right|$, 在图 2 中考虑到 $\phi_{DC} < 0$, 故有

$$\overline{CA} = \frac{-\phi_{DC}}{2\pi f_0}. \quad (22)$$

将(17), (20)~(22)式代入(19)式中, 化简可得

$$\overline{BD} = -\frac{\phi_{DC} L (L + d \sin \alpha)}{2\pi f_0 d L \cos \alpha + L \phi_{DC} - d \phi_C \sin \alpha}, \quad (23)$$

式中 ϕ_{DC}, ϕ_C 分别是条纹中计算出来的, 并通过解截断算法得到的连续相位分布 $\Delta \phi(x, y)$, $\phi_0(x, y)$ 。(23)式可以看作是双瞳不等高但双轴共面时, 物面上任一点 D 的高度 \overline{BD} 的计算公式。

再将(2),(3)式代入(23)式,可得物面任一点 D 的高度 \overline{BD} 的解析式

$$\overline{BD} = -\frac{\phi_{DC}L(L + s \cdot \sin\alpha_1)}{2\pi f_0 Lr + L\phi_{DC} - \phi_C \cdot s \cdot \sin\alpha_1}, \quad (24)$$

该式即为成像系统的光轴与投影系统的光轴不共面,且双瞳连线于水平面成夹角 α_1 时的高度计算公式。作为验证,在传统的双轴共面,且双瞳连线平行于水平面的情况下, $\alpha_1 = 0$ 。此时 $r = d$, (24) 式化简为

$$\overline{BD} = -\frac{L\phi_{DC}}{2\pi f_0 d + \phi_{DC}}, \quad (25)$$

这就还原为传统傅里叶变换轮廓术的高度计算公式^[1]。由此可见传统的傅里叶变换轮廓术方法中其高度的测量只是现行方法中的一个特例。

由上面的理论可以得出,如果不考虑 CCD 的成像质量等问题,由于非平行不共面与共面情况相比,仅仅相当于图像在 CCD 上成像位置发生改变,所以两个光轴共面与否并不影响高度计算的结果,均可采用(24)式计算。值得注意的是,由于系统能正确恢复物体形貌的前提是 CCD 需获得正确的参考及变形物条纹,所以本文讨论的所有理论均只在保证能获得正确的条纹的条件下成立。

3 模拟实验

模拟实验光路如图 1 所示,定义 α_1 在平行线

$\overline{I_1 H}$ 上方为正,下方为负。模拟的半椭球物体的最大高度为 33.25 cm,如图 5 所示。光栅周期为 $T =$

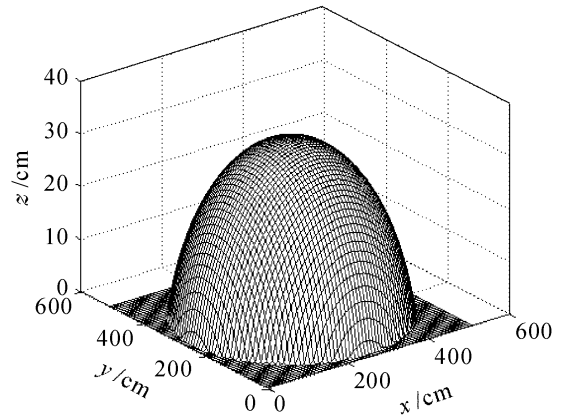


图 5 待测物体

Fig. 5 Object to be measured

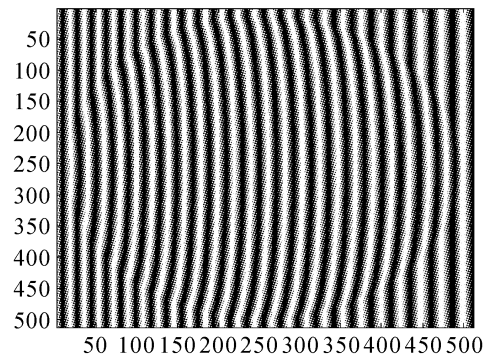


图 6 $\alpha = 0^\circ$ 时的变形条纹

Fig. 6 Deformed fringe distribution when $\alpha = 0^\circ$

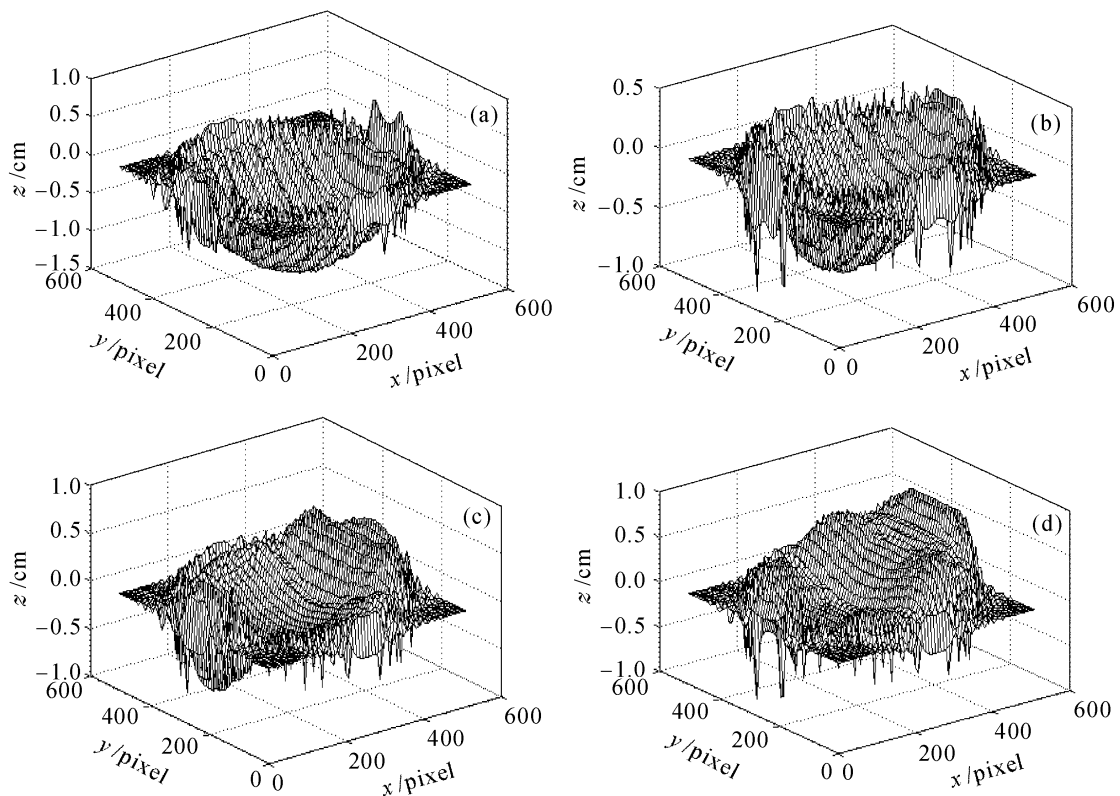


图 7 恢复出来的高度误差分布图

Fig. 7 Height error distribution of reconstruction ((a) $\alpha = 0^\circ$; (b) $\alpha = 10^\circ$; (c) $\alpha = 20^\circ$; (d) $\alpha = 30^\circ$)

16, 系统参数: $r = 800 \text{ cm}$, $s = 400 \text{ cm}$, $L = 2000 \text{ cm}$, 所得变形光栅像尺寸为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。分别对 α_1 取不同角度的情况进行计算机模拟。图 6 给出了 $\alpha_1 = 0^\circ$ 的变形条纹图。图 7 表示搭建的测量系统中, α_1 形成 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 时, 恢复出来的高度误差分布图。作为对比, 图 8 表示在 $\alpha_1 = 30^\circ$ 时, 用传统方法进行高度计算所得的高度误差分布图, 其均方差 (RMS) 为 2.7014, 最大高度为 28.53 cm。而图 7(d) 所示的采用新方法恢复的均方差仅为 0.3262, 最大高度为 33.31 cm。图 9 为 $\alpha_1 = -10^\circ$ 时的高度误差分布。表 1 给出了不同角度情况下的均方差及对应的最大高度值, 可以看出, 正角度时误差比相应的负角度要小, 且传统的平行且共面时所对应的零角度并不是能准确恢复物体形貌的最理想角度, 相关的误差理论分析尚需作进一步的系统研究。值得一提的是 90° 时仍能进行较好的高度恢复, 其实是由于本实验的 s 不变, 而 α_1 改变, 这就相当于投影仪不动, 而 CCD 在以投影仪为球心的球面上任意旋转, 当 CCD 旋转到投影仪的正上方时

就对应 $\alpha_1 = 90^\circ$ 的情况, 此时形成了一种不等高但共轴的测量方式。

表 1 不同角度测量的均方差分布及所对应的最大高度
Table 1 Mean square deviation and maximum height distribution corresponding to different α_1

$\alpha_1 / (^\circ)$	Mean square deviation	Maximum height /cm	$\alpha_1 / (^\circ)$	Mean square deviation	Maximum height /cm
-30	1.2138	35.73	40	0.4824	32.95
-20	0.9877	35.33	50	0.6359	32.60
-10	0.7491	34.86	60	0.7732	32.49
0	0.5245	34.47	70	0.8712	32.31
10	0.3124	34.01	80	0.9929	32.16
20	0.2312	33.67	90	0.9499	32.10
30	0.3262	33.31			

4 实验

本文进一步进行了实验验证。实测物体最高处为 $h = 32.5 \text{ mm}$, 所用光栅周期为 $T = 16$, 系统参数为: $r = 360.0 \text{ mm}$, $s = 280.0 \text{ mm}$, $\alpha_1 = 17^\circ$, $L = 950.0 \text{ mm}$ 。实验时, 从采集的图像中剪切出大小为

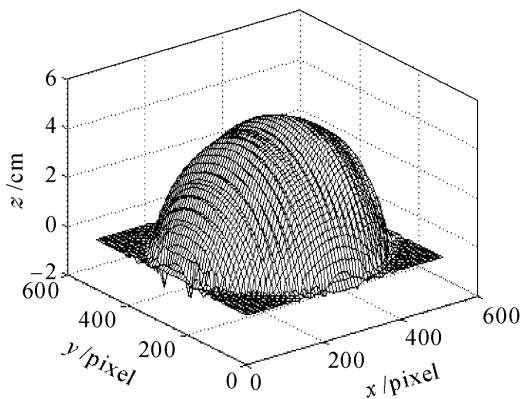


图 8 $\alpha = 30^\circ$ 时用传统算法所得的高度误差分布

Fig. 8 Height error distribution using traditional method when $\alpha = 30^\circ$

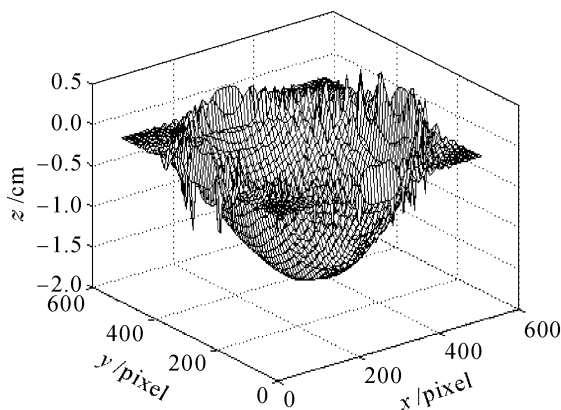


图 9 $\alpha_1 = -10^\circ$ 时恢复出来的高度误差分布

Fig. 9 Height error distribution of reconstruction when $\alpha = -10^\circ$

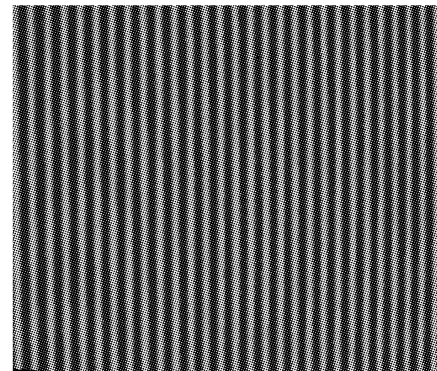


图 10 参考面条纹图

Fig. 10 Grating fringes of reference plane

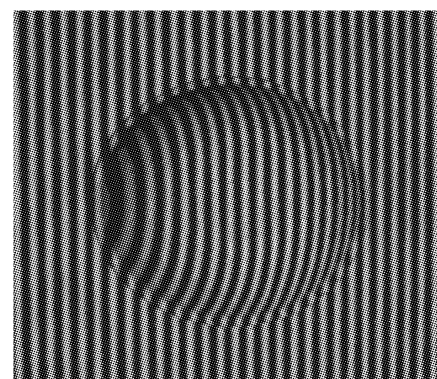


图 11 变形物面条纹图

Fig. 11 Grating fringes modulated by three-dimensional object

400 pixel \times 400 pixel的区域。图 10 和图 11 分别表示参考光栅和变形光栅图,用本文理论恢复的物体形貌如图 12 所示,其最大高度为33.1 mm,能较好地恢复物体的三维信息;但若采用传统的公式进行高度计算,则所得的物体形貌如图 13 所示,其最大高度为27.4 mm,与真实物体的高度差别已经过大,已不能正确地恢复物体的三维信息。

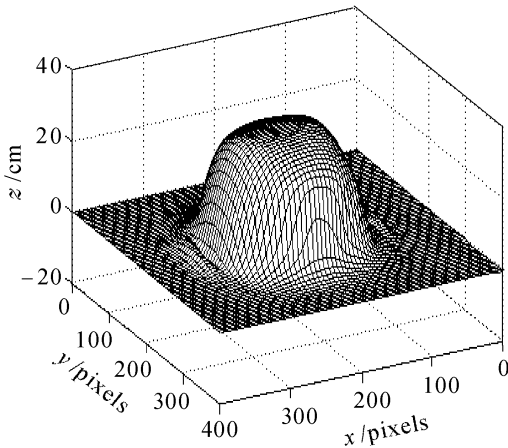


图 12 正确的高度恢复

Fig. 12 Correct height reconstruction

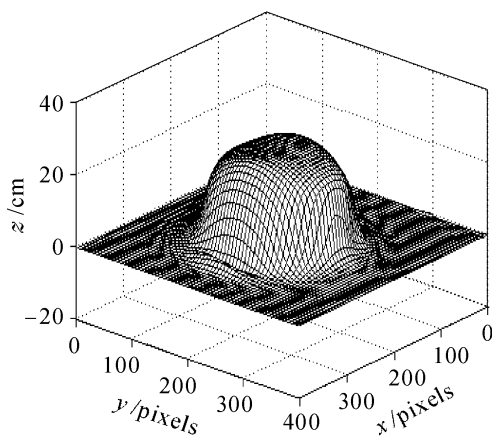


图 13 用传统的恢复方法所得高度分布

Fig. 13 Height reconstruction by the traditional method

5 结 论

提出的不共轴非平行时的相位计算及高度计算方法,使得传统傅里叶变换轮廓术测量不仅在测量理论上,还是在操作的方便上,均有较大的变化。它拓宽了传统傅里叶变换轮廓术测量法的适用范围,传统傅里叶变换轮廓术测量中的相位及高度计算公式成为本文在共面且平行时的特例。该方法不再要求双瞳连线与参考面平行,也不再要求双瞳出射线间共面,因而不必校正双瞳与参考面的平行,为在难以做到双瞳与参考面平行或双瞳难以共面的特殊环境测量提供了解决问题的一个途径;且由于光栅及

CCD 均可单独灵活地移动,因此更容易取得理想的全场变形条纹,搭建实验台也更加容易;通过本文的理论分析,可以得出一个新的结论即:如果不考虑 CCD 的成像质量等问题,两个光轴共面与否并不影响高度计算的结果。它为传统的傅里叶变换轮廓术方法提供了理论依据,即当采用传统的方式测量时,不必刻意校正是否光轴共面,而只需成像系统的入瞳与投影系统的出瞳等高即可。

参 考 文 献

- 1 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24):3977~3982
- 2 Jianfeng Lin, Xianyu Su. Two-dimensional Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes [J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(12):3297~3301
- 3 Fiona Berryman, Paul Pynsent, James Cubillo. A theoretical comparison of three fringe analysis methods for determining the three-dimensional shape of an object in the presence of noise [J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 2003, **39**(1):35~50
- 4 Chen Wenjing, Su Xianyu, Tan Songxin. Basis requirement for measurement system in FTP [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1999, **10**(6):535~539
陈文静,苏显渝,谭松新. Fourier 变换轮廓术中对测量系统的基本要求[J]. *光电子·激光*, 1999, **10**(6):535~539
- 5 J. Vanherzeele, P. Guillaume, S. Vanlanduit. Fourier fringe processing using a regressive Fourier-transform technique [J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 2005, **43**(6):645~658
- 6 W.-S. Zhou, X.-Y. Su. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry [J]. *J. Modern Optics*, 1994, **41**(1):89~94
- 7 Chen Wenjing, Su Xianyu, Su Likun *et al.*. Improvement for measuring accuracy of Fourier transform profilometry with gray image [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(3):55~59
陈文静,苏显渝,苏礼坤等. 利用灰度图提高 Fourier 变换轮廓术的测量精度[J]. *光电工程*, 2000, **27**(3):55~59
- 8 José J. Esteve-Taboada, Javier Garcia, Carlos Ferreira. Application of Fourier transform profilometry to the recognition of 3-D objects [C]. *SPIE*, 2003, **5227**:59~66
- 9 Giuseppe Schirripa Spagnolo, Giorgio Guattari, Carmine Sapia *et al.*. Contouring of artwork surface by fringe projection and FFT analysis [J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 2000, **33**:141~156
- 10 Chen Wenjing, Su Xianyu. A new method for improving measuring accuracy of Fourier transform profilometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(1):19~22
陈文静,苏显渝. 提高 Fourier 变换轮廓术测量精度的新方法[J]. *光电工程*, 2002, **29**(1):19~22
- 11 Li Wansong, Su Xianyu, Su Likun *et al.*. Simultaneous calibration algorithm of phase-shifting based on FFT [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10):1390~1395
李万松,苏显渝,苏礼坤等. 基于快速傅里叶变换的实时相移校正算法[J]. *光学学报*, 1999, **19**(10):1390~1395
- 12 Yang Hu, Chen Wenjin. Measuring sensitivity influenced by sampling in FTP [J]. *Laser Journal*, 1998, **19**(5):45~48
杨 虎,陈文静. 抽样对 FTP 测量精度的影响[J]. *激光杂志*, 1998, **19**(5):45~48