

用条纹图形拼接法测量三维大物体面形

陈明仪 吴德柱 程维明

(上海大学(嘉定)精密机械工程系, 上海 201800)

摘 要 三维物体面形的测量在各个领域中有着广泛的应用, 用莫尔法、调制光场分析法测量具有非接触性、高精度、快速的特点, 但对于大物体的测量却存在着许多困难, 诸如阴影噪声难以消除、条纹对比度低。考虑到图形的相关性, 本文提出了一种基于多孔径拼接原理的测量三维大物体面形的方法: 条纹图形拼接法, 给出了数学模型、计算机模拟结果和实验结果。

关键词 三维大物体面形测量, 条纹图形拼接法, 多孔径拼接原理。

1 引 言

三维物体表面轮廓测量在自动检测、机器人视觉、实物仿形、医学诊断、计算机辅助设计/计算机辅助制造等领域的应用越来越广泛。用光学的测量方法由于其非接触性、高灵敏度、高测量精度、高自动化而日益受到人们的重视和研究。其中莫尔法^[1]、基于光栅投影的调制光场分析法[包括傅里叶变换法(FTP)^[2]、位相映射法(PMP)^[3]、空间位相检测法(SPD)^[4]、线性相位滤波法^[5]]是比较有效的测量方法。

然而, 无论是莫尔法, 还是调制光场分析法, 都存在着一些难以克服的困难:

1) 测量物体时需要形成足够大范围的光栅条件以覆盖整个物体, 因此当物体较大时就要求或者采用较大的光栅投影, 或者调整投影设备或结构。

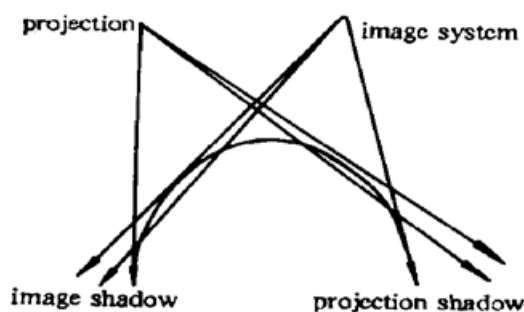


Fig. 1 Projection shadow or image shadow

2) 阴影噪声的存在, 致使无法测量物体的某一部分或者误差较大, 形成病态, 一般地, 阴影可分为投影阴影噪声和成像阴影噪声(如图 1)。目前, 通常的做法是人为剔除噪声^[6], 减小了测量范围、自动化程度降低; 或者用双摄影、双投影的方法^[3], 增加了系统的复杂性。

3) 测量倾斜度大或深度较大的面形困难。对于这类面形, 由于摄像系统的分辨率的限制和上述分析方法本身的局限性, 导致无法分辨出条纹, 这就意味着无法进行求解, 比如, 傅里叶变换分析法测量的要求是 $|\partial k(x, y)/\partial x| \leq 1/3d^{[2]}$ 。

4) 条纹对比度较低。

实际上，作者等人考虑图形的相关性，用孔径拼接的方法成功地解决了大平面的干涉测量问题^[7]，即：进行多次测量，每次仅测量大平面的一部分(称之为子孔径)，并使各部分稍有重叠(拼接区)，然后将多次测量的结果拼接起来，从而得到整个平面的面形。作者的初步研究证明^[8]：可以将此原理推广至莫尔法和调制光场分析法，用多幅条纹图形拼接法，从而克服上述缺点，进行大物体的面形测量。本文则作更深入的分析与讨论。

2 孔径拼接转换

为了方便，假定对子孔径的测量采用如图 2 所示的几何结构^[3]。用拼接法测量大物体时，先在某一位置测量出一部分(子孔径 1)，接着移动和/或转动测量系统，在另一位置又测量出一部分(子孔径 2)，并使两个孔径之间稍有重叠。对整个测量系统作大角度旋转是为了测量倾斜度大的物体和消除阴影噪声，这样可使其相对于参考面的倾斜度减小，如图 3 所示。

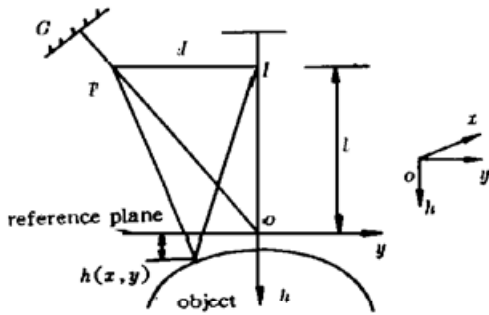


Fig. 2 Subaperture measurement system

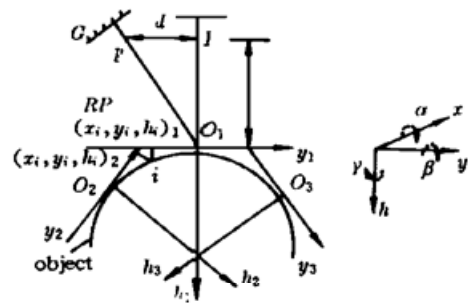


Fig. 3 System geometry for subaperture conversion

若建立图 3 所示的坐标系，并假定参考坐标系 1 相对于参考坐标系 2 理论上的平移量为 P_x 、 P_y 、 P_h ，绕 x 、 y 、 h 轴的旋转角为 α 、 β 、 γ (以逆时针为正)，则对于拼接区内的 i 点，有^[9]：

$$(x_{i1}, y_{i1}, h_{i1}, 1) = (x_{i2}, y_{i2}, h_{i2}, 1)T \tag{1}$$

式中：

$$T = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ P_x & P_y & P_h & 1 \end{pmatrix}$$

然而，在实际旋转和平移过程中， α 、 β 、 γ 、 P_x 、 P_y 、 P_h 都有可能由机构引入误差，即 T 应为 T' ：

$$T' = \begin{pmatrix} \cos \beta' \cos \gamma' & \cos \beta' \sin \gamma' & -\sin \beta' & 0 \\ \sin \alpha' \sin \beta' \cos \gamma' - \cos \alpha' \sin \gamma' & \sin \alpha' \sin \beta' \sin \gamma' + \cos \alpha' \cos \gamma' & \sin \alpha' \sin \beta' & 0 \\ \cos \alpha' \sin \beta' \cos \gamma' + \sin \alpha' \sin \gamma' & \cos \alpha' \sin \beta' \sin \gamma' - \sin \alpha' \cos \gamma' & \cos \alpha' \cos \beta' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ P'_x & P'_y & P'_h & 1 \end{bmatrix}$$

其中 $\alpha' = \alpha + \Delta\alpha$, $\beta' = \beta + \Delta\beta$, $\gamma' = \gamma + \Delta\gamma$, $P'_x = P_x + \Delta x$, $P'_y = P_y + \Delta y$, $P'_h = P_h + \Delta h$ 。而 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 、 Δx 、 Δy 、 Δh 分别表示 α 、 β 、 γ 、 P_x 、 P_y 、 P_h 引入的误差。

在实际测量中, 可令 $\gamma = 0$, $\Delta\gamma = 0$ (因为 γ 是绕 h 轴旋转)。而 Δx 、 Δy 很容易控制在小于 0.5 mm 的范围内, 在图像平面它们引起的变化很微小; 同时, 若 $h(x, y)$ 是光滑连续的曲面, 则对 Δx 、 Δy 更不敏感, 因此可以忽略不计, 再考虑到一般情况下, $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta \leq 0.5^\circ$ (这在测量中很容易做到), 则有 $\sin \Delta\alpha = \Delta\alpha$, $\sin \Delta\beta = \Delta\beta$, $\cos \Delta\alpha = 1$, $\cos \Delta\beta = 1$, $\sin^2 \Delta\alpha = 0$, $\sin^2 \Delta\beta = 0$, 并令 $\Delta A = P_h + \Delta h$, $\Delta B = -\Delta\beta$, $\Delta C = \Delta\alpha \cos \beta$, 并将后面二个矩阵相乘, 则 T' 为:

$$T' = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & \sin \alpha \cos \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\text{tg } \beta \Delta C & \Delta B & 0 \\ \text{tg } \beta \Delta C & 1 & \Delta C & 0 \\ -\Delta B & -\Delta C & 1 & 0 \\ P_x & P_y & \Delta A & 1 \end{bmatrix}$$

用 T' 代替(1) 式中的 T , 则拼接区内点 i 有下列关系:

$$(x_{i1}, y_{i1}, h_{i1}, 1) = (x_{i2}, y_{i2}, h_{i2}, 1) T' \quad (2)$$

由于 α 、 β 、 P_x 、 P_y 都是已知量, 只有 ΔA 、 ΔB 、 ΔC 是未知量, 因此理论上在拼接区选取三点, 利用(2) 式即可解出 ΔA 、 ΔB 、 ΔC 。然而在实际测量中, 由于采样数据会有误差, 所以一般取多于 3 个点, 用最小二乘法来求解非线性方程组, 得出最优解。

求出 ΔA 、 ΔB 、 ΔC 后, 再利用(2) 式可将参考坐标 2 上的所有点统一到参考坐标 1 上去 (或者将 1 统一到 2 上去), 从而消除了参考面之间的相对倾斜、位移等, 推广到多个子孔径上, 即可获得整个物体的面形。

3 计算机模拟

这里模拟了一个抛物柱面, 其理论面形表达式为 $h(x, y) = 0.015y^2 + 0.1$ 。子孔径采用文献[5] 所述的线性相位滤波法进行测量如图 2 所示, 其中 $l = 1500 \text{ mm}$, $d = 300 \text{ mm}$, 参考平面上的光栅条纹平均周期 $p = 5 \text{ mm}$ 。并假设参考平面上光强表达式 $g_r(x, y)$ 和物面上光强表达式 $g_o(x, y)$ 分别为:

$$g_r(x, y) = 50.0 + \sum_{n=1}^{10} 100 \frac{l}{\sqrt{x^2 + y^2 + l^2}} \text{sinc}(n/2) J_1(\pi n/2)/(\pi n/4) \times \cos[(2\pi n y/p) + n\phi_r(x, y)] \quad (3)$$

$$g_o(x, y) = 50.0 + \sum_{n=1}^{10} 100 \frac{l + h(x, y)}{\sqrt{x^2 + y^2 + l^2 + h^2(x, y)}} \text{sinc}(n/2) J_1(\pi n/2)/(\pi n/4) \times \cos[(2\pi n y/p) + n\phi_o(x, y)] \quad (4)$$

式中 $\phi_r(x, y)$ 、 $\phi_o(x, y)$ 表征为参考平面和物面上条纹的位相值。

总共模拟测量了六个子孔径, 各个子孔径的大小为 $50 \times 50 \text{ mm}^2$, 分布如图 4(a) 所示, 其中阴影线表示拼接区。采用了中心拼接模式, 即子孔径 2、3、4、5、6 直接向子孔径 1 进行拼

接(参数如表 1 所列)。拼接结果见表 1, 其中下标数值表示为模拟机构平移和转动引入的误差值, E_{max} 、 E_{min} 、 $P-V$ 、 rms 等值是与理论面形相比较求出的。从表中可以看出, 由图形拼接区可以以 10^{-2} mm 和 10^{-4} rad 的分辨率求解得出 ΔA 、 ΔB 、 ΔC 误差项, 从而使机构引入的误差可以得到很好的补偿, 求解出来的 ΔA 、 ΔB 、 ΔC 值与实际所加入的误差值基本吻合。

经计算机模拟表明, 虽经多次拼接(5 次), 由此产生的 $P-V$ 值小于 $p/15$, 均方根值小于 $p/60$, 此误差值均在用线性相位滤波法测量的误差值范围内。

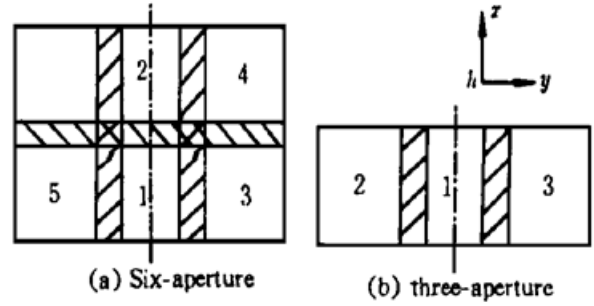


Fig. 4 Subaperture layout for connection

Table 1. Central connection

data given	aperture	β /rad	α /rad	P_h /mm	P_x /mm	P_y /mm
	1	0	0	0	0	0
	2	$0_{+0.0052}$	$0_{-0.0017}$	$0_{-0.3}$	35	0
	3	$0_{+0.0035}$	$0.698_{+0.0070}$	$10_{+0.2}$	0	28
	4	$0_{+0.0017}$	$0.698_{-0.0035}$	$10_{-0.3}$	35	28
	5	$0_{+0.0052}$	$-0.698_{-0.0035}$	$10_{+0.3}$	0	-28
	6	$0_{-0.0017}$	$-0.698_{+0.0035}$	$10_{+0.1}$	35	-28

data measured	aperture	$\Delta B(-D\beta)$	$\Delta C(\Delta\alpha)$	ΔA /mm	E_{max} /mm	E_{min} /mm	$P-V$ /mm	rms /mm
	1	/	/	/	0.120	-0.125	0.245	0.0580
	2	-0.0052	-0.0020	-0.300	0.131	-0.119	0.250	0.0588
	3	-0.034	0.0066	10.168	0.133	-0.130	0.263	0.0594
	4	-0.0019	-0.0033	9.679	0.129	-0.127	0.256	0.0586
	5	-0.0053	-0.0037	10.321	0.127	-0.121	0.248	0.0575
	6	0.0014	0.0037	10.125	0.136	-0.124	0.260	0.0591
	full	/	/	/	0.190	-0.187	0.377	0.0752

4 实验论证

按照图 3 所示几何光路图, 建立了条纹图形拼接法测量三维物体面形的实验系统(如图 5 所示)。其中由精密旋转平台带动物体(圆柱状饼干筒)作大角度的旋转, $l = 1078.54$ mm, $d = 289.07$ mm, 采用的朗奇光栅节距为 2 l/mm, 在参考平面上的光栅条纹平均周期 $p = 5.714$ mm, x 轴和 y 轴方向的抽样间隔分别为 1.172 mm/pix, 1.111 mm/pix。

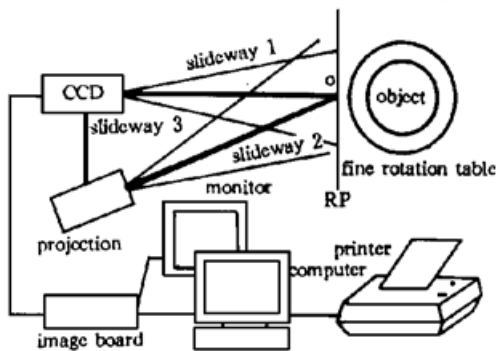


Fig. 5 Experimental system

按照图 4(b) 所示的三孔径拼接示意图进行了三个子孔径(大小约为 80×90 mm²) 的拼接, 拼接参数如表 2 所列, 图 6 为三个子孔径条纹图形照片, 图 7 则表示了三个截面上用传统接触法与条纹图形拼接法测量值的比较及物体的三维立体表示。

Table 2. Connection parameters

parameters	aperture	β/rad	α/rad	P_n/mm	P_x/mm	P_y/mm
	1	0	0	0	0	0
	2	0	-0.611	16.64	0	-52.769
	3	0	0.611	16.64	0	52.769

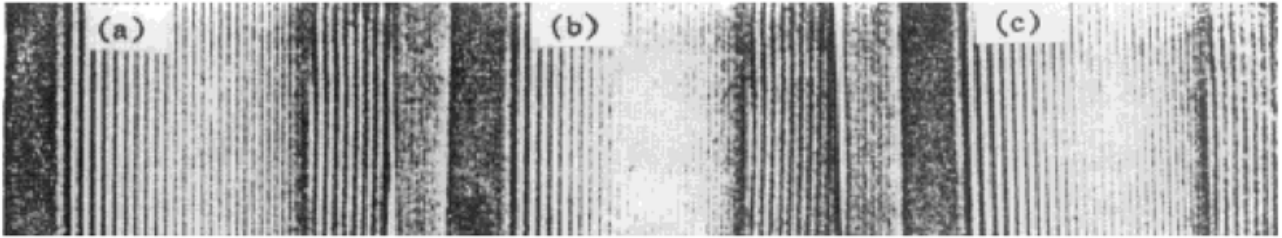


Fig. 6 Fringe patterns. (a) Subaperture 2, (b) Subaperture 1, (c) Subaperture 3

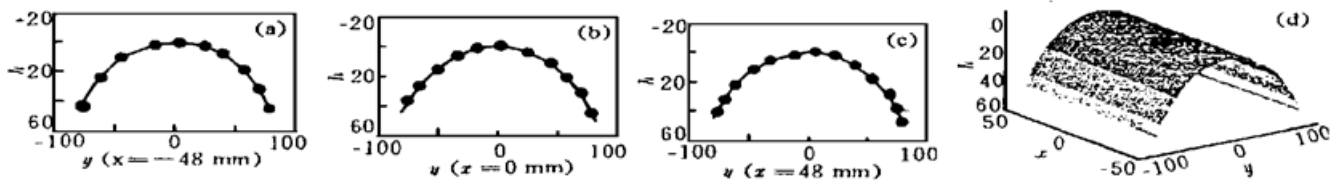


Fig. 7 (a), (b), (c) Comparison with contact measurement. “*” denotes measurements by contact method, “○” denotes measurement by fringe pattern connection method. (d) Reconstruction of object. (Unit: mm)

从图7可以看出,即使在边缘部分,用条纹图形拼接法测量物体也可以获得很好的结果,克服了傅里叶变换法等对测量面形要求起伏较小的缺陷,实际拼接测量的最大误差小于 $p/10$ 。

5 讨 论

利用拼接区可以灵敏而精确地求出两个子孔径间由机构产生的相对转动误差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 和轴向变动量 Δh 。所以,利用条纹图形拼接法:

- 1) 可以测量大物体。由于每次仅测量物体的一部分,故使用小光栅就可以测量大物体。
- 2) 可以消除阴影噪声。由于拼接法允许系统结构移动到物体的多个适当的位置,故可以消除阴影噪声。
- 3) 可以测量大倾斜度或深度较大的物体。只要将测量系统倾斜某一适当角度(绕x轴或y轴都可以),就可以使物体相对于参考面的倾斜度减小到分析方法允许的范围内,从而扩大了各种三维物体面形分析方法的适用范围。

4) 由于拼接法每次测量的仅是物体的一部分,因此可以获得较好的条纹对比度,有利于提高测量的精度。

同时,拼接法不涉及复杂的数据处理,很容易做到实时处理,自动化程度较高。

由于条纹图形拼接法通过面形拟合、采用最小二乘法来求解非线性方程组得出 ΔA 、 ΔB 、 ΔC 项。因此,对于一些复杂的面形,应采取分段拟合面形的方法,以提高拟合精度,从而提高求解的精度。还应适当地选择拼接模式、拼接区的大小,以进行最佳拼接,而且,将参考坐标系从直角坐标转换为极坐标,则可将条纹图形拼接法推广到 360° 物体面形的测量,如圆

柱、球体的测量。此已在研究之中。

作者衷心感谢戎天小姐在资料收集、程序调试等方面给予的热情帮助。

参 考 文 献

- [1] D. M. Meadows, Generation of surface contours by moire patterns. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(4) : 942~950
- [2] Mitsuo Takeda *et al.*, Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24) : 3977~ 3982
- [3] Maurice Halioua *et al.*, Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry. *Opt. & Laser. Eng.*, 1989, **11**(2) : 185~ 215
- [4] S. Toyooka *et al.*, Automatic profilometry of 3-D diffuse objects by spatial phase detection. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10) : 1630~ 1633
- [5] Shouhong Tang *et al.*, Fast profilometry for th automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(20) : 3012~ 3018
- [6] Maria Pirga *et al.*, Modified procedure for automatic surface topography. *Measurement*, 1994, **13**(1) : 191~ 197
- [7] Ming-Yi Chen *et al.*, Multi-aperture overlap-scanning technique for large aperture test. *Proc. SPIE*, 1991, **1553** : 626~ 635
- [8] Ming-Yi Chen *et al.*, Multi-aperture overlap-scanning technique for moire metrology. *Proc. SPIE*, 1996, **2861** : 107~ 114
- [9] 程维明等, 用齐次坐标实现子孔径变换和拼接. 上海科技大学学报, 1993, **16**(2) : 363~ 368

Fringe-Pattern Connection Method for Shape Measurement of 3-D Large Objects

Chen Mingyi Wu Dezhu Cheng Weiming

(Department of Fine Mechanical Engineering, Shanghai University (Jiading), Shanghai 201800)

(Received 21 July 1996; revised 4 February 1997)

Abstract The techniques for shape measurement of 3-D object have widely been applied. Both moire topography and modified lighting technique have many advantages such as non-contact, high accuracy and high speed. But they inevitably meet with some difficulties, such as shadow noise and low contrast for measuring large object. Considering the correlation between two patterns sampled from the same object, a frigne-pattern connection method based on MAOST is proposed which can be effectively used to measure 3-D shape of large objects without all difficulties happened in conventional techniques. Mathematical mode, computer simulation and experimental results are presented.

Key words 3-D shape measurement, fringe-pattern connection technique, MAOST.