

三维形貌测量的扫描相移法研究

徐建强^{1,2} 王蕴栅² 司书春² 高成勇² 云大真¹

(1 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116023)

(2 山东大学 物理与微电子学院, 山东 济南 250061)

摘要 物体三维形貌测量中常用的光切法的主要优点是易于实现扫描测量大型物体表面, 缺点是光刀中心位置难以精确确定; 相移法的主要优点是可以利用较宽的光栅提高测量的灵敏度与准确度, 具有测量速度快和较好的抗静态噪声的能力, 缺点是当待测范围较大时, 采集图像的像差较大, 不利于大型物面的测量. 将这两种方法有机地结合起来, 取长补短, 提出了一种扫描相移法. 实验结果表明, 这个方法不但适用于长形大物面的形貌检测, 而且又大大地减少了图像采集系统畸变误差的影响, 从而提高了检测准确度.

关键词 三维形貌测量; 扫描相移法; 相移法; 光切法

中图分类号 O439; TN911.73

文献标识码 A

0 引言

物体表面三维形貌的测量技术在医学诊断、工程设计、自动测量、机器视觉、逆向工程、CAD/CAM、MEMS 等许多领域得到越来越广泛的应用, 尤其是光学三维形貌测量方法因具有非接触、高准确度、速度快等特点而倍受青睐. 目前比较常用的方法是投影栅线法, 其中光切法^[1-5]、相移法^[6-9]、傅里叶变换法^[10-14]等仍是人们研究的热点. 其中光切法能使待测物面相对于测量探头只需一维移动就可以完成二维扫描, 因此, 它的测量系统结构比较简单且便于控制. 更重要的是, 它具有易于实现扫描测量大型物面等优点而获得广泛应用. 但这个方法的抗噪声干扰能力较差, 致使光刀中心位置难以精确确定, 从而影响了测量的分辨率和准确度. 相对地, 相移法可以用较宽的光栅来提高测量的灵敏度和准确度, 而且还有计算量少以及比较成熟、可靠和测量速度较快等优点, 这些弥补了光切法的不足. 但当测量范围较大时, 采集的图像的像差将增大, 对结果产生不利的影响, 所以不宜于大型物面的测量, 这一缺点恰恰可由光切法来补偿. 本文对比了光切法与相移法上述的优缺点, 并将他们结合起来, 提出了适用于检测长(大)型物面形貌的准确度好、速度快的扫描相移法. 实验表明, 这个方法是有效可行的.

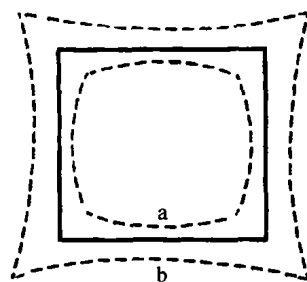
1 扫描相移法的原理

光切法利用激光三角测距原理来检测曲面轮廓, 采用线光源照明待测表面、面阵 CCD 摄像机(或数码相机)接收被调制的变形线, 通过确定光线中心的位

置得到被测表面上一条直线上的高度变化值, 然后通过扫描的方式得到整个表面的三维面形数据.

相移法是一种先进的提高测量灵敏度、准确度和测量自动化程度的方法, 它分为定步长相移算法和等步长相移算法. 定步长相移法要求每步的相移量不但相等, 而且必须要等于规定大小. 因此, 对相移器的相移控制准确度要求非常严格. 等步长算法只需每次相移步长相等, 相移器容易实现. 相移法的处理过程为: 利用相移器控制投射到被测表面的光栅的相位, 使每次移动相位 Δ , 并依次拍摄具有不同相位的变形栅线图, 然后利用一定的算法求出整场的表面形貌. 常用的等步长相移法算法有 Hariharan, Stoilov 和 Carré 等算法.

在实际采集图像时, 由于摄像机镜头是非理想的光学系统, 被测物点在摄像机像面上实际成像位置与理想成像位置之间会存在偏差(畸变)^[15], 主要有径向畸变(图1)、偏心畸变和薄透镜畸变. 由图1可知摄像机采集的图像四个边缘处畸变较大, 两个垂直轴向上畸变较小, 中心最小. 因此, 测量时使被测表面成像在像面中心位置的畸变误差最小, 但其测量范围较小, 效率较低. 本文所研究的扫描相移



a) Cylinder distortion b) Pincushion distortion
图1 CCD 摄像机的径向畸变

Fig. 1 Radial distortion of CCD vidicon

法, 只使用图像的中心轴附近部分, 采用相移法计算得到此窄条的表面形貌, 再用扫描方式测量整个被

测表面,既保留了相移法原有特点,又避免了边缘畸变误差.

假定待测表面的大小为 $N \times M$,取采集到的像面中心处 $N \times L$ 大小的图像作为相移法计算所用的图像. 设控制每步图像移动量为一个像素,相移值为 Δ ,则 $N \times M$ 大小的表面共需采集 M 个图像的图像序列,记为 $A_i, i=1, 2, \dots, M$. 第 i 个图像的中心列对应 $N \times M$ 大小的待测表面的第 i 列. 取图像序列中第 i 个图像起的连续的 n 个图像,根据扫描时每步的移动量调整图像列位置,得到对应待测表面相同位置的 n 个 $N \times L$ 大小的图像,应用 n 步相移法可计算出待测表面中 $N \times L$ 大小区域的表面形貌. 然后以下一列为起始位置,重复上面的操作,得到与前一次相距一个步进位置的区域表面形貌,重复操作至待测表面的另一端. 将每一次得到的区域形貌对应取平均,得到整个待测表面 ($N \times M$ 大小)的形貌.

将投影及图像采集 CCD 固定在一起组成测量探头,在被测表面上扫描,每移动一步(像面上移动 D 个像素)采集一个图像,共采集 K 个大小 $N \times M$ 的图像 B ,分别取其中心 $N \times L$ 部分,得 $N \times L \times K$ 的图像序列 A .

为有较好的适应性,采用任意步距的等步长算法,以五步的 Stoilov 算法为例,设相邻的五幅图像分别为 $A_i, A_{i+1}, A_{i+2}, A_{i+3}, A_{i+4} (i=1 \sim K-4)$. 由于测量时是被测物体相对摄像机移动,因此 $A_i, A_{i+1} \dots$ 不能是 B 序列中相同位置的子图像. 设 A_i 是 B 中以 (j, k) 为起点的 $N \times L$ 大小的子图像,即

$$A_i = B(j \rightarrow i + L - 1, k \rightarrow k + N - 1)$$

同理有

$$A_{i+1} = B(j - D \rightarrow i + L - 1 - D, k \rightarrow k + N - 1)$$

$$A_{i+2} = B(j - 2D \rightarrow i + L - 1 - 2D, k \rightarrow k + N - 1)$$

$$A_{i+3} = B(j - 3D \rightarrow i + L - 1 - 3D, k \rightarrow k + N - 1)$$

$$A_{i+4} = B(j - 4D \rightarrow i + L - 1 - 4D, k \rightarrow k + N - 1)$$

则由 Stoilov 算法得到 A_i 区域 $N \times L$ 大小的表面的相位为^[6]

$$\varphi_i(x, y) = \arctan \left\{ \frac{2(A_{i+1} - A_{i+3})}{2A_{i+2} - A_i - A_{i+4}} \right\}$$

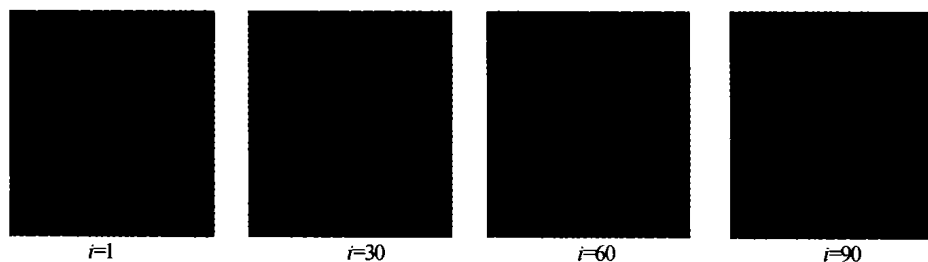


图3 变形栅线图序列(部分)
Fig.3 Portion of image deformable grating sequence

$$\sqrt{1 - \left[\frac{A_i - A_{i+4}}{2(A_{i+1} - A_{i+3})} \right]^2} \quad (1)$$

式中, $y=1 \sim N, x=1 \sim L, i=1 \sim K-4$. 即 φ_i 的大小为 $N \times L$, 共有 $K-4$ 个. 则有

$$\Phi_i = \begin{Bmatrix} 000 & & 000 \\ 000 & \varphi_i & 000 \\ 000 & & 000 \end{Bmatrix} \quad (N \text{ 行}) \quad (2)$$

(i-1) × D L 列 (k-i-4) × D 列

Φ_i 的大小为 $N \times H$, 其中 $H = L + (K-5) \times D$, 其中只有 L 列有相位数据,其它列为 0. 对 $\Phi_i (i=1, 2, \dots, M)$ 求平均可得整个待测表面的相位为

$$\Phi = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^M \Phi_i \quad (3)$$

式中, G 是与 D, K, L 有关的常数矩阵,大小为 $N \times H$. G 中各元素的值取为 $\Sigma \Phi_i$ 中此位置中非零元素的个数.

2 实验处理结果

图 2 是扫描相移法系统原理示意图. 实际测试系统的组成:液晶投影仪、数码相机、移动导轨. 利用投影仪向待测物体表面投射周期为 4 毫米的正弦栅线,由移动导轨带动待测物体每移动 1 mm 采一幅变形栅图像,每 4 步移动一个栅线周期,得一图像系列 $A_i (i=1, 2, \dots, 90)$ 共 90 幅图像,截取图像中心相同位置和大小部分,用扫描相移法进行处理. 相邻图像中待测物体的移动值为 3 个像素. 作为对比,通过软件利用液晶投影仪实现相移,采集 4 步相移法所需的 5 幅图像 $B_i (i=1, 2, \dots, 5)$. 图 3 显示了图像序列 A 中的 4 幅 (i 分别取 1, 30, 60, 90).

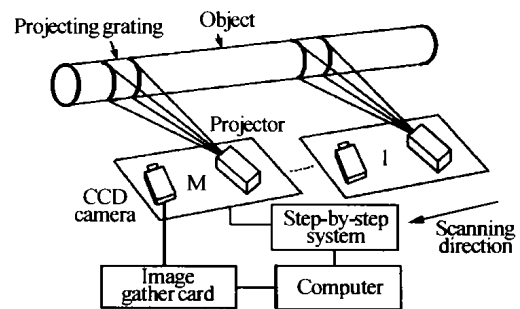


图2 扫描相移法原理
Fig.2 Principle of scan-phase shifting method

用前述的扫描相移法算法对以上变形栅线图序
列 A 进行计算,得到待测物体表面形貌的测量值,
如图 4(a)所示. 用等步长相移算法对图像序列 B
进行计算,得同一待测物体表面形貌的测量值,如图
4(b)所示.

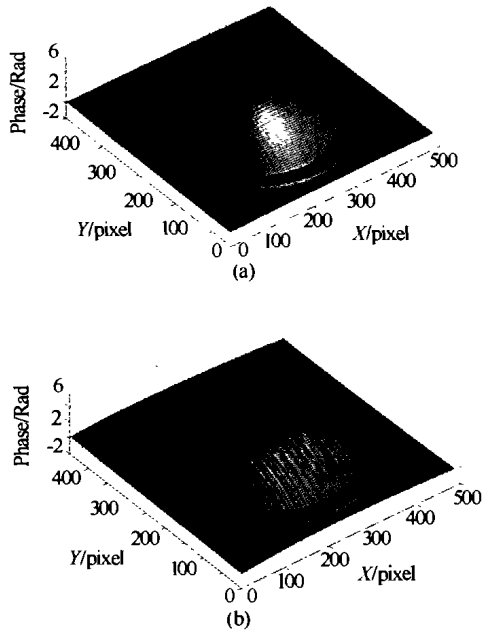


图 4 (a)扫描相移法计算结果,(b)相移法计算结果
Fig. 4 (a)The result get by scan-phase-shifting method
(b)Phase shifting method

图 5 是被测表面同一位置截面两种方法所得结
果的比较,从图中可看到用整幅图像算得的结果有
明显的上凸弯曲,这是图像的径向畸变造成的,而用
扫描相移法计算的结果则平直的多. 从扫描相移法
计算的结果图 4、图 5 可看出,由本新方法得到的
结果相当好.

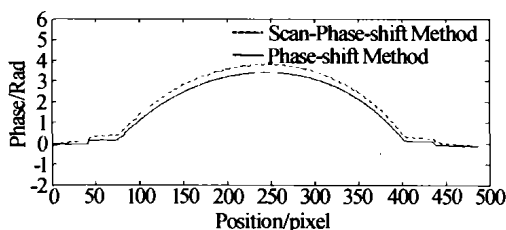


图 5 扫描相移法与相移法计算结果比较
Fig. 5 Compare scan-phase-shifting method with
phase shifting method

3 结论与讨论

扫描相移法很好地把光切法和传统相移法的优
点结合起来,并很好地解决了实际图像采集光学系
统四个角附近畸变大,造成大物体表面形貌测量误
差增大的问题. 另外,投影栅线法测量表面形貌的
横向分辨率受摄像机(或数码相机)分辨率的限制,
测量范围和横向分辨率是成反比关系的,即增大测
量范围必然会降低分辨率. 利用扫描相移法可以通

过近距离采集图像(或利用望远系统或显微系统)
提高分辨率,而通过扫描提高测量范围. 关键是扫
描步距应恰好使图像中的移动量等于整数像素,切
栅线周期要与扫描步距相适应,以符合相移法的要
求.

对于相移法中的各种定步长和等步长算法,都
适用于扫描相移法. 在实际的测量中,并不需要将
全部变形栅像采集完,而只需在同一时刻保留所用
算法所需要的图像个数即可. 另外,每扫描一步所
计算的相位 Φ_i 也没有必要取为 $N \times M$ 大小,仍可只
取为 $N \times L$,求整体表面相位平均值时只要将各步得
到的相位 φ_i 错位相加后除以 G 就可以了.

参考文献

- 1 王晓林,陈伟民,黄尚廉. 光切法三维轮廓测量的原理及
其应用. 光学技术,1997,3(2):39~43
Wang X L, Chen W M, Huang S L. *Optical Technology*,
1997,3(2):39~43
- 2 吴剑波,崔振,赵宏,等. 光刀中心自适应阈值提取法. 工
具技术,2000,34(10):27~29
Wu J B, Cui Z, Zhao H, et al. *Tool Technology*, 2000, 34
(10): 27~29
- 3 Kai W, Schafer D R. An approach to computer-aided quality
control based on 3D coordinate metrology. *Journal of
Materials Processing Technology*, 2000, 107(1-3):96~110
- 4 李兵, 罗意平,王昭,等. 多光刀三维轮廓快速测量方法
研究. 光子学报,2002,32(6):738~741
Li B, Luo Y P, Wang Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,
32(6):738~741
- 5 Li Mingming, Zhao Hong, Wang Zhao, et al. High speed
three-dimensional scanning system. *Acta Photonica Sinica*,
2002,31(5):611~615
- 6 Stoilov G, Dragostinov T. Phase stepping Interferometry:
Five frame Algorithm with an Arbitrary Step. *Opt & Lasers in
Eng*, 1997, 28(1):619
- 7 钱克矛,伍小平. 相移技术中五步等步长 Stoilov 算法的
性能分析. 光学技术,2001,27(1):13~16
Qian K M, Wu X P. *Optical Technology*, 2001, 27(1):13~
16
- 8 Tay C J, Quan C, Shang H M. Shape identification using
phase shifting interferometry and liquid-crystal phase
modulator. *Optics & Laser Technology*, 1998, 30(8):545~
550
- 9 范华,田丰,谭玉山. 单模光纤相移三维轮廓测量术. 中
国激光,1998,25(2):135~138
Fan H, Tian F, Tan Y S. *Chinese Journal of Lasers*, 1998,
25(2):135~138
- 10 Takeda M, Ina H, Koboyashi S. Fourier-transform method of
fringe-pattern analysis for computer-based topography and
interferometry. *J Opt Soc Am*, 1982, 72(1):156~160

- 11 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl Opt*, 1983, **22**(24): 2977 ~ 3982
- 12 Zhou X, Su X Y. Effect of the modulation transfer function of a digital image-acquisition device on phase-measuring profilometry. *Appl Opt*, 1994, **33**(35): 8210 ~ 8215
- 13 徐建强, 王蕴珊. 大曲率表面物体形貌的光学检测方法研究. *光电子·激光*, 1998, **9**(4): 322 ~ 325
Xu J Q, Wang Y S. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1998, **9**(4): 322 ~ 325
- 14 徐建强, 王蕴珊. 三维形貌检测的自动参考栅像法研究. *光子学报*, 1998, **26**(6): 553 ~ 557
Xu J Q, Wang Y S. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **26**(6): 553 ~ 557
- 15 孙长库, 叶声华. *激光测量技术*. 北京: 天津大学出版社, 2001. 129 ~ 140
Sun C L, Ye S H. *Laser Measurement Technology*. Tianjin: Tianjin University Press, 2002. 129 ~ 140

Study on Scan-phase-shifting Profilometry for Measurement of 3-D Object Shapes

Xu Jianqian^{1,2}, Wang Yunshan², Si Shuchun², Gao Chengyong², Yun Dazhen¹

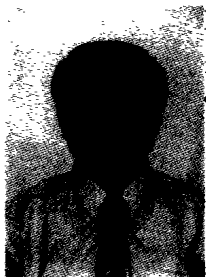
¹ Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023

² College of Physics and Microelectronics, Shandong University, Jinan 250061

Received date: 2003-09-16

Abstract In 3-D object shapes measurement, the strong suit of light-Sectioning method (LSM) in common used is easy to accomplish the scan measure of large scale object surface. The shortcoming of LSM is the light-knife center was difficult to be confirmed exactitude. The principal strongpoint of phase-shifting method is enhanced the measure sensitivity and precision with wider grating, phase-shifting method has the capabilities of rapidness measure speed and finer resist static state noise. The disadvantage of the method is having biggish aberration when measured the big area, so it is unfit for measurement the large-scale surface. A novel method is proposed to measure 3-D object shapes based on scan phase-shifting method by combined the strongpoint of above tow methods. The experiment results indicate that the new method can measure the surface shape of large object, and the influence of aberration error caused by image gather system can be decreased greatly, the measurement precision can be enhanced accordingly.

Keywords 3-D object shapes; Scan-phase-shifting method; Phase-shifting method; Light-sectioning method (LSM)



Xu Jianqian was born in 1962, in Shandong Province, China. He received the B. S. degree from Shandong University in 1984, and received M. S. degree from Shandong University of Technology in 1998. He is a professor of Shandong University now, and he is a Ph. D. candidate in Dalian University of Technology. His research interests include optical measurement and other measure technique.