

图像测量技术的新应用

吴晓波

(后勤工程学院自动化系 重庆 400041)

杨永琴

(重庆交通学院计算机及信息工程系 重庆 400074)

摘要 图像测量技术是近年来在测量领域中形成的新的测量技术。它广泛应用于三维物体的几何尺寸、形状、变形等的测量,精密复杂零件的微尺寸测量和外观检测,工业监测及航空遥感测量等技术领域中。本文将综述该技术的现状及进展。

关键词 图像测量 三维物体

1 引言

物体表面轮廓的三维测量是现代测试技术的一个重要分支,随着现代科学技术的发展,人们对物体轮廓面三维测量提出了越来越高的要求。二十多年来,随着激光技术、精密计量光栅制造技术、计算机技术以及图像处理等高新技术的发展,使得三维测量技术迅速发展,并在人体测量及医学诊断^[1-3]、生产过程监测及质量控制^[4-6]、交通监视及航空管理^[7-8]、运动分析^[9-10]、三维物体测量及三维重构^[11-14]、以及复合材料变形研究^[15-16]等方面得到初步应用。

图像测量技术是以现代光学为基础,融光电子学、计算机图像学、信息处理、计算机视觉等科学技术为一体的现代测量技术。物体表面轮廓的三维尺寸和形状的图像测量(简称三维图像测量)是其在计量中的新的应用。所谓图像测量就是测量被测对象时,把图像当作检测和传递信息的手段或载体加以利用的测量方法,其目的是从图像中提取有用的信号。对三维图像测量的研究,日本、德国、美国、加拿大等发达国家开始得较早,大至在六十年代后期开始,且提出了许多新的测量原理和方法^[17-22];我国在这方面的研究开展得较晚,公开发表的文章见文献[23~25]。三维图像测量方法主要有光学图样法(干涉法、莫尔法、相位法等)和基于图像传感器的光电法。相比之下,光电法具有环境适应性好、柔性好、测量范围宽、图像信息易于管理等特点。然而,目前对光电法的理论和方法研究仍然处于低精度的水平。国内外学者提出了一些改进

的方法,如动态多周期采样平均法和解调法等,但都未能取得突破性进展。三维图像测量主要有以下方法:

2 干涉测量法^[26-28]

它是利用光波的干涉原理对物体形状进行测量的。特别是激光问世以来,干涉测量法得到迅速发展,涌现出了双光束干涉、多光束干涉、外差干涉、全息等多种方法。干涉测量法的特点是测量精度高,达到 nm 级,但测量尺寸范围小,对环境要求很苛刻。

3 莫尔等高线法^[18]

自 Meadows 等1970年提出莫尔轮廓法以来,在此基础上提出了影像(Shadow)莫尔法^[19,20],投影(Projection)莫尔法^[19,29,30],扫描(Scanniny)莫尔法^[20],及这些方法的改进方法^[31-33]。使莫尔等高线三维计量技术不同程度地达到实用化程度。

影像莫尔法:原理如图1,光源照射到置于被测物体上的主光栅,其影像投在物体上,物体上 E 点与光栅上 C 点的高度差 W 为:

$$W = N \times P / \tan(\alpha) + \tan(\beta) \quad (1)$$

式中, N 为莫尔条纹的阶,如 AD 包含 m 条宽度为 p 的线对, AB 包含 n 条,则 $N = m - n$ 。影像莫尔法特点是原理简单、精度较高,但由于制造面积较大的光栅很困难,所以该方法适用于小物体的测量。

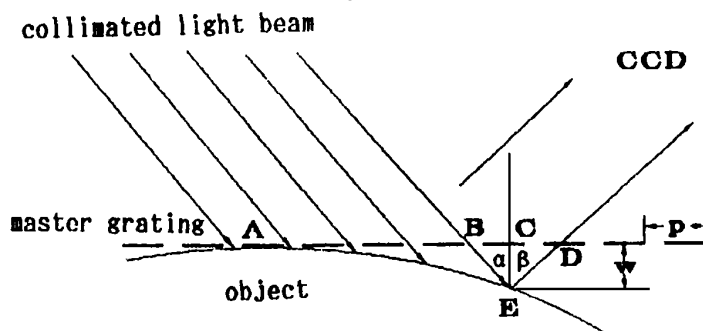


Fig 1 Shadow Moiré set-up

投影莫尔法:是将光栅影像投射到被测物体上,然后在观察侧用第二个光栅观察物体表面的变形光栅像。这样就得到莫尔条纹。分析莫尔条纹便可得到物体高度信息。该法的特点是适合于测量较大的物体。

扫描莫尔法:其投影侧与投影莫尔法相同,但在观察侧不用第二个光栅来形成莫尔条纹,而是用电子扫描光栅和变形像迭加生成莫尔等高线。它的优点是利用现代电子技术,可以很方便地改变扫描光栅栅距、位相等。生成不同位相的莫尔等高线条纹图像,便于实现计算机自动处理。但缺点是需要扫描机构,数据获取速度低、稳定性较差、对噪声敏感^[34]。

4 傅立叶变换轮廓法 FTP^[21,35-38]

该法是对投射到物体表面的光栅图形在其空间频域和空间信号域内进行傅立叶变换和处理。该技术具有比传统莫尔技术更高的灵敏度,并全自动区分物体表面的起伏变化,对条纹阶次和内插数的设置没有要求,该技术没有由光栅图形的高次谐波成分产生的假的莫尔条纹所

引起的误差。FTP 法的原理分析如下:

设投影侧光学系统和成像侧光学系统的光路如图2。轴相交在参考平面 R 和 O 点, 参考平面是一假设的垂直于 E_cEc 的平面, 用作测量物体高度 $h(x, y)$ 的参考。 G 为栅平面, S 为接收平面, 其它说明如图2。

物体上变形光栅图像为:

$$g(x, y) = r(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp \{ j [2\pi n f_0 x + n \Phi(x, y)] \} \quad (2)$$

式中: $r(x, y)$ 是物体表面的反射系数。

$$f_0 = 1/P_0 = \cos \theta / P \quad (3)$$

是光栅图的基频。相位:

$$\Phi(x, y) = 2\pi f_0 BD \quad (4)$$

式(2)为变形光栅图像空间相位调制信号。可解释为具有相位 $\Phi(x, y)$ 和幅度 $r(x, y)$, 空间载频 nf_0 调制的复合信号。由于相位载有测量物体的三维形状信息, 所以现在的任务是从变形光栅图像中提出 $\Phi(x, y)$ 。采用 FFT 算法经推导^[21]得:

$$\log [g(x, y) g_0(x, y)] = \log [|A_1|^2 r(x, y)] + i \Delta \Phi(x, y) \quad (5)$$

物体高度:

$$h(x, y) = l_0 \Delta \Phi(x, y) / [\Delta \Phi(x, y) - 2\pi f_0 d] \quad (6)$$

式中: $\Delta \Phi(x, y)$ 为相位分布信息, 可从式(5)虚部得到。

$$\Delta \Phi(x, y) = 2\pi f_0 \overline{CD} \quad (7)$$

$$\hat{g}(x, y) = A_1 r(x, y) \exp \{ j [2\pi f_0 x + \Phi(x, y)] \} \quad (8)$$

$$g_0(x, y) = A_1 \exp \{ j [2\pi f_0 x + \Phi_0(x)] \} \quad (9)$$

$\Phi_0(x)$ 为 $h(x, y) = 0$ 时的初相调制信号。FTP 法的不足之处为测量斜度大的物体需要非常高的分辨率的图像设备和大运算能力的计算机^[34], 其测量范围:

$$| \partial h(x, y) / \partial x |_{\max} < 1/3 (l_0/d) \quad (10)$$

5 相位测量法^[22, 49, 40]

投影在物体上的光栅, 根据物体的高度化而产生变形, 这个变形的光栅图像叫做2D 的条纹图。它包含了物体的三维信息。变形光栅的光强一般形式为:

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) \{ 1 + m(x, y) \cos [\Phi(x, y) + \Phi_0] \} \quad (11)$$

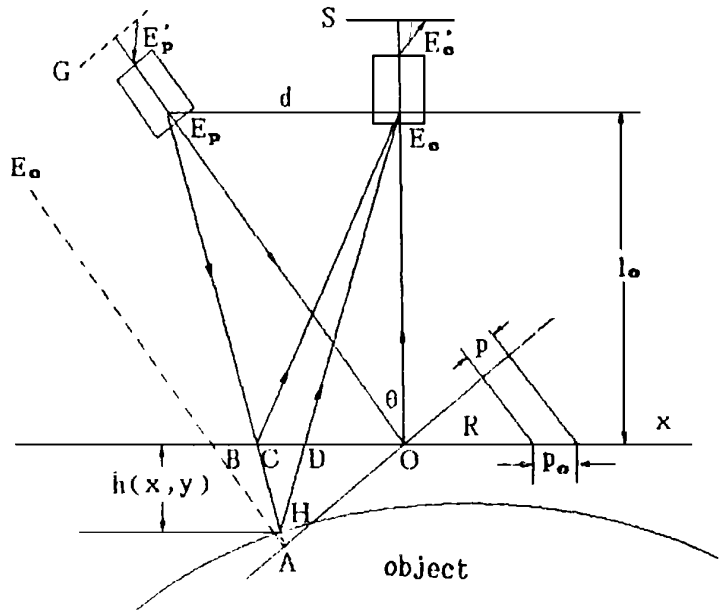


Fig 2 Crossed-optical-axes geometry

式中, $I_i(x, y)$ 为物体 (x, y) 点上的光强, $I_o(x, y)$ 为背景光强, $m(x, y)$ 为系统对比度, Φ_i 为相移量 ($i = 1, 2, 3$), $\Phi(x, y)$ 为相位, 它是物体形状 $h(x, y)$ 的函数, 是需要求出的物理量。采用三相算法, 即将 Φ_i 分别取 $\Phi_1 = 0, \Phi_2 = 2\pi/3, \Phi_3 = 4\pi/3$ 代入式(11), 然后解方程得:

$$\Phi(x, y) = \arctan[\sqrt{3}(I_3 - I_2)/(2I_1 - I_2 - I_3)] \quad (12)$$

由于采用多帧图像, 相移法的特点是精度高, 可达到条纹周期的 $1/1000$ ^[34], 另外由于该法只需计算三个强度值和反 \tan 函数, 所以处理简单。缺点是不能消除条纹图中高频噪声引起的误差。

6 新的非接触测量法^[41]

这种方法比较新颖, 源于1993年日本杂志《机械的研究》第45卷第4号上, “新的非接触测定法及其应用”一文。其原理是被测物放在工作转台上, 经 CCD 成像实现物体三维形状的非接触测量, 该方法属于光电法。此项技术主要应用在产品的品质管理上, 通过对各类零件的分类存档, 用以改进设计, 提高产品质量等。缺点是测量精度较低, 约为 $\pm 0.1\text{mm}$, 且被测物的形状也较简单, 如长方体、圆柱体等的测量。

7 亚像元轮廓图像测量法^[42, 45]

该方法属于光电法。这种方法是在对被测物体图像的形成、获取的过程和图像传感器的内在物理特性等的综合研究基础上提出的。应用具有保持边缘特征和滤波功能, 且能适应非均匀照明的十字窗图像边缘自动检测算法, 使图像边缘精确地定位在一个像素上。为满足图像测量的需要和提高测量分辨率, 应用以多项式插值函数为原理的亚像元检测算法, 使 CCD 摄像机的分辨率提高了约60倍。图像边缘点亚像元坐标 (X_E, Y_E) 由下式给出:

$$X_E = X_i + \frac{R(i-1, j) - R(i+1, j)}{R(i-1, j) - 2R(i, j) + R(i+1, j)} \times \frac{W}{2} \quad (13)$$

$$Y_E = Y_j + \frac{R(i, j-1) - R(i, j+1)}{R(i, j-1) - 2R(i, j) + R(i, j+1)} \times \frac{H}{2} \quad (14)$$

式中, X_i, X_j 为十字窗图像边缘自动检测算法找到的边缘点, $R(i, j)$ 为原始图像 $f(i, j)$ 的梯度图像, W 和 H 分别为 CCD 摄像机像元的宽度和高度。

该方法具有适应范围广、测量速度快、测量精度较高等特点。对被测工件尺寸在 $\Phi 150 \sim \Phi 200\text{mm}$ 之内的异形外表面轮廓的测量分辨率可达到 $\pm 0.01\text{mm}$, 即 $1/10000$ 。

8 结 论

以上是国内外对物体进行三维测量时所采用的常用原理和方法。这些方法各有优缺点, 且有一定的适用范围, 在应用时应充分分析被测物体的特点及测量的要求来选择测量方法。有时还需要作一些改进才能满足特殊要求的测量。如文献[14]利用扫描法和傅里叶变换法来对较大物体进行三维测量。这样, 综合了两种方法的优点, 使傅里叶变换法拓展到可测量大

型物体。另外值得一提的是在物体的三维测量方面,加拿大的Northern Digital 公司从1983年开始研究3-D 物体测量系统,到1988年,取名为OPTO TRAK 的系统的测量精度在1m 内达到 $30\mu\text{m}$ ^[43]。这个系统在我们掌握的资料中,相对精度是较高的一个系统。但系统的测量原理、系统构成、处理方式均没有给出,只给出摘要。目前图像测量技术正朝着高精度、高测量速度和线测量方向发展;另一个非常有前途的发展方向是将模式识别、人工智能和神经网络等技术引入图像测量系统,使该系统具有测量、识别、分析等多种功能。

参 考 文 献

- 1 Maurice K, Leberl F, et al Real-time close-range 3-D motion measurements for dental medicine. Proc SPIE, 1990, 1395: 366~ 373
- 2 Waldhausl P, Forkert G, Rasse M, Balogh B. Photogrammetric surveys of human faces for medical purposes. Proc SPIE, 1990, 1395: 704~ 710
- 3 Schneider C T, Sinnreich K. Concept of optical coordinate measurement machine. Proc SPIE 1990, 1395: 816~ 821
- 4 Ouyang F. Computerized image quality inspection system. Proc SPIE, 1993, 1907: 133~ 139
- 5 Chim S S, Kino G S. Optical metrology for integrated circuit fabrication. Proc SPIE 1990, 1464: 138~ 144
- 6 Huang Y Y, Tang S H, Zhu Q. 3-D surface inspection using interferometric grating and 2-D FFT based technique. Proc SPIE, 1990, 1332: 696~ 703
- 7 Hashimoto T, Murai S. Traffic flow measurement by video image processing. Proc SPIE, 1990, 1395: 802~ 808
- 8 Robertson G. Aircraft crash analysis utilizing a photogrammetric approach. Proc SPIE, 1990, 1395: 1120~ 1133
- 9 Wu J, Wahn K. Recovering 3-D motion and structure from first-order image deformation. Proc SPIE, 1990, 726: 176~ 181
- 10 Zhang Z, Faugeras O D. Motion analysis of two stereo views and its applications. Proc SPIE, 1990, 1395: 638~ 645
- 11 Choate A G. Optical and digital processing techniques in a machine vision metrology system. Optical Engineering, 1989, 28(12): 1311~ 1316
- 12 Dirckx J J J, Decraemer W F, Dielis G. Phase shift method on object translation for full field automatic 3-D surface reconstruction from moire topograms. Applied Optics, 1988, 27(6): 1164~ 1169
- 13 Cline H E, Holik A S, Lorenzen W E. Computer-aided surface reconstruction of interference contours. Applied Optics, 1982, 21(24): 4481~ 4488
- 14 赵世平. 大型复杂表面三维轮廓计算机视觉系统原理及实现. 重庆大学博士论文, 1990
- 15 Andresen K. Displacement and strain calculations by the phase shift method. Applied Optics, 1987, 26(14): 2747~ 2751
- 16 Chang M, Hu C P, Lam P, Wyant J C. High precision deformation measurement by digital phase shifting holographic interferometry. Applied Optics, 1985, 24(22): 3780~ 3783
- 17 Tang S H, Huang Y Y. Fast profilometer for the automatic measurement of 3-D object shapes. Applied Optics, 1990, 29(20): 3012~ 3018
- 18 Meadows D M, et al. Generation of surface contours by moire patterns. Applied Optics, 1990, 9(9): 1467
- 19 Pirodda L. Shadow and projection moire techniques for absolute or relative mapping of surface shapes

- Optical Engineering, 1982, 21(4): 640~ 649
- 20 Idesawa M, Yatagai T, Soma T. Scanning moire method and automatic measurement of 3-D shapes Applied Optics, 1977, 16(8): 2152~ 2161
 - 21 Takada M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes Applied Optics, 1983, 22(24): 3977~ 3982
 - 22 Srinivasan V, Liu H C, Haloua M. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse objects Applied Optics, 1984, 23(18): 3105~ 3108
 - 23 袁玉麟 掠射式镜面莫尔轮廓法 仪器仪表学报, 1992, 13(4): 364~ 368
 - 24 陈泽光等 采用准正弦投影光场的三维面形测量系统 仪器仪表学报, 1989, 10(4): 409~ 415
 - 25 吴晓波, 钟先信等 高精度图像测量系统 光学 精密工程, 1995, 3(1): 28~ 33
 - 26 后腾国足等 形状的激光精密计测 国外激光进展, 1987, (1): 56~ 61
 - 27 河野嗣男 用激光测量评价精密表面特性 国外计量, 1987, (2): 14~ 16
 - 28 郑华喜 表面粗糙度和微观轮廓非接触测量的现状与技术水平 工具技术, 1992, (8): 36~ 38
 - 29 Seib M, Hoefler H. 3-D Moire contouring with modified CCD camera. L. J. A 70 ICAL EO: 28~ 38
 - 30 Haloua M, Krishnamurthy R S, Liu H C, Chiang F P. Projection moire with moving grating for automated 3-D topography. Applied Optics, 1983, 22(6): 850~ 855
 - 31 Cline H E, Lorenzen W E, Holik A S. Automatic moire contouring. Applied Optics, 1984, 23(10): 1454~ 1459
 - 32 Indebetouw G. Profile measurement using projection of running fringes Applied Optics, 1978, 17(18): 2930~ 2933
 - 33 Blatt J H, Hooker J A. 3-D inspection of large objects by Moire profilometry. 1989, L. I A 70 ICAL EO: 12~ 16
 - 34 Haloua M, Liu H C. Optical sensing techniques for 3-D machine vision. Proc SPIE, 1986, 665: 150~ 161
 - 35 Takada M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. J Opt Soc Am, 1982, 72(1): 156~ 160
 - 36 Macy W W Jr. Two-dimensional fringe-pattern analysis Applied Optics, 1983, 22(23): 3898~ 3901
 - 37 Bone D J, Bachor H A, Sandeman R J. Fringe-pattern using 2-D Fourier transform. Applied Optics, 1986, 25(10): 1653~ 1660
 - 38 Roddier C, Roddier F. Interferogram analysis using Fourier transform techniques Applied Optics, 1987, 26(9): 1668~ 1673
 - 39 Srinivasan V, Liu H C, Haloua M. Automated phase measuring profilometry: a phase mapping approach. Applied Optics, 1985, 24(2): 185~ 187
 - 40 Creath K. Comparison of phase measurement algorithms Proc SPIE, 1986, 680 Surface Characterization and Testing: 19~ 27
 - 41 藤森直往 新しい非接触寸法測定法とその応用 機械の研究, 1993, 45(4): 429~ 435
 - 42 吴晓波 异形三维回转体亚像元轮廓图像测量技术的研究 重庆大学博士学位论文, 1995
 - 43 Crouch D G, Kehil L, Krist J R. OPTOTRAK- At last a system with resolution of ten microns Proc SPIE, 1990, 1356: 53

Image Measuring Technique and It's Development

WU Xiao-Bo

(Dept. of Automation, Logistic Engineering Institute, Chongqing 400041)

YANG Yong-Qin

(Dept. of Computer and Information Eng., Chongqing Jiaotong Institute, Chongqing 400041)

Abstract

Image measuring technique which is a new technique in the field of measurement forms of late years. In the measurement of dimension, shape, and deformation for 3-D object, the measurement, and surface testing of complex precision components for microelement, and industrial inspection as well as remote sensing measurement etc., it finds wide use. This paper will survey the current state of the technique and its development.

Key words: Image metrology, 3-D object

吴晓波 男, 1963年6月生。1984年在解放军后勤工程学院自动化系获学士学位, 1992年在重庆大学自动化系获硕士学位, 1995年在重庆大学光电精密仪器系获博士学位。所搞科研项目“空军某油库自动化系统工程”1988年获军队科技进步二等奖及国家科技进步三等奖。主研的某部科学技术基金支助项目“异形曲面薄壁零件轮廓面非接触在线测量技术研究”项目, 1995年获部委科技进步二等奖。已公开发表论文12篇。现正从事自动控制系统故障诊断、容错控制、系统辨识、图像处理及精密测量等研究工作。