

文章编号 : 0253-2239(2001)12-1444-04

基于正弦条纹投影的三维传感及其去包裹处理*

康 新¹⁾ 何小元¹⁾ Quan C²⁾

(1), 东南大学工程力学系, 南京 210096
(2), 新加坡国立大学机械工程系, 新加坡 119260)

摘要: 采用液晶显示(LCD)投影仪产生的正弦条纹,用四步相移技术对物体进行了三维形貌测量,重点讨论了去包裹问题,对大面积相位间断区的模板标识及含离散相位间断点条纹图的去包裹问题提出了新的处理方法,给出了实际测量及计算结果。

关键词: 三维传感;液晶显示投影仪;相移法;去包裹
中图分类号: TN911.74 文献标识码: A

1 引 言

物体的三维传感在工程设计、质量控制、机器人、高速在线检测、医学诊断、计算机半自动设计/计算机辅助制造及刑事侦察等领域起着越来越重要的作用,具有非接触的光学测量方法由于其分辨率高、速度快、获取数据多等优点已成为三维传感的主要方法,其中基于光学投影的相位测量方法更是近年来人们研究的热点之一,主要有傅里叶变换法^[1-3]和相移法^[4-6]。在计算量、被测物体陡峭度和抗静态噪声等方面,相移法较傅里叶变换法有明显的优势。但相移法要求投影光栅必须是正弦型光栅,实际上要制作正弦型光栅是一件非常困难的事,一般情况只能得到准正弦光栅。液晶显示投影仪可以由程序控制产生各种样式的光栅条纹、栅格和二元编码图样等,是一种比较理想的投影设备。本文采用液晶显示投影仪产生正弦条纹,用四步相移法对物体进行了三维形貌测量。

基于相位测量的三维传感都不可避免地要面临解包裹问题,近年来人们已提出不少解包裹方法,有支切法^[7,8]、最小梯度生成树法^[9]、条纹调制度分析方法^[6]、细胞自动机算法^[10,11]、稳态婚姻算法^[12]、最小价格匹配算法^[13]和基于形态学的算法^[14]等等。然而,客观上每种方法都有一定的局限性,由于条纹图缺陷的多样化,解包裹问题一直是三维传感实现自动化的最大障碍。本文针对投影光栅法三维传感中经常出现的阴影(也称盲区)或被测物体表面存在

孔洞等造成的大面积相位间断区提出一种模板标识方法(对相位间断区需用模板覆盖住,解包裹时绕开),这种方法同调制度分析方法一样可以标识出大面积相位间断区,但计算量却比调制度分析方法小,因而速度快。同时本文提出一种针对离散相位间断点(由物体表面高度梯度过大而引起的条纹过密从而导致条纹欠采样、条纹丢失或摄像机本身的光电噪声等引起)的去包裹技术,采用这种技术解包裹时不需要事先检测出相位间断点,而是采用两次校正来消除相位误差,实践表明,这种方法效果很理想,是一种比较实用的方法。

2 测量原理简介

图 1 所示光路图为交叉光轴结构, P 为投影仪, E 为摄像机, 两点到参考平面等距离, O 点是投影仪和摄像机两光轴的交点, 以 O 为原点建立如图所示坐标系, 设 x 方向为条纹周期方向, 当一组正弦条纹投影到物体表面时, 投影条纹被物体高度调制

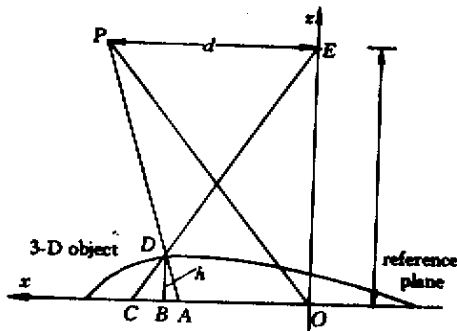


Fig. 1 Optical geometry of the projection and recording system

* 国家自然科学基金(10072017)资助课题。

收稿日期: 2001-01-20

而发生畸变。图 2 为采用四步相移技术(相移量为 $\pi/2$)得到的四幅畸变条纹图,其强度可分别表示为

$$I_1(x, y) = R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos[2\pi fx + \phi(x, y)]\}, \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos[2\pi fx + \phi(x, y) + \pi/2]\}, \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos[2\pi fx + \phi(x, y) + \pi]\}, \quad (3)$$

$$I_4(x, y) = R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos[2\pi fx + \phi(x, y) + 3\pi/2]\}. \quad (4)$$

式中, $R(x, y)$ 为物体表面非均匀反射率, $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为条纹对比度, f 为投影条纹在参考面上的频率, $\phi(x, y)$ 为相位, 其中包含物体高度信息。

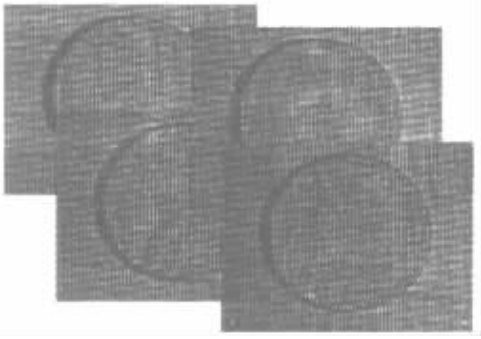


Fig.2 Four phase shifting sinusoidal fringe patterns on a coin surface

由上述四个方程得物体表面 D 点相位:

$$\phi_D = 2\pi fx + \phi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}, \quad (5)$$

同理, 参考面上 C 点相位为:

$$\phi_C = 2\pi fx + \phi(x, y) = \arctan \frac{I'_4(x, y) - I'_2(x, y)}{I'_1(x, y) - I'_3(x, y)}, \quad (6)$$

式中, I'_1, I'_2, I'_3, I'_4 是移去物体后参考面上投影条纹的强度方程。由(5)式、(6)式得:

$$\Delta\phi = \phi_D - \phi_C = 2\pi f \cdot \overline{AC}$$

若被测物体高度远远小于 L , 则有下式成立:

$$h(x, y) = \frac{L}{d} \cdot \overline{AC} = \frac{L}{d} \frac{\Delta\phi}{2\pi f} = k \cdot \Delta\phi, \quad (7)$$

通过对测量系统进行标定可确定系数 k , 进而根据相位差可得物体高度。

3 相位间断区的模板标识及针对离散相位间断点的去包裹技术

理想的条纹图去包裹工作十分简单, 只需逐点扫描行或列就可得到正确的相位展开图, 然而当条

纹图中包含有噪声时去包裹过程将会比较复杂, 条纹图中噪声的分布一般呈两种状况: 大面积的噪声区(也称无效区或间断区)和少数的离散的噪声点, 它们是传播相位误差的根源。

3.1 相位间断区的模板标识

投影光栅法三维传感中, 当采用交叉光轴结构时总有部分区域得不到投影条纹, 形成暗反射区, 例如物体的陡峭边缘形成的阴影、表面上的孔洞等, 这些区域形成相位间断区, 因此在解包裹前需要先检测出这些区域, 建立一个二值模板, 解包裹时绕过这些区域, 最后对这些区域的相位值进行插值或其他处理。相位的间断一般用下式判断:

$$\sum_1^4 d(i) \neq 0, \quad (9)$$

式中, $d(i) = \text{in}[\Delta\phi(i)]_t$, t 为相位发生 2π 跳跃的阈值, 根据包裹相位图在垂直条纹方向差分后的直方图选择, 一般小于 2π , $\Delta\phi(i) = (i = 1, 2, 3, 4)$ 是 2×2 区域四像素按顺时针或逆时针方向的相位差。然而(9)式只是相位间断点的充分条件而非必要条件, 因此不能检测出全部相位间断区。如图 3(a)所示, 图中的点是用(9)式标识出的相位间断点, 可见图中大面积的阴影区没有能够全部检测出。为了检测出大面积相位间断区, 通常采用调制度(也有人称广义振幅)分析的方法。本文提出一种新的方法: 将(1)式~(4)式相加平均所得为

$$I(x, y) = R(x, y) \cdot A(x, y), \quad (10)$$

此式表示光强等于反射部分 $R(x, y)$ 和背景光强 $A(x, y)$ 的乘积。若反射部分较弱, 则 $I(x, y)$ 的值就比较低, 盲区或有空洞的区域 $R(x, y)$ 一般都很弱, 见图 3(b)。图 3(b)是 $I(x, y)$ 的灰度图, 图中盲区的 $I(x, y)$ 明显很低, 因此可通过设置合适的阈值将盲区和孔洞检测出来。阈值的选取可通过 $I(x, y)$ 的直方图进行, 见图 3(c), 在 $I(x, y)$ 的直方图中总存在一个谷底, 可选择谷底处的值作为阈值, 阈值的选取不能太小, 否则会漏掉一些间断点, 也不能选得太大, 否则会误把连续点判为间断点。图 3(d)为用此方法得到的二值模板, 实践证明它能

很好地覆盖相位间断区。

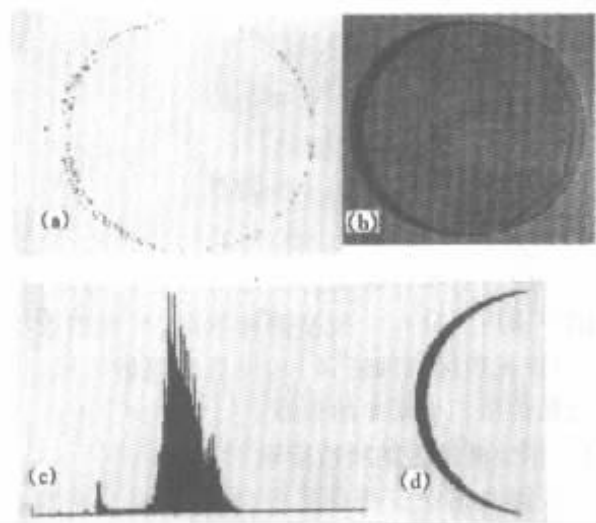


Fig. 3 The detection of the template for the phase discontinuity area. (a) Points of phase discontinuity; (b) The gray scale map of $I(x, y)$; (c) Histogram of $I(x, y)$; (d) Area of phase discontinuity

3.2 针对点状噪声的去包裹技术

点状噪声在去包裹时会引起“拉线”现象，“拉线”现象实为相位误差的传播路线，为消除“拉线”现象，可采用构造分割线的方法，以切断误差传播途径，但这种方法比较繁琐，原因是：(9)式中

$$\sum_1^4 d(i)$$

的值总是等于 1、0 或 -1，若 $\sum_1^4 d(i) = 1$ ，

称正极点， $\sum_1^4 d(i) = -1$ 称负极点，它们是成对出现的，有正极点就必有与之相对应的负极点，用构造分割线的方法就要涉及正负极点严格配对问题，搜索起来是非常麻烦的。如果不严格配对，那么构造出来的分割线往往会漏掉间断点或误把连续点判为间断点^[8]，有些文献把相距最近的正负极点直接连接起来以构成分割线，这只能在正负极点之间的距离均小于极点对之间的距离时才能正确解包裹，如果这个条件不满足就会产生一定的误差。虽然有一些改进的方法相继提出，但构造分割线方法终究是很麻烦的。针对这种情况本文提出如下方法：分别沿水平和垂直方向扫描，进行两次去包裹，得两幅相位展开图，扫描过程不必考虑点状噪声，因此两幅图中均会产生“拉线”现象且“拉线”相互垂直，如图 4(a) 和图 4(b) 所示，为清楚起见，只给出部分图中“拉线”，选择合适的扫描起点，使两种“拉线”不直接相交（除间断点外），然后对两幅图采用加 $k \cdot 2\pi$ 的方法来校正错误的 2π 跳跃，这里 $k = \text{in}[(\phi_2 - \phi_1) / (2\pi)]$ ，1 → 2 方向为垂直“拉线”方向，以上是第

一步校正，当然选择的扫描起始点必须是正确解包裹点，一般情况这个条件是很容易满足的。第一步校正过程结束后得两幅相位展开图并没有完全消除“拉线”现象，因为间断点本身的包裹相位 $(-\pi \leq \phi \leq \pi)$ 就是不正确的，第一步校正只是消除在间断点处引起的不合理的 2π 跳跃，还有因包裹相位 ϕ 本身引起的误差没有消除，这部分误差可能在相位展开图中不易观察到，但在计算出的三维形貌图中却表现得非常明显。第二步校正基于相位的二阶导数：对第一步校正后所得两幅相位展开图的每一个对应点分别沿垂直各自“拉线”的方向计算二阶导数，若相位连续则二阶导数很小，若相位跳跃则二阶导数的绝对值必然较大，因为两幅图的“拉线”不直接相交，因此必然存在一个较小的二阶导数，它所对应的相位就是最终正确解包裹的相位。

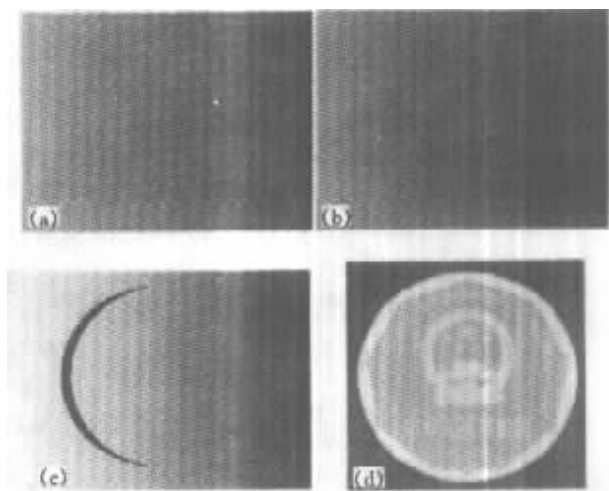


Fig. 4 The results of phase unwrapping. (a) The unwrapped phase map with error-line in x direction; (b) The unwrapped phase map with error-line in y direction; (c) The unwrapped phase map after error-correcting; (d) The gray scale map of the height on the coin surface

4 测量和计算结果

采用文中的方法对均匀喷漆的硬币进行了测量和计算，图 4(c) 为用本方法计算得到的相位展开图。图 4(d) 为计算得到的硬币表面高度灰度图，图中灰度值和高度成正比，黑色对应于基准面，白色对应于高度最大点。图 5 为表面上“人民”两字的等高线图。图 6 为两字的网格图。

结论 采用液晶显示产生的正弦条纹用四步相移技术对硬币进行了三维形貌测量，提出了大面积相位间断区的模板标识新方法及针对点状噪声的解包裹

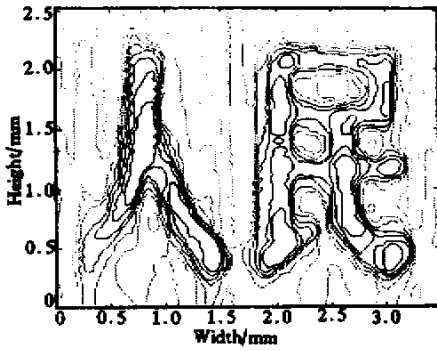


Fig.5 The contour map of the “人民” on the coin surface

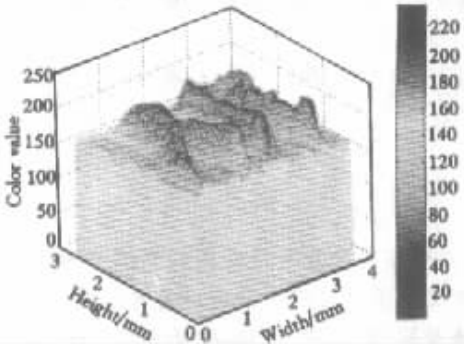


Fig.6 3-D plot of “人民” on the coin surface

新技术 测量及计算结果表明,文中提出的方法技术不仅计算量小,可提高了测量自动化程度,而且效果比较理想,通过和传统的接触测量方法进行比较,最大偏差为 4.8%。

参 考 文 献

- [1] Takeda M Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24) :3977 ~ 3982
- [2] Li J, Su X Y, Guo L R. An improved Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object

- shapes. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(12) :1439 ~ 1444
- [3] Spagnolo G S, Guattari G, Sapia C *et al.*. Contouring of artwork surface by fringe projection and FFT analysis. *Opt. Laser Engng.*, 2000, **33**(2) :141 ~ 156
- [4] Huang P S, Hu Q, Jin F *et al.*. Color-encoded fringe projection and phase shifting for 3-D surface contouring. *Proc. SPIE*, 1998, **3407** :477 ~ 482
- [5] He X, Zou D, Liu S *et al.*. Phase-shifting analysis in moire interferometry and its application in electronic packaging. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(5) :1410 ~ 1419
- [6] Su X Y, Von Bally G, Vukicevic D. Phase-stepping grating profilometry: Utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1, 2, 3) :141 ~ 150
- [7] Huntly J M. Noise-immune phase unwrapping algorithm. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(15) :3268 ~ 3271
- [8] Cusack R, Huntley J M, Goldrein H T. Improved noise-immune phase-unwrapping algorithm. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(5) :781 ~ 789
- [9] Towers D P, Juge T R. Automatic interferogram analysis techniques applied to quasi-heterodyne holography and ESP. *Opt. Laser Engng.*, 1991, **14**(4) :239 ~ 281
- [10] Ghiglia D C, Mastin G A, Romero L A. Cellular automata method for phase unwrapping. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1987, **4**(1) :267 ~ 280
- [11] Servin M, Rodriguez-Vera R, Moore A J. A robust cellular processor for unwrapping. *J. Modern Opt.*, 1994, **41**(1) :119 ~ 127
- [12] Quiroga J A, Gonzalez-Cano A, Bernabeu E. Stable-marriage algorithm for preprocessing phase maps with discontinuity sources. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(23) :5029 ~ 5038
- [13] Buckland J R, Huntley J M, Turner S R. Unwrapping noisy phase maps by use of a minimum-cost-matching algorithm. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(23) :5100 ~ 5108
- [14] Soille P. Morphological phase unwrapping. *Opt. Laser Engng.*, 2000, **32**(4) :339 ~ 352

3-D Sensing Using Sinusoidal Fringe Projection and Phase Unwrapping

Kang Xin¹⁾ He Xiaoyuan¹⁾ Quan C²⁾

(1), Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096

(2), Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore 119260

(Received 20 January 2001)

Abstract: With four-step phase-shifting method the 3-D surface profile of a coin was measured using sinusoidal fringe projection produced by a liquid crystal display (LCD) projector. The phase unwrapping problems are discussed. A new method for detection of the phase discontinuity area and a new technique for phase unwrapping are presented. The experimental results are given.

Key words: 3-D sensing ; liquid crystal display ; projector ; phase-shifting ; phase unwrapping