

利用空间坐标变换的三维测量系统

田 丰 赵 宏 陈文艺 范 华 谭玉山

(西安交通大学机械工程学院激光红外研究所, 西安 710049)

摘 要 提出一种新的三维面形测量合成方法, 它可以用于大型物体及具有复杂面形物体的多次测量。本文将空间坐标变换理论引入到三维面形测量中, 并阐述了基于此变换的物相转换方法及图像合成方法。测量结果表明, 本方法可以基本消除传统方法中存在的问题, 解决了三维测量中的一个瓶颈问题。

关键词 三维测量, 图像合成, 坐标变换。

1 引 言

三维物体形状的测量在三维造型、机器人视觉、自动化生产、及质量控制等方面有着广泛的应用。目前, 常见的基于光学测量的轮廓术包括: 傅里叶变换法^[1]、相位测量法^[2]、莫尔法^[3]、结构光法^[4]、以及空间滤波法^[5]等。其中相位测量法由于对相位采用点点计算法, 某一点的相位决定于来自相移所获得的 N 个光强值, 而不受周围其它点的影响(尽管这些点可能存在误差), 因此它得到了广泛的应用。其光学结构如图 1 所示。

当普通投影仪投影一正弦光场到物体表面时, 受物体表面形状的调制, 这一变形光场可表示为^[2]:

$$I(x, y) = R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos [\frac{2\pi}{P}x + \Delta\varphi(x, y)]\} \quad (1)$$

式中 $R(x, y)$ 为与物体表面反射率有关的参数, $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为调制因子, P 为条纹周期, $\Delta\varphi(x, y)$ 是与物体表面轮廓相关联的相位因子, 采用两步相移法, 可得^[6]:

$$\Delta\varphi(x, y) = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3} (I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3} \quad (2)$$

式中 I_1 、 I_2 、 I_3 分别 ϕ 相移为 0 , $2\pi/3$, $4\pi/3$ 对应的变形光栅图。用(2)式求得的 $\Delta\varphi(x, y)$, 是一个从 $-\pi$ 到 $+\pi$ 值, 为了得到一个连续的相位分布, 必须对测得的相位分布图进行去包裹, 然后利用特定光学结构下的物相关系求得待测物体的三维面形。

通过以上过程, 可以求出物体面形的分布 $h(x, y)$ 。但是, 对于大的物体, 如汽车壳体、船模, 则由于 CCD 及投影仪视场的限制不能一次测量完成(尽管可以通过加大摄距适当增大测量范围, 但受限于投影仪功率、测量环境及条件), 对于形状复杂、曲率变化大的物体则会产生阴影, 如图 2 所示。

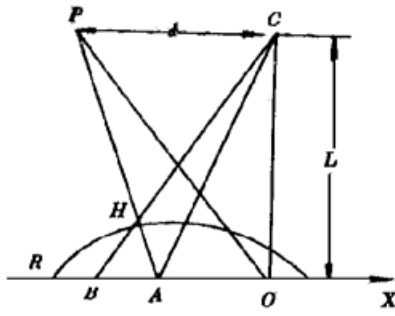


Fig. 1 Structure of grating projection

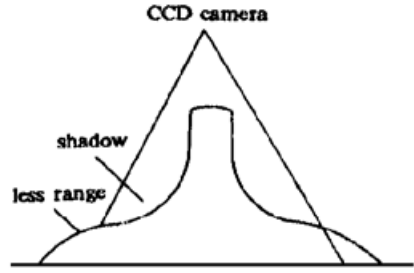


Fig. 2 Shadow and less range exist

本文就此问题提出了一种多次测量再合成的方法，并阐述了这种方法的原理及具体的实现过程。

2 多次测量图像合成的实现

为解决测量范围不够或者阴影等问题，本文采用多次测量再合成的方法，如图 3 所示。即用两套或更多套测量系统：投影仪 P_1 、摄像机 C_1 组成的左测量系统 SL 和投影仪 P_2 、摄像机 C_2 组成的右测量系统 SR。

2.1 合成的基本思想

为了使两套系统的测量结果能够合成起来，关键是解决两个问题：1) 坐标的统一，即两部分的结果是相对于同一个参照系；2) 公共区域的处理，即由于系统的不完全对称性，对于物体上同一点，两系统 SL, SR 测出的高度坐标值并不相同，此时如何确定其高度值。首先，建立唯一的物空间坐标系 $O-XYZ$ ，以确定待测物体的三维坐标。为此，不论是 SL，还是 SR 系统，单独测量的结果最终都将转换在 $O-XYZ$ 坐标系下，这样，便解决了第一个问题。其次，在 SL、SR 系统的测量重叠区域的中间位置上设置标志点，以它们为分界线，左右两边的系统各自计算物体的三维坐标；而对于公共的标志点，则取两系统测量值的平均，即对于同一点 (x_0, y_0) ，SL 系统测得结果为 h_L ，SR 系统测得结果为 h_R ，那么，点的高度坐标最后为： $h_c = (h_L + h_R)/2$ 。下面针对这两个问题展开详细论述。

2.2 单独测量时物体各点坐标的确定

如前所述，在光栅投影测量系统下，利用相移法可以求出图像中每一像素点的相位 $\Delta\mathcal{Q}(x, y)$ 。如图 4 中的 B 点，在初始光栅像中，B 点有一相位 $\mathcal{Q}(x_b, y_b)$ ；当被测曲面置于参考

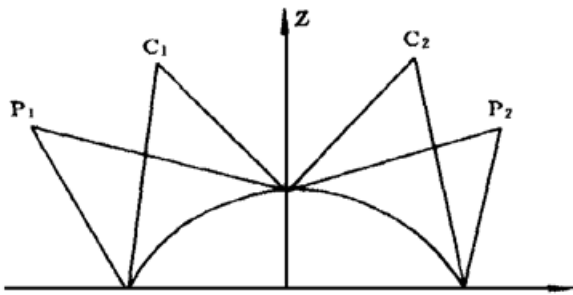


Fig. 3 Multi-systems measurement diagram

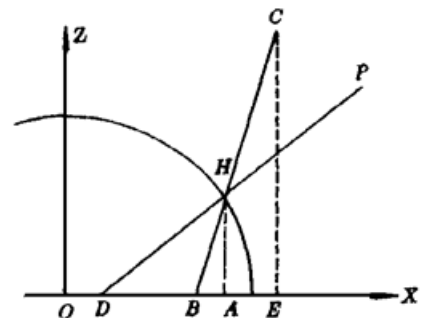


Fig. 4 Geometry of single system

平面上之后，图像平面上点 (x_b, y_b) 的相位为 $\mathcal{Q}(x_b, y_b)$ ，故：

$$\Delta\mathcal{Q}(x_b, y_b) = \mathcal{Q}(x_b, y_b) - \mathcal{Q}(x_b, y_b)$$

由于，B 点与物体上的 H 点对应着像面上的同一点。这样，在用查找表法基于 B 点的 $\Delta\mathcal{Q}(x, y)$ 求解出的高度 $h(x, y)$ 实际上是 H 点的高度坐标，因此须根据 B 点的坐标 (x_B, y_B) 求出 H

点的相应横纵坐标。如图 4 所示, 设 CCD 的入瞳, 或物方节点为 C , 它在物坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标为 $C(X_c, Y_c, Z_c)$, 待测点 H 的坐标为 $H(X_H, Y_H, Z_H)$, 由相似三角形 $\Delta BAH \sim \Delta BEC$, 有:

$$\overline{BA} / \overline{BE} = \overline{HA} / \overline{CE} = Z_H / Z_C,$$

又因

$$\overline{BE} = \overline{OE} - \overline{OB} = X_c - X_B$$

所以

$$\overline{BA} = Z_H / Z_c (X_c - X_B) \tag{4}$$

而

$$X_H = X_B + \overline{BA} \tag{5}$$

由于用相移法求相位时是按行计算的, 故 Y 方向的坐标不用修正。这样, 利用(4)式和(5)式可以得到 H 点的三维坐标, 继而得到整个物体的面形, 实现预定的目标。然而, (4)、(5)式中, X_c 、 Z_c 是未知数, 由于节点 C 的准确位置无法确定, 故不能用通常的方法测得。

2.3 空间坐标变换求解 CCD 节点坐标

为计算需要的坐标值, 必须建立适当的坐标系以描绘测量系统。如右图5所示。设待测物体所在的物空间坐标系为 $O-XYZ$, 摄像机 CCD 靶面所在的坐标系为 $o-xyz$, 亦可称为像空间坐标系, 其中, o 为靶面中心, x 轴, y 轴分别与靶面的横边和纵边平行; 为计算方便, 引入像空间辅助坐标系 $S-X'Y'Z'$, S 点即是 CCD 的物方节点, 或称摄影中心, 它的 X' , Y' 轴分别与物坐标系 $O-XYZ$ 中的 X , Y 轴平行。设 S 点和物体上 A 点在 $O-XYZ$ 中的坐标分别为 X_0, Y_0, Z_0 和 X, Y, Z , 则 A 在辅助坐标系 $S-X'Y'Z'$ 中的坐标为 $X-X_s, Y-Y_s$, 和 $Z-Z_s$, 而 A 点对应的像点 a 在 $S-X'Y'Z'$ 中的坐标为 X', Y', Z' 。由于 Sa 和 SA 是共线的, 则可得像点、物点的变换方程式^[7]:

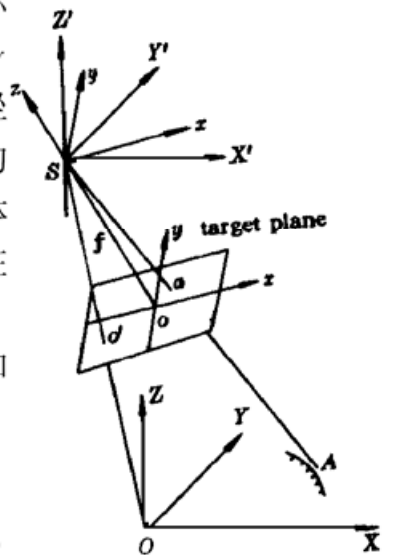


Fig. 5 Relation among coordinates

$$\begin{cases} x = f \frac{a_1(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + c_1(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} \\ y = -f \frac{a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} \end{cases} \tag{6}$$

其中 f 为摄像机的主距, 如果忽略物镜畸变差引起的像点位移, 它等于摄像物镜的焦距。系数 $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3)$ 是像空间坐标系 $o-xyz$ 和像空间辅助坐标系 $S-X'Y'Z'$ 对应两轴之间的方向余弦, 即:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(X'x) & \cos(X'y) & \cos(X'z) \\ \cos(Y'x) & \cos(Y'y) & \cos(Y'z) \\ \cos(Z'x) & \cos(Z'y) & \cos(Z'z) \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中 $\cos X'x$ 表示 X' 轴与 x 轴之间的方向余弦, 余此类推。

虽然上式中有九个参数, 但实际上只包含三个独立参数。例如, 当选取以 Y' 轴为主轴的转角系统 φ, ω, κ 三个角度为独立参数时, 经过三次旋转后, 可以得到^[8]:

$$\begin{cases} a_1 = \cos \varphi \cos \kappa - \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa, & a_2 = -\cos \varphi \sin \kappa - \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa, \\ a_3 = -\sin \varphi \cos \omega \\ b_1 = \cos \omega \sin \kappa, & b_2 = \cos \omega \cos \kappa, & b_3 = -\sin \omega \\ c_1 = \sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa, & c_2 = -\sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa, \\ c_3 = \cos \omega \cos \varphi \end{cases} \tag{8}$$

从(6)式可以看出, 如果设 f 已知(等于摄像物镜的焦距), 那么为了解算出 $X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa$ 六个外方位元素, 必须列出六个方程式。这样一来, 需要知道三个物空间点的坐标及相应的像点坐标。这亦可看作是对测量系统的标定。因此, 在实际测量前, 利用一个标准的平面, 事先对其上的三个点做标志, 并量得其物空间的坐标, 然后, 通过摄像机及监视器测得其像点的坐标, 从而实现了六个未知外方位元素的解算。

3 测量步骤及结果

根据以上的分析, 可以建立如图6所示的光学结构, 针对一个较为复杂的船模进行测试。

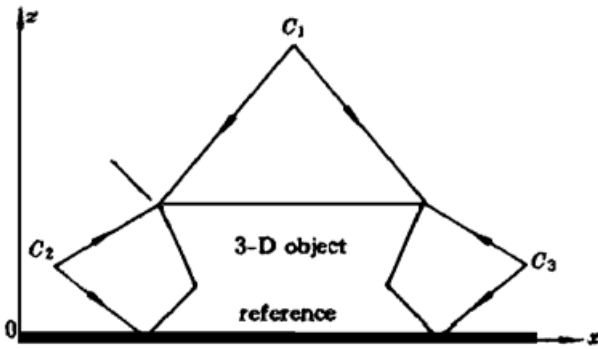


Fig. 6 General structure of measuring system

采用三个测量系统(图6中省略画出投影仪光路)。首先对这三个系统分别进行标定, 即在参考平面上设定物坐标系 $O\text{-}XYZ$, 取其左下角为坐标原点。与光栅条纹平行的方向为 Y 轴, 垂直的方向为 X 轴, 以此为基准, 将一个标准的块规置于参考面上, 在其上选取三点, 量得其在 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标。打开摄像机 C_1 , 从监视器上得到其像点的坐标, 从而利用(6)式计算出测量物体上边的外方位元素。同样, 可以得到左半边

及右半边的物相转换查找表及相应的外方元素。继而完成整个系统的标定。这里需要指出的是, 由(6)式组成的方程组是非线性的, 必须采用迭代法计算。因此, 首先利用多元函数的泰勒公式对其进行线性化。迭代法最常见的有两种: 简单迭代法和牛顿(Newton)迭代法, 因为后者必须计算一阶导数, 运算量较大^[9], 为此本文采用前者。经过一定的迭代次数后, 估计误差达到 10^{-4} 量级。迭代结果分别为:

$$\begin{aligned} X_{C1} &= 160.221 \text{ mm}, & Z_{C1} &= 570.238 \text{ mm}; \\ X_{C2} &= 60.421 \text{ mm}, & Z_{C2} &= 270.436 \text{ mm}; \\ X_{C3} &= 257.732 \text{ mm}, & Z_{C3} &= 283.024 \text{ mm}. \end{aligned}$$

对系统标定完成之后, 就可对船模的三个区域进行测量。即利用(2)式求得其包裹相位, 再用两步法进行去包裹^[10], 得到连续的相位分布; 然后, 利用前面的查找表将相位转换为高度坐标。最后, 通过(4)式~(8)式对横坐标进行修正, 从而实现三维测量。最后根据前面设置的标志点, 对其两次测出的高度值进行平均, 得到最后的坐标。经过以上的测试过程, 得到如图7所示的测量结果。

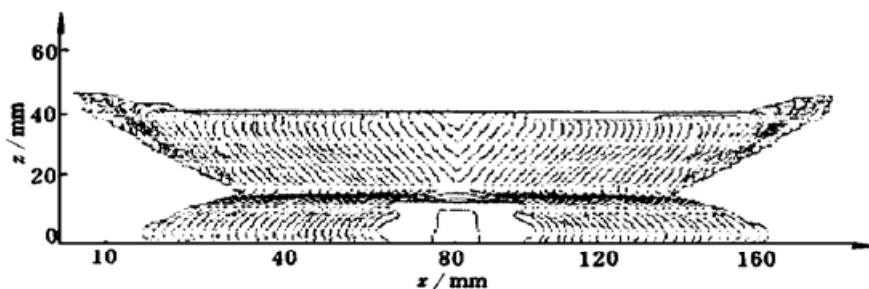


Fig. 7 Three-dimensional display of ship model

结 论 通过以上理论分析和实测结果, 不难看出: 利用空间坐标变换, 成功地测出了物体各点的坐标。这一方面为后面进行的多次测量并合成的测量打下了理论基础, 另一方面, 这种方法无疑也可用在诸如三角法、结构光等其他光学测试中。在以上两步的基础上, 对大物体进行了多次测量, 并对每次的结果加以合成。解决了传统测量中的瓶颈问题: 测量范围小和存在阴影。无疑, 为光学三维测量的实用化的发展做出了有意义的、大胆的、可行的尝试。

当然, 这中间还有许多问题有待进一步解决。例如, 如何使投影光场更加均匀, 如何更加可靠、迅速的去包裹, 以及对于形状更加复杂的物体如何进行内部形面的测量等。笔者将在今后对上述问题作进一步的探讨。

参 考 文 献

- [1] M. Takeda, K. Mutoh, Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24) : 3977~ 3982
- [2] V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua, Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18) : 3105~ 3108
- [3] D. M. Meadows, W. O. Johnson, J. B. Allen, Generation of surface contours by moire pattern. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(4) : 942~ 947
- [4] J. A. Jalkio, R. C. Kim, S. K. Case, Three dimensional inspection using multistriple structured light. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(6) : 966~ 974
- [5] K. H. Womark, Interferometric phase measurement using spatial synchronous detection. *Opt. Engng.*, 1984, **23**(4) : 391~ 395
- [6] K. Creath, Phase-shifting speckle interferometry. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18) : 3053~ 3058
- [7] 冯文灏, 非地形摄影测量. 北京, 测绘出版社, 1985
- [8] 崔炳光, 孙 护, 朱肇光, 摄影测量学. 北京, 测绘出版社, 1984
- [9] 陈明逵, 凌永祥, 计算方法教程. 西安, 西安交通大学出版社, 1992
- [10] Hong Zhao, Wenyi Chen, Yushan Tan, Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(20) : 4497~ 4500

3-D Measuring System Based on the Spatial Coordinate Transformation

Tian Feng Zhao Hong Chen Wenyi

Fan Hua Tan Yushan

(*Laser and Infrared Application Institute, School of Mechanical Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049*)

(Received 8 November 1996; revised 24 February 1997)

Abstract Many kinds of 3-D profilometry share the drawbacks of not having enough measuring range (especially, when a big object to be tested) and existing shadow problems. A new approach is purposed, which can fit the measurement of big objects and small ones with complicated shape. The theory of spatial coordinate transformation into the 3-D profilometry is presented and the method to transform the phase information into the height of objects and to combine the results from different systems is described.

Key words 3-D profilometry, image combination, coordinate transformation.