

# 激光片光三维传感的直接映射方法

李万松 苏显渝

(四川联合大学光电科学技术系, 成都 610064)

**摘 要** 提出了一种新的全场高度映射方法, 利用激光片光产生的莫尔条纹的性质, 拟合出两个映射曲面。通过这两个曲面方程, 可同时直接得出 CCD 探测器表面任意一点在实际世界坐标系中对应的高度和一维横向坐标。此方法具有极大的实用价值。

**关键词** 激光三维测量, 激光片光, 高度映射, 莫尔条纹。

## 1 引 言

光学的三维面形检测, 由于其非接触、高精度、易于自动控制等优点, 日益受到人们的重视。现有的方法包括莫尔条纹法<sup>[1]</sup>、傅里叶变换轮廓术<sup>[2-3]</sup>、位相测量轮廓术<sup>[4]</sup>、光学三角测量法<sup>[5]</sup>等。就其本质言, 都是通过分析受到三维物体面形调制的空间光场, 从而获得高度信息。这些方法已广泛地应用于机器人视觉、实物仿形, 自动加工等领域。

在光学三角测量法中, 必须把探测器记录到的物面上的光点的位置信息转换成高度信息, 为了克服系统误差, 需要预先制作一个高度映射表, 类似于位相测量轮廓术中的位相-高度映射表。通常的方法查表时只能得到某一点的高度值, 而该点的横向位置却不能得到。本文提出的全场高度映射方法, 利用激光片光在 CCD 探测器表面形成的等和、等差两组莫尔条纹的性质, 能够同时得到一点的高度值和一维横向坐标值, 加上由平移工作台得到的另一维横向坐标值, 便能准确地确定出物面各点的三维坐标。该方法已成功应用于“叶片三维面形自动测量系统”中。

## 2 基本原理

采用激光片光的光学三角测量法如图 1 所示, 激光束沿投影光轴投射到物面, 在另一个方向上, 光场的像被 CCD 接收。通过几何关系可得<sup>[6]</sup>:

$$OH = \frac{(OI - f) \Delta \sin \alpha}{f \sin \theta + \Delta \sin \alpha \cos \theta} \quad (1)$$

式中  $f$  为成像系统的焦距,  $OI$  为成像系统到参考平面的距离, 图 1(a) 中,  $M$  点为参考平面上  $O$  点在 CCD 平面上所成的像点,  $N$  点为在参考平面处放上被测物体后, 物面上的  $H$  点在 CCD 平面上所成的像点,  $\Delta$  为  $M$  和  $N$  之间的距离。

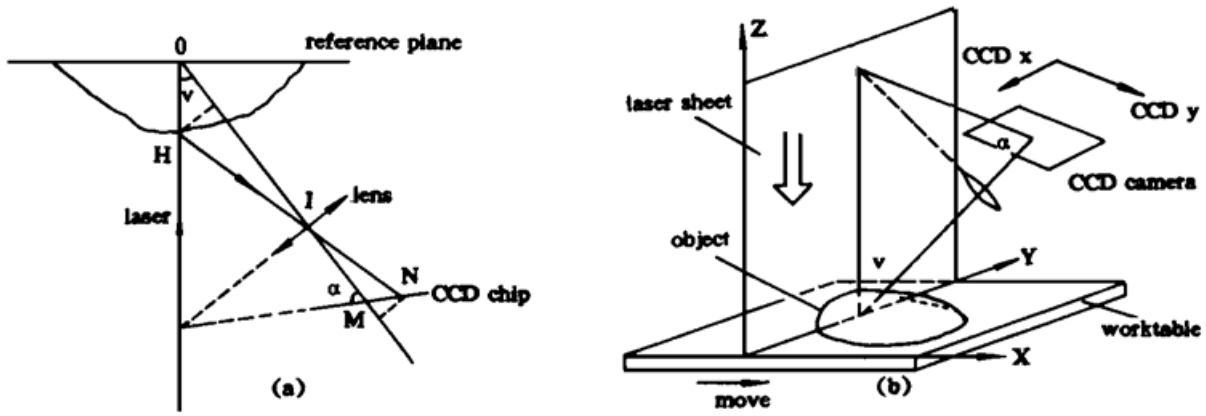


Fig. 1 (a) The system geometry of laser triangulation, (b) Experimental setup

可见要准确得出一一点的高度值，必须准确知道上式中的各个量，但在实际测量中以上各量无法准确得知，这将严重影响测量精度。解决的办法是制作一个高度映射表，即通过一定的方法标定出 CCD 面上各点所对应的实际高度。

本文提出的方法其装置如图 2 所示<sup>[7]</sup>， $\alpha_1, \alpha_2, \beta, \gamma$  为 4 个平面， $\alpha_1, \alpha_2$  与  $\beta$  的夹角相等，为  $\theta_1$ 。 $\alpha_1$  与  $\beta$  的交线 AB 平行于  $\alpha_2$  与  $\beta$  的交线 CD， $\beta$  垂直于  $\gamma$ ，且二者交线为 AC。直线 AB、CD 与 AC 的夹角(锐角)为  $\theta_2$ 。片光刀平面垂直于 AC。

制表时步进电机带动模具沿与片光平面垂直的方向平移，其移动的步长精确可知，设为  $s$ 。在模具的每一个位置，片光面和  $\alpha_1$  或  $\alpha_2$  面都存在一条交线  $l$ ，同时由于 CCD 平面和片光面是一对共轭面，此交线在 CCD 平面上还对应着一条曲线  $l'$ 。由于整个成像系统的误差， $l'$  相对于  $l$  发生了形变。片光面从  $\alpha_1$  向  $\alpha_2$  逐渐扫描，在 YZ 平面上得到一系列的倾斜直交线。最后把所有的交线组合到一起，在 YZ 平面内得到如图 3 所示的一个网络。其中斜率大于 0 的直线共  $k_1$  根，对应着  $\alpha_1$  面上的交线；斜率小于 0 的直线共  $k_2$  根，对应着  $\alpha_2$  面上的交线。

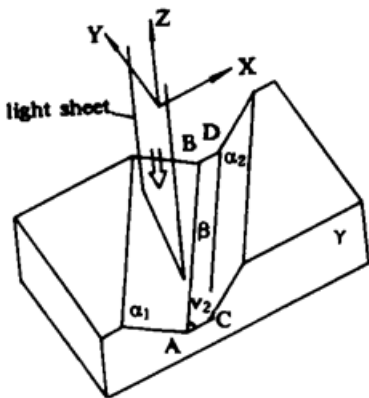


Fig. 2 Calibration gauge

对于  $\alpha_1$  面上的直线，其方程可写为：

$$z = a^* y + b \tag{2}$$

由模具上的几何关系，可得：

$$a = \text{tg } \theta_1^* \cos \theta_2, \quad b = s^* \text{tg } \theta_1^* \sin \theta_2 + c_1 \tag{3}$$

式中  $c_1$  为一常量。则直线族方程可写为：

$$z = \text{tg } \theta_1^* \cos \theta_2^* y - m^* s^* \text{tg } \theta_1^* \sin \theta_2 + c_1, \quad (m = 0, 1, \dots, k_1 - 1) \tag{4}$$

同理， $\alpha_2$  面上的直线族方程可写为：

$$z = -\text{tg } \theta_1^* \cos \theta_2^* y + n^* s^* \text{tg } \theta_1^* \sin \theta_2 + c_2, \quad (n = 0, 1, \dots, k_2 - 1) \tag{5}$$

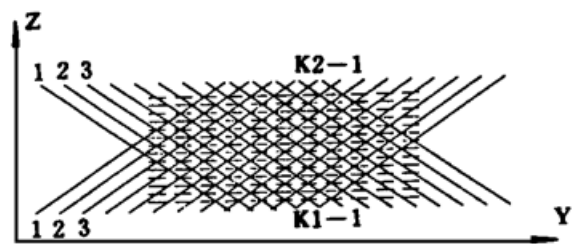


Fig. 3 Mesh in real world coordinate. The dash line is difference frequency moire fringe

设两直线族等差和等和条纹的序数方程为:

$$m - n = p, \quad m + n = q \tag{6}$$

将(4)、(5)两式代入(6)式, 则得到等差条纹方程:

$$\frac{-2^* z + c_1 + c_2}{s^* \operatorname{tg} \theta_1^* \sin \theta_2} = p \tag{7}$$

及等和条纹方程:

$$\frac{2^* \operatorname{tg} \theta_1^* \cos \theta_2^* y + c_1 - c_2}{s^* \operatorname{tg} \theta_1^* \sin \theta_2} = q \tag{8}$$

可见等差条纹方程(7)是一系列平行于 Y 轴的直线, 间距为 $(s^*/2) \operatorname{tg} \theta_1^* \sin \theta_2$ ; 等和条纹方程(8)是一系列平行于 Z 轴的直线, 间距为 $(s^*/2) \operatorname{tg} \theta_2^*$ 。

等差与等和条纹此时可称为等 Z 条纹和等 Y 条纹。由于 CCD 平面和片光平面(YZ 面)是一对共轭面, 片光平面上任一条直(曲)线和网络在 CCD 平面内都存在一条对应的曲线和网络。经过整个成像系统的变换, CCD 记录下的曲线和网络与片光面内的相比都已发生了形变。片光面内的等 Z 线和等 Y 线在 CCD 坐标系中已不再是平行的直线族, 如图 4 所示。但在两族曲线中, 每条曲线的等 Z 性或等 Y 性却保持不变, 确定其级次(p 或 q)之后, 每条曲线对应的 Z 值或 Y 值都可通过(7)、(8)两式得到。对图 4(a)中所有变形的等 Z 线付以对应的 Z 值后, 经过最小二乘法拟合, 可得到形如:

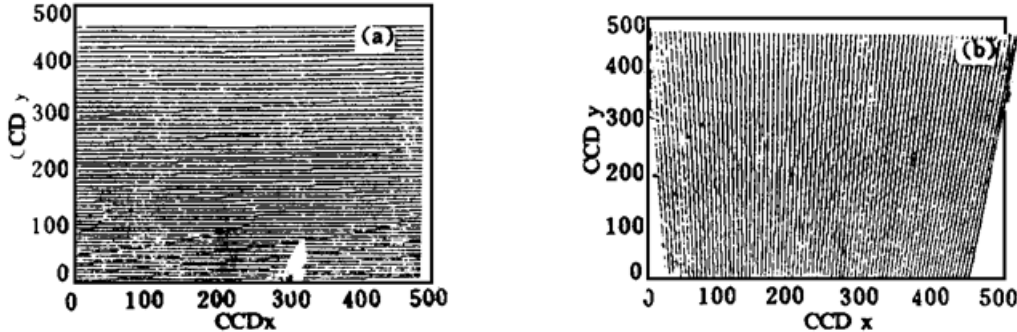


Fig. 4 (a) Deformed difference frequency moiré fringe in CCD plane, (b) Deformed sum frequency moiré fringe in CCD plane

$$f(x_{\text{CCD}}, y_{\text{CCD}}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_{\text{CCD}} - \bar{x}_{\text{CCD}})^{i-1} (y_{\text{CCD}} - \bar{y}_{\text{CCD}})^{j-1} \tag{9}$$

的一个曲面方程, 这里  $x_{\text{CCD}}, y_{\text{CCD}}$  都是 CCD 平面内的坐标, 图形如图 5(a) 所示。CCD 面上任意一点  $(x_{\text{CCD}}, y_{\text{CCD}})$  代入(9)式, 便可直接得到该点对应的 Z 值。同理, 由图 4(b)中变形的等 Y 线也可拟合出一个形如(9)式的曲面方程, 如图 5(b)所示, 将  $(x_{\text{CCD}}, y_{\text{CCD}})$  代入后立即得到该点对应的 Y 值。如此通过这两个曲面方程, 便可同时得到 CCD 面上的  $(x_{\text{CCD}}, y_{\text{CCD}})$  点在片光平面内对应点的 Z 值和 Y 值。

### 3 实验结果

实际测量中取平移步进量  $s$  为 0.7 mm,  $\theta_1$  为  $45^\circ$ ,  $\theta_2$  为  $40^\circ$ 。拟合出的两曲面如图 5 所示。对应等 Z 线, 其系数矩阵为  $a[3][3]$ :

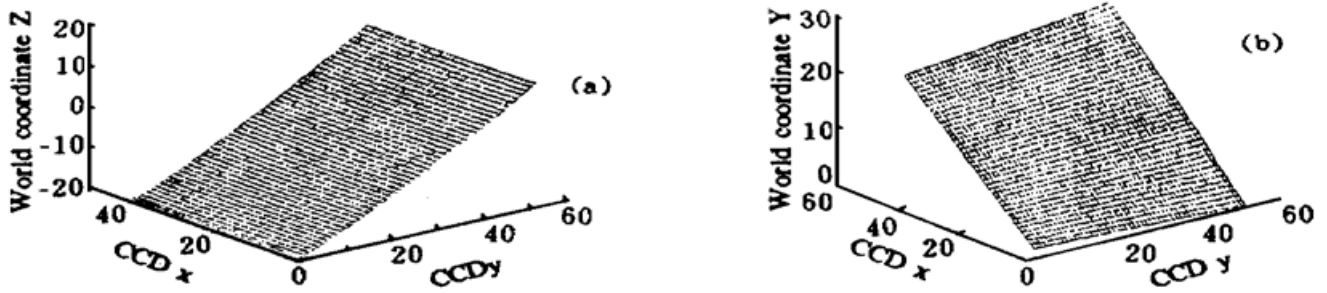


Fig. 5 (a) Z-mapping curve plane in CCD plane, (b) Y-mapping curve plane in CCD plane

$$a[3][3] = \begin{matrix} -6.639755 & 0.066763 & 0.000032 \\ 0.000279 & 0.000002 & 0 \\ 0.000005 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$$\bar{x}_{\text{CCD}} = 251.5 \quad \bar{y}_{\text{CCD}} = 251.499$$

对应等 Y 线, 其系数矩阵为  $b[3][3]$ :

$$b[3][3] = \begin{matrix} 12.958323 & 0.001976 & 0.000001 \\ 0.054025 & 0.000025 & 0 \\ 0.000001 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$$\bar{x}_{\text{CCD}} = 251.5 \quad \bar{y}_{\text{CCD}} = 251.499$$

该全场高度映射方法已成功应用于四川省科委重点项目“叶片三维面形光电自动测量系统”中。其精度分布如图 6 所示, 它是对于一平面物体测量后所得结果。横坐标是该物体一剖面上的采样点, 被测剖面的理想值是一条纵坐标为零的直线, 由于整个系统的误差, 实测值发生了偏移。经计算, 剖面上各点的均方差为 0.0098 mm, 系统达到了很高的测量精度。

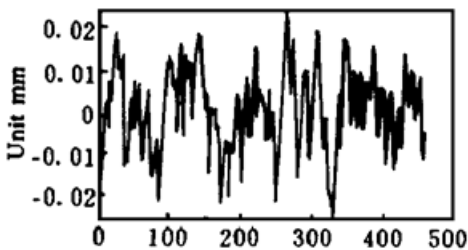


Fig. 6 Accuracy distribution

结论 本文提出的全场高度映射方法, 通过对特殊设计的标准模块的测量, 形成两组莫尔条纹(等和条纹和等差条纹), 文中证明了: 在给定的直角坐标系中, 等差条纹和等和条纹与等 Z 线和等 Y 线一一对应。因此提供了一种非常好的全场高度映射方法。本文给出了详细的理论分析和实验结果。这一新方法在采用片光照明三维传感系统中较大的实用价值。

### 参 考 文 献

- [1] H. Takasaki, Moire topography. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(9) : 1467~ 1472
- [2] M. Takeda, K. Mutoh, Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24) : 3977~ 3982
- [3] Jian Li, Xian-Yu Su, Lu-Rong Guo, Improved Fourier transform profilometry of the automatic measurement of three-dimensional object shapes. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(12) : 1439~ 1444
- [4] V. Srinivasan, H. C. Lui, M. Halioua, Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse object. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18) : 3105~ 3108

- [ 5] Xiao-Xue Cheng, Xian-Yu Su, Lu-Rong Guo, Automated measurement method for 360° profilometry of 3-D diffuse object. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(10) : 1274
- [ 6] Bo Jia, Xian-Yu Su, Lu-Rong Guo, 3-D measurement of turbine blade profile by light knife. *Chinese J. Lasers*, 1992, **19**(4) : 271~
- [ 7] S. Blossey, G. Hausler, F. Stockinger, A simple and flexible calibration method for range sensors. *Meeting Digest, Topical Meeting of the International Commission for Optics(Ico'94)*, 1994

## A Direct Mapping Algorithm for Three-Dimensional Sensing with Laser Sheet Triangulation

Li Wansong      Su Xianyu

(*Opto-Electronics Department, Sichan University, Chengdu 610064*)

(Received 6 April 1996; revised 10 June 1996)

**Abstract** A new mapping algorithm between real world coordinate and CCD coordinate for 3-D sensing with laser sheet triangulation is presented and verified by experiment. Two mapping curved planes are generated with the characteristic of moire patters that is formed by laser sheet. We can get the real world coordinate  $z$  and  $y$  of every point in the surface of CCD camera simultaneously through these two mapping curve plane.

**Key words** laser triangulation, laser sheet, 3-D sensing, moire patters.