

# 双参考面 FTP 法测量弹痕轮廓

权贵秦<sup>1</sup>, 安毓英<sup>1</sup>, 王凤琴<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071;

2. 郑州轻工业学院计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 针对头盔上弹痕的三维轮廓测量, 提出了采用基于双参考面的条纹投影傅里叶变换法. 改变一般测量中只选择一个平面作参考面的做法, 引入无弹痕时的头盔表面作为测量的第二参考面, 克服了单平面参考面测量时的信息丢失, 保证了准确性. 测得了弹痕的实际三维轮廓. 实验证实了其正确性, 精度可达 0.1 mm.

**关键词:** 傅里叶轮廓术; 三维轮廓测量; 双参考面; 弹痕

**中图分类号:** TN247    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-2400(2007)05-0805-04

## Bullet mark profile measurement based on FTP of the double reference surface

QUAN Gui-qin<sup>1</sup>, AN Yu-ying<sup>1</sup>, WANG Feng-qin<sup>2</sup>

(1. School of Technical Physics, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 2. School of Computer and Communication Engineering, ZhengZhou University of Light Industry, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Aimed at measuring the bullet mark on the helmet, the fringe projection Fourier Transformation Profilometry (FTP) based on double reference surfaces is proposed. The second reference surface, which is the helmet surface without damage, is introduced. This method is different from the convenient measuring method, which only uses one reference plane, and avoids the loss of information and insures accuracy in measurement. Experiments prove that this method is availd, and that precision is up to 0.1 mm.

**Key Words:** Fourier transformation profilometry; 3-D profile measurement; double reference surface; bullet mark

光学投影法测量物体表面三维轮廓是一种非接触式的传统测量方法, 具有非接触和数据获取速度快等优点, 因而在现代检测领域应用越来越广泛<sup>[1~8]</sup>. 条纹投影获得物体表面轮廓的方法在测量大尺寸凸面物体中得到了很大的进展, 但是针对头盔上的弹痕三维轮廓测量研究的不多, 在国内期刊上尚未报道. 传统三维轮廓测量得到物体高度是相对于参考平面的实际高度, 因此物体在参考面上的位置具有很大的随机性, 带来较大的随机误差. 而弹痕测量时未留弹痕头盔表面是不规则的曲面, 没有确定的平面作为参考面. 因此需要在原平面参考面基础上, 再引入无弹痕的头盔表面作为第二参考面, 两个参考面的使用与转换使条纹投影的傅里叶变换法更准确地获得了弹痕的三维轮廓信息.

## 1 基于双参考面傅里叶变换术理论基础

傅里叶变换轮廓术的典型测量光路如图 1 所示, 图中  $P_1$  和  $P_2$  分别是投影系统和摄像机的光心,  $d$  是  $P_1$  与  $P_2$  间的距离,  $L$  是  $P_2$  到参考平面  $R$  间的距离,  $A$  和  $O$  是参考平面  $R$  上的两点, 其间距  $\overline{OA}$  为  $r$ ,  $D$  是弹痕

收稿日期: 2007-03-12

基金项目: 陕西省科技厅工业攻关资助(2003K08-G6)

作者简介: 权贵秦(1958-), 男, 教授, 西安电子科技大学博士研究生.

上的点,摄像机的光轴垂直于参考平面。

在求得弹痕的三维轮廓信息时,采用软件生成具有正弦分布的条纹图,通过投影仪投影到弹痕表面上,此时条纹受到弹痕表面面形的调制而产生变形.条纹图中的相位就包含了物体表面的高度信息.通过投影仪将具有正弦分布的条纹图投到参考平面上,形成参考条纹图,此时从摄像机得到的条纹图图像的光强可以表示为<sup>[4,5]</sup>

$$I_0(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos(2\pi f_0 + \varphi_0(x,y)) = a(x,y) + c(x,y) \exp(i2\pi f_0 x) + c^*(x,y) \cdot \exp(-i2\pi f_0 x) \quad (1)$$

$$\varphi_0(x,y) = 2\pi f_0 r \quad ,$$

其中  $(x,y)$  为参考平面图像上任意一点的坐标值,  $a(x,y)$  为背景光强,  $b(x,y)$  为条纹图的对比度,  $\varphi_0(x,y)$  为参考平面条纹图信号的相位,  $f_0$  为参考条纹空间频率.

$$c(x,y) = (1/2)b(x,y) \exp[i\varphi_0(x,y)] \quad . \quad (2)$$

一般情况下,  $a(x,y), b(x,y), \varphi_0(x,y)$  的变化频率比  $f_0$  低得多,做  $x$  的快速傅里叶变换得

$$C(f,y) = A(f,y) + C(f-f_0,y) + C^*(f+f_0,y) \quad . \quad (3)$$

通过带通滤波的方法得到  $C(f,y)$ ,再对其作快速傅氏反变换得  $c(x,y)$ ,则可计算出相位分布为

$$\varphi_0(x,y) = \arctan\{\text{Im}[c(x,y)]/\text{Re}[c(x,y)]\} \quad . \quad (4)$$

当放入被测物体后,参考条纹图受到物体高度的调制,形成变形条纹图,在参考图 2 中,设  $\overline{AB}$  为  $s, \overline{CE}$  为  $t, \overline{OB}$  为  $m$ ,此时从摄像机得到的变形条纹图图像的光强可以表示为

$$I_1(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos(2\pi f_0 + \varphi_1(x,y)) \quad , \quad (5)$$

其中  $\varphi_1(x,y) = 2\pi f_0 m$ .

由式(4),(5)可以得到变形条纹图相对于参考条纹图的相位差为

$$\Delta\Phi(x,y) = \varphi_1(x,y) - \varphi_0(x,y) = 2\pi f_0 s \quad . \quad (6)$$

弹痕表面是一不规则的曲面,如图 2 所示.参考面 1 是平面,参考面 2 是无弹痕的头盔表面.曲面 3 是弹痕形成后实际的曲面.由图 2 可知,真正的弹痕深度信息是由参考面 2 和曲面 3 之间的位置决定.采用一般的测量方法时,弹痕深度与放置头盔的位置有很大关系,会引入较大的随机误差,不能准确地测量弹痕的实际轮廓.在测量弹痕实际深度时需要两个参考面,参考面 1 是一个平面,是用于系统标定;参考面 2 是同一类型头盔在弹着点区域无弹痕时的表面.设在参考面 1 上的相位是  $\varphi_0(x,y)$ ,参考面 2 上相位是  $\varphi_1(x,y)$ ,曲面 3 上相位是  $\varphi_2(x,y)$ ,则:  $\Delta\Phi_1(x,y) = \varphi_1(x,y) - \varphi_0(x,y), \Delta\Phi_2(x,y) = \varphi_2(x,y) - \varphi_0(x,y)$ .

参考面 2 到参考面 1 的距离为

$$h_1(x,y) = \frac{L \cdot s}{d + s} = \frac{L \cdot \Delta\Phi_1(x,y)}{2\pi f_0 d + \Delta\Phi_1(x,y)} \quad . \quad (7)$$

曲面 3 到参考面 1 的距离为

$$h_2(x,y) = \frac{L \cdot t}{d + t} = \frac{L \cdot \Delta\Phi_2(x,y)}{2\pi f_0 d + \Delta\Phi_2(x,y)} \quad . \quad (8)$$

由式(7),(8)得到弹痕实际的轮廓信息为

$$h(x,y) = h_2(x,y) - h_1(x,y) = \frac{L \cdot \Delta\Phi_2(x,y)}{2\pi f_0 d + \Delta\Phi_2(x,y)} - \frac{L \cdot \Delta\Phi_1(x,y)}{2\pi f_0 d + \Delta\Phi_1(x,y)} \quad . \quad (9)$$

在实际测量中,当系统的结构确定后,  $d, L, f_0$  都是一个常数,所以  $\varphi_0(x,y)$  可以看作是一个常数,只需

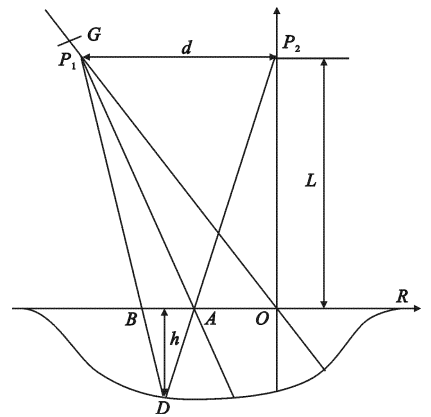


图 1 傅里叶变换轮廓术的光路图

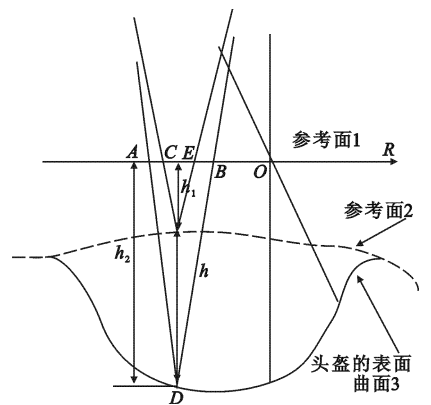


图 2 双参考面 FTP 法示意图

要计算一次,在程序中直接调用.在实际测量时只需要计算出  $\varphi_1(x,y)$ ,  $\varphi_2(x,y)$  就可以准确地测出弹痕的实际轮廓.在求解相位分布时采用傅里叶变换术(FTP)求得弹痕表面实际的相位分布.经过系统标定<sup>[5]</sup>最后求出弹痕的实际轮廓分布信息.虽然双参考面法增加了计算量,但最后求得的结果误差较小.

## 2 实验与结果分析

采用笔者提出的基于双参考面傅里叶轮廓术,对头盔上的弹痕进行了实际的测量.在图像采集系统中采用 MV-800 数字采集卡,KB760 CCD 拍摄条纹图.在实际弹痕测量过程中,参考面 2 的形状随着未形成弹痕的表面的不同而不同.拍摄未留弹痕时头盔表面条纹图作为参考条纹图,弹痕条纹图作为弹痕的变形条纹图,最后得到实际弹痕的三维轮廓.经过傅里叶变换法计算分别得到未留弹痕面相对于参考平面 1 的三维轮廓图 3(a),弹痕相对于参考平面 1 的三维轮廓图 3(b),弹痕相对于参考曲面 2 的三维轮廓图 3(c).

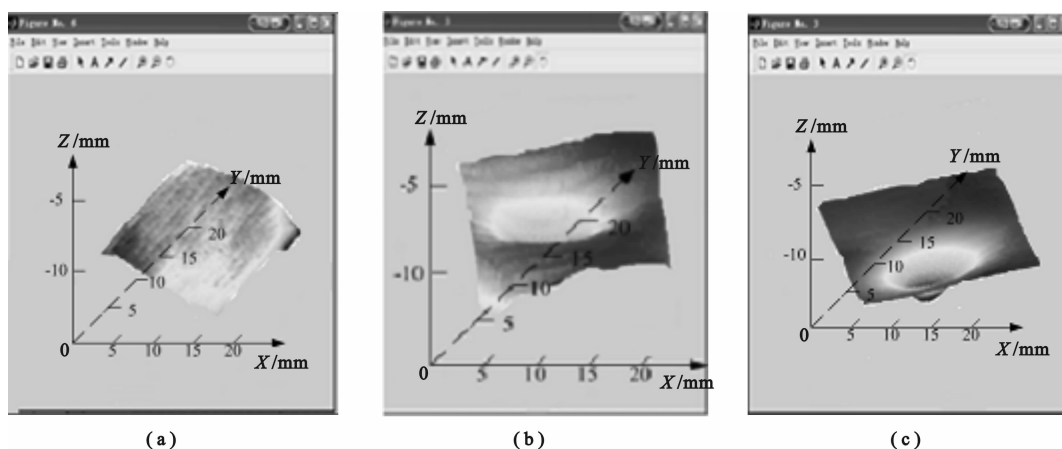


图 3 弹痕实际三维轮廓图

从测量结果可以看出,采用基于双参考面傅里叶轮廓术可以准确得到弹痕的三维轮廓.相比于单参考面法得到的三维轮廓更接近弹痕的实际分布.如图 3(b)所示,弹痕的轮廓和头盔离参考平面位置有很大的关系,在实际测量中带来较大的随机误差.采用笔者提出的方法,经过系统标定和实际弹痕深度的误差分析<sup>[6~9]</sup>,测量精度可以达到 0.1mm.在实际测量中把头盔放在支架上面,经过严格的定位措施,这样保证了未留弹痕的头盔的放置位置和留弹痕的头盔的位置保持一致.在分析实际弹痕测量误差时,在同一类型未留弹痕的头盔上面选择一些点,和弹痕相应点的高度相比较,在测量实际弹痕的深度时采用接触式直接测量的方法.比较结果见表 1.

表 1 实测与计算结果的比较

单位:mm

序号	X	Y	计算 Z 高度	实际弹痕高度	误差
1	0	0	-0.25	-0.36	0.11
2	1	1	-2.46	-2.63	0.27
3	2	2	-3.56	-3.82	0.26
4	3	3	-4.68	-4.93	0.25
5	15	15	-6.78	-7.03	0.25
6	16	16	-7.83	-7.66	0.13
7	20	20	-5.36	-5.06	0.30
8	20	25	-4.36	-4.64	0.28
9	22	22	-3.26	-3.00	0.26
10	13	13	-8.46	-8.50	0.05

由上面的数据可以得出,系统的误差在 0.3 mm 以内,平均误差是 0.216 mm.

### 3 结束语

针对头盔上的弹痕测量问题,提出了采用双参考面傅里叶轮廓术,获得了弹痕实际的三维轮廓信息,给出了该方法的理论基础和实际的弹痕三维轮廓测量实验结果.与传统测量方法相比采用该方法具有较高的准确性,可以推广到凹陷物体三维轮廓测量中.

#### 参考文献:

- [1] 李勇,苏显渝. 可获取彩色纹理的 PMP 三维测量系统[J]. 浙江师范大学学报,2006, 29(4): 37-41.
- [2] Takeda M, Mutoh K. Fourier Transform Profilometry for the Automatic Measurement of 3-D Object Shapes[J]. Appl Opt, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [3] Ikeda Y, Yoneyama S, Fujigaki M, et al. Absolute Phase Analysis Method for Three-dimensional Surface Profilometry Using Frequency-modulated Grating Society of Photo-optical Instrumentation Engineers [J]. Opt Eng, 2003, 42(5): 1249-1256.
- [4] 田爱玲, 蒋庄德, 黄梦涛, 等. 基于条纹投影的三维轮廓测量新方法[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 959-962.
- [5] Saldner H O, Huntley J M. Temporal Phase Unwrapping: Application to Surface Profiling of Discontinuous Objects [J]. Appl Opt, 1997, 36(13): 2770-2775.
- [6] 郑素珍, 陈文静, 苏显渝. 三维面形测量中小波变换和傅里叶变换的对比研究[J]. 激光杂志, 2006, 27(1): 48-50.
- [7] 许庆红, 钟约先, 由志福. 光栅投影轮廓测量的系统标定技术[J]. 光学技术, 2000, 3(26):126-129.
- [8] 丁洪萍, 李庆辉, 邹文艺. 实现横向超分辨率的位相型光瞳滤波器[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(3): 450-454.

(编辑: 齐淑娟)

---

(上接第 772 页)

- [2] Alpert C J, Yao S Z. Spectral Partitioning: the More Eigenvectors, the Better [J]. Discrete Applied Math, 1999, (90): 3-26.
- [3] Weiss Y. Segmentation Using Eigenvectors: a Unifying View [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision; 2. Washington: IEEE Computer Society, 1999: 975-982.
- [4] Verma D, Meila M. A Comparison of Spectral Clustering Algorithms [R]. Washington: University of Washington, 2003.
- [5] Ng A Y, Jordan M I, Weiss Y. On Spectral Clustering: Analysis and an Algorithm [C]//Advances in Neural Information Processing Systems; 14. Cambridge: MIT Press, 2002: 849-856.
- [6] Zhang B, Hsu M, Dayal U. K-harmonic Means—a Data Clustering Algorithm [EB/OL]. [2006-01-12]. <http://hpc.isti.cnr.it/~palmeri/datam/articles/HPL-1999-124.pdf>.
- [7] Fowlkes C, Belongie S, Chung F, et al. Spectral Grouping Using the Nystrom Method [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(2): 214-225.
- [8] Hu Z L, Guo D Z, Sheng Y H. Extracting Textural Information of Satellite SAR Image Based on Wavelet Decomposition [J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(6): 423-427.

(编辑: 齐淑娟)