

① 94.17(3) 1-6

大型物体测量中的付立叶变换轮廓法

FTP for the Measurement of Large 3-D object Shapes

江毅

Jiang Yi

黄尚廉

Huang Shanglian

陈伟民

Chen Weimin

(重庆大学光电精密机械研究所, 重庆, 630044)

王贞凯 ✓

Wang Zhenkai

胡章洪

Hu Zhanghong

(德阳东方电机厂工艺室)

TH741.5

A 摘要 介绍一种用付立叶变换轮廓法(FTP)来实现的大型物体表面轮廓测量系统。FTP用在较大视场、大面积测量时,能够达到的测量精度为3%,重复性精度为1%。

关键词 付立叶变换轮廓法; 大型三维物体; 轮廓测量

中国图书资料分类法分类号 TH741.5

傅里叶变换, FTP

ABSTRACT A large 3-D profilometer which is based on Fourier transform profilometry (FTP) is introduced in this paper. Higher measuring precision and repeatability precision can be obtained when FTP is used in large visual field and large scale condition.

KEYWORDS fourier transform profilometry(FTP); large 3-D object; profilometry

0 引 言

非接触测量三维物体表面轮廓在工业和现实生活中有着广阔的应用前景,引起了人们的广泛重视,提出了各种各样的测量方法。用投影光栅的方法是获取三维轮廓信息的一种简单而有效的手段。周期性的光栅投影到物体表面上,投影光栅象的位相就受到物体表面轮廓的调制,成为变形光栅象。摄像机拍摄到的变形光栅象是一幅2-D图象,但携带有3-D信息。解调出变形光栅象的位相就能提取出被测物体的高度轮廓信息。按解调的方法不同,提出了各种测量原理,如莫尔等高线法^[1,2],付立叶变换轮廓法(FTP)^[3],步进移相法^[4],空间相位探测法^[5]等。然而众多的测量方法都局限于实验室中,在工业和生活中的实际应用却很少,而用于大型三维物体轮廓测量的研究几乎未见报导。

然而,在工业中急需能够比较精确测量大型三维物体表面轮廓的装置系统,如飞机机翼、汽车外壳、水轮机叶片、导弹壳体、船体等,在其铸模或生产过程中,都需测量出其表面轮廓。

* 收文日期 1993-09-07

本课题受国家自然科学基金资助

实现大型三维非接触测量,必须解决好以下几个问题:

- 1) 在大视场、大面积测量中,如何用较少的光敏元达到较高的测量精度和分辨率。
- 2) 如何克服大视场光学系统引起的畸变。
- 3) 如何克服大视场测量中,由于光源波动、图像采集系统抖动造成的重复性不好。

在对比了各种测量原理后,选择了付立叶变换轮廓法(FTP)用于大型三维物体的轮廓测量,取得了较好的重要性精度和测量精度。

1 测量原理

图1是测量原理示意图。为了减小原始光栅象的变形,我们采用平行光轴结构,摄像机光轴与投影机光轴平行且都垂直于参考平面 R。参考面 R 为一实际的基准平台(基面),被测物置于基面上,光栅线放置方向垂直于两光轴所成的平面。设摄像机光轴与基面的交点 O 为原点,光栅象周期方向为坐标 x 方向,垂直于图 1 所示平面为 y 方向,摄像机轴向为高度 $h(x, y)$ 方向。

分别拍摄两幅光栅象:未放置被测物时的原始光栅象和放置被测物后的变形光栅象。投影光栅一般为矩形光栅,则基面上的原始光栅象可写为:

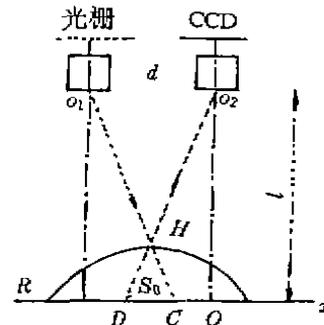


图 1 平行光轴结构

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \cdot \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\varphi_0(x, y)]\} \quad (1)$$

其中 $f_0 = 1/d_0$ 是基面上光栅象的空间频率, $\varphi_0(x, y)$ 是初始相位。平行光轴结构中,理想情况下,初相 $\varphi_0(x, y) = 0$ 。然而,在大视场、大面积测量中,光学系统畸变非常厉害,使得原始光栅象已经产生了变形,即 $\varphi_0(x, y) \neq 0$ 。

当被测物体置于基面上后,周期性的投影光栅的相位就受到物体表面轮廓的调制,成为变形光栅象,如图 1 中原始光栅象的 C 点就移相到了 D 点。变形光栅象可表示为:

$$g_1(x, y) = r(x, y) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \cdot \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\varphi_1(x, y)]\} \quad (2)$$

其中 $r(x, y)$ 是物体表面非均匀反射系数, $\varphi_1(x, y)$ 是变形光栅象的初相。

下面的处理都是沿 x 方向进行的,只需改变 y 值,就可以处理完整幅图象。分别对(1)、(2)两式沿 x 方向求付立叶变换,得其频谱为 $G_0(f, y)$ 、 $G_1(f, y)$,如图 2 所示。其中零级谱(直流低频成分)是由于光照非均匀和非均匀反射造成的,高次谐波 $2f_0, 3f_0 \dots$ 是由于投影为矩形光栅,存在高频分量。 f_0 是载频,携带有有用的相位信息。用一适合的 FIR 滤波器滤出载频信号(图 2 中的阴影部分),再求付立叶反变换,有:

$$\hat{g}_0(x, y) = A_1 \cdot \exp\{i[2\pi f_0 x + \varphi_0(x, y)]\} \quad (3)$$

$$\hat{g}_1(x, y) = r(x, y) \cdot A_1 \cdot \exp\{i[2\pi f_0 x + \varphi_1(x, y)]\} \quad (4)$$

(3) 式与(4)式共轭相乘:

$$\begin{aligned} \hat{g}_1(x, y) \cdot \hat{g}_0^*(x, y) &= r(x, y) \cdot A_1^2 \cdot \exp\{i[\varphi_1(x, y) - \varphi_0(x, y)]\} \\ &= r(x, y) \cdot A_1^2 \cdot \exp[i \cdot \Delta\varphi(x, y)] \end{aligned} \quad (5)$$

再取对数:

$$\ln[\hat{g}_1(x, y) \cdot \hat{g}_0^*(x, y)] = \ln[r(x, y) \cdot A_1^2] + i \cdot \Delta\varphi(x, y) \quad (6)$$

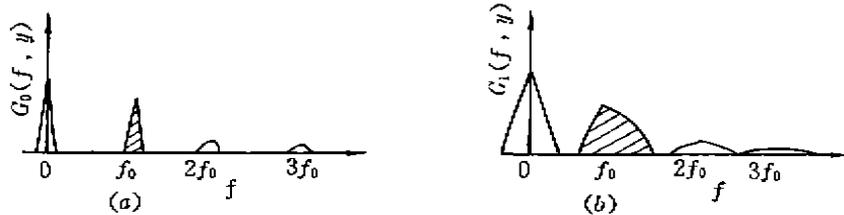


图 2 光栅函数谱

(6) 式的虚部 $\Delta\varphi(x, y)$ 就反映了纯粹由于物体高度轮廓引起的相移值, 它不受原始光栅象的初相 $\varphi_0(x, y)$ 的影响, 即克服了由于大视场光学系统畸变引入的误差。如对 D 点解相, 则 $\Delta\varphi(x, y)$ 就是 C 点到 D 点的相移:

$$\Delta\varphi(x, y) = \varphi_1(x, y) - \varphi_0(x, y) = 2\pi f_0 \cdot S_0(x, y) = 2\pi f_0 \cdot \overline{DC} \quad (7)$$

解调出 $\Delta\varphi(x, y)$ 后, 即可由(7)式求出 $S_0(x, y)$, 再由相似三角形 $\triangle DHC \sim \triangle O_2HO_1$, 有:

$$h(x, y) = \frac{S_0(x, y) \cdot l}{d + S_0(x, y)} = \frac{\Delta\varphi(x, y) \cdot l}{2\pi f_0 d + \Delta\varphi(x, y)} \quad (8)$$

$h(x, y)$ 即为物体表面到基面的高度轮廓。

由于光场波动和图象采集系统抖动主要影响到光栅信号的低频直流成分和高次谐波, 而对载频信号(一级谱)影响较小, 而 FTP 法只需要一级谱信号, 因此该测量方法能保证较高的重复性精度。

2 系统组成

图 3 是我们的整个测量系统框图。计算机输出控制信号, 控制投影系统将光栅投影到基面上, 摄像机拍摄后, 经图象卡(CA5300)转换为 $512 \times 512 \times 8 \text{ bit}$ 的图象矩阵存入计算机, 计算后显示并打印输出。

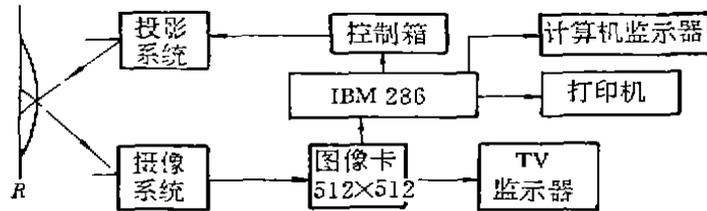


图3 测量系统框图

为了实现大视场、大面积三维测量,我们设计了独特的光学系统。图4是系统光路图,其中 $d = 500 \text{ mm}$, $l = 2100 \text{ mm}$ 。投影镜头与摄像镜头为同种型号,以减小测量误差,镜头视场角达 69° 。面阵CCD摄像机光敏元为 $512H \times 582V$,光栅为 10 线/mm 。3000 W的氙灯光源 S 发出的光经凹面镜会聚和平面镜反射,进入聚光镜,这里采用柯勒照明方式,将光栅经投影物镜投影到基面上。实际测量范围为 $2200 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$,简单地升高测头,还可增大测量范围。测定出图象矩阵中每个象素在水平方向与垂直方向代表的实际长度: x 方向为 4.4921 mm/象素 , y 方向为 4.1016 mm/象素 。

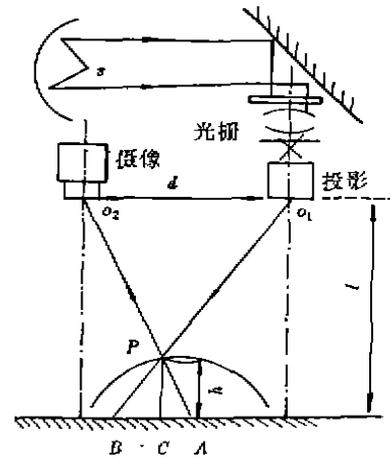


图4 光路图

由于大视场光学系统的畸变,使基面上原始光栅象的栅距最大为 27.40 mm ,最小为 26.33 mm ,平均值是 27.07 mm 。由于光源和摄像系统抖动,连续拍摄同样的光栅象2次,灰度值之差最大达22个灰度级。

3 测量结果

分别拍摄一幅原始光栅象和一幅变形光栅象,再按图5所示的流程计算出高度轮廓。

图6(a)所示为 $-768.5 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的平板倾斜一个角度,作为标准被测物用来检验测量系统。图6(b)是测量出的三维重建图象,图6(c)是旋转 180° 后的重建图象。图6(d)示出了一幅水轮机叶片的三维重建图象。

为了考察测量精度,我们把图6所示的平板的测量数据与实际数据对比如表1所示。其中测量数据是沿 x 方向的某一行数据,这里选用了第10行数据,横坐标则是每一象元点。由于被测平板为标准平板,因此实际平板的高度轮廓数据则是手工测量出平板的最低点和最高点后,由直线关系推出的每个象元对应的实际高度值。由于数据量较大,表1所列出的数据除最后一点外,都是每20个点取一个。

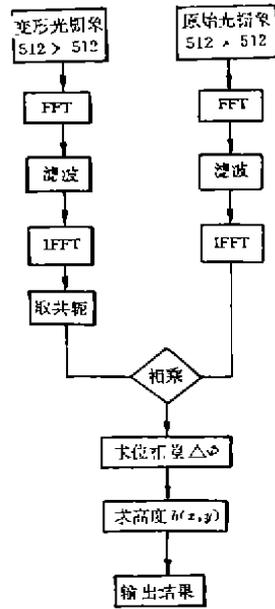
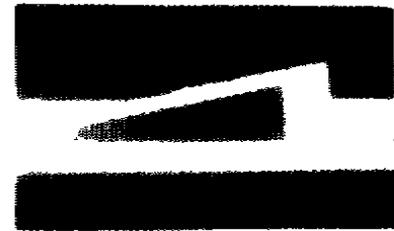
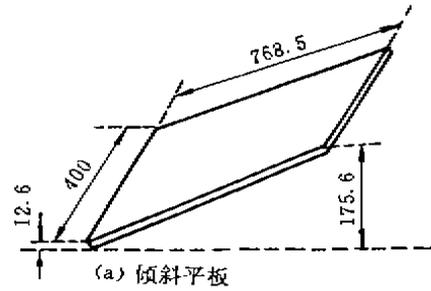


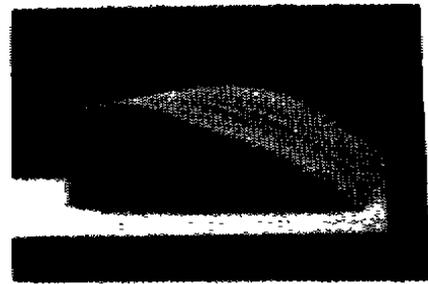
图 5 数据处理流程图



b) 三维重建图



c) 旋转 90° 的三维重建图



d) 叶片三维重建图

图 6 三维重建图

表 1 精度分析(y 坐标:第 40 行)

数组横坐标	1	21	41	61	81	101	117
测量值	13.93	40.73	67.43	94.97	122.53	151.12	176.38
实际值	12.60	40.46	68.33	96.19	124.05	151.92	175.60
绝对误差	1.33	0.27	-0.90	-1.22	-1.52	-0.80	0.78
引用误差(%)	1.33	0.27	-0.90	-1.22	-1.52	-0.80	0.78

对于精度的评价,在该大型三维测量系统中不能简单地引用相对误差的概念(相对误差 = 绝对误差 / 测得值),因为同样的绝对误差在同一次测量中的不同坐标处,得到的相对误差可以变化上 100 倍,这是与实际不符的。因此采用引用误差的概念:引用误差 = 示值误差 / 测量范围上限。本系统最大测量高度为 1000 mm。

为了考察系统的重复性,拍摄 8 幅同一原始光栅象和 8 幅同一变形光栅象,分别求出 8 个高度轮廓,再计算出 8 次测量的均方根误差 σ 值,如表 2 所示.表 2 中只截取了 512×512 矩阵中的一部分.

实际测量表明,本系统的测量精度优于 3‰,重复性精度优于 1‰.

表 2 均方根误差 σ (512×512 中的一部分) mm

	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
10	0.23	0.22	0.21	0.20	0.21	0.24	0.27	0.30	0.32	0.34	0.35	0.35
11	0.45	0.44	0.41	0.37	0.31	0.27	0.25	0.27	0.31	0.35	0.40	0.45
12	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.21	0.18	0.15	0.12	0.10	0.08
13	0.32	0.28	0.26	0.24	0.22	0.18	0.15	0.18	0.29	0.45	0.61	0.72
14	0.41	0.43	0.46	0.48	0.48	0.47	0.45	0.43	0.42	0.42	0.41	0.40
15	0.34	0.34	0.34	0.32	0.30	0.29	0.33	0.41	0.52	0.63	0.70	0.68
16	0.36	0.41	0.46	0.50	0.51	0.50	0.48	0.46	0.43	0.40	0.36	0.35

4 讨 论

在三维物体形状轮廓测量中,接触测量(如三坐标机)获取数据速度慢,对工作环境要求高,测量范围窄.用激光测距的方法一次只能测量一个点或一行数据,若测量整个面形,需要有精密的机械步进装置,且光学系统调整复杂.而采用投影光栅的方法能够有效地克服以上不足.因而付立叶变换轮廓法尤其适合于大型三维轮廓测量,它与其它投影光栅法相比,具有以下优点:

1) 它能用低位数的光敏元获得较高的测量精度与灵敏度.因 FTP 法是测量光栅的相位值,只要图象空间采样频率满足采样定理,就可以完整地提取出 3-D 信息,并能直接求出每个采样点所对应的高度轮廓.

2) 它能克服由于大视场引起的光学畸变,并能克服光学系统非理想造成的测量误差.因为畸变和非理想光学系统都可以归结为初相 $\varphi_0(x, y)$,而 FTP 法能有效地消除初相 $\varphi_0(x, y)$ 的影响.

3) 由于 FTP 法要提取出基频成分(载频),而滤除低频分量及高次谐波,因而受光源及图象采集系统的抖动影响较小,能够达到较高的重复性精度.

参 考 文 献

- 1 Meadows D M, Johnso W O, Allen J B. Generation of surface contours by Moire patterns. Appl Opt. 1970, 9(4), 942~947
- 2 Takasaki H. Moire topography. Appl. Opt. 1970, 9(7), 1467~1475
- 3 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. Appl. Opt. 1983, 22(22), 3977~3982
- 4 Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse object. Appl. Opt. 1984, 23(18), 3106~3108
- 5 Toyooka S, Iwaasa Y. Automated profilometry of 3-D diffuse object by spatial phase detection. Appl. Opt. 1986, 25(10), 1630~1633