

一种新的形貌检测系统标定技术

周灿林¹ 李方²

(1 山东大学物理与微电子学院, 济南 250061)

(2 中山大学生命科学院, 广州 510275)

摘要 形貌检测中,经相位解调和相位展开后,所求得的只是待测物体表面与参考面的相对相位分布,而三维形貌检测要测的是高度分布.在分析一般测试系统的基础上,推导出了相位与高度分布的非线性函数映射关系.设计了标定测试系统的实验方案.通过平移实物参考面,测得其上的相位分布,由平移距离与相位增量之间的关系,用最小二乘迭代法计算相位差与物体高度映射关系.最后,对一个实际测试系统进行了标定,并与 Hung 的标定方法进行了分析比较.理论和实验都表明,新方法精度高,操作方便,降低了标定复杂度.

关键词 形貌检测;相位分布;迭代法;映射关系;系统标定

中图分类号 TH741 O43 **文献标识码** A

0 引言

光学三维形貌测量在工业测量、机器视觉、逆向工程实物仿形、制鞋服装设计、生物医学等领域具有重要意义和广阔应用前景.国内外许多学者对此进行了大量卓有成效的研究^[1-7].目前人们对解相和相展开技术的研究相当深入,而对系统标定问题的研究不多.本文通过分析,推导了一般三维形貌测试系统装置情况下,相位差与物体高度映射函数关系,从映射关系可以看出,它依赖测试系统几何参数,但考虑到实际测量中要精确获取系统参数非常困难,文章提出了一套方便实用的标定方法.

1 基本原理

光栅投影轮廓测量系统根据摄像机光轴和投影装置光轴的空间位置不同,可分为相交轴系统和平行轴系统.以相交轴系统为例来分析.如图1, R 为参考平面, C 为摄像机镜头光心, P 为投影系统镜头光心, A 为被测物体上任一点,摄像机光轴与参考面 R 相交于点 o ,以 o 点为原点建立坐标系 $oxyz$,其中 x 轴与图面平行, y 轴与图面垂直, z 轴与摄像机光轴重合,光栅投影时的成像面为平面 I ,在平面 I 上,光栅投影为平行等间距条纹,设其节距为 p ,平面 I 实际上是被投影光栅的共轭象面.另外以 o 点为原点建立另一坐标系 $ox'y'z'$,使 $x'oy'$ 平面与 I 平面重合,并且 x' 轴与 I 面上条纹方向垂直, z' 轴与投影系统的光轴方向平行,设坐标系 $oxyz$ 可依次绕 x 轴、 y

轴、 z 轴旋转 α, β, γ 角度后与坐标系 $ox'y'z'$ 重合. B 、

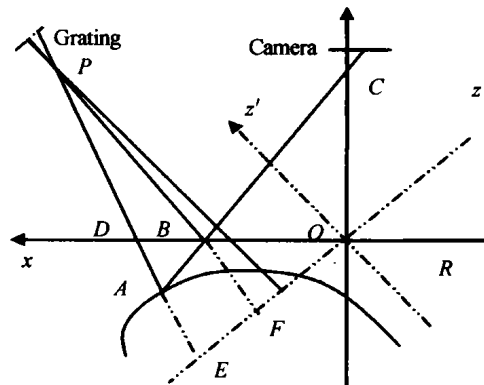


图1 投影栅系统图

Fig. 1 Geometry of Grating projection system

D 点分别是 A 点与两光心连线跟参考面的交点.又设 A, P, B 点在 $ox'y'z'$ 坐标系中的坐标分别为 $A(x'_A, y'_A, z'_A), P(x'_P, y'_P, z'_P), B(x'_B, y'_B, z'_B)$, B, A, C 三点在 $oxyz$ 坐标系中的坐标为 $B(x_B, y_B, z_B), A(x_A, y_A, -h), C(0, 0, z_C)$.由 BC 两点的坐标可以决定空间直线 AC ,于是我们可以得到用 B 和 C 两点坐标表示的 A 点坐标为

$$\begin{cases} x_A = x_B(h + z_C)/z_C \\ y_A = y_B(h + z_C)/z_C \end{cases} \quad (1)$$

A, B 两点在摄像机相面上重合,设 A, B 两点光栅条纹投影相位分别为 Φ_A, Φ_B ,两者相位差为 $\Delta\Phi$.由于参考面上 B 点与 I 平面上 F 点相位相同,物面上 A 点与 I 平面上 E 点相位相同,所以有

$$\Delta\Phi = \Phi_E - \Phi_F \quad (2)$$

由坐标系 $oxyz$ 与坐标系 $ox'y'z'$ 的旋转关系, A, B 两点在两坐标系下有如下变换关系

$$\begin{cases} x'_A = [x_B \cos \beta \cos \gamma + y_B (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)](h + z_C)/z_C - h(-\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma) \\ y'_A = [-x_B \cos \beta \sin \gamma + y_B (-\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma)](h + z_C)/z_C - h(\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma) \\ z'_A = [x_B \sin \beta - y_B \sin \alpha \cos \beta](h + z_C)/z_C - h \cos \alpha \cos \beta \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x'_B = x_B \cos \beta \cos \gamma + y_B (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) \\ y'_B = -x_B \cos \beta \sin \gamma + y_B (-\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) \\ z'_B = x_B \sin \beta - y_B \sin \alpha \cos \beta \end{cases} \quad (4)$$

由空间解析几何,已知 P, B 两点在坐标系 $ox'y'z'$ 中的坐标,可求得在 $ox'y'z'$ 下该直线方程为

$$\frac{x' - x'_P}{x'_B - x'_P} = \frac{y' - y'_P}{y'_B - y'_P} = \frac{z' - z'_P}{z'_B - z'_P} \quad (5)$$

类似可得 P, A 两点在坐标系 $ox'y'z'$ 中的直线方程为

$$\frac{x' - x'_P}{x'_A - x'_P} = \frac{y' - y'_P}{y'_A - y'_P} = \frac{z' - z'_P}{z'_A - z'_P} \quad (6)$$

又平面 I 的方程为

$$z' = 0 \quad (7)$$

由平面 I 与直线 \overline{PA} 、直线 \overline{PB} 交点 E, F 的坐标分别为

$$\begin{cases} x'_E = x'_P - \frac{(x'_A - x'_P)z'_P}{z'_A - z'_P} \\ y'_E = y'_P - \frac{(y'_A - y'_P)z'_P}{z'_A - z'_P} \\ z'_E = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x'_F = x'_P - \frac{(x'_B - x'_P)z'_P}{z'_B - z'_P} \\ y'_F = y'_P - \frac{(y'_B - y'_P)z'_P}{z'_B - z'_P} \\ z'_F = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由于 x' 轴与 I 面上条纹方向垂直,所以有

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi\pi(x'_E - x'_F)}{p} = \frac{2\pi\pi p}{p} \left[\frac{x'_B - x'_P}{z'_B - z'_P} - \frac{x'_A - x'_P}{z'_A - z'_P} \right] = \frac{ah}{1 + bh} \quad (10)$$

其中

$$b = \frac{x_B \sin \beta - y_B \sin \alpha \cos \beta - z_C \cos \alpha \cos \beta}{(x_B \sin \beta - y_B \sin \alpha \cos \beta - z'_P)z_C}$$

$$a = 2\pi z'_P \{ z'_P [x_B \cos \beta \cos \gamma + y_B (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)] - z_C (-\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma) + x'_P (-x_B \sin \beta + y_B \sin \alpha \cos \beta + z_C \cos \alpha \cos \beta) + z_C [x_B (-\cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma) - y_B \cos \beta \cdot \sin \gamma] \} / [pz_C (x_B \sin \beta - y_B \sin \alpha \cos \beta - z'_P)^2]$$

h 为待测物面上 A 点距离参考面的高度. 如果以 (i, j) 表示图像点的像素坐标,式(10)可以写成

$$\Delta\Phi = \frac{a(i, j)h(i, j)}{1 + b(i, j)h(i, j)} \quad (11)$$

由式(11)可知,对一般测试系统来说,相位差与物体高度之间的映射关系同时依赖于测试系统参数及待求点的横坐标,是一个复杂的非线性函数关系. 对于给定的测试系统,只要确定了 $a(i, j)$ 和 $b(i, j)$, 也就是确定了相位差与物体高度的映射关系. 因此可以按如下方法对系统进行标定:将一个可以精确控制移动的移动控制台置于测试范围内,将一平整参考面固定在移动台上(设此时 $z=0$),测出其上的位移分布 Φ_0 ,然后将参考面沿 Z 轴方向分别作 N 次平移,从控制台读取每次的平移量,同时测出与每次平移位置对应的相位分布. 假设第 n 次的平移量为 h_n ,对应的相位分布为 Φ_n . 又假设

$$\Delta\Phi_n(i, j) = \Phi_n - \Phi_0$$

对于图像面上的每个象素点 (i, j) ,可以得出如下的方程组

$$\begin{cases} a(i, j)h_1/[1 + b(i, j)h_1] = \Delta\Phi_1(i, j) \\ a(i, j)h_2/[1 + b(i, j)h_2] = \Delta\Phi_2(i, j) \\ \vdots \\ a(i, j)h_n/[1 + b(i, j)h_n] = \Delta\Phi_n(i, j) \\ \vdots \\ a(i, j)h_N/[1 + b(i, j)h_N] = \Delta\Phi_N(i, j) \end{cases} \quad (12)$$

对于式(12),只有 $a(i, j)$ 、 $b(i, j)$ 两个未知数,因此,当 $N=2$ 时,即只平移两次,就可完全确定 $a(i, j)$ 、 $b(i, j)$,但是考虑到在平移过程中存在平移误差,为提高精度,必须使 $N > 2$. 于是,式(12)成为一超定非线性方程组,它可由最小二乘迭代法求解. 将式(11)展开为一阶 Taylor 级数形式

$$\Delta\Phi = (\Delta\Phi)_e + \frac{\partial(\Delta\Phi)}{\partial a} \delta a + \frac{\partial(\Delta\Phi)}{\partial b} \delta b + o = \frac{a_e h}{1 + b_e h} + \frac{h \delta a}{1 + b_e h} - \frac{a_e h^2 \delta b}{(1 + b_e h)^2} + o \quad (13)$$

其中:下标 e 表示有误差的量, o 表示无穷小量. 由式(13)写出迭代过程. 其迭代求解步骤如下:

①假定迭代初始数值 $b^{(0)}(i, j) = 0$,则 $a^{(0)}(i, j)$ 可由如下线性方程组求得

$$a^{(0)}(i, j) \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \\ \vdots \\ h_N \end{pmatrix} = \Delta\Phi \quad (14)$$

其中: $\Delta\Phi = [\Delta\Phi_1(i,j), \Delta\Phi_2(i,j) \dots \Delta\Phi_n(i,j) \dots \Delta\Phi_N(i,j)]^T$

②计算出第 k 次迭代结果 $a^{(k)}, b^{(k)}$ 后, 将其代入式 (13) 线性方程组中, 可求得未知量 $\delta a^{(k+1)}, \delta b^{(k+1)}$, 于是可得第 $k+1$ 次迭代结果为

$$[a^{(k+1)}, b^{(k+1)}]^T = [a^{(k)}, b^{(k)}]^T + [\delta a^{(k+1)}, \delta b^{(k+1)}]^T \quad (15)$$

③重复第 2 步, 直到满足精度要求.

2 与其它方法的比较

Hung^[6]等采用的标定方法的公式为

$$\Delta\Phi = kh \quad (16)$$

为了标定相位差与高度之间的映射关系, 在标定时, 将待测物体沿 h 方向作一微小移动 δh , 测得与参考相位差的变化为 $\delta(\Delta\Phi)$, 从而得到

$$k = \frac{\delta(\Delta\Phi)}{\delta h} \quad (17)$$

由上面的公式 (11), 可得系数 k 的理论数值应该是

$$k = \frac{a}{1 + bh} \quad (18)$$

由式 (17) 和 (18) 可知, 用式 (17) 所测系数 k 的实际值是

$$k = \frac{\delta(\Delta\Phi)}{\delta h} = \frac{a}{(1 + bh)^2} \quad (19)$$

比较式 (18) 与 (19) 可知, 仅当参数 b 很小, 可忽略不计时, 实际测量值才与理论值相等. 由于 Hung

的标定方法没有考虑参数 b 带来的非线性影响, 因此有一定的系统误差. 从理论上说, 本文的系统标定方法应该是全面而完善的. 当然在实际标定操作中, 由于最精确的移动控制台也存在移动误差, 还有相位求解过程中所求得的相位也存在求解误差, 因此, 本文的标定方法不可避免是存在误差的. 但由于理论模型更趋完善, 使系统误差得以基本消除, 其存在的误差主要是实验过程中的随机误差.

3 实验测试

为了验证本方法的有效性, 用自建系统进行了实验, 系统硬件为 Epsone 液晶投影机、摄像机、图象卡、微机, 软件为作者用 visual C++ 语言自编的形貌测量图象处理软件. 变形光栅图象由图象卡采集并转为 256 级灰度数据文件, 然后由自编处理软件进行处理. 我们以一个半径为 50 mm 的球冠面具为测试对象, 对其表面进行了测量. 检测系统摄像机光心到参考面的距离 $l = 802.6$ mm, 投影系统光心与摄像机光心连线的长度 $d = 153.8$ mm, 投影系统光心和摄像机光心连线与参考面的夹角 $H = 8.26^\circ$, 栅线节距 8 line/mm. 分别用本文方法与 Hung 的方法进行实验, 图 2 为所测得的球冠过球心某一截面高度分布情况. 不难看出, 本文的方法误差较小.

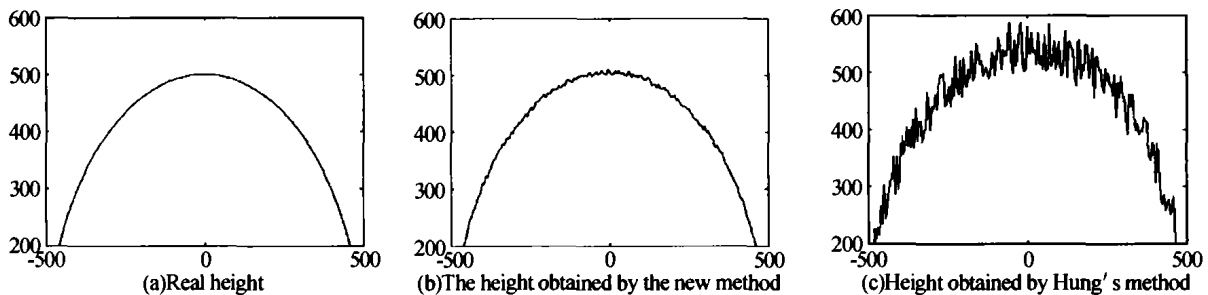


图 2 球冠横截面高度图
Fig. 2 Cross-section digram

4 结论

本文针对形貌测试中相位与高度映射关系问题, 分析推导出了一般测试系统的相位与高度映射函数关系. 通过对实物参考面控制作精确已知位移的平移, 测得其对应相位, 用迭代法求取映射关系. 分析和实验表明, 新方法精度高, 操作方便, 降低了系统标定复杂度.

参考文献

1 Frank C, Gorden M B, Mumin S. Overview of three-dimensional shape measurement using optical method. *Opt Eng*, 2000, **39**(1): 10 ~ 22

2 Takeda M, Ina H, Kpbayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and the interferometry. *J Opt Soc Am*, 1982, **72**(1): 156 ~ 160
 3 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes. *Appl Opt*, 1983, **22**(24): 3977 ~ 3982
 4 周灿林. 相位锁定循环投影技术及其应用. *光子学报*, 2000, **29**(2): 157 ~ 160
 Zhou C L. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(2): 157 ~ 160
 5 翁嘉文, 钟金钢. 加窗傅里叶变换在三维形貌测量中的应用. *光子学报*, 2003, **32**(8): 993 ~ 996
 Weng J W, Zhong J G. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 993 ~ 996

- 6 Hung Y Y, Lin L, Shang H M, *et al.* Practical three-dimensional computer vision techniques for surface measurement. *Opt Eng*, 2000, **39**(1):143 ~ 149
- 7 赵焕东,李志能,陆建刚. 凯泽-贝塞尔窗在傅里叶变换轮廓术中的应用. 光子学报,2001,**30**(8):1028 ~ 1032
- Zhao H D, Li Z N, Lu J G. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(8):1028 ~ 1032

A Novel Calibration Technology in Profilometry

Zhou Canlin¹, Li Fang²

¹ School of Physics and Microelectronics, Shandong University, Jinan 250061

² School of Life Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275

Received date:2004-02-23

Abstract It is only the relative phase distribution between the tested object and reference plane that is attained after phase demodulation and phase unwrapping in profilometry. However, the objective of 3D shape measurement is to obtain the object's height distribution. The nonlinear mapping relationship of both phase and height is analysed and deduced in a general experimental setup. The calibration scheme is designed. When the reference plane is shifted, its corresponding phases have been measured. According to the shifted distance and the phase increment, the mapping relationship between phase difference and depth of the object can be determined by the least square interactive method. Finally, a practical experimental system is calibrated and compared with Hung's method. The experimental results and theoretical analysis show that the new method is characterized by the high accuracy, easy to handle, lower the complexity of calibration.

Keywords Shape measurement; Phase distribution; Iterative algorithm; Mapping relationship; System calibration



Zhou Canlin was born in Hunan Province, China, he took his M. S. degree in solid mechanics from Shandong University of Technology in 1994. Since 2000, he was associate professor and a tutor of postgraduate in Shandong University. Currently, he has been a Ph. D. candidate in Department of Mechanics, Tianjin University. His main research fields include optical non-destructive measurement, digital image processing, mechanics measurement technique.