

文章编号: 1001-3806(2010)05-0600-03

采用虚拟标准平面标定相位测量轮廓术系统

张海花¹, 李勇¹, 张海燕², 王江³

(1. 浙江师范大学 信息光学研究所, 金华 321004; 2. 天津职业大学, 天津 300402; 3. 军事交通学院 汽车工程系, 天津 300161)

摘要: 为了标定相位测量轮廓术系统中相位-高度映射关系, 引入了虚拟标准平面。基于投影是摄像的逆过程这一事实, 从摄像机模型出发, 使用统一的数学模型和平面靶标来标定出摄像机和投影仪的内部、外部参量。再由双目视觉中的立体标定方法得出测量系统的几何结构。最后根据标定得到的参量, 在测量体积内设置参考平面并计算得出参考平面及不同高度上平行于参考平面的各标准平面上的相位分布。利用最小二乘法求解相位-高度映射方程系数。实验测量的标准差达到0.046mm。对间距为1.00mm的台阶模型进行测量, 实际测得间距为0.99mm。结果表明, 该方法可行, 简化了相位测量轮廓术系统标定过程。

关键词: 信息光学; 相位测量轮廓术; 虚拟标准平面; 系统标定; 结构光照明; 相位-高度映射

中图分类号: O438; TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.007

Calibration of PMP system using virtual planes

ZHANG Hai-hua¹, LI Yong¹, ZHANG Hai-yan², WANG Jiang³

(1. Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. Tianjin Professional College, Tianjin 300402, China; 3. Department of Automotive Engineering, Military Traffic Institute, Tianjin 300161, China)

Abstract: In order to calibrate the coefficients of phase-height mapping equation in phase measuring profilometry (PMP) systems, virtual planes were introduced. Firstly, the intrinsic and extrinsic parameters of camera and projector were calibrated with uniform mathematics model and processing method, as a projector could be considered as a camera working in reverse. Secondly, geometric construction of the measurement system was calibrated by means of stereovision method. Thirdly, a reference plane was defined in the measuring volume. Phase distribution of reference plan and parallel standard planes at different distances from the reference plan was worked out according to the calibrated parameters. Finally, the coefficients of phase-height mapping equation were obtained with least square method. The standard deviation of measurement reached 0.046mm. A model consists of four steps with space of 1.00mm was also measured. The measured average height between neighbor steps was 0.99mm. The experiment results reveal that the method is feasible. The procedure of system calibration is simplified.

Key words: information optics; phase measuring profilometry; virtual plane; system calibration; structured illumination; phase-height mapping

引言

目前, 基于结构光照明的光学3维传感技术已被广泛应用于产品质量检测、物体识别、虚拟现实、文物修复等领域^[1-3]。其中相位测量轮廓术^[4] (phase measurement profilometry, PMP) 具有全场检测、测量精度高、速度快等优点, 是当前的研究热点之一。PMP的基本结构由一套相移条纹投影系统和光电图像传感

器组成。投影系统投射相移正弦光栅到漫反射被测物体表面, 再用光电图像传感器从另一个视角拍摄受到物体面形调制而形成的变形光栅。用相移法求解光栅相位, 然后通过相位-高度映射关系得到物体表面高度、面内映射关系得到横向坐标。实际测量中, 相位-高度映射关系及面内映射关系均通过标定测量系统来建立。通常需要3维标定装置, 如采用精密平移台, 带动标准平面在测量体积内移动若干位置进行标定^[5]或设计特制的3维靶标进行标定^[6]。这些方法对设备的要求比较高, 不适合做现场标定。ZHANG^[7]提出利用平面靶标来标定摄像机, 只需从不同角度观察平面靶标, 靶标的摆放情况约束很少, 这种方法减少了实际操作中的复杂度。本文中投影系统看作反向工作的摄像机, 采用ZHANG的方法对摄像机和投影仪进行标

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60702078); 浙江师范大学青年基金资助项目(KJ20090128)

作者简介: 张海花(1983-), 女, 助理工程师, 主要研究方向为3维传感技术。

E-mail: haihua@zjnu.cn

收稿日期: 2009-07-13; 收到修改稿日期: 2009-09-20

定。然后采用虚拟标准平面来标定 PMP 系统的相位-高度映射关系,在保证精度的同时降低了标定操作的复杂度。给出了标定方法的原理、过程及实验结果。

1 标定原理

1.1 摄像机模型

摄像机的数学模型如图 1 所示,其中, X_w - Y_w - Z_w

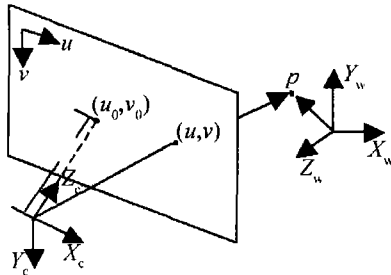


Fig. 1 Model of camera

为测量系统坐标系, X_c - Y_c - Z_c 为摄像机坐标系, u - v 为图像坐标系。测量系统坐标系中的一个点 $p(X_w, Y_w, Z_w)$ 在摄像机坐标系中的坐标可以表示为:

$$[X_c \ Y_c \ Z_c]^T = \mathbf{R}[X_w \ Y_w \ Z_w]^T + \mathbf{T} \quad (1)$$

式中, \mathbf{R} 为测量系统坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵, \mathbf{T} 为两者之间的平移向量。

实际摄像机的镜头存在畸变^[8], 主要有径向畸变和切向畸变。摄像机的径向畸变 $\delta_{x,r}, \delta_{y,r}$ 可表示为:

$$\begin{cases} \delta_{x,r}(x, y) = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ \delta_{y,r}(x, y) = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $x = X_c/Z_c, y = Y_c/Z_c, r^2 = x^2 + y^2, k_1, k_2, \dots$ 为径向畸变系数。

摄像机的切向畸变 $\delta_{x,t}, \delta_{y,t}$ 可以表示为:

$$\begin{cases} \delta_{x,t}(x, y) = 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ \delta_{y,t}(x, y) = p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{cases} \quad (3)$$

式中, p_1, p_2 为切向畸变系数。

考虑摄像机的畸变后, p 点在归一化摄像机坐标系中的实际坐标可以表示为:

$$\begin{cases} x_d = x + \delta_{x,r}(x, y) + \delta_{x,t}(x, y) \\ y_d = y + \delta_{y,r}(x, y) + \delta_{y,t}(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

经过透视变换, 可得到 p 点在图像坐标系中的坐标:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 f_u, f_v 分别为 u, v 方向的归一化焦距, s 为坐标轴的倾斜因子, (u_0, v_0) 为主点的图像坐标。

在 PMP 测量中, 由 u - v 坐标求 X_w - Y_w - Z_w 坐标, 这是一个后向投影问题。由于畸变模型(2)式、(3)式两式为非线性方程, 一般无法直接反求出 x, y 。因此需要借助于其它方法, 常用的有叠代法、多项式近似方法

等, HEIKKILA 采用了下式计算^[9]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{G} \begin{bmatrix} x_d(1 + a_1 r_d^2 + a_2 r_d^4) + 2a_3 x_d y_d + a_4(r_d^2 + 2x_d^2) \\ y_d(1 + a_1 r_d^2 + a_2 r_d^4) + a_3(r_d^2 + 2y_d^2) + 2a_4 x_d y_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $G = (a_5 r_d^2 + a_6 x_d + a_7 y_d + a_8) r_d^2 + 1; r_d^2 = x_d^2 + y_d^2; a_1, a_2, \dots, a_8$ 为后向投影畸变系数。

1.2 相位-高度映射关系标定

采用虚拟标准平面来标定相位-高度映射关系。首先投影水平和垂直两套正交的正弦条纹到标定靶标上, 以条纹的相位作为投影仪图像坐标, 用 ZHANG^[7] 的方法对投影仪和摄像机进行标定, 标定过程见图 2。

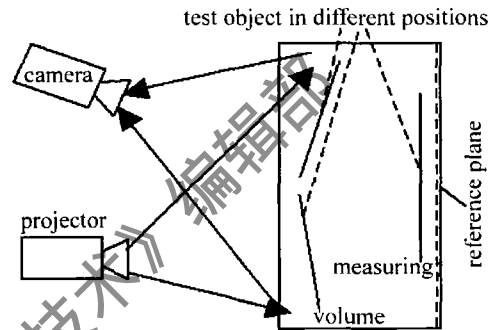


Fig. 2 Sketch map of calibration

此方法的基本思想是, 假设摄像机内参量是常数, 将平面靶在测量体积内摆放若干位置, 对每个标定平面估计出它到摄像机图像坐标的变换矩阵(内参量和外参量的混合矩阵)。然后利用旋转矩阵的正交性, 通过超过两个不同位置标定平面的变换矩阵构造求解内外参量的线性方程组, 解出摄像机的内外参量。最后通过优化算法得到畸变参量和优化后的内外参量。在得到投影仪与摄像机参量后, 采用立体标定方法得到摄像机和投影仪位置关系, 再定义系统坐标系, 最后根据这些参量计算出虚拟标准平面上的相位分布, 标定相位-高度映射关系。虚拟标准平面上的相位分布计算如下。

当摄像机相对于测量系统坐标系的位置参量 $\mathbf{R}_c, \mathbf{T}_c$ 已知时, 对于摄像机图像平面上 (u_c, v_c) 点, 根据(5)式、(6)式两式计算出 (x, y) , 代入(1)式得:

$$[xZ_c \ yZ_c \ Z_c]^T = \mathbf{R}_c [X_w \ Y_w \ Z_w]^T + \mathbf{T}_c \quad (7)$$

对于系统坐标系中某一高度 Z_w , 将上式整理后可得:

$$\begin{bmatrix} Z_c \\ X_w \\ Y_w \end{bmatrix} = \mathbf{B}^{-1} \begin{bmatrix} T_{c1} + R_{c13}Z_w \\ T_{c2} + R_{c23}Z_w \\ T_{c3} + R_{c33}Z_w \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{式中, } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} x & -R_{c11} & -R_{c12} \\ y & -R_{c21} & -R_{c22} \\ 1 & -R_{c31} & -R_{c32} \end{bmatrix} \circ$$

在求出与 (u_c, v_c) 对应的某一高度为 Z_w 的标准平面上点的系统坐标 (X_w, Y_w) 后,再根据投影仪在系统坐标系中的位置参量 R_p, T_p ,由(1)式~(5)式得到与 (u_c, v_c) 点及 Z_w 对应的投影仪图像平面上点的坐标 (u_p, v_p) 。在标定时,采用光栅的相位表示投影仪图像坐标,通过上述计算就可以得到相应虚拟标准平面上的相位分布。

2 实验过程及结果

2.1 测量系统参量

采用TDP-FF1A型LCD投影仪、CM-200 MCL型摄像机和计算机搭建了PMP系统。投影的相移条纹周期为16像素,采用五步相移法求解靶标各点相位。系统的测量体积为 $200\text{mm} \times 300\text{mm} \times 150\text{mm}$ 。选用棋盘格做标定靶标。由于黑白方块的交界处存在边缘效应,黑色方块中条纹调制度低,顶点和黑色方块中得到的相位值不精确。在标定投影仪和立体标定过程中,选白色方格的中心点作为特征点。使用的相位高度映射关系为^[10]:

$$\Delta h(u, v) = \sum_{i=0}^N k_i(u, v) \Delta \varphi_{p,d}^i(u, v) \quad (9)$$

式中, $\Delta \varphi_{p,d}$ 为相对相位。

2.2 实验结果

PMP测量系统各项未知参量的标定结果如下。投影仪参量:归一化焦距 $f_c = [592.86448 \quad 590.98389]$;主点坐标 $c_c = [153.99772 \quad 255.02316]$;投影仪畸变参量: $k_1 = -0.10331; k_2 = 0.09416; p_1 = -0.00403; p_2 = -0.00162$;摄像机参量:归一化焦距 $f_c = [3689.21462 \quad 3685.92825]$;主点坐标 $c_c = [806.80824 \quad 521.91644]$;摄像机畸变参量: $k_1 = -0.13450; k_2 = 0; p_1 = -0.00170$;测量系统外部参量:摄像机相对投影仪的旋转矢量 $om = [-0.07276 \quad 0.30884 \quad 0.00473]$;摄像机相对投影仪的平移矢量 $T = [-163.63067 \quad 101.72711 \quad 209.50671]$ 。

首先在标定后的PMP系统测量体积内倾斜放置一个标准平面进行测量。由测量结果拟合得到的平面如图3所示,图4为 z 方向上实际测量值与拟合平面

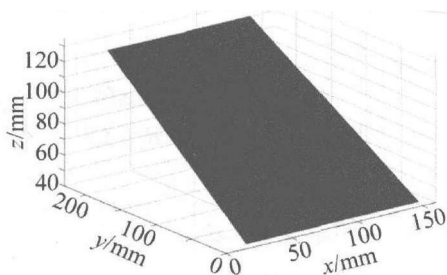


Fig. 3 Measurement result of plane

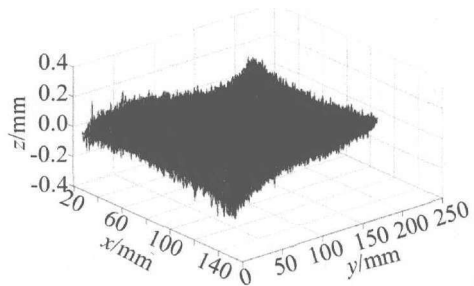


Fig. 4 Error distribution of the plane

的误差分布,标准偏差为 0.046mm 。然后对一个标准的台阶模型进行测量,该模型的左侧是多个平行平面,相邻平面之间的间距均为 1.00mm ,右侧为一斜面。图5为该模型的重构结果,测量得到相邻平面距离为 0.99mm 。

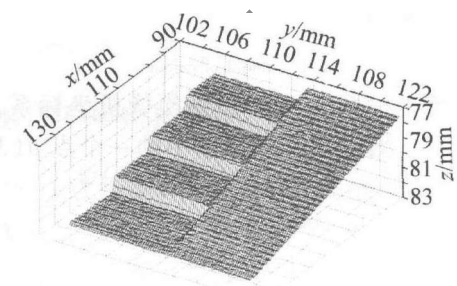


Fig. 5 Measurement result of model

3 结论

系统标定是PMP的关键技术之一。一般情况下需要引入高精度平移台等设备来标定。作者将投影仪看成反向工作的摄像机,利用ZHANG的方法^[7]标定摄像机和投影仪的参量,提出虚拟标准平面的概念,标定出摄像机图像平面各点处的相位-高度映射方程系数。采用该方法可以大大降低PMP系统标定的复杂度及标定靶标的制作难度。参考平面是根据系统参量计算出来的理想平面,因此,避免了参考平面的测量噪声对测量精度的影响。

参考文献

- [1] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. Opt Engng, 2000, 39(1):10-22.
- [2] BLAIS F. Review of 20 years of range sensor development[J]. Journal Electron Imaging, 2004, 13(1):231-240.
- [3] MA L H, WANG H, LI Y, et al. 3-D rebuilding based on numerical reconstruction of the hologram[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(4):595-598(in Chinese).
- [4] YONEYAMA S, MORIMOTO Y, FUJIGAKI M, et al. Phase-measuring profilometry of moving object without phase-shifting device[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003, 40(3):153-161.
- [5] ZHOU W S, SU X Y. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry[J]. Journal of Modern Optics, 1994, 41(1):89-94.

- laser irradiation[J]. *J Phys*,2000,D33(5):492-497.
- [2] SEMAK V V, BRAGG W D, DAMKROGER B, *et al.* Transient model for the keyhole during laser welding[J]. *J Phys*,1999,D32(15):61-64.
- [3] GONG Sh L, YAO W, LI S. Porosity formation mechanisms and controlling technique for laser penetration welding aluminum alloy[J]. *Transaction of the China Welding Institute*,2009,30(1):59-62(in Chinese).
- [4] KATAYAMA S, KOBAYASHI Y, MIZUTANI M, *et al.* Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding[J]. *Journal of Laser Applications*,2001,13(5):187-192.
- [5] ZHANG X H, ZHANG X D, CHEN W Zh, *et al.* Prevention and mechanical analysis of porosity formation in pulsed CO₂ laser welding of 30CrMnSiA[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 419-422(in Chinese).
- [6] LI L Q, CHEN Y B, TAO W. Research on dual-beam welding characteristic of aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2008,35(11):1783-1788(in Chinese).
- [7] QIN G L, LIN Sh Y. Radial dimension of keyhole and its dynamic characteristics in laser deep penetration welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(4): 557-561(in Chinese).
- [8] KAPLAN A F, MIZUTANI M, KATAYAMA S, *et al.* On the mechanisms of pore formation during laser spot welding[J]. *Proc SPIE*, 2003,4831:186-191.
- [9] KAPLAN A F, MIZUTANI M, KATAYAMA S, *et al.* Unbounded keyhole collapse and bubble formation during pulsed laser interaction with liquid zinc[J]. *J Phys*,2002,D35(2):1218-1228.
- [10] KAR A, ROCKSTROH T, MAZUMDER J. Two-dimensional model for laser-induced materials damage: effect of assist gas and multi-reflections inside the cavity [J]. *J A P*,1992,71(6):2560-2569.
- [11] MILEWSKI J, SKLAR E. Modeling and validation of multi-reflections for enhanced laser welding[J]. *Modelling and Simulation in Material Science Engineering*,1996,4(3):305-332.
- [12] SOLANA P, NEGRO G. A study of effect of multi-reflections on the shape of the keyhole in laser processing of materials[J]. *J Phys*, 1997,D30(23):3216-3222.
- [13] FABBRO R, CHOUF K. Keyhole modeling during laser welding [J]. *J A P*, 2000, 87(9):4075-4083.
- [14] GANOR J, LASAGA A C, WEI P, *et al.* Beam focusing characteristics effect on energy reflection and absorption in a drilling or welding cavity of paraboloid of revolution[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,1998,41(21):3299-3308.
- [15] JIN X Zh, LI L J, ZHANG Y. A study on Fresnel absorption and reflections in the keyhole in deep penetration welding[J]. *J Phys*, 2002,D35(18):2304-2310.
- [16] KI HYUNSON, MOHANTY P, MAZUMDER J. Multi-reflection and its influence on keyhole evolution [J]. *Journal of Laser Applications*,2002,14(1):39-45.
- [17] CHO J, NA S. Implementation of real-time multiple reflections and Fresnel absorption of laser beam in keyhole[J]. *J Phys*,2006,D39(24):5372-5378.
- [18] OSHER S, SETHIAN J A. Front propagation with curvature-dependent speed; algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. *Journal of Computational Physics*,1988,79(1):12-49.

(上接第602页)

- [6] SU X Y, SONG W Z, CAO Y P, *et al.* Phase-height mapping and coordinate calibration simultaneously in phase-measuring profilometry [J]. *Opt Engng*,2004,43(3):708-712.
- [7] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [8] ZHANG J, ZHU D Y, JIA X D. Camera lens distortion calibration with co-line points[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2):221-224(in Chinese).
- [9] HEIKKILA J, SILVEN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]//*Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington D C: IEEE Computer Society,1997:1106-1112.
- [10] LI Y, SU X Y, WU Q Y. Accurate phase-height mapping algorithm for PMP[J]. *Journal of Modern Optics*, 2006, 53(14):1955-1964.