

文章编号: 0253-2239(2008)03-0482-05

# 基于无约束系统的结构光三维测量方法

吴迪<sup>1,2</sup> 吕乃光<sup>2</sup> 欧阳京<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876  
<sup>2</sup> 北京信息科技大学光电信息与通信工程学院, 北京 100085)

**摘要** 针对传统结构光系统进行三维测量时,要求满足双瞳平行于参考平面和摄像机光轴垂直于参考平面这两个强约束条件,建立了新的系统结构,去除了平行和垂直的约束,摄像机和投影仪位置可自由摆放。基于该无约束系统结构,提出了一种新的系统标定方法,通过重建“投影仪-摄像机-参考平面”三者的空间关系,可以简便而精确地获取传统“高度-相位”公式中参量:双瞳的距离和摄像机到参考平面距离;同时,推导了无约束系统结构下新的物相关系方程和高度计算公式。实物测量结果证明,基于无约束系统的结构光三维测量方法可操作性强,测量精度可达0.1 mm。

**关键词** 光学测量; 结构光; 物相关系; 系统标定; 无约束系统

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A

## A Structured Light Three-Dimensional Measurement Method Based on Unconstrained System Configuration

Wu Di<sup>1,2</sup> Lü Naiguang<sup>2</sup> Ouyang Jing<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China  
<sup>2</sup> School of Optoelectronic Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100085, China)

**Abstract** In the most conventional structured light system, the camera must be perpendicular to the reference plane, and the connecting line between the exit pupil of the projecting system and the entrance pupil of the camera must be parallel to reference plane. Aiming at this problem, an unconstrained system configuration is built up, and the parallel and perpendicular constrained conditions are removed. A camera and a fringe projector consisting of the system can be posed freely depending on the objects and the purpose. Based on aforementioned unconstrained system, a new calibration method is presented. In the method, the spatial relationship of “projector-camera-reference plane” can be calibrated and reconstructed accurately, and therefore the important parameters—distance of two pupils and distance from camera to reference plane in the conventional structured light system can be obtained easily. Meanwhile, the new phase-height mapping relationship and height calculating formulas corresponding to the unconstrained system are derived. The experimental results prove that this method can obtain a range data in the accuracy of error about 0.1 mm.

**Key words** optical measurement; structured light; phase-height mapping relationship; system calibration; unconstrained system

## 1 引 言

在现代光信息处理技术中<sup>[1~3]</sup>,主动结构光轮

廓测量技术是一种非接触的三维测量方法,基本原理是利用三角法获取被测物体的高度。为了得到反

收稿日期: 2007-05-11;收到修改稿日期: 2007-09-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(50475176, 50675015)、北京市自然科学基金/北京市教委科技发展计划重点项目(KZ2200511232019)、北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目(PXM2007-014224-044674)、北京市教委科技面上项目(KM200611232004)和北京市重点实验室(机电系统测控)开放课题(82063011)资助课题。

**作者简介:** 吴迪(1979—),男,辽宁人,博士研究生,主要从事三维视觉测量和图像处理等方面的研究。

E-mail: sy\_wudi@163.com

**导师简介:** 吕乃光(1944—),男,安徽人,博士生导师,主要从事三维视觉测量和光信息处理等方面的研究。

E-mail: nglv2002@yahoo.com.cn

映物体高度变化的信息,一般向物体投射具有一定结构的光模型,结构光场由于受物体高度的调制而发生形变,高度的变化就反映在变形光场的相位变化中。通过解调出代表高度信息的相位并进行相位展开,就可获取到物体的高度信息,如目前已较为成熟的傅里叶轮廓术<sup>[4~7]</sup>。测量系统的标定和相位解包裹技术是影响结构光测量精度的两个主要因素。在传统的系统结构中,要求摄像机入瞳和投影设备出瞳的连线平行于参考平面,并且摄像机光轴要垂直于参考平面,同时双瞳的距离以及摄像机到参考平面的距离也要求预先精确测量。但在实际操作过程中,这些条件不容易实现,主要体现在:标定过程操作复杂,往往需要花费大量时间和精力;标定精度低,干扰因素不易控制,有时甚至需要精密的仪器辅助标定。因此,不可避免地增加了测量成本,引入了标定误差。

针对传统结构的弊端,毛先富等<sup>[8]</sup>提出去掉平行度约束,但仍保持垂直度的方法。本文提出同时去掉平行度和垂直度约束条件下新的系统标定方法,并推导了相应的物相关系方程和高度计算公式。

## 2 系统标定

### 2.1 摄像机标定

摄像机标定<sup>[9]</sup>包括确定摄像机内部几何和光学特性(内部参量)、摄像机对于世界坐标系的位置和方向(外部参量),步骤如下:

首先,将标准的平面模板贴附在参考平面上,参考平面固定于能精确控制的位移台上,并垂直于位移台的移动方向。定义位移台的平移方向为世界坐标系的  $Z$  方向。此时的参考平面位置为世界坐标系的  $X-Y$  平面,即  $Z=0$  平面,坐标原点可任选其中一个角点,如图 1 所示。然后控制位移台等间距向前平移 2~4 次,并在每次平移后拍摄一张方格图

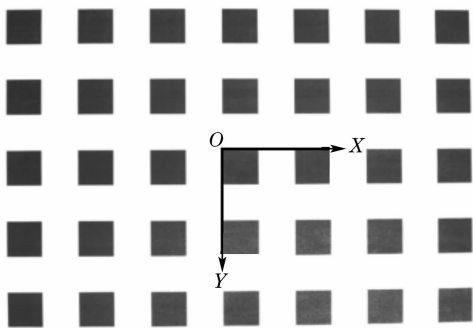


图 1 标定靶

Fig. 1 Calibration target

像,利用 Harris 算子<sup>[10]</sup> 求取每幅图像的方格角点图像坐标  $p(u, v)$ 。通过构建空间立体靶标并定义了世界坐标系,这样任意角点的精确空间三维坐标  $P(X, Y, Z)$  和图像坐标  $p(u, v)$  均已知。

其次,在不考虑畸变的情况下,利用物空间三维坐标系到计算机图像二维坐标系的直接线性变换(DLT)关系确定投影矩阵  $M$ :

$$\begin{cases} u_i m_{34} = X_{ui} m_{11} + Y_{ui} m_{12} + Z_{ui} m_{13} + m_{14} - \\ \quad u_i X_{ui} m_{31} - u_i Y_{ui} m_{32} - u_i Z_{ui} m_{33}, \\ v_i m_{34} = X_{ui} m_{21} + Y_{ui} m_{22} + Z_{ui} m_{23} + m_{24} - \\ \quad v_i X_{ui} m_{31} - v_i Y_{ui} m_{32} - v_i Z_{ui} m_{33}, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $u_i$  和  $v_i$  为第  $i$  个图像点的横纵坐标;  $m_{rc}$  代表  $3 \times 4$  的投影矩阵  $M$  的第  $r$  行第  $c$  阵元素。

最后,通过对  $M$  矩阵进行分解<sup>[11]</sup>,获取摄像机的全部内外参量,并以此作为初值,利用 Levenberg-Marquardt 算法<sup>[12]</sup>进行参量优化,得到最优解,其中还包括径向畸变系数  $K_1, K_2$ , 离心畸变系数  $P_1, P_2$ 。这时,摄像机在世界坐标系中的精确位置便可知。再利用优化的  $M$  矩阵更新(1)式作为最终计算三维空间坐标的一个约束方程。

### 2.2 投影仪光心标定

投影仪光心的标定是在摄像机标定基础上进行的,具体方法是用投影仪投射一些简单的交叉直线模型到参考平面上,如图 2。同摄像机标定一样,控制位移台等距离移动 3~4 次,在每次移动后由摄像机拍摄一幅该模型图像,求出每幅图像的交叉点的图像坐标,并利用已标定的相机参量进行畸变校正。由于移动距离已知,那么每个交叉点的空间  $Z$  坐标就已知(仍以 2.1 节定义的世界坐标系为准),再由(1)式又可以确定不同平面上交叉点的  $X$  和  $Y$  坐标,则每个交叉点的空间三维坐标已知。

理论上,由投影仪光心发出的任何两条光线,它

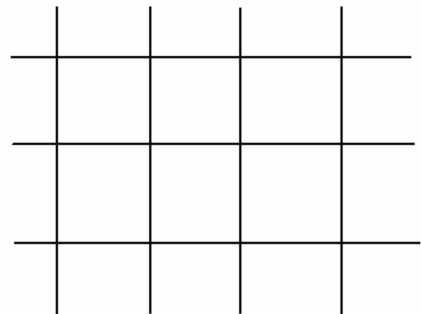


图 2 交叉直线模型

Fig. 2 Model of crossing lines

们与几个平行平面上的对应交点连线必然交汇于投影仪光心,原理如图 3 所示,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  以及  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  分别为两条光线与三个平行平面的交点,  $P$  为投影仪光心。如果这些点的空间坐标已知,那么就可以拟合出两条交汇于投影仪光心的空间直线,两条直线的交点即为投影仪光心的空间坐标。为提高精度,可以投射有多个交叉点的交叉直线模型,得到多条交汇于投影仪光心的空间直线,然后在最小二乘意义上精确求取投影仪光心的空间坐标。例如图 2 有 12 个交叉点,可以拟合出 12 条交汇于投影仪光心的直线。

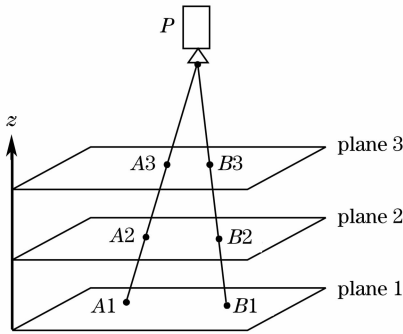


图 3 来自投影仪的两条光线与三个平面相交  
Fig. 3 Two lines from the projector crossing with three planes

2.3 由系统结构获取参量

系统整体标定已经完成,“投影设备-摄像机-参考平面”三者的空间关系已经确定。通过上述步骤得到的摄像机光心和投影仪光心的世界坐标,只需简单的计算就可精确获得双瞳距离  $d$ 、摄像机到参考平面( $Z=0$  平面)的距离  $L$  以及双瞳连线与参考平面的夹角  $\theta$  等结构参量。

3 无约束系统结构下的物相关系

在图 4 中,已经去除系统的平行度和垂直度约束,  $FC \parallel HO$ ,  $EH \perp AB$ ,  $R$  为参考平面( $z=0$  平

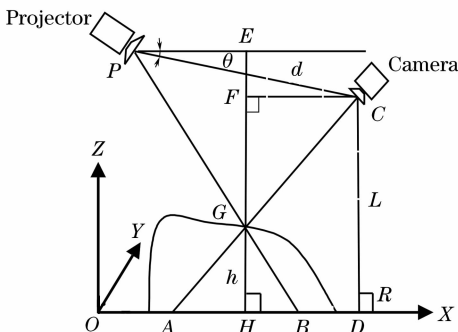


图 4 无约束的系统结构  
Fig. 4 Unconstrained system configuration

面)。由于  $\triangle AHG \sim \triangle FGC$ , 且  $FC=HD$ , 则

$$\frac{AH}{FC} = \frac{HG}{GF} = \frac{AH}{HD} = \frac{h}{L-h} \tag{2}$$

同理,由于  $\triangle PGE \sim \triangle GHB$ , 且  $GE=L-h+d\sin\theta$ , 则

$$\frac{HB}{PE} = \frac{HG}{GE} = \frac{h}{L-h+d\sin\theta} \tag{3}$$

$H$ 、 $P$  和  $D$  点的  $X$  坐标分别为  $X_H$ 、 $X_P$ 、 $X_D$ , 由于  $HD = X_H - X_D$ ,  $PE = X_P - X_H$ , 并联立(2)式、(3)式:

$$AB = AH + HB = \frac{h \cdot HD}{L-h} + \frac{h \cdot PE}{L-h+d\sin\theta} = \frac{h(X_H - X_D)}{L-h} + \frac{h(X_P - X_H)}{L-h+d\sin\theta} \tag{4}$$

令参考平面上点  $A$  和  $B$  的相位差为  $\Delta\phi(x, y)$ , 光栅条纹的周期宽度为  $W$ , 则有

$$AB = \frac{\Delta\phi(x, y)W}{2\pi} \tag{5}$$

由(4)式、(5)式, 可得

$$\frac{h(X_H - X_D)}{L-h} + \frac{h(X_P - X_H)}{L-h+d\sin\theta} = \frac{\Delta\phi(x, y)W}{2\pi} \tag{6}$$

这就是在无约束系统结构下的物相关系等式。(6)式中  $X_D$ (等于摄像机的  $X$  坐标  $X_C$ )、 $X_P$ (投影仪的  $X$  坐标)、 $L$ 、 $d$ 、 $\theta$  均已通过标定获得, 余下的两个未知数  $X_G$  和  $h$  中,  $h$  实际上是  $G$  点的  $Z$  坐标值  $Z_G$ , 此时联立(2)式和(7)式, 就可以得到被测物体任意一点的高度  $h$ (即  $Z_G$ ), 简洁等式如下:

$$ah^2 + bh + c = 0, \tag{7}$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  可展开为

$$\begin{cases} a = T_1 d \sin \theta - T_2 + X_D - K(X_P - T_2), \\ b = (T_2 - X_D)(L + d \sin \theta) + L(X_P - T_2) + 2KL + Kd \sin \theta, \\ c = -KL^2 - KLd \sin \theta \end{cases}$$

上式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  进一步展开为

$$\begin{aligned} K &= \frac{\Delta\phi(x, y)W}{2\pi}, \quad T_1 = \frac{t_2}{t_1}, \quad T_2 = \frac{t_3}{t_1}, \\ t_1 &= \frac{m_{11} - u_i m_{31}}{m_{12} - u_i m_{32}} - \frac{m_{21} - v_i m_{31}}{m_{22} - v_i m_{32}}, \\ t_2 &= \frac{m_{13} - u_i m_{33}}{m_{12} - u_i m_{32}} - \frac{m_{23} - v_i m_{33}}{m_{22} - v_i m_{32}}, \\ t_3 &= \frac{u_i m_{34} - m_{14}}{m_{12} - u_i m_{32}} - \frac{v_i m_{34} - m_{24}}{m_{22} - v_i m_{32}}, \end{aligned}$$

(7)式是一元二次等式, 在得到的两个解中, 舍弃其中一个无意义的解, 就可以得到所有点的高度值  $h$ ,

进而可以通过(1)式,得到每个点的  $X, Y$  坐标值。

## 4 实 验

实验采用的图像采集设备为 DH-SV1300FC/FM 型号数字相机,分辨力为  $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,像素尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ ;投影仪为 ASK C300 型号,显示分辨力为  $1024 \text{ dpi} \times 768 \text{ dpi}$ 。采用时间相位解包裹方法<sup>[13~15]</sup>进行相位展开,得到相位差  $\Delta\phi(x, y)$ ,光栅条纹的周期宽度取常量。

首先,对已知尺寸的标准长方体(预先由三坐标测量机测定),其中高度和宽度分别为  $50.06 \text{ mm}$  和  $20.04 \text{ mm}$ 。实验分别采用本文提出的无约束结构和传统结构进行测量,对长方体高度和宽度的测量结果分别为  $50.18 \text{ mm}$  和  $20.14 \text{ mm}$ 。表 1 列出了两种方法均取高度平面上约 10000 个点和宽度平面上约 6000 个点的测量结果。

实物测量选用鼠标和风扇叶片。图 5 中鼠标的实际高度为  $38.890 \text{ mm}$ (利用三坐标测量机测定),测量高度  $38.789 \text{ mm}$ ,误差  $0.101 \text{ mm}$ 。图 6 为实测

的风扇叶片。

表 1 两种结构的实验结果比较

Table 1 Experimental result comparison of two system configuration

	Unconstrained		Conventional	
	Mean	RMS	Mean	RMS
	error /mm		error /mm	
Height	0.12	0.11	0.22	0.18
Width	0.11	0.09	0.16	0.13

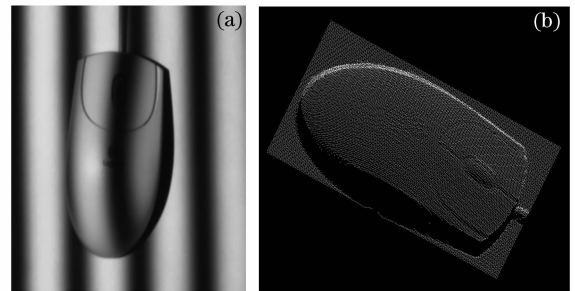


图 5 鼠标。(a) 条纹图,(b)点云图

Fig. 5 A mouse. (a) Fringe image, (b) point cloud image

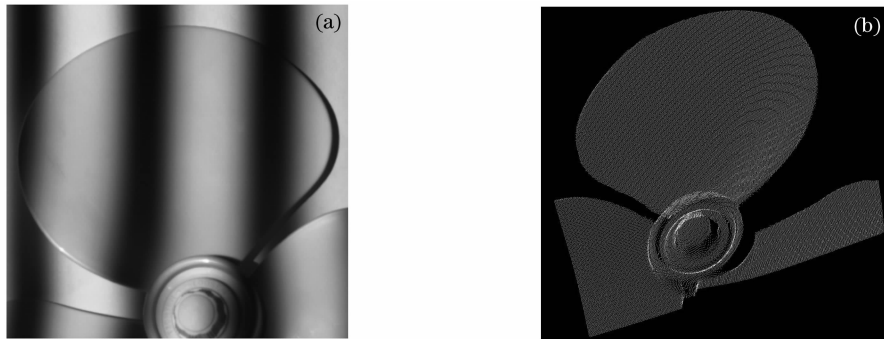


图 6 风扇叶片。(a) 条纹图,(b)点云图

Fig. 6 A fan blade. (a) Fringe image, (b) point cloud image

## 5 结 论

建立无约束系统结构,并利用标定技术获取“投影设备-摄像机-参考平面”空间关系,不但避开了平行度标定和垂直度标定问题,提高了关键参量的测量精确度,而且增强了测量过程的可操作性。基于建立的无约束系统,本文推导了新的物相关系方程和高度计算公式。由于新的物相关系方程含有两个未知数,因此通过引入摄像机定标这种比较成熟的技术建立物点和像点的对应关系作为约束来唯一求解空间点的三维坐标。实验表明,该方法的可操作性和测量精度相比于传统结构方法均得到了提高,证明建立在无约束测量系统结构下的物相关系方程和高度计算公式是合理和精确的。

## 参 考 文 献

- 1 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 Lü Naiguang. *Fourier optic* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 294~354  
吕乃光. 傅立叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 294~354
- 3 Chen Jiabi, Su Xianyu. *Optical Information Technique-Principle & Applications* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 321~361  
陈家璧, 苏显渝. 光学信息技术原理与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 321~361
- 4 Su Xianyu, Tan Songxin, Xian Liqun *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1228~1233  
苏显渝, 谭松新, 向立群 等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. 光学学报, 1998, **18**(9): 1228~1233
- 5 Sun Juan, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Study the

- measurement range of wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 647~653  
 孙 娟,陈文静,苏显渝 等. 小波变换轮廓术的测量范围研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 647~653
- 6 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Analysis on an improved Fourier transform profilometry[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 97~102  
 毛先富,陈文静,苏显渝 等. 傅里叶变换轮廓术新理论研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 97~102
- 7 Zhang Nanyangsheng, Yang Kuntao. There-dimensional measurement technology based on virtual grating of double frequency[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1407~1410  
 张南洋生,杨坤涛. 双频虚拟光栅投影三维测量技术[J]. 中国激光, 2006, **33**(10): 1407~1410
- 8 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Analysis of new phase and height algorithm in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 225~229  
 毛先富,陈文静,苏显渝 等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 225~229
- 9 D. C. Brown. Close-range camera calibration [ J ]. *Photogrammetric Engineering*, 1971, **37**(8): 855~866
- 10 C. Harris, M. Stephens. A combined corner and edge detector [C]. *Proc. Fourth Alvey Vision Conference*, Univ. Manchester, 1988. 147~151
- 11 Ma Songde, Zhang Zhengyou. *Computer Vision-Theory of Computation and Algorithm* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 52~59  
 马颂德,张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 52~59
- 12 Chen Baolin. *Optimization Theories and Algorithms* [M]. second edition, Beijing: Tsinghua University Press. 2005. 324~328  
 陈宝林. 优化理论与算法[M]. 第2版, 北京: 清华大学出版社, 2005. 324~328
- 13 J. M. Huntley, H. Saldner. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(17): 3047~3052
- 14 Henrik O. Saldner, Jonathan M. Huntley. Profilometry using temporal phase unwrapping and a spatial light modulator-based fringe projector[J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(2): 610~615
- 15 Yue Huimin, Su Xianyu. Temporal phase unwrapping process [J]. *Laser J.*, 2004, **25**(3): 9~12  
 岳慧敏,苏显渝. 时间位相展开方法研究进展[J]. 激光杂志, 2004, **25**(3): 9~12