

单摄像机结构光扫描系统中投影仪标定技术

戴小林 钟约先 袁朝龙 马扬飏

(清华大学 机械工程系 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

Research on projector calibration in one-camera 3-D
measurement systems

DAI Xiao-lin, ZHONG Yue-xian, YUAN Chao-long, MA Yang-biao

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Key Laboratory for Advanced Materials
Processing Technology, Ministry of Education, Beijing 100084, China)

【摘 要】传统的单摄像机、单投影仪三维扫描系统,利用相位值计算被测物体的高度信息,可操作性差,且测量精度不高。将立体视觉的三维重构技术引入到单摄像机、单投影仪扫描系统,利用相位值实现投影仪与摄像机的匹配,根据双目视觉的原理进行三维重构,测量精度明显提高。该技术的关键是投影仪的定标,研究了基于相位匹配技术的投影仪标定算法,实验结果验证了该算法的可行性。

关键词: 投影仪定标; 结构光; 三维测量

【Abstract】 The traditional one-camera system uses the phase value to calculate the height information, the disadvantage is that the maneuverability and the measurement accuracy is not so good. The 3D reconstruction method based on stereo vision is introduced to the one-camera-one-projector system. Phase value is used to accomplish the task of matching the camera and the projector. The principle of binocular vision is used to reconstruct the object, it causes that reconstruction precision is obviously elevated. The calibration of one-camera-one-projector system has been studied and the method of projector calibration based on phase matching is proposed. The targets of which the coordinates are known exactly is used. Experiment results show this phase unwrapping method is feasible.

Key words: Projector calibration; Structured light; 3-D measurement

中图分类号: TH16.O29 文献标识码: A

1 前言

物体外轮廓的测量技术(又称三维扫描技术)的重要意义在于,它能将真实世界的立体信息转换为计算机直接处理的数字

信息,为实物数字化提供了一种手段。此技术在机械零件测量、反求工程、影视特技制作、虚拟现实等方面得到了广泛应用。

传统的单摄像机结构光三维测量方法采用单目视觉原理

* 来稿日期: 2007-10-12

度优于 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$, 刀尖角度测量精度小于 2° 。

表 1 标准环境下的单点重复实验结果
Tab.1 Simple point repetition experiment result
under standard environment

测量次数	测量参数 半径 R (mm)	长度 L (mm)	刀尖角
1	35.126	186.357	84°18'
2	35.126	186.356	84°18'
3	35.127	186.354	84°16'
4	35.125	186.354	84°16'
5	35.127	186.357	84°17'
6	35.125	186.356	84°18'
7	35.127	186.357	84°16'
8	35.125	186.357	84°17'
标准值	35.126	186.356	84°17'

6 结论

刀具几何参数检测装置的光学系统的研究为传统的投影屏式测量向 CCD 视觉检测的改进提供了基础,使二维刀具检测仪器实现了刀形检测功能。本系统采用 CCD 光学成像系统,从而克服了光学十字瞄准时误差大的问题。最后经过误差补偿和硬件、软件等互相校正环节,系统误差大为减小,重复测量精度达到 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$,使刀具检测装置的测量精度和自动化程度大大提高。

参考文献

- 孙学珠,付维乔.高精度 CCD 尺寸自动检测系统的光学系统设计[J]. 光学技术,1998(5):4-6
- J.M. Zuo, J. Paced. Experimental measurement of electron diffuse scattering in magnetite using energy-filter and imaging plates[J]. Micron, 2000: 527-532

为:把结构光投影到被测物体表面,结构光栅由于受物体三维形状的调制而发生变形,通过对变形的结构光栅场进行处理,解调出代表物体高度的相位信息,再经过相展开和系统标定就可以获得物体的三维几何信息。

这样的方法存在约束过强、标定精度不高、可操作性不强等问题,这在很大程度上影响了该技术的实用化^[1]。

本文将立体视觉的三维重构技术引入到单摄像机、单投影仪扫描系统,提出基于相位匹配技术的投影仪定标算法,提高了系统的标定精度和可操作性。

在该系统中, 投影仪标定是其中一个重要的环节, 解决投影仪装置与摄像机图像上点的对应问题和反求三维物体点的坐标信息都要用到投影仪标定的结果。

从测量精度上来说，投影仪标定的精度是决定系统测量精度的关键因素之一。

2 投影仪模型

由于投影仪不是图像采集设备，因此无法通过拍摄图像和图像处理的方法进行标定。

但是,考察投影仪的投射原理可以发现,投影仪可以看作一个逆向的摄像机。

这样,就可以建立一个与摄像机类似的数学模型,如图 1 所示。不同的是投影仪只能投射光栅,不能拍摄光栅,因此需要借助摄像机来对投影仪进行标定。

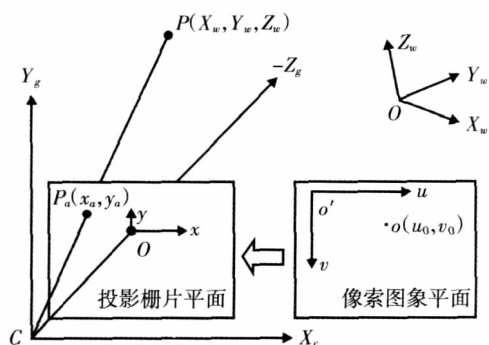


图 1 投影仪模型

如图 1 所示, 为计算机图像经投影仪成像到三维世界坐标系中的模型, 该模型使用了 3 个坐标系。

2.1 计算机图像坐标系

此坐标系为二维坐标系, 对应于图 1 中的像素图像平面, 其原点在图像的左上角, 单位为像素。图像上点的坐标表示为 $P = (u, v)^T$ 。

2.2 投影仪坐标系

此坐标系为三维坐标系，像素图像平面上的点在投影仪坐标系中的坐标表示为 $P_C \in X_C, Y_C, Z_C)^T$ 。此坐标系的原点定义在镜头的光心，其 Z_C 轴为光轴， X_C 和 Y_C 分别平行于图像平面的水平和垂直轴。

2.3 世界坐标系

在世界坐标系中三维空间中的一点表示为:

$$P_w \in X_w, Y_w, Z_w)^T$$

3 投影仪标定方法

在对投影仪标定之前,需要先将摄像机进行标定。关于摄像机标定的方法在很多文献中都有详细论述^[2-5],在此不再赘述。

本文采用标定块(图略)来对投影仪进行标定,标定图案由11列9行圆点所组成,采用印刷的方法制作在有机玻璃板上,其行列间距设定值为40mm。

投影仪标定步骤如下。

3.1 检测标志点

计算标志点圆心在摄像机中的图像坐标。采用亚像素定位并用误差补偿的方法^[6]检测标志点的空间坐标 P_{Wb} 。

3.2 计算相位值

向标定块投射相移图片,如图 2 所示,编码结构光图片。通过解相与相展开两个步骤计算各标志点圆心处的相位值 u_i 、 v_i^T 。

0	1	2	3	4	5	6	7	周期
0	1	3	2	6	7	5	4	编码

图 2 结构光编码与周期对应

3.3 建立相机成像与投影栅线的对应关系

根据相位值计算标志点在投影栅片中虚拟成像的坐标:

$$(u_i, v_i)^T$$

对于标定块上某标志点 i , 其相位值 u_i, v_i^T 与圆心处的世界坐标 P_w 存在一一对应关系:

$$(u, v)^T = P_W \quad (1)$$

又, 标志点 i 在投影仪栅片中的虚拟成像坐标 $(u_i, v_i)^T$; 与其相位值也存在一一对应关系:

$$\begin{aligned} u_i &\in (u_i/2) * U \\ v_i &\in (v_i/2) * V \end{aligned} \quad (2)$$

式中: U, V —光栅图像在 u, v 方向上一个周期的像素数。

因此,对于标志块上的标志点,其圆心处的世界坐标系与其在光栅图像上的虚拟成像坐标间也存在一一对应关系。

3.4 计算投影仪内外参数

根据投影仪模型,采用两阶段法^[2],计算投影仪的内外参数。

像素图像平面上的点 p 投影到世界坐标系中的点 P_w 可由以下 4 步完成, 这 4 步中所用到的参数也就是投影仪定标所要解决的问题。

3.4.1 像素图像向投影栅图像转换

像素图像片光面坐标 p 到投影栅片图像坐标 $p_0 \in x_0, y_0)^T$, 其转变关系如下:

$$\begin{aligned} x_i &= u - u_0 \cdot dx \\ y_i &= v - v_0 \cdot dy \end{aligned} \quad (3)$$

式中: (u_0, v_0) —主点(光轴与图像平面的交点)在计算机图像坐标系中的坐标;

dx 和 dy —像素之间水平和垂直方向的距离。

3.4.2 投影栅图像向投影仪坐标系转换

利用针孔模型将 p_u 投射到投影仪坐标系中 P_c 的变换关系为:

$$\begin{aligned} X_c &= Z_c \cdot x_u / f \\ Y_c &= Z_c \cdot y_u / f \end{aligned} \quad (4)$$

式中: f —镜头的焦距。

3.4.3 引入投影仪镜头畸变

考虑到径向镜头畸变, 将非畸变坐标变为畸变坐标。由于镜头畸变的因素, 投影得到的实际坐标为 $P_d = (X_d, Y_d, Z_d)^T$, 其关系如下:

$$\begin{aligned} X_d &= X_c + X, \\ Y_d &= Y_c + Y, \\ Z_d &= Z_c \end{aligned} \quad (5)$$

式中: X 和 Y —畸变量。

镜头畸变包括径向畸变、切向畸变和离心畸变等, 如式 (6) 所示:

$$\begin{aligned} X &= k_1 X_c r^2 + k_2 X_c r^4 + 2p_1 X_c Y_d + 2p_2 X_d Y_d + Y_d a \\ Y &= k_1 Y_c r^2 + k_2 Y_c r^4 + 2p_2 Y_d X_d + 2p_1 X_d Y_d + X_d a \\ r &= \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: k_1, k_2 —径向畸变;

p_1, p_2 —离心畸变;

a —切向畸变。

一般来说使用 k_1, k_2 就足以描述畸变了。

3.4.4 投影仪坐标系向世界坐标系转换

从投影仪坐标系实际坐标到世界坐标系的变换,

$$P_w = RP_d + T \quad (7)$$

式中: R 和 T —代表旋转矩阵和移动向量;

R — 3×3 的旋转矩阵, 是 3 个旋转角 α, β, γ 的函数, $T = (T_x, T_y, T_z)^T$ 。

总之, 投影仪标定是利用投射图像坐标与物体点三维坐标来求得投影仪内外参数的过程, 其中外参数包括旋转矩阵 R , 平移向量 T ; 内参数包括焦距 f , 径向畸变系数 k_1, k_2 , 主点坐标 (u_0, v_0) 。

4 标定实验结果分析

投影仪的内外参数, 如表 1 所示。

表 1 投影仪内外参数

f/mm	k_1	k_2	k_3	T_x/mm	T_y/mm
32.704	30.364	4.158	3.012	0.023	0.031
T_z/mm	$-10^{-4} \cdot k_1$ /mm ²	$-10^{-4} \cdot k_2$ /mm ⁴	$u_0/pixel$	$v_0/pixel$	
0.047	1.226	0.312	0.398	0.359	T_z/mm

实验中使用的投影仪为 ULTRALIGHT S540, 分辨率选取 1024×768 。计算标志点在投影仪栅片上的虚拟成像, 其在投影仪图像平面上的残差在水平和垂直方向上均为 0.1 像素。标志

点圆心在投影栅片中的虚拟成像, 如图 3 所示。

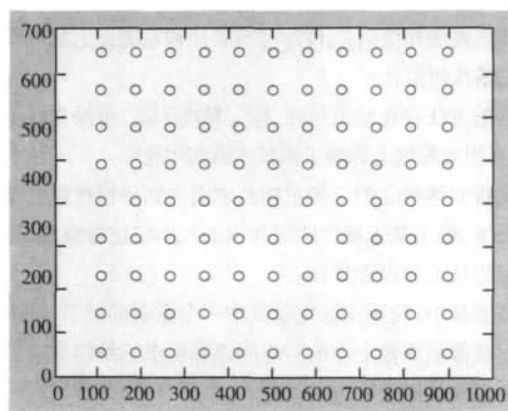


图 3 标志点圆心在投影仪栅片上的虚拟成像

利用投影仪标定的结果, 采用立体视觉重构的方法, 对精确知道三维坐标点的测试块 ($500mm \times 400mm$) 进行测量, 测量距离为 $800mm$ 时, 绝对精度达到 $0.4mm$ 。投影仪定标的相对精度为在空间的绝对精度与测量距离的比值, 因而相对精度达到 1/2000。

5 结论

采用立体视觉原理构成的单摄像机、单投影仪三维扫描系统, 除了对摄像机进行标定外, 投影仪的标定是关键。本文建立了投影仪的分析模型, 提出了基于相位匹配技术的投影仪标定方法。

实验表明, 投影仪标定的绝对精度达到 $0.4mm$, 相对精度达到 1/2000。该方法比传统的投影栅相位法具有较高的测量精度和可操作性, 能够满足系统实用化的要求。

参考文献

- 1 许庆红, 钟约先, 由志福. 光学投影轮廓测量的系统标定技术. 光学技术, 2000, 26(2): 126~132, 133
- 2 Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3-D machine metrology using off-the shelf TV cameras and lens [J]. IEEE J on Robotics and Automation, 1987, RA-3(4): 323~344
- 3 Shi Sheng-Wen. Accurate linear technique for camera calibration considering lens distortion by solving an eigenvalue problem [J]. Optical Eng, 1993, 32(1): 138~149
- 4 Cerveri P, Borghese N A, Pedotti A. Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control points of unknown coordinates [J]. J Biomechanics, 1998, 31(10): 935~940
- 5 Fusiello A. Uncalibrated Euclidean reconstruction: A review [J]. Image and Vision Computing, 2000, 18: 555~563
- 6 Pedersini Federico, Stati Augusto, Tubaro Stefano. Improving the performance of edge localization techniques through error compensation [J]. Signal Processing: Image Communication, 1998, 12: 33~47
- 7 AAsundi, C S Chan. Phase shifting applied to non-sinusoidal Intensity distribution—an error simulation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1994, 21: 3~30
- 8 张吴明, 钟约先, 由志福等. 基于结构光编码的相展开方法. 光学技术, 2002, 28(52): 404~406