

# 一种简易的线结构光投影三维形状获取方法\*

郑作勇<sup>+</sup>, 姚莉, 姚婷婷, 马利庄

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

## A Simple Method for Shape Recovery Based on Linear Structured Light

ZHENG Zuo-Yong<sup>+</sup>, YAO Li, YAO Ting-Ting, MA Li-Zhuang

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-21-34204586, Fax: +86-21-34204586, E-mail: oliver.zheng@sjtu.edu.cn, http://home.is.ac.cn

Zheng ZY, Yao L, Yao TT, Ma LZ. A simple method for shape recovery based on linear structured light. *Journal of Software*, 2006,17(Suppl.):176-183. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/s176.htm>

**Abstract:** This paper aims at recovering the shape of an object by using a common LCD projector and a digital camera. The projector is employed as a point light source for casting linear stripe onto the surface of an object. From the sequence of photos taken by a digital camera, the shape of an object can be recovered. In this paper, a method for projector calibration is proposed on the basis of camera calibration. In addition, a RGB linear structured light scheme is also proposed for recovering the shape of an object with complex color and texture. The experimental results show that dense point clouds can be obtained for further surface reconstruction. It can be concluded that such a system cheap but keeping relatively high accuracy can be considered as a replacement of expensive scanning systems.

**Key words:** linear structured light; shape recovery; 3D reconstruction; camera calibration; projector calibration

**摘要:** 利用普通的 LCD 投影仪和数码相机获得物体的三维形状. 投影仪作为光源, 投射线结构光在物体表面, 从数码相机拍摄的照片序列中, 恢复物体的形状. 提出了根据已经标定好的相机参数, 继续对投影仪进行标定的方法; 同时, 针对物体表面颜色/纹理较为复杂的情况, 提出了一次投射三色线结构光的改进方法, 克服了不易恢复此类物体形状困难. 实验结果表明, 该方法可以获得物体的稠密点云用于进一步的重建, 适于组建一个廉价但却保持相对精度的扫描系统.

**关键词:** 线结构光; 形状恢复; 三维重建; 相机标定; 投影仪标定

在计算机视觉领域中, 通过图像来恢复物体表面形状是一个被广泛研究的问题. 其中, 结构光方法由于易于实现、精度较高、非接触物体等优点而得到广泛的使用; 同时, 该方法对设备的要求较高, 物体形状的恢复精度依赖于图像质量和像素的精确匹配. 结构光分为点、线及面结构光三类, 线结构光实现简单, 且一定程度简化了匹配问题, 因此使用较多.

最简单的线结构光就是向物体投射单个条纹, 可以控制条纹的移动<sup>[1]</sup>, 也可以通过平移或者旋转物体<sup>[2]</sup>, 使条纹扫过整个物体. 此类方法需要拍摄较多的图片. 为了减少图片的数量, 需要对线结构光进行编码, 典型的编

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60373070 (国家自然科学基金)

Received 2006-04-15; Accepted 2006-09-11

码方法有时空二进制<sup>[3]</sup>和伪随机序列<sup>[4]</sup>等方法,将拍摄到的像素颜色和事先确定的编码方案相对比,来确定像素的空间位置.编码方法需要较高精度的投影和拍摄系统.

本文中使用普通的投影仪和数码相机作为投影和拍摄系统,在对相机和投影仪分别进行了标定之后,向物体表面投射黑白条纹或者红绿蓝三色条纹,利用投射在物体表面的阴影边界来恢复物体的形状,具有设备简单、容易实现、精度较高及适用性较好等优点.

## 1 测量系统组成

测量系统由一台 LCD 投影仪、一台数码相机、一个棋盘格图组成,如图 1 所示.投影仪和数码相机事先经过标定(见第 3.1 节和第 3.2 节).投影仪向物体表面投射出一条黑色条纹,条纹缓慢扫过整个物体,此过程使用数码相机拍摄,形成一个图像序列.

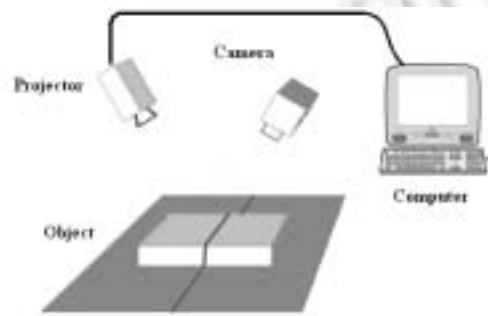


Fig.1 System framework

## 2 形状恢复原理

图 2 描述了物体三维形状恢复的基本原理<sup>[1]</sup>.在  $t$  时刻,位于位置  $L$  的投影仪向放置在平面  $\Pi_d$  的物体上投射出一幅图案,图案中的条纹在物体表面形成一条阴影.此时场景用相机拍照后,阴影上的物体点  $P$  在场景照片中的对应像素为  $P'$ ,同时平面  $\Pi$  的两个参考点  $P_{top}(t)$  和  $P_{bott}(t)$  的对应像素分别为  $P'_{top}(t)$  和  $P'_{bott}(t)$ .在图中可以看到,物体表面点  $P$  是投影平面  $\Pi(t)$  和成像光线  $O_c P$  的交点,只要确定了  $\Pi(t)$  的平面方程和  $O_c P$  的直线方程,即可求得点  $P$  的三维坐标.

投影仪光心  $L$  和相机光心  $O_c$  通过标定可以得到,因此只要能够找到成像照片上的像素点  $P'_{top}(t)$  和  $P'_{bott}(t)$ ,即可得到两条成像光线  $O_c P'_{top}(t)$  和  $O_c P'_{bott}(t)$ ,进而求得与平面  $\Pi_d$  的交点  $P_{top}(t)$  和  $P_{bott}(t)$ ,这两点和投影仪光心  $L$  一起,最终确定了投影平面  $\Pi(t)$ .

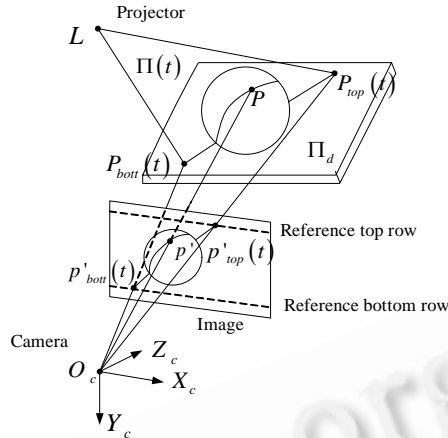


Fig.2 Principle of shape recovery

### 2.1 阴影时刻及阴影边界的确定

条纹扫过整个场景时,使用数码相机记录下来,形成一个图像序列,每个像素点的灰度值使用  $I(x,y,t)$  表示,其中  $(x,y)$  表示像素的图像坐标; $t$  表示时刻,对应具体的帧数.假如投影的图案是单个黑色条纹,除此之外其他部分都是白色,则在物体表面上形成的阴影会引起像素值  $I(x,y,t)$  的变化:从初始最大值  $I_{\max}(x,y)$  (此时条纹没有扫描到该像素),下降到最小值  $I_{\min}(x,y)$  (此时该像素处在黑色条纹阴影里),当条纹离开时又恢复到初始值.

对于图像序列  $I(x,y,t)$ ,定义像素  $(x,y)$  的灰度最大值  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  为

$$I_{\min}(x,y) = \min_t \{I(x,y,t)\} \quad (1)$$

$$I_{\max}(x,y) = \max_t \{I(x,y,t)\} \quad (2)$$

定义像素灰度阈值如下:

$$I_{\text{thresh}} = \frac{1}{2}(I_{\min}(x,y) + I_{\max}(x,y)) \quad (3)$$

对于图像序列,定义  $I(x,y,t)$  如下:

$$\Delta I(x,y,t) = I(x,y,t) - I_{\text{thresh}}(x,y) \quad (4)$$

根据前面判断像素是否在阴影内部的条件,定义  $I(x,y,t)=0$  的点就是阴影边界上的点.对于图像序列中一给定点  $(x_0,y_0)$ ,  $I(x_0,y_0,t)$  是时间  $t$  的函数,函数值  $I=0$  时对应的  $t$  就是该点处在阴影边界的时刻.实际情况下,满足  $I(x_0,y_0,t)=0$  的整数  $t$  并不总是存在,更常见的情况是,  $I(x_0,y_0,t_0-1)>0$  而  $I(x_0,y_0,t_0)<0$  ( $t_0$  是整数,  $t_0-1<t_0$ ),这时可用线性插值计算出非整数  $t$ .这就是时间域上的处理.对于一给定时刻  $t_0$  的图像,选取参照线  $y=y_0$ ,  $I(x,y_0,t_0)$  是以  $x$  变化的函数,函数值  $I(x,y_0,t_0)=0$  对应的  $x$  值就是参照线上处在阴影边界上的点的横坐标值.实际情况下,满足  $I(x,y_0,t_0)=0$  的整数  $x$  并不总是存在,更常见的情况是,  $I(x_0-1,y_0,t_0)>0$  而  $I(x_0,y_0,t_0)<0$  ( $x_0$  是整数,  $x_0-1<x_0$ ),这时可用线性插值计算出非整数  $x_0$ .这就是空间域上的处理.

### 2.2 计算步骤

- (1) 对于图像序列中的每一个像素  $P(x_0,y_0)$ ,其对应了物体表面上一点  $P$ ,计算其处在阴影边界的时刻  $t_0$ ;
- (2) 如果  $t_0$  恰好是整数,取图像序列中对应  $t_0$  的那一帧,计算参考线  $y=y_{\text{top}}$  和  $y=y_{\text{bot}}$  上处在阴影边界上的两个点  $P'_{\text{top}}(t_0)$  和  $P'_{\text{bot}}(t_0)$ ,进入步骤(4);
- (3) 如果  $t_0$  是非整数,取图像序列中对应  $\lfloor t_0 \rfloor$  和  $\lceil t_0 \rceil$  的两帧,分别计算参考线  $y=y_{\text{top}}$  和  $y=y_{\text{bot}}$  上处在阴影边

界上的两个点  $P'_{top}(\lfloor t_0 \rfloor), P'_{bot}(\lfloor t_0 \rfloor)$  和  $P'_{top}(\lceil t_0 \rceil), P'_{bot}(\lceil t_0 \rceil)$ , 然后线性插值计算出  $P'_{top}(t_0)$  和  $P'_{bot}(t_0)$ ;

- (4) 由相机成像光线  $O_c P'_{top}(t_0)$  和  $O_c P'_{bot}(t_0)$ , 分别与平面  $\Pi_d$  相交, 求出  $P_{top}(t_0)$  和  $P_{bot}(t_0)$ , 此两点和投影仪光心  $L$  共同构成了投影面  $\Pi(t_0)$ ;
- (5) 求相机成像光线  $O_c P(x_0, y_0)$  和投影面  $\Pi(t_0)$  的交点坐标, 即是物体表面点  $P$  的三维坐标。

### 3 标 定

在上文获取物体三维形状的原理中, 相机的有关参数和投影仪的光心位置必须准确地确定。确定相机/投影仪参数的过程称之为标定。需要标定的参数有: (1) 内部参数: 焦距  $f$  和镜头的一阶畸变系数  $K1$  (为计算简便, 仅考虑了相机/投影仪镜头的一阶畸变系数); (2) 外部参数: 相机/投影仪本地坐标系在世界坐标系下的位置和方向,

包括平移向量  $T=(T_x, T_y, T_z)^T$  和旋转矩阵  $R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$ 。

#### 3.1 相机标定

相机参数的标定方法有很多种, 本文中使用了 Tsai 提出的两步标定法<sup>[5]</sup>。该方法易于实现, 且由于采用了非线性优化方法, 可以获得较高的精度。其原理如下: 对于一组已知世界坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$  的控制点, 其在成像照片上的像素坐标为  $(X_d, Y_d)$ , 则两者之间的关系可用下列成像公式表示:

$$X_d(1+k_1r^2) = f \frac{r_{11}X_w + r_{12}Y_w + r_{13}Z_w + T_x}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + T_z} \tag{5}$$

$$Y_d(1+k_1r^2) = f \frac{r_{21}X_w + r_{22}Y_w + r_{23}Z_w + T_y}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + T_z} \tag{6}$$

其中,  $r^2 = X_d^2 + Y_d^2$ 。

在成像公式中,  $f, K_1, T$  和  $R$  共 14 个参数为未知数, 每个控制点的  $(X_w, Y_w, Z_w)$  和  $(X_d, Y_d)$  已知, 提供 2 个方程。在实验中, 为了提高精度, 往往选择数量较多的控制点, 因而提供的方程个数超过了未知数的个数, 使求解的过程变成非线性最优化的过程。求解的过程详见文献<sup>[5]</sup>, 在此不再赘述。

可以看到, 如果将成像公式中的  $(X_w, Y_w, Z_w)$  视为未知数, 而其他参数为已知, 则成像公式实际上是两个平面方程, 两个平面相交确定了一条直线 (即成像光线), 它描述了点  $(X_w, Y_w, Z_w)$  在相机成像面的像素坐标是  $(X_d, Y_d)$ 。

在本文中, 标定相机的具体过程如下: 制作一张黑白相间的棋盘格, 格子大小为 20mm×20mm。将打印好的棋盘格平放在图 2 中的平面  $\Pi_d$  上, 使用数码相机拍照。在照片上选择一个四边形区域 (对应了棋盘格的一个矩形区域), 其 4 个角点是棋盘正方形格子的交点, 而矩形内部则包含了若干格子交点。该矩形区域同时也确定了世界坐标系, 其原点是 4 个角点中的一个 (随意选择), 与之相邻的两条边则分别是  $X$  轴和  $Y$  轴,  $Z$  轴根据右手法则确定。在图像上, 使用 Hough 变换找出矩形区域内的所有格子交点, 获得其像素坐标  $(X_d, Y_d)$ , 而其世界坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$  已知, 代入成像公式 (5), (6) 进行标定, 即可获得相机的有关参数。

#### 3.2 投影仪标定

本文中使用了投影仪作为点光源, 其优点是: (1) 操作简单; (2) 可以根据需要, 投影各种不同图案。根据 3 节中的原理, 在  $t$  时刻, 投影仪的光心位置 (图 2 中的  $L$  点) 和两个参考阴影点 (图 2 中的  $P_{top}(t)$  点和  $P_{bot}(t)$  点) 共同确定了投影面, 因此, 需要准确标定投影仪光心  $L$  的位置。

在本文中, 将投影仪看作是一个逆向的照相机模型<sup>[6]</sup>, 其存在一个虚拟的“CCD 成像面”, “成像面”上的图案就是准备投影的图像。光心位置同样可以使用 Tsai 的标定方法进行标定。

在与投影仪相连的计算机上先画出一个棋盘格,然后将其投影在标定相机时所用的棋盘格平面上(图 2 中的平面  $\Pi_d$ ,同时也是世界坐标系中的平面  $Z_w=0$ ),这时用相机拍下投影图像的照片(拍摄时,相机的所有参数与它在标定时一样,保持不变).在投影图像的照片上,同样使用 Hough 变换,找出所有的角点,获得其像素坐标.根据已经标定好的相机参数,使用成像公式,反向计算出各个格子交点的三维坐标  $(X_w, Y_w, 0)$ .利用自画棋盘格上各个交点已知的像素坐标,再次使用成像公式,即可求出投影仪的参数.可以看到,在标定投影仪的过程中,两次使用了成像公式.投影仪参数和相机参数完全一致,在本文中,我们需要的就是其光心位置.

#### 4 实验结果

我们分别对台球、塑料盒和两个纸杯进行了重建,图 3~图 6 显示了重建的结果.可以看到,对于台球和塑料盒,因其表面没有纹理,所以获得了较好的结果;而两个纸盒表面有纹理图案,因此对于这些区域的像素,不能准确地判断其何时处在投影边界,从而影响了重建结果,表现为重建表面上的空洞.



Fig.3 Billiard ball

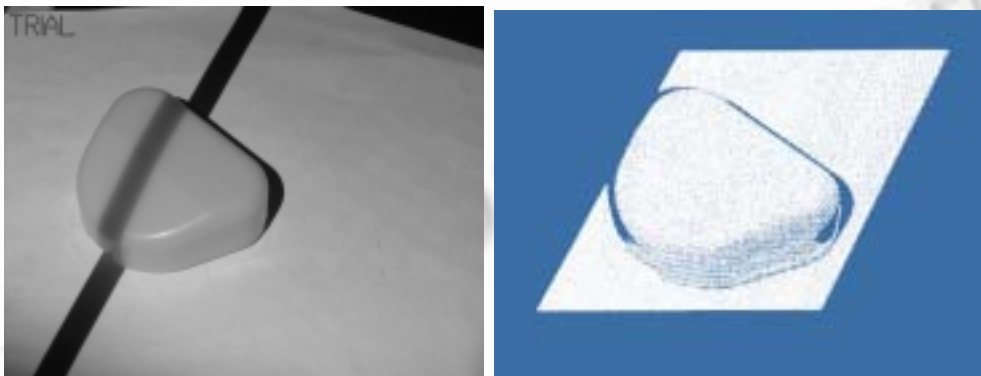


Fig.4 Plastic box

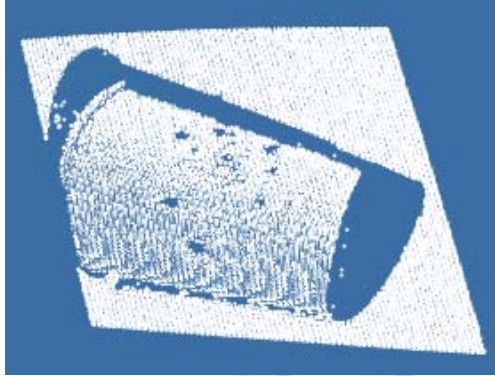


Fig.5 Cup 1

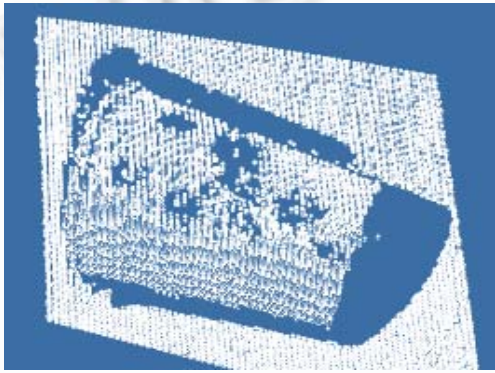
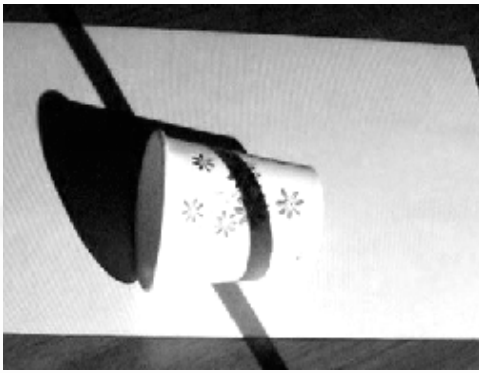


Fig.6 Cup 2

### 5 改进

从上面的原理可知,线结构光投影方法是依靠投影在物体表面的阴影边界,从而来确定物体的三维形状.阴影边界则通过计算像素值随时间变化的差值确定.因此,结构光投影到物体表面后,引起物体表面像素值的变化程度至关重要.如果像素值的变化程度不明显,则不容易计算像素的三维坐标.在上面纸杯重建失败的例子中,由于其表面颜色较多,具有复杂的纹理,因此选择一种合适颜色的结构光,使所有像素颜色都发生显著的变化较为困难.即使能够选择,也必须事先进行观察,才能确定结构光的颜色,在具体操作上较为不便.另外,由于使用灰度图像,在将彩色图像转换成灰度图像的过程中,丧失了 RGB 分量的信息,致使原本可以区分边界的像素点在灰度图像中无法区分.基于上述分析,本文提出了一种简便实用的改进方法,即直接使用彩色图像,并一次投射红、蓝、绿三色结构光.原理图如图 7 所示.

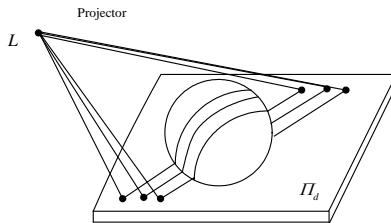


Fig.7 Improved 3-color structured light

在将三色结构光投射到物体表面后,每个像素的成像必然至少在一个颜色分量上发生明显的变化,可以用

该分量代替灰度图像中使用的灰度值,用来判断阴影边界,计算投影面和成像光线.最终获得的两个纸杯的重建结果如图 8、图 9 所示.可以看到,使用灰度图像的重建结果中的表面空洞,在使用三色结构光的彩色图像的重建结果中基本消失了.

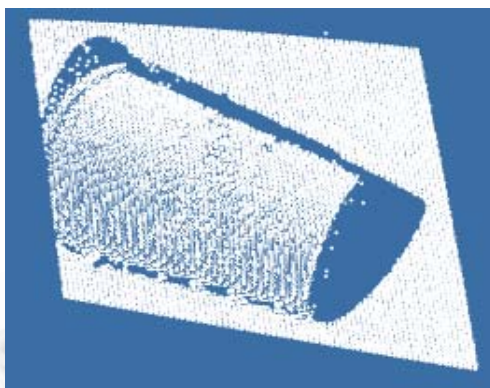
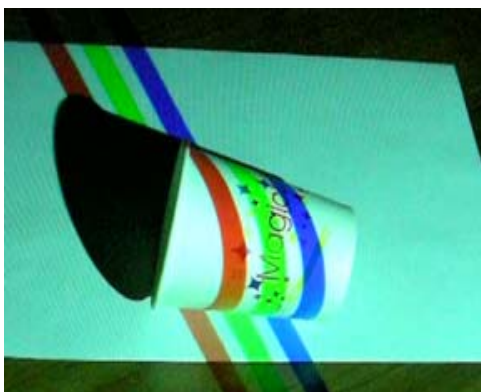


Fig.8 Cup 1

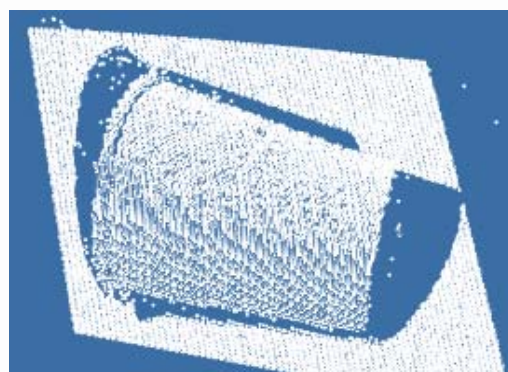


Fig.9 Cup 2

## 6 讨论

图像噪声和标定精度是影响最终物体形状恢复准确度的两个最主要因素.在实验中,为了减少图像噪声的影响,投射的阴影线在物体表面上移动的速度非常缓慢,因此在图像序列中,像素灰度值的变化是连续的,便于确定每个像素处在投影边界的准确时间;通过在棋盘格照片上选择更大的矩形区域(也就选择了更多的控制点)和改进寻找控制点的算法,提高了标定的精度,其畸变图像平面误差<sup>[7]</sup>DIPE(distorted image plane error,)在 0.5 像素之内.我们对图 3 中重建的台球球体进行了数据拟合,拟合得出的台球半径和实际测得的半径相比,相对误差在 2% 左右.由于编码结构简单,必须使用较多数量的图象进行形状恢复,图象的摄取及处理需要较多的时间,上述的实例中获得形状所需的时间均在 15s 左右.

更加复杂的结构光编码方法<sup>[4,8]</sup>,增加了编码的唯一性,减少了所需图象的数量(最少一幅即可),因而减少了处理时间,并且提高了精度.但是此类方法必须能够根据像素颜色进行准确的定位,因而对图象设备的要求很高.在我们的实验中,一般的投影仪和数码相机很难根据颜色,准确地区分图象中的相邻像素,因而只能调整编码方法(例如在 De Bruijn 编码方案<sup>[8]</sup>中,加宽彩色细线,形成彩色条纹,便于从图象中辨认),这样获得的只是稀疏的点云.

## 7 总 结

在本文中,物体三维形状恢复系统由数码相机和投影仪组成,使用简单方便,且具有较高的恢复精度.如果使用分辨率更高的图像序列,将获得物体形状的稠密点云,可以作为一个三维扫描设备的简单替代.同时,在实验过程中发现,如果物体表面具有较强的高光或者互反射(inter-reflection)现象,则物体表面的恢复将不准确或者失败.如何去掉高光及互反射的影响仍然是一个需要继续研究的课题.

### References:

- [1] Bouguet JY, Perona P. 3D photography on your desk. In: Ahuja N, Desai U, eds. Proc. of Int'l Conf. on Computer Vision (ICCV). Bombay: IEEE Computer Society Press, 1998. 43–50.
- [2] Tao L, Sun CK, He L, Zhang YG, Ye SH. A color 3-D acquisition method based on structured-light scanning. Journal of Optoelectronics-Laser, 2006,17(1):111–114 (in Chinese with English abstract).
- [3] Sansoni G, Carocci M, Rodella R. Three-Dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: Analysis and Compensation of the Systematic Errors. Applied Optics, 1999,38(31):6565–6573.
- [4] Li Z, Brian C, Seitz SM. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. In: Cortelazzo GM, Guerra C, eds. Proc. of the 1st Int'l Symp. on 3D Data Processing Visualization and Transmission (3DPVT). Padova: IEEE Computer Society Press, 2002. 24–36.
- [5] Tsai RY. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987,RA-3(4):323–344.
- [6] Zhang YB, Lu RS, Fei YT. Multicolor pseudo-random array pattern projector and its calibration. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004,36(1):59–62 (in Chinese with English abstract).
- [7] Lee JS, Jeong YH. CCD camera calibration and projection error analysis. In: Park G, ed. Proc. of the 4th Korea-Russia Int'l Symp. Ulsan: Piscataway, 2000. 50–55.
- [8] Pages J, Salvi J, Garcia R, Matabosch C. Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling. In: Luo R, ed. Proc. of the 2003 IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation. Taipei: IEEE Computer Society Press, 2003. 133–138.

### 附中文参考文献:

- [2] 陶立,孙长库,何丽,张玉纲,叶声华.基于结构光扫描的彩色三维信息测量技术.光电子·激光,2006,17(1):111–114.
- [6] 张勇斌,卢荣胜,费业泰.机器视觉中彩色伪随机编码投影系统及其标定.哈尔滨工业大学学报,2004,36(1):59–62.



郑作勇(1970 - ),男,河南荥阳人,博士生,主要研究领域为网格动画,网格细分.



姚婷婷(1979 - ),女,硕士,主要研究领域为基于图像的建模.



姚莉(1977 - ),女,博士生,主要研究领域为基于图像的建模与绘制.



马利庄(1964 - ),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,计算机辅助几何设计.