

基于格雷编码光栅的双目 立体扫描仪关键技术研究

王少敏, 张爱武, 田克微

(首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037)

摘要: 本文提出了一个双目立体扫描仪的软、硬件设计, 在硬件方面提出了需要配置的各种硬件器材, 软件方面主要介绍了双目立体扫描仪的实现算法。重点介绍了立体视觉的测量原理, 以及如何采用两台摄像机得到三维立体影像。为了使不同摄像机得到的图像匹配起来, 必须使用结构光的方法来进行立体像对的定位, 对结构光的实现本文采用了数字投影仪投射栅格光栅的方法。本文通过大量实验, 结合扫描仪设计和实际测量要求, 归纳出了扫描仪的机械结构设计方法。同时, 为了得到准确的测量数据, 必须进行摄像机的标定, 简要介绍了 Tsai 两步标定法, 以得到摄像机的内外参数。最后, 结合深度数据进行了三维重构, 给出了实验结果。

关键词: 地图学与地理信息系统; 双目立体扫描仪; 三维成像; 结构光; 光栅; 深度数据

中图分类号: TP70 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2008)07-0640-7

The key technology of two-camera 3D scanner based on gray-code light projection

WANG Shaomin, ZHANG Aiwu, TIAN Kewei

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University,
Beijing 100037)

Abstract: This paper gives a method of the software and hardware design of a two-camera 3D scanner. In hardware design, some necessary device is chosen. In software design, development arithmetic is introduced. The significant part is measure principle of 3D vision and how to obtain 3D image from two cameras. Structured light should be used for positioning and is generated by digital projection. By plenty of experiments, mechanical design of the scanner is fixed according to practical measure demands. On the other hand, for exact data, demarcate of the camera is needed. Tsai demarcate method is introduced to get the parameters. Finally, the result of the experiment is figured out by 3D restructure of depth data.

Key words: cartography and geography information system; two-camera 3D scanner; 3D imaging; structured light; raster; depth data

0 引言

随着测量技术日新月异的发展, 更高精度、更多视角的测量方法已经成为测量学科发展的新方向。作为对人类现实世界的真实反映, 使用三维测量技术得到的三维模型, 可广泛应用于逆向工程、三维展示、虚拟现实等方面, 已越来越受到人们的欢迎。

目前, 进行三维测量的方法主要有两种: 激光扫描和双目立体扫描。前者使用一束激光光束, 通过驱动云台带动激光发射器进行转动, 对物体进行扫描。通过激光反向回来的时间, 确定被测物体的

基金项目: 国家自然科学基金 (40201043)

作者简介: 王少敏 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 三维信息获取与应用

通信联系人: 张爱武, 教授, 主要研究方向: 三维信息获取与应用, E-mail: zhangaw163@163.com

深度数据，进行三维建模。其原理和算法简单、实现方便、测量范围大，但设备价格比较昂贵，而且沉重、不易携带。

双目立体扫描法是对人双眼得到的物体三维信息过程的模拟。本文研究的是基于光栅投影的主动式双目扫描仪。使用可见光将特定的光栅条纹投影到测量工件表面，采用面扫描方式，借助两个高分辨率 CCD 数码相机进行不同角度的拍照，利用立体视觉技术，获得工件的三维点云图。这种扫描仪体积小、生产成本低、扫描速度快、精度高、拼接累积误差小。

经过多年的研究，双目立体扫描仪已经有了多种商用机型。国外应用比较早的是德国 GOM 公司推出的 ATOS 系列流动光学扫描仪。近年来，国内这方面的研发也逐渐成熟，代表性产品有上海数造科技公司的 3DSS 系列三维光学扫描仪和北京天远三维科技有限公司的 OKIO 系列三维扫描仪。在功能、精度和人性化上，国内产品有逐渐超越国外产品的趋势。

1 双目立体扫描仪的数学原理及实现方法

双目立体扫描仪的基本工作原理是利用三角形测量法，基于两摄像机所产生的视差，计算所测点的深度数据，即坐标。扫描仪的结构如图 1 所示。

将实际物体数据保存为计算机的电子数据时，其中重要的一点就是虚拟坐标系与世界坐标系的匹配。在双目立体扫描仪中，存在三个坐标系。其一是拍得的照片坐标系，称之为像平面坐标系，定义其中的点为 $P(X, Y)$ ；其二是两个摄像机各自所在的坐标系，称之为摄像机坐标系，定义其中的点为 $P(x, y, z)$ ；最后是真实物体所在的坐标系，称之为世界坐标系，定义其中的点为 $P_w(x_w, y_w, z_w)$ 。其中 z_w 即为深度数据，整个测量算法即是围绕如何由 A、B 两个摄像机拍摄的图片坐标 $P_a(X_a, Y_a)$ 和 $P_b(X_b, Y_b)$ 得到世界坐标 $P_w(x_w, y_w, z_w)$ 。

坐标测量示意图如图 2 所示，两台摄像机呈不同角度摆放，由透镜成像原理可知，像平面位于摄像机前方 $P_w(x_w, y_w, z_w)$ ，即被测点的坐标。

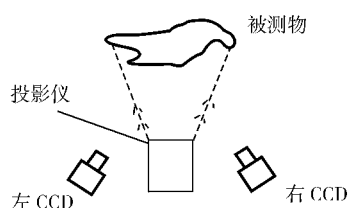


图 1 双目立体扫描仪简单模型
Fig. 1 Simple model of two-camera 3D scanner

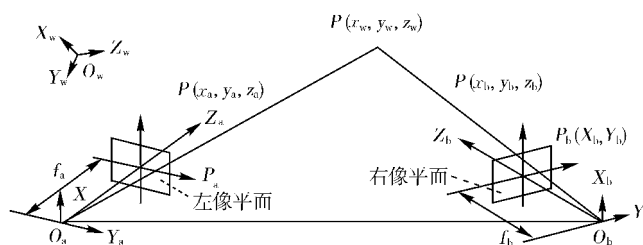


图 2 双目立体成像的数学模型
Fig. 2 Mathematics model of two-camera 3D vision

由上述条件可知，首先要求得各坐标系之间的转换关系^[1]。由成像原理可知，对摄像机 A 来说，其像平面坐标 $P_a(X_a, Y_a)$ 与其摄像机坐标 $P(x_a, y_a, z_a)$ 之间存在以下转换关系

$$\begin{cases} X_a = \frac{f_a \cdot x_a}{z_a} \\ Y_a = \frac{f_a \cdot y_a}{z_a} \end{cases} \quad (1)$$

设 ρ 为一非零常数， f 为摄像机的焦距，设 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为投影矩阵，用矩阵形式表示两坐标系间的关系，则有

$$\rho \begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

将摄像机坐标系转换为世界坐标系 $P_w(x_w, y_w, z_w)$ 主要决定于摄像机本身拍摄中产生的旋转和平移变换。设世界坐标系原点 O_w 相对摄像机坐标系原点 O 产生的平移矩阵为 $\bar{\mathbf{T}} = [T_x \ T_y \ T_z]^T$ ，而产生的旋转矩阵为 $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 。二者合称 \mathbf{M} 矩阵，即 $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_z \end{bmatrix}$ ，从而两坐标系间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

以上坐标转换关系可得到 $z_a = \rho/f$ ，即上述线性方程组对应的参数矩阵行列式为零，无法解出真正的三维坐标值^[2]。根据三角形测量法，可以通过联立摄像机 B，引入两台摄像机之间的变化关系矩阵 \mathbf{M}_{db} ，有下列关系式

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{db} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{db1} & r_{db2} & r_{db3} & T_{dbx} \\ r_{db4} & r_{db5} & r_{db6} & T_{dby} \\ r_{db7} & r_{db8} & r_{db9} & T_{dbz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将摄像机 B 的平面坐标 $P_b(X_b, Y_b)$ 与其摄像机坐标 $P(x_b, y_b, z_b)$ 之间的转换关系矩阵代入式 (4) 中，则有

$$\rho_b \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ 1 \end{bmatrix} = P_b \cdot \mathbf{M}_{db} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式 (1) 可得

$$\begin{cases} x_a = \frac{X_a \cdot Z_a}{f_a} \\ y_a = \frac{Y_a \cdot Z_a}{f_a} \end{cases} \quad (6)$$

联立式 (5) 和式 (6)，则可得到空间点在摄像机 A 坐标系下对应的坐标

$$\begin{cases} x_a = \frac{X_a \cdot (f_b \cdot T_{dby} - T_{dbz} \cdot Y_b)}{Y_b(r_{db7} \cdot X_a + r_{db8} \cdot Y_a + r_{db9} \cdot f_a) - f_b(r_{db4} \cdot X_a + r_{db5} \cdot Y_a + f_a \cdot r_{db6})} \\ y_a = \frac{Y_a \cdot (f_b \cdot T_{dby} - T_{dbz} \cdot Y_b)}{Y_b(r_{db7} \cdot X_a + r_{db8} \cdot Y_a + r_{db9} \cdot f_a) - f_b(r_{db4} \cdot X_a + r_{db5} \cdot Y_a + f_a \cdot r_{db6})} \\ z_a = \frac{f_a \cdot (f_b \cdot T_{dby} - T_{dbz} \cdot Y_b)}{Y_b(r_{db7} \cdot X_a + r_{db8} \cdot Y_a + r_{db9} \cdot f_a) - f_b(r_{db4} \cdot X_a + r_{db5} \cdot Y_a + f_a \cdot r_{db6})} \end{cases} \quad (7)$$

根据摄像机坐标系下的三维点坐标，即可得到世界坐标系下的 $P_w(x_w, y_w, z_w)$ ，从而完成了整个

测量目的。

2 格雷编码光栅原理

由上述数学原理可知，扫描仪的关键在于如何得到两幅图像上的立体像对。因此，自动获取对应像对即成为了要解决的关键问题。

本文采用主动投影光栅方法，投影仪投射多幅黑白相间的光栅到被测物体上，依次对其拍照，并确保左右两摄像机拍得所有光栅投射范围内的图像。使用多幅光栅比只采用一幅高细分度的光栅图像拥有更高的精确度，且易于识别和计算。考虑到可识别性与精度，本文采用 6 幅编码光栅图像，即每个像素点有 6 位的编码值，最细分的光栅图像拥有 2^5 即 32 个光栅周期。

对于每个相机所拍得的六幅照片，先进行预处理，由于拍摄的是同一区域，只是所加的光栅不同，每个像素点在不同细分度的光栅调制图中拥有不同的明暗度。按照明暗度进行编码，若亮处为 0 而暗处为 1，每个像素点拥有了各处独一无二的编码值。将同一编码的像素点对进行计算，可以得到深度信息^[3]。

由于采用编码识别的方式，需要考虑编码效率。与传统扫描仪使用的自然码编码方法相比，格雷码符合最小字符编码原则，误码率低，优势明显。本文使用的格雷码光栅可自动生成格雷码，图 3、图 4 是两组不同编码方式的光栅图对比。

对实际被测物体，加拍了光栅的图像，如图 5 所示。

对上面得到的图片进行预处理。首先进行二值化，并将图像的暗边（非投射光栅区域）切除，再去除背景，只留下被调制的光栅条纹。

根据上述编码规则，对每个像素点给予唯一的编码值。对两幅图像中相同编码值的点，即是所谓的立体像对，实现了迅速方便的获取。



图 3 格雷码光栅
Fig. 3 Gray coded raster



图 4 自然码光栅
Fig. 4 Natural coded raster



图 5 左右摄像机拍得的光栅调制图像
Fig. 5 Raster image of two camera

3 扫描仪模型的机械结构设计

扫描仪的整体机械结构包括两个摄像头，中间用于投射定位光栅的投影仪（也可以采用自选设计

的光学仪器), 以及连接它们的构件。

由于扫描仪结构中的几项主要参数决定了扫描范围与测量精度, 设计时应综合考虑。

传感器的测量范围是由左右摄像机有效视场范围的重合部分来确定的, 这是一个六面体结构。但实际测量中, 其测量范围为该六面体的一个部分。Y 方向上的测量范围主要由摄像机像面 Y 方向上的尺寸和有效焦距 f 决定, 因此本文主要需要确定在 X 和 Z 方向上的测量范围。

设摄像机像面 X 方向上的尺寸为 t_x , 扫描仪在 X、Z 上的测量范围为 Δx 和 Δz , 摄像机有效视场角为 α , 摄像机摆放角度为 θ , 基线 (两摄像机之间的距离) 长度为 B , 工作距离 (摄像机镜头离被测工件的距离) 为 Z , 则有

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\alpha &= \frac{t_x}{2f} \\ \Delta x &= 2Z \cdot \operatorname{tg}\alpha; \Delta z = B \cdot \operatorname{tg}\alpha \\ \theta &= \operatorname{arctg} \frac{\Delta z}{\Delta x} = \operatorname{arctg} \frac{B}{2Z} \end{aligned} \quad (8)$$

从而可以得出

$$Z = \frac{B}{2\operatorname{tg}\theta} \quad (9)$$

当其它条件不变, 测量范围一定而摄像机的摆放角度小于 45° 时, 基线 B 越长, 测量精度越高^[4]。但是如果基线过长, 会增加仪器尺寸, 不利于携带。因此应适当设置基线。

由成像关系可知, 图像处理引入的物方误差为 $\operatorname{err}_0 = \operatorname{err}_1 \cdot \beta \approx \operatorname{err}_1 \cdot \frac{\sqrt{Z^2 + B^2/4}}{f}$ 。所以当其它条件不变时, 适当的增大焦距 f 可以减少物方误差, 而此时引入的镜头畸变误差也会变小。然而, 有效焦距的增大会导致测量范围的缩小。

本文采用主动光栅影的方法, 光栅图像在深度方面的清晰度受到投影仪的光学景深的限制, 使用的 Sony 投影仪的景深在几十毫米左右。

根据经验, 实际测量系统的要求为:

- 有效测量范围大于 $80 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$;
- 深度测量范围 $20 \text{ mm} < \Delta z < 80 \text{ mm}$;
- 基线 $B \leq 1000 \text{ mm}$;
- 工作距离 $B < 800 \text{ mm}$;

综上所述, 本文最终确定选择 CCD 的型号为 BASLER A102kc, 摄像机镜头有效焦距为 60 mm ; 扫描仪基线 $B=600 \text{ mm}$; 工作距离 $Z=700 \text{ mm}$, 并要求相机和投影仪基本上在水平位置上处于同一平面上, 相机头可有一定程度的前伸和高于投影仪。

可以计算出上述设计的有效测量范围以及摄像机的摆放角: $\Delta x=90.75 \text{ mm}$; $\Delta y=75.25 \text{ mm}$; $\Delta z=39.75 \text{ mm}$; $\theta=23.65^\circ$, 数据基本上可以满足测量的要求。

4 摄像机标定

对于取得的立体像对, 还必须得到摄像机的自身参数与两摄像机的空间关系来计算三维点坐标, 这就需要进行摄像机的标定。

由于摄像机标定已有了成熟的方法, 因此不作为本文的重点, 仅对其方法进行简单的描述。本文采用了 Roger Tsai 两步标定法, 从而得到各摄像机的 M 阵与其空间关系阵 M_d 。

本文采用的标定物是 7×7 的黑色实心方形块阵列, 如图 6 所示, 方块的中心表示点的位置。

Roger Tsai 两步标定法的第一步是利用最小二乘法求解超定线性方程，求出外部参数；第二步求解内部参数，如果摄像机无透镜畸变，可由一个超定线性方程解出。如果存在一个以二次多项式近似的径向畸变，则可用一个三变量的优化搜索求解^[5]。

本文从不同角度对标定物进行拍照，图 7 即为所得图片。

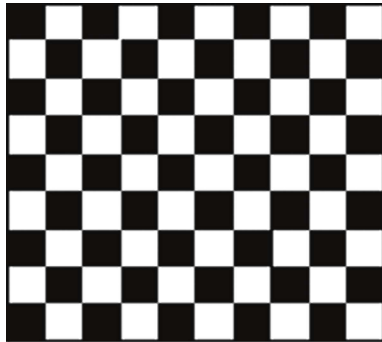


图 6 标定模板
 Fig. 6 Demarcate template

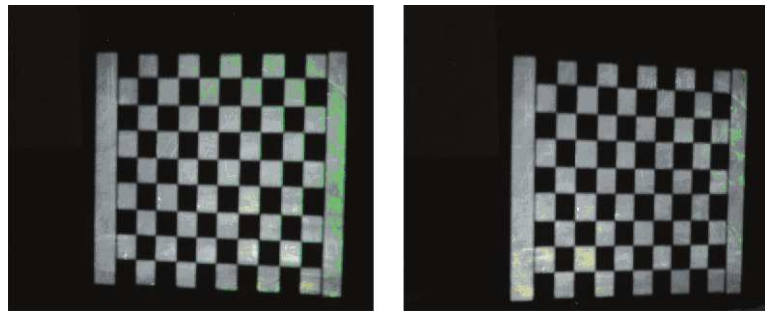


图 7 左右摄像机各处拍得的标定图片
 Fig. 7 Demarcate image of two camera

设 $\mu = [\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5]$ 是所要求的标定参数向量，其中旋转参数 r_{11} 、 r_{12} 、 r_{22} 和与平移参数 t_x 和 t_y 之比构成了 μ 的各个元素

$$\mu_1 = \frac{r_{11}}{t_y}; \mu_2 = \frac{r_{12}}{t_y}; \mu_3 = \frac{r_{21}}{t_y}; \mu_4 = \frac{r_{22}}{t_y}; \mu_5 = \frac{t_x}{t_y} \quad (10)$$

设向量 $b = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]$ 包含了 n 组对应点的图像横坐标 u_i 。由已知构造矩阵 A 和向量 b ，求解线性方程

$$A\mu = b \quad (11)$$

得到未知的参数向量 μ ，从而可以根据 μ 计算出焦距 f 、摄像机畸变因子 κ_1 、旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 。最终可以得到的左右摄像机的标定参数。

5 三维深度数据的最终获取

根据上面得到的立体像对二维坐标以及摄像机参数，通过自行编写的软件，根据数学原理，可求出具体的三维点。表 1 是部分三维点坐标值。

借用已成熟的建模方法，利用 3D MAX 等计算机建模工具，就可以根据所得到的深度数据，建立物体的三维模型。

表 1 部分三维点坐标值
 Tab. 1 Some 3D point data

| | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 深度数据 | 12.19 | 12.46 | 12.72 | 13.01 | 13.27 | 13.56 | 13.56 |
| | 12.18 | 12.46 | 12.73 | 13.00 | 13.28 | 13.55 | 13.55 |
| | 12.19 | 12.47 | 12.74 | 13.02 | 13.29 | 13.57 | 13.56 |
| | 12.17 | 12.43 | 12.71 | 12.98 | 13.26 | 13.53 | 13.54 |
| | 12.06 | 12.20 | 12.56 | 13.15 | 13.21 | 13.35 | 13.35 |
| | 12.18 | 12.45 | 12.72 | 13.00 | 13.27 | 13.54 | 13.55 |

6 结论

本文通过对人体双目三维视觉原理的分析，阐述了进行双目视觉测量的基本方法。在双目立体扫描仪的数学实现原理的基础上，根据现实测量的需求，设计了扫描仪的机械结构。对于立体像对定位的关键技术，即光栅投影方法，进行了具体的分析和研究，提出了格雷码光栅的解决方法，并与传统自然码光栅进行了比较，说明了其优势。在对摄像机标定方法进行简单说明后，在实验室环境下搭

建了扫描仪模型,进行了严密的实验,最终得到深度数据,完成了整个测量过程。

[参考文献] (References)

- [1] SHAPIRO L G, STOCKMAN G C. 计算机视觉[M]. 赵清杰, 钱芳, 蔡利栋. 北京: 机械工业出版社, 2005.
SHAPIRO L G, STOCKMAN G C. Computer vision[M]. ZHAO Q J, QIAN F, CAI L D. Beijing: Mechanism and Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 闵新力, 万德安. CCD双目视觉测量系统结构参数设置的理论研究[J]. 机械设计与制造, 2001, 6(3): 25~29.
MIN X L, WAN D A. CCD two-camera vision measure system parameter research[J]. Mechanism Design and Manufacture, 2001, 6(3): 25~29. (in Chinese)
- [3] 张广军. 结构光三维视觉及其在工业中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 2(6): 650~653.
ZHANG G J. Structured light 3D vision application in industry[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 2(6): 650~653. (in Chinese)
- [4] 郑午, 郑玉彬, 张学文, 等. 三维机械设计[M]. 北京: 化工出版社, 2006.
ZHENG W, ZHENG Y B, ZHANG X W, et al. 3D mechanism design[M]. Beijing Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [5] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Ourual of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323~344.