

基于格雷码和多步相移法的双目立体视觉三维测量技术研究

王兵, 郭玲

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘要: 传统的被动式双目立体视觉三维测量技术, 具有操作简单, 使用灵活方便, 相机标定技术成熟的优点, 但是对于特征点稀疏图像, 寻找匹配点困难, 匹配精度低; 编码结构光测量方式通过向被测物体投射特定的编码图案, 获取编码图像进行解码求解物体的三维信息, 具有测量精度高, 速度快的优点, 但是存在着投影仪标定精度低, 实现难度大的缺点; 提出了将双目立体视觉和编码结构光相结合的三维测量方法, 在完成双目校正的基础上, 向被测物体投射格雷码图案和多步相移图案, 给予被测物体容易识别和可控制的特征信息, 最后求取物体的三维信息; 而且通过实验论证了投射多步相移图案比起 4 步相移图案, 测量精度更高, 能够更好的体现物体细节。

关键词: 3D 测量; 双目立体视觉; 编码结构光; 格雷码; 多步相移法

3D Measurement Technology Based on Binocular Stereo Vision Using Gray Code and Multi-Step Phase-Shift Structured Light

Wang Bing, Guo Ling

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The traditional passive binocular stereo vision three-dimensional measurement technology has the advantages of simple operation, flexible and convenient use, and mature camera calibration technology, but it is difficult to find matching points, and the matching accuracy is low for images with sparse feature points. The encoded structured light measurement method acquires the encoded image by decoding a specific coding pattern to the object to be measured, and decodes the three-dimensional information of the object. It has the advantages of high measurement accuracy and high speed, but it has the disadvantages of low calibration accuracy and difficult to realize. The 3D measurement method combining binocular stereo vision with coded structured light, based on completing the binocular correction to the object projection, gray code patterns and multi-step phase-shift pattern to the measured object can be easily identified and controlled feature information, finally obtain three-dimensional information of objects. Moreover, it is proved by experiment that projective multi-step phase-shifting pattern is more accurate than 4 step phase shifting pattern, and can reflect object details better.

Keywords: 3D measurement; binocular stereo vision; structured light; gray-code; multi-step phase-shift

0 引言

眼睛在人类的所有感觉器官中最为重要, 人们从外界接受的信息绝大部分都来自于我们的眼睛, 我们常常通过双眼感受这世界的种种美好^[1]。计算机视觉就是模仿人类视觉系统, 以各类成像系模仿眼睛, 计算机模仿人的大脑进行处理接受到图像信息, 其目的之一就是根据获相机取到的图像二维信息转变为目标物的三维坐标^[2]。因此, 随着科学技术的发展三维测量技术在工业产品模型设计、精密部件测量、医学领域等方面有着重要的研究意义。

本文在基于格雷码和多步相移法的基础上结合双目立体视觉进行三维测量技术研究, 第 1 节介绍了双目立体视觉成像原理和立体校正方法, 第 2 节介绍了格雷码与多步相移法的编解码原理, 第 3 节通过实验论证了基于格雷码和多步相移法的双

目立体视觉三维测量技术的可行性。纸盒三维测量实验在完成双目校正的基础上, 向物体表面投射 7 幅格雷码图案和 15 幅相移编码图案, 最后根据相机获取的物体编码图像解码得到物体的三维信息^[3]。

1 双目立体视觉

如图 1 所示, 根据是否要接触被测物体, 三维测量可以分为非接触式和接触式^[4]。非接触式测量中根据是否主动向被测物体投射光源, 非接触式三维测量又可以分为被动式和主动式, 其中主动式三维测量通过向被测物体投射特殊的光源, 形成相应的图像, 最后由相机采集图像经过计算机处理, 得到物体的三维信息^[5]。

双目立体视觉属于被动式三维测量方法, 由环境中的自然光, 如太阳的直射光和天空光对待测物体进行照明, 而不需要向被测物体投射人造光源进行照明^[6]。双目立体视觉通过模拟人的双眼, 将两台相机安装在待测物体的两个不同视角位置, 使得两个相机与待测物体构成一个三角形, 最后根据对待测物体拍摄得到的两幅图片和三角法原理获取待测物体的三维信息^[7]。双目立体视觉虽然不需要向被测物体提供人造光源, 成本低廉, 但是对没有较多特征的物体图像匹配

收稿日期:2017-08-31; 修回日期:2017-10-31。

作者简介: 通讯作者: 王兵 (1992-), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事三维扫描重建方向的研究。

郭玲 (1976-), 女, 江苏南京人, 副教授, 博士, 主要从事计算机视觉与三维重建方向的研究。

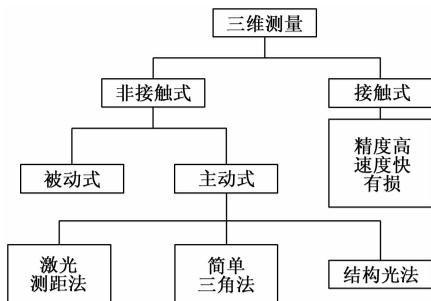


图 1 三维测量分类

困难，精度低。

编码结构光法属于主动式三维测量方法，需要向待测物体投射特定的编码图案，然后由相机获取一系列的编码图像解码，进而得到物体表面每条条纹的特定编号以及对应该光线投射角，再由结构光基本公式获得待测物体的三维坐标^[8]。

1.1 双目相机校正

如图 2 所示，点 P_1, P_2 为相机校正前点 P 在左右相机中的成像点，点 P'_1, P'_2 为相机校正后点 P 在左右相机中的成像点。点 c_1, c_2 为左右相机的光心，点 e_1, e_2 为相机校正前基线 $c_1 c_2$ 与左右相机成像平面的交点，叫做极点^[9]。

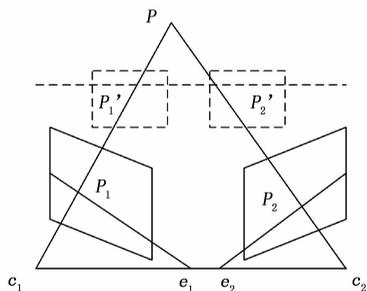


图 2 双目视觉系统

首先根据张氏标定法求得左右相机各自的旋转矩阵和平移矩阵。点 P 和 P_1, P_2 点可表示为：

$$\begin{cases} P_1 = R_1 P + T_1 \\ P_2 = R_2 P + T_2 \end{cases} \quad (1)$$

由式 (1) 可以得到两个相机之间的相对关系：

$$P_1 = R_2 R_1^{-1} P_2 + T_2 - R_2 R_1^{-1} T_1 \quad (2)$$

由式 (2) 可以得到两个相机之间的相对旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 为：

$$\begin{cases} R = R_2 R_1^{-1} \\ T = T_2 - R T_1 \end{cases} \quad (3)$$

首先将左右相机成像平面各旋转 R 的一半，使左右相机的成像平面重投影畸变最小，左右视图共同面积最大^[10]。

$$\begin{cases} R_l = R^{1/2} \\ R_r = R^{-1/2} \end{cases} \quad (4)$$

此时左右相机的成像平面平行，但是与基线不平行，对此我们需要构造变换矩阵 R_{rect} ：

$$R_{rect} = [(e_1)^T \quad (e_2)^T \quad (e_3)^T]^T \quad (5)$$

构造 e_1 使得左视图极点为无穷远处，构造 e_2 与主光轴方向正交，与 e_1 垂直，构造 e_3 与 e_2 和 e_1 正交：

$$\begin{cases} e_1 = \frac{T}{T} \\ e_2 = \frac{[-T_y \quad T_x \quad 0]}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}} \\ e_3 = e_1 \times e_2 \end{cases} \quad (6)$$

根据式 (4) 合成旋转矩阵和式 (5) 构造矩阵可以得到式 (7)，使得同一物点 P 在左右相机中像点的纵坐标相等，即 $y(p'_1) = y(p'_2)$ ：

$$\begin{cases} R'_l = R_{rect} * R_l \\ R'_r = R_{rect} * R_r \end{cases} \quad (7)$$

1.2 双目相机成像原理

在完成双目校正后，极点 e_1, e_2 位于无穷远处，两相机的光轴平行，同一物点的像点在左右相机中高度相同。极线约束使得对应像点的寻找由面搜索变为线搜索，二维搜索变为一维搜索，而经过相机校正后对应点搜索变为同一行搜索，大大减少了计算量^[4]。

图 2 中，根据三角相似关系可以得到：

$$\begin{cases} x_{P'_1} = f \frac{X_c}{Z_c} \\ x_{P'_2} = f \frac{(X_c - B)}{Z_c} \\ y_{P'_1} = y_{P'_2} = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (8)$$

其中： B 为左右相机光心点 c_1, c_2 的距离， f 为相机焦距，定义 $D = x(p'_1) - x(p'_2)$ ，可以得到点 P 在左相机下的三维坐标值为：

$$\begin{cases} X_c = B x_{P'_1} / D \\ Y_c = B y_{P'_1} / D \\ Z_c = B f / D \end{cases} \quad (9)$$

由此我们可以得到相机图像中点 P_1 与世界坐标系中点 P 的关系为：

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & 1/B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ D \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中：点 c_x, c_y 为左相机主点坐标。根据式 (10) 可以得到左相机图像坐标系中点在世界坐标系中对应点坐标为 $(X/W, Y/W, Z/W)$ ^[11]。

2 结构光

编码结构光法是一种主动式三维测量方法，由投影仪向待测物体投射一系列编码图案，使得物体具有容易识别的特征点^[12]。再由相机获取图像解码获得特征点的投射角度，最后根据三角法求得物体的三维坐标^[13]。编码结构光法与点结构光和线结构光结构光相比，测量速度快，时间短，与传统的双目视觉相比具有更高的匹配精度，对于特征不多的图像也能有着很好的测量效果。

2.1 格雷码

在结构光编码中，二进制编码使用最为普遍，其原理也最为简单^[14]。投影图像只需要用两种颜色来区分不同的条纹，分别记为 0、1，其中 0 对应黑色，1 对应白色。通过向待测物

体投射 m 幅二进制编码图案, 将待测物体表面划为个区域。格雷码由二值码发展而来, 它与普通二值码相比更加可靠。如表 1 所示, 十进制的 1 变成 2 的时候, 二进制码的每一位数值都要进行跳变, 而格雷码只有一位进行跳变。

表 1 二进制与格雷码比较

十进制	二进制	格雷码
0	00	00
1	01	01
2	10	11
3	11	10

格雷码属于可靠性编码, 当状态发生变化时只存在一位跳变, 而不会出现多位跳变的情况, 提高了解码的正确率, 可以更加方便检测条纹编码是否出错^[15]。格雷码编码原理简单, 准确度高, 但是在三维测量需要投射大量图案, 而且随着图案的增加, 黑白条纹边界分辨率降低, 降低测量的准确度。因此, 我们先向待测物体表面投射如图 3 所示的 7 幅格雷码图案, 将待测物体表面分为 128 个区域。格雷码解码后可以获得 0~127 周期次数 k , 再向待测物体表面投射多步相移图案来进行三维测量。

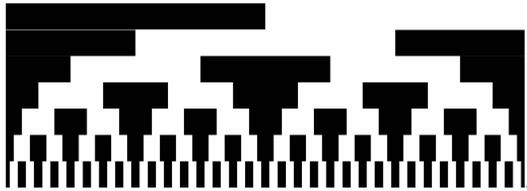


图 3 格雷码图案

图像阈值分割中无论是采用自适应阈值还是固定阈值都存在不可避免的错误, 对此我们采用简化的 Daniel Scharsterin^[16]方法, 在向物体表面投射如图 3 所示的格雷码图案后, 再向物体表面投射如图 4 所示的格雷码取反图案。 (x, y) 处投射格雷码图案时灰度值为 $I(x, y)$, 投射格雷码取反图案时灰度值为 $I'(x, y)$, 若 $I(x, y) - I'(x, y) > 20$ 则取值为 1, 反之则为 0。

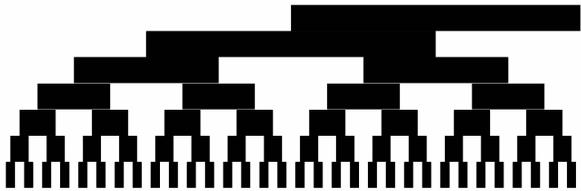


图 4 格雷码取反图案

2.2 多步相移法

相移法是按顺序向待测物体表面投射多幅正弦周期相移图案, 然后由相机获取经相移图案调制的待测物体图像, 解码得到待测物体表面每点的主相位值^[17]。向物体表面投射如图 5 所示相移图案, 点 (x, y) 处光照强度为:

$$I_n(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)[\cos\theta(x, y) + 2n\pi/N] \quad (11)$$

其中: $I_n(x, y)$ 为点 (x, y) 在第 n 幅相移图中的灰度值, $I'(x, y)$ 为条纹光的背景光强, $I''(x, y) / I'(x, y)$ 为条纹反差, $\theta(x, y)$ ($\theta \in (-\pi, \pi)$) 为待求主相位值:

$$\theta(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(2n\pi/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(2n\pi/N)} \quad (12)$$

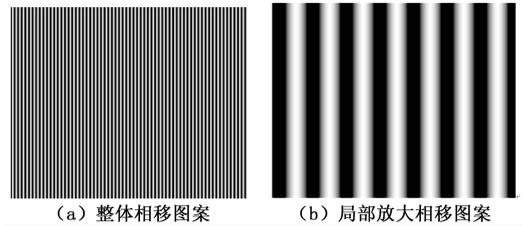


图 5 相移图案

相移法的优点在于每点的相位值不受邻点光照强度的影响, 分辨率高, 同一周期内每点相位值绝对唯一。缺点在于图像中周期的确定存在二义性, 因此我们需要先用格雷码对物体表面进行周期划分, 再用相移法对物体表面进一步细分。格雷码图案的最小周期必须为相移图案周期的 N 倍, 以保证在主相位值发生突变时周期值 k 同步突变^[18]。

将点 (x, y) 由相移法得到的主相位值 θ 与格雷码解码周期 k 向叠加, 求得点 (x, y) 的绝对唯一主相位值 $\psi(x, y)$:

$$\psi(x, y) = 2k\pi + \theta(x, y) \quad (13)$$

2.3 周期校正和匹配点搜索

在理想情况下主相位值 θ 和格雷码解码周期 k 同步发生突变, 求得的每点主相位值 $\psi(x, y)$ 单调递增, 即 $\psi(x, y+1) > \psi(x, y)$ 。但是考虑到环境光照强度、相移图案稳定性等一系列因素, 可能会导致格雷码解码周期 k 与主相位值 θ 之间存在着周期错位。若相邻两点之间发生周期错位, 则 $\psi(x, y) - \psi(x, y+1) \approx 2\pi$ 。因此我们选取阈值 π 来判断是否发生周期错位, 若 $\psi(x, y) - \psi(x, y+1) \geq \pi$, 则令 $\psi(x, y+1) = \psi(x, y+1) + 2\pi$ 。

由图 2 可知, 在完成双目校正后, 点 P 在左相机中成像位置的横坐标 x_1 必定大于在右相机中成像位置的横坐标 x_2 。而且考虑到在周期校正后主相位值绝对递增, 因此点 P 在右相机中成像平面的对应点可以在 $(0, x_2)$ 采用二分法进行查找。

3 实验结果与分析

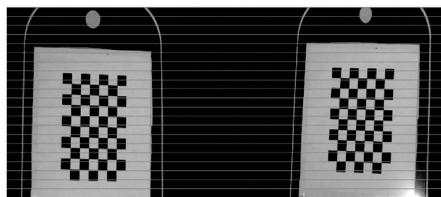
为验证基于格雷码和多步相移法的双目立体视觉三维测量方法的可行性, 搭建三维测量系统结构。实验器材包括: 相机两个 (分辨率为 $1\,920 \times 1\,080$), 投影仪一台 (分辨率为 $1\,280 \times 800$), 计算机一台, 一张打印棋盘格的 A4 纸一张和待测物体白色盒子一个。

首先对双目相机进行立体校正, 使得左右相机严格遵循行对齐, 校正效果如图 6 所示。

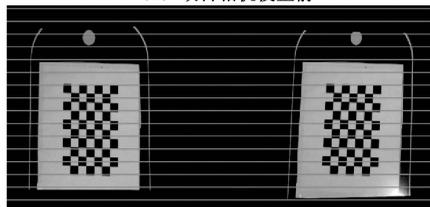
完成双目相机校正后向白色盒子表面投射 7 幅格雷码图案和 7 幅格雷码取反图案, 最后再投射 15 幅相移编码图案, 如图 7 所示。

对获取到的图像进行解码, 得到视差图, 结合双目视觉成像原理, 求出白色盒子的世界坐标系中的三维信息, 将点云导入到 meshlab 中结果如图 8 所示。

由图 8 所示 7 步格雷码和 15 步相移法很好的反映了白色盒子的三维形貌, 为了进一步确定三维测量的精度, 以盒子高度为基础值, 求解最大测量误差, 并与 4 步相移法的测量结果

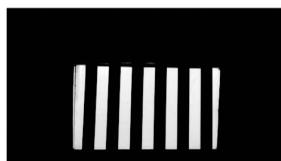


(a) 双目相机校正前



(b) 双目相机校正后

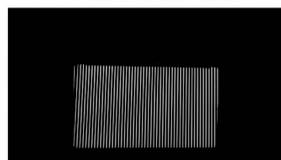
图 6 棋盘图像



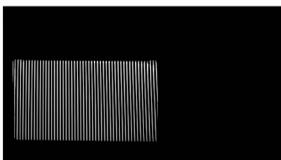
(a) 左相机格雷码图像



(b) 右相机格雷码图像



(c) 左相机相移图像



(d) 右相机相移图像

图 7 格雷码与相移法图像

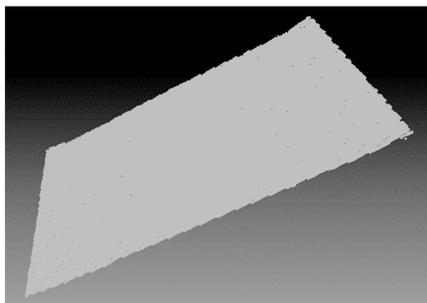


图 8 白色盒子点云图像

作比较, 如表二所示。

表 2 三维测量比较

测量方法 指标项	7 步格雷码与 15 步相移法	7 步格雷码与 4 步相移法
点云数目/万	21	18
点云距离/mm	0.21	0.24
最大误差/mm	0.54	0.82
编码图案/幅	29	18
点云计算时间/ms	6 765	5 413

理想情况下相移和测量不存在误差, 则根据 4 步相移法可以精确计算出物体每点的相位值。但是, 在实际应用中测量值受到相移误差、传感器误差和周围环境的影响, 导致测量值不精确。采用 15 步相移法对测量值进行优化统计, 虽然无法完

全消除误差, 却大大降低了误差带来的影响。由表二我们可以看出采用 15 步相移法与 4 步相移法相比, 虽然需要投射更多的编码图片, 解码并计算三维点云的时间更长, 但是在测量精度上有着极大的提高, 能够更好的体现三维物体的形貌。

4 结束语

三维测量技术在文物保护、自动化生产、精密工业部件测量和逆向工程等方面有着重要的应用, 并且随着成像设备、投影仪和其他光电元件的进步, 测量的精度也在不断的提高。

本文基于格雷码和多步相移法的双目立体视觉三维测量技术研究, 在完成双目相机校正的基础上向待测物体投射格雷码图案和多步相移图案, 对得到的编码图像进行解码很好的重构物体的三维形貌。并与 4 步相移法进行比较, 证明投射多步相移图案虽然会牺牲一些测量时间, 但是能够获得更加细致物体三维信息, 测量精度更高。

参考文献:

- [1] 陆 乐. 平面设计中的视觉流程概述 [J]. 科技创新导报, 2008 (33): 67-67.
- [2] 戴 磊. 基于视觉反馈的机器人控制 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [3] 苑惠娟, 于 佳, 尚爱军. 基于颜色编码的大型物体表面三维测量 [J]. 红外与激光工程, 2008 (s1): 166-169.
- [4] 喻士领. 基于光栅条纹投影的三维测量系统标定方法的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [5] 许志梁. 基于结构光和立体匹配的稠密深度获取技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [6] 许志梁. 基于结构光和立体匹配的稠密深度获取技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [7] 沈国峰. 基于双目立体视觉的牙颌模型测量技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [8] 方 勇. 颜色编码三维测量的图像处理方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- [9] 刘 伟. 基于多视图的三维重建技术研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2009.
- [10] 张颖江, 潘 尧, 吴 聪. 基于车载系统双目 CCD 相机测距 [J]. 信息安全与技术, 2016, 7 (1): 57-62.
- [11] 钱 真, 彭秀艳, 贾书丽, 等. 动平台下双目视觉定位标定算法研究 [J]. 计算机仿真, 2012, 29 (10): 293-297.
- [12] 雷 震. 单相机单投影仪的编码结构光三维测量方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [13] 刘 欢. 实时彩色三维建模技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [14] 刘永久. 基于结构光投影的运动物体高速实时三维测量方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [15] 宋昌江. 基于双目视觉的三维物体表面测量系统设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [16] Scharstein D, Szeliski R. High-accuracy stereo depth maps using structured light [A]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings [C]. 2003 IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2003; 1-195-1-202 vol. 1.
- [17] 于晓洋, 单丽娜, 曹沈楠, 等. 结构光时间编码技术进展 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010, 15 (1): 98-102.
- [18] 宋昌江. 基于双目视觉的三维物体表面测量系统设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.