

基于结构光的三维成像技术

李托拓 胡 锋 耿 征

(中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室 北京 10019)

摘要:就结构光三维成像的基本原理展开讨论,就投影图案的不同对结构光三维成像技术进行分类,对于每一类中选取其中具有代表性的几种方法进行描述,并给出三维成像技术的性能评价指标,对不同方法进行比较。介于定标精度对最终重建精度有着决定性的意义,我们对基于结构光三维成像系统的定标方法也作了简单介绍。

关键词:三维重构,结构光,相机投影仪系统

Structured – light 3D Surface Imaging Technology

LI Tuotuo¹, HU Feng¹, GENG Zheng¹

(HaiDian District, BeiJing, China 100190)

Abstract: In this paper we provide a review of recent advances in 3D surface imaging technologies and focus particularly on non – contact 3D surface imaging techniques based on structure illumination. Performance indexes of 3D imaging system are discussed, and various 3D surface imaging schemes are categorized, illustrated, and compared. Calibration techniques are also discussed, since they play critical roles in achieving the required precision.

Keywords: 3D reconstruction, Structural illumination, Camera and projector system

我们所生活的世界是三维的,但是传统相机和图像传感器都只能获取二维的图像,不具备深度信息。这种局限限制了人类通过二维成像系统对真实世界中复杂的物体的感知及理解的能力。所谓的三维成像技术,是指可以通过非接触的方式获取三维物体及场景中的表面形状的三维(x, y, z 坐标)信息。三维成像技术的出现,突破了传统二维成像系统存在的局限,增加了人类对世界的认识理解能力。

1 前言

三维成像技术具有广阔的应用背景,随着高清晰度高速图像传感器的出现以及计算机运算能力提升,使得过去的几十年中,三维成像技术得到了很大发展。

根据其重建结果可以分为表面重建和体重建(主要指医学中的CT,MR)。本文中所提到的三维成像技术主要指的是表面重建技术。表面三维成像技术又可以分两类:被动三维成像和主动三维成像。被动三维成像技术中获取的图像完全来自于物体表面对环境光的反射,而主动三维成像是指在重建过程中需要往被测表面辐射能量,通过采集反射回来的能量来重建其三维形状。

几种比较常用的三维重构技术有:激光扫描,双目视觉,结构光,和TOF(time of flight)。激光扫描法可以得到很好的精度,但是成本比较高,测量速度慢,不适合测量动态场景而且容易对人或者动物的眼睛造成伤害。当前的TOF传感器的分辨率较低,精度比较低,成本价格较高所以目前未得到广泛的使用。双目视觉系统使用一对相机组成双目相机,通过对两个相机拍摄到的图像进行匹配搜索,最后使用三角化方法计算

出匹配点的深度。极线约束使得匹配搜索范围降为沿着线方向的一维搜索,尽管如此,双目图像匹配的运算量仍然非常大,仍比较耗时。同时对于某些纹理特征不明显的场景,例如白色的墙壁,往往不能得到较满意的结果。这些问题限制了双目视觉的实际应用。由于投影仪和相机具有等效的光学模型,把双目视觉中的一个相机换成投影仪所构成的结构光三维重构系统和双目视觉具有等效的光学结构,但是由于引入了投影仪,通过投影不同的图案可以使得匹配问题变的非常简单。在结构光三维重构系统中,通过对投影仪投影图案进行编码,使得我们可以对相机捕捉到的投影图案进行分析,解码,从而建立起投影仪和相机图像之间的像素点对应关系。如果已知结构光三维成像系统的定标数据,即可以用和双目视觉中同样的方法计算出三维信息。

结构光三维重构技术具有成像结果稳定,精度高,点云稠密等等特点,因此在很多领域得到广泛应用,如:逆向工程,产品质量检测,整型美容手术等等。本文的内容将按照如下展开,第二节主要介绍了结构光三维成像系统的定标方法的及其成像原理,第三节对不同的结构光编码进行分类介绍,比较。第四节介绍了相机投影仪系统的性能评估。最后在第五节对全文进行总结。

2 结构光三维成像系统定标及基本原理

2.1 相机及投影仪光学模型

计算机视觉领域中,通常使用相机的简化模型,即小孔模型来描述相机^[1]。相机模型通常使用一个矩阵表示,这个矩阵称为摄像机矩阵。由于投影仪的光学模型和相机的光学模型除投影方向不相同之外并无其他差异,所以用这个矩阵同样适用于投影仪。摄像机矩阵用来描述三维空间中的点 $M = [X, Y, Z, 1]^T$ 和它在相机成像传感器上的对应点 $m = [x, y, 1]^T$ 位置:

$$m \sim KR[iI - t]M$$

其中: $K = \begin{bmatrix} f_x & s & u_x \\ 0 & f_y & u_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 其中 K 为内参数矩阵, f_x, f_y 分别为 x, y 轴方的焦距 u_x, u_y 为主点的坐标,对于相

机主点通常在图像正中央位置,而对于投影仪,通常图像主点位于图像底部的中间位置。 s 为 x 轴 y 轴之间的扭曲。 R 为摄像机坐标系与世界坐标系的旋转, t 为摄像机坐标系的原点在世界坐标系下的坐标。

2.2 相机投影仪系统定标

前一节提到的摄像机参数矩阵可以通过对相机投影仪标定来确定。定标的结果直接决定三维系统的重建精度。相机的定标就是要建立传感器上的点与空间中过光心的直线之间的对应关系。这个关系往往还需要考虑到透镜的畸变对其影响。当前相机的定标技术在计算机视觉领域已经比较成熟,有很多可以直接使用的相机定标程序模块。首先简单介绍一种常用的平板定标算法^[2],然后再介绍投影仪的定标方法。

2.2.1 相机的平板定标算法

假设平面标定模板的位置在世界坐标系的 $Z=0$ 的平面上,这样在平面上的每一个点的其次坐标变为 $M = [X, Y, 0, 1]^T$, 因此定标板上的任意一点和图像中其对应点的位置关系可以用一个单应矩阵 H 来描述:

$$m \sim K[r_1, r_2, r_3][I - Rt][X, Y, 0, 1]^T$$

$$m \sim K[r_1, r_2, -Rt][X, Y, 1]^T$$

$$m \sim H[X, Y, 1]^T$$

其中 $H = [h_1, h_2, h_3] = K[r_1, r_2, -Rt]$ 称为单应矩阵, r_1, r_2, r_3 为旋转矩阵的三个列向量。对于旋转矩阵,它的三个列向量相互正交,因此下面的方程成立:

$$h_1^T(KK^T)^{-1}h_2^T = 0$$

$$h_1^T(KK^T)^{-1}h_1^T = h_2^T(KK^T)^{-1}h_2^T$$

每一个单应矩阵都可以得到一组上面的方程,及对内参数提供两个约束。上面的方程中 $(KK^T)^{-1}$ 是一个对称矩阵,所以它只有六个自由度,因此上面的方程也可以写成一个6维向量的形式。

$$A = K^{-T}K^{-1} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_4 \\ A_2 & A_3 & A_5 \\ A_4 & A_5 & A_6 \end{bmatrix}$$

$$\alpha = [A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6]$$

将单应矩阵 H 的第 i 个向量写作 $h_i = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]$ 然后我们可以得到:

$$h_i^T (KK^T)^{-1} h_j^T = v_{ij} \alpha$$

其中 $v_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i1}h_{j3} + h_{i3}h_{j1}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]^T$ 。上面的方程组又可以重新改成为齐次方程的形式。为了解出未知内参数向量 α , 我们至少要获取3个不同视角拍摄的棋盘的图像。但是在实际使用中由于存在噪声,所以通常使用多于三张图片进行定标,对于得到的超定方程,使用 SVD 分解求得一个最小二乘解。最终再通过对下面的能量函数进行最优化处理以从而减少反投影误差。

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| m_{ij} - \hat{m}(K, R, t, M_j) \|^2$$

2.2.2 投影仪的亮度定标

在实际使用中,为了得到更好的显示效果,投影出来的图像实际亮度和投影图像中像素点的亮度值并不满足线性关系。由于在某些三维成像系统中的时候,亮度值将会被用来恢复该点在投影仪成像平面的坐标,因此必须对投影仪的亮度进行标定,使得其投出来的图像实际亮度和投影图像的亮度值满足线性关系。对投影仪的亮度进行标定,往往需要捕捉几个投影仪投影出来的不同的图案,这些图案通常包括一组灰度和黑白图案。由采集到的图像可以得到投影仪投影图像的实际亮度和投影图案的亮度值的关系曲线,然后使用高阶的多项式函数对这个进行拟合,再对得到的拟合函数求逆函数,最后使用这个逆函数对三维成像中用到的投影图案进行变换,这样即可以恢复投影仪亮度和投影图案中向像素点线性关系(图1所示)。

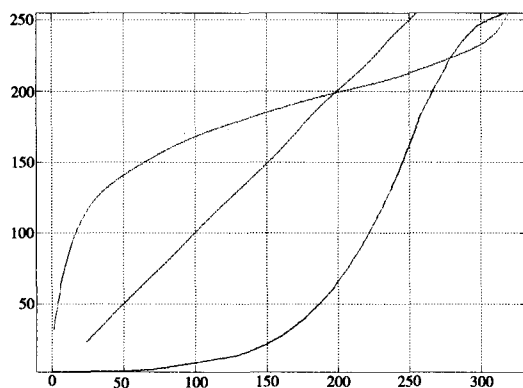


图1 投影仪亮度定标。蓝色为原始亮度曲线,绿色为拟合出的反函数,红色为校正后的亮度曲线

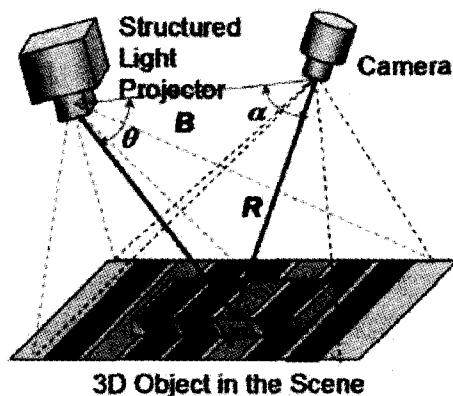


图2 结构光三维成像基本原理

2.2.3 投影仪的几何标定

投影仪的和相机具有同样的光学模型,因此和相机的定标存在一些共同点。而相机定标算法现在已经比较成熟,所以投影仪的标定也可以借鉴相机定标算法。但是由于投影的方向不同,所以较难建立起世界坐标系中的点和投影仪图案中点的对应关系,不同的投影仪定标算法使用不同的方法确定空间点和投影仪平面像素点的对应关系。通常投影仪定标使用一个已经定标好的相机和一个定标模板。先对使用定标好的相机计算出定标模板的所在的三维平面。然后用投影仪投出标定图案,如棋盘图案等^[3,4]。用相机采集到棋盘图案,由于模板所在的平面已知的,所以可以得到检测出的角点在空间中的坐标,而投影仪定标图案中角点的

位置是已知的,这样就建立起投影仪内的平面和空间点的对应关系。这种方法原理简单易于实现,但是往往定标的精度较大程度上取决预先定标的相机精度,定标过程会将相机定标误差和投影仪定标误差累积在一起。还有一些定标方法通过投影结构光或者二值编码方法,采集到图片后通过解码确定标定模板在投影仪平面的位置,这种方法不需要事先将相机进行定标,因此不会引入累积误差。但是这种方法往往会受光照等因素影响。棋盘图案中不同颜色使得角点处亮度存在突变,影响到最终定位精度,因此也有些方法使用红蓝棋盘的来避免这种情况导致的误差。

2.3 结构光三维成像基本原理

立体(双目)视觉的基本原理就是对视差进行三角化从而计算物体的深度。投影仪的光学模型和相机的光学模型基本相同只是在投影方向上存在差异,因此双目视觉和结构光三维成像系统的光学模型是等效的,成像原理也基本相同。由于引入了投影仪,结构光三维成像系统中可以通过对投影图像的编解码解决双目匹配的问题。如图2中所示,对于已经定标好的结构光三维成像系统,如果我们已经找出投影仪投影图案和相机采集到的图像上的一对匹配点,则可以很容易的计算出该点在三维空间中的位置:

$$R = \frac{B \sin(\theta)}{\sin(\alpha = \theta)} \quad (6)$$

其中, θ , α 和 B 可以由定标参数和对应点在图像中的位置确定出来。实际的系统中可能并不是用这个公式计算深度,但是其基本原理都是使用三角化的方法。

3 结构光三维成像技术

结构光三维成像技术是三维重构技术中一种重要的方法。它使用投影仪对被测表面投影结构光或者图案,然后用相机捕捉这些图案,通过图案的扭曲形变,计算出表面的形状。这种投影图案的设计准则通常是为了最小化图案的数量,最大化提高精度以及简单有效的解码过程。结构光三维重构通常被称为“强”三维重构系统,因为相对于其他方法,结构光三维成像的结果在精度,可靠性等等方面都有较好的表现,而且不受物体表面特性的限制。例如,结构光三维成像系统可以对没有任何特征的白色墙壁进行三维成像。

当前已经存在很多不同的结构光三维成像方法,根据其投影图案类型和解码的原理,我们将其分为四类:①时空编码投影;②单幅彩色空间编码投影;③条纹索引编码;④网格索引编码,每种分类中还有一些子类方法,图3展示了一个大概的分类框架。我们重点描述了在每种分类中最具有代表性的集中方法包括二值顺序编码,相位移动法,彩虹,彩色编码以及其它复杂的编码图案。

3.1 时空编码

时空编码是指所用到的图案不仅仅在空间上编码,而且在时间上也进行编码,不同的时间投出不同的图案。时空编码通常使用一序列的投影图案,按照时间顺序依次往复投影到被检测表面。最常用的时空编码策略是顺序投影一组图案到被测表面上,对于某个像素的码字就是这一序列中改像素的亮度值。由于可以投影多副图案,所以编码基数可以比较小,即投影图案中的亮度级别较少,这样可以获得较高的鲁棒性。

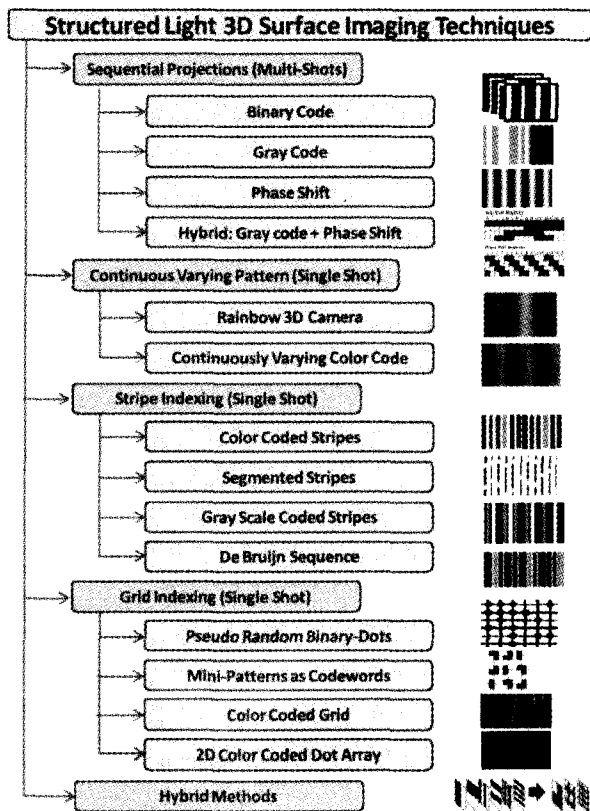


图3 结构光三维成像技术分类网络

3.1.1 二值编码

基于二值编码^[5-8]的方法中只采用两个亮度级别,即亮度为0(黑色)和1(255)(白色)的条纹来形成一序列编码图案。每个像素的码字即该像素在序列投影图案的亮度级别0和1组成。一种比较常用的编码方式是从第一幅编码图案中的亮度值 B_0 代表最高位MSB,依次类推最后一个编码图案中代表最低位LSB。由 $B_0B_1B_2\cdots B_{n-1}B_n$ 组成的二值数及代表该像素的码字。每增加一幅投影图案,可以编码的码字书将增加一倍。如果序列中存在 m 幅编码图案,即可以有 2^m 个不同的码字。最多可用编码字的数即为投影仪的分辨率,但是由于光学系统的特性,这样只具有一个像素宽度的编码图案用图像传感器采集到之后可能并不能正确分辨,所以并不推荐使用太多幅的编码图像。图4(a)为 $m=5$ 情况下使用的一组编码。使用这组图案可以对 $2^5=32$ 个条纹进行编码。在获取这些编码之后,可以通过条纹的位置计算(通过空间几何三角化)出这32个条纹的三维形状。在二值编码中相邻的条纹之间的跃变可能同时出现不同的图案中,同时由于光学系统通常具有种低通滤波器,在对采集到的图像二值化和解码的过程中,可能将会出现类似数字电路中的竞争冒险现象,产生很大误差。为了避免这种情况的出现,通常在二值编码中引入了格雷码方式,由于格雷码中相邻的码字之间只会有一位不相同,所以可以避免了这种误差。二值编码只是用两个亮度级别,所以具有较高的可靠性而且对被测物体的表面特性不敏感。但是如果需要较高空间解析度,需要投较多的图案。例如如果需要达到1024的横向解析度,则最少需要投影10幅图案。然而投影采集10幅图案及处理过车所需要的时间可能会超出很多应用所允许的时限,而且在采集中需要保证被检测表面不发生运动,因此不适合测量动态场景。

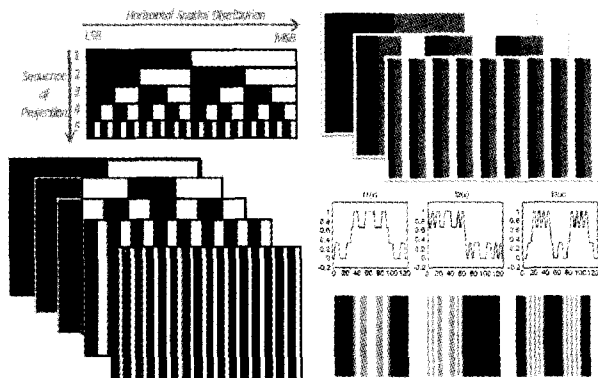


图4 时空编码
(a)二值编码(b)灰度编码

3.1.2 灰度编码

前面所述的二值编码中,只选用的两个灰度级别,因此需要较多幅的图案才可以满足分辨率的需求。而灰度编码使用多于两个灰度级别来进行编码,因此可以大大减少需要投影的图案数量^[8,9]。例如使用4灰度级的三幅图案可以对64个条纹编码($4^3=64$),而使用二值编码则需要6幅图案才能到达相对应的分辨率。Caspi et al.提出了一种基于彩色的扩展灰度编码^[10]。这种方法基于 n 个颜色,每个颜色对应一个编码值。在设计二值和灰度编码图案过程中还需要注意一些步骤,如最大化不同码字之间的距离,因为在实际的三维成像应用中,相邻码字之间的区分能力是非常重要的。图4.b中所示的是一组在希尔伯特空间中最优化的灰度编码图案^[11],这种编码在实际应用中往往可以得到比普通9幅二值编码更好的效果。

3.1.3 相移法

相移法是一种常用的结构光三维成像方法^[12,13]。它使用一组正弦波的图案,其中每个图案相差一个固定的相位。移相算法的优点是需要的投影图案数目相对较小,可以得到高分辨率的结果,精度较好。我们使用三步相移法作为例子描述一下相移法的概念。图像传感器中获得的图案可以用下面的方程表示。

$$I_{pn} = I'_p + I''_p \cos[\varphi_p - 2n\pi/3]$$

其中 I_{pn} 代表拍摄到的图像的向素值, I'_p 代表环境光线强度, I''_p 为正弦波调制强度, φ_p 表示相移值。当取 $n=3$ 时,由上面的方程可以解出 φ_p :

$$\varphi_p = \arctan\left(\sqrt{3} \frac{I_{p1} - I_{p3}}{2I_{p2} - I_{p1} - I_{p3}}\right) \quad (8)$$

由于反三角函数为周期函数,所以这里得到的 φ_p 为值域 $(-\pi/2, \pi/2)$ 的周期函数,这个过程被称作相位展开。比较常用的相位展开算法有分支切割,路径积分,基于质量图的相位展开方法等等。在相位展开

后得到绝对相移值后由像素点的位置以及像素点的相位值,可以通过定标参数和几何约束计算出点的深度^[14]。如果表面存在大于或者等于 2 倍相位的不连续区域,则相展算法很可能将返回错误的结果。由于在实际使用中难以避免误差或被测表面不连续情况的存在,所以开发可靠的相位展开算法比较困难。实际使用中,相移法往往还存在一些其他的缺陷,例如:在平滑的表面上存在变化较为明显的纹理时,由于受到纹理颜色干扰,有些相位将不能被准确的恢复,导致最终测量到的表面存在一些类似于浮雕纹理的误差。

Daniel Lau 提出一种双频的相移法(dual frequency phase multiplexing, DFPM)^[15,16],这种方法将两个不同频率的编码叠加在一起,通常一个高频的编码加上一个单位频率编码。其投影图像亮度可以写作:

$$I_{pn} = A_p + B_{p1} \cos(2\pi f_h y_p - 2\pi/N) + B_{p2} \cos(2\pi f_u y_p - 4\pi/N) \quad (9)$$

其中 I_{pn} 为图像的亮度值, A_p 为环境光亮度, f_h, f_u 和 B_{p1}, B_{p2} 分别为两个不同的正弦波的频率和调制强度。 y_p 为对应的像素点的横坐标,即相移法最终要求解的相移值。这种方法不仅减少了投影图案的数目,同时也使得相位展开变得更容易。在解码之后,其中高频分量的相移图可以给出更好的细节的表现,而低频分量作为一个基值,用于相位展开。

3.1.4 混合方法:相移法+格雷码

如前文所述,相移法和格雷二值编码都存在一些优缺点。相移法可以得到一个相对的相位结果,绝对相位值获取比较困难。当对于表面相位有存在大于或者等于 2π 的不连续值的时候,往往不能得到正确的结果。然而基于二值格雷码等等的绝对编码可以提供绝对的相移,但是其分辨率不足,不能获得全分辨率的结果。如果结合两种方法(如图 5),既可以解决相移法中的绝对相移,同时也可以解决灰度编码分辨率不足的问题^[12,17]。

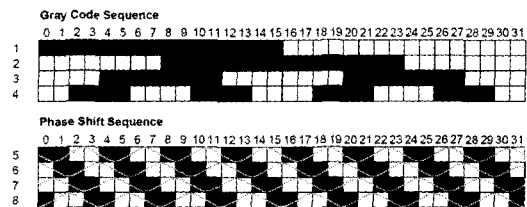


图5 相移法+格雷码

3.2 全屏连续变换图案

时空编码的主要缺点在于顺序投影不适合测量动态的场景,如人体或者动物体等等。我们下面介绍一些利用颜色信息或者独特的编码策略的方法,这些方法只需要投影一副图案便可以重建出场景的三维信息。由于这些方法使用的图案少,所以比较适合使用于动态场景的三维重构。

3.2.1 彩虹三维相机

图 6 描述了彩虹三维相机的基本原理^[18-21]。它也是基于三角化原理,使用常用的视频摄像机以全帧速捕获场景图像,如图 6 所示。与传统的双目相机不同的是,彩虹三维相机的独特之处在于所使用到的投影图案是一种波长随着空间变化的连续光照投影图案,这种图案可以根据像素点的颜色对应的波长找到点匹配,由三角测量计算出三维信息。由于使用连续光照,所以彩虹三维相机可以以视频相机的全帧速采集图像(通常 30fps 或者更高)。高速的图像采集能力使得其尤适用于运动场景,或者在需要安装于运动平台上的应用场合。彩虹相机图像中对二维彩色图像中每个像素计算深度,所以其三维图像和二维彩色纹理存在直接对应关系,使得二维三维图像配准变得简单。

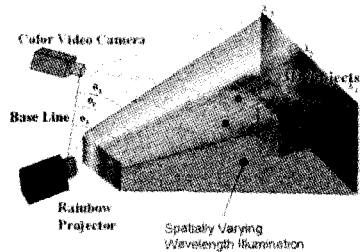


图6 彩虹三维相机

3.2.2 连续变化彩色编码

通过连续变化的彩色图案同样也可以对空间位置进行编码。例如我们可以为每个颜色通道构造一个亮度连续变化的图案,在叠加在一起之后,每个颜色通道都是一个独立的连续变化的图案。图 7 所示的是三原色上连续变化的图案,叠加在一起之后,形成类似于彩虹投影仪一样的图案^[22]。这种图案的在空间与光谱长度上并不遵循特定的线性关系。但是由于每个颜色通道的比率是已知的,所以解码算法很容易推导和实现。

3.2.3 伪随机编码

连续的全屏变化编码还包括伪随机图案, Microsoft 的 Xbox 运动传感器 Kinect 中就使用一种特殊的光学的办法产生近红外连续变化的伪随机点图案作为投影的图案(图 8)。然后使用红外摄像机采集图像和投影图案进行极线搜索配准, 从而计算出三维数据。Kinect 中将这一算法使用硬件实现, 可以直接输出 640(480 分辨率)的深度图像。

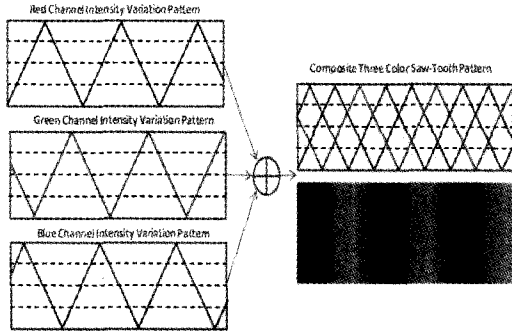


图7 连续变化彩色编码

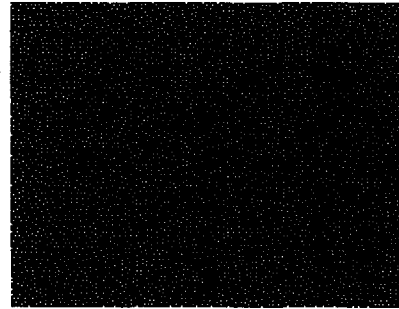


图8 二值化后的Kinect红外投影图案

3.3 条纹索引

3.3.1 彩色条纹编码

彩色图像传感器通常具有三个独立的采集通道。每个通道对应一个颜色(光谱上的一段)。例如有些彩色图像传感器使用加法三原色, 红绿蓝, 另外的一些图像传感器使用减法的基色如: 青, 黄, 平红。这些基色的线性组合能够生成无穷多重颜色。虽然相机输出的图片的量化精度有限, 通常为 8 位 12 位或者 16 位, 但是三种颜色组合出来的颜色数目还是非常庞大的。例如 8 位三通道的图像可以有 2^{24} 种颜色^[23,24]。如此多的颜色信息可以用来增强三维表面成像的性能, 减少采集时间提高测量准确度。例如图 2 所示的彩色条纹编码就可以大大提高相移法或者单色条纹中的不确定的病态问题。使用这种彩色编码系统可以实现实时的三维图像采集。同时也可以将多个图案编码到同一个彩色图案中, 每个图案对应不同的颜色亮度。为了简化解码过程。我们可以选择具有最大集合内部元素间距离的颜色集合。集合中颜色最大数目受限于采集的图片中能够满足足够小的串扰的色彩间距。

3.3.2 分段条纹编码

前文中所提到的线移方法必须通过配合灰度编码来实现绝对编码, 因此需要较多幅灰度的图案。Marryama 设计了一种使用独特的二值编码^[25], 他在编码的竖条纹中添加了一些断开的缺口(图 9(a)), 通过这些缺口来实现对每个不同条纹的区分, 从而省去了较多幅的灰度编码。这种编码很巧妙, 但是仅仅适用于三维表面比较平滑, 而且没有较明显的纹理的情况下使用。如果图案发生较大的形变或者有较强的纹理干扰, 将很难正确的提取线条和缺口, 及正确的恢复三维形状了。

3.3.3 基于不重复序列灰度条纹编码

如果使用多于两个灰度级的图案, 则可以通过对灰度级条纹的排列实现相邻的灰度子序列在给定的长度内不会重复出现的一种编码策略^[26], 如图 9(b) 所示。例如, 对于使用三个灰度级别的图案, 可以设计如下的灰度级别排列的图案: BWGWBGWGBWB 这种图案的匹配处先将图像传感器中的图像转换为灰度级别的灰度标号。然后在投影图案的标号排列和图像传感器采集到的图像形成灰度级别标号求相关。在子序列匹配成功之后再扩站配对好的序列长度, 最终实现对所有的条纹的序号正确解码。

3.3.4 基于 De Bruijn 序列的条纹索引

一个 k 元 n 阶 De Bruijn 序列^[27] 是一个长度为 k^n 的循环序列, 在遍历这个循环序列时候每个长度为 n 的子序列只出现一次。例如一个 2 元 3 阶 De Bruijn 序列, 如图 10 所示, 遍历这个序列, 其中每个子序列将出

现且只出现一次。这个序列可以有效的对一个长度为 24 的序列使用 8 个数字来编码。由于 De Bruijn 序列具有这种子序列唯一性,所以可以用来构造结构光条纹编码,通过子序列实现条纹索引^[28,29]。由 De Bruijn 序列作为定点构造出来的图称为 De Bruijn 图^[30],在 De Bruijn 图只对每个边遍历一次的路径称为欧拉回路。对每个定点只通过一次的回路称为哈密顿回路。下面我们介绍一个基于 De Bruijn 序列的彩色的条纹索引图案,其中 RGB 三个通道中每个通道都使用两个亮度级别,因此其最大组合数为 $8(2^3)$,去除全黑条纹,还有 7 种颜色可以选择。使用这 7 种选择颜色构造出的 3 阶 De Bruijn 序列可以编码 343 个条纹,如果 7 元序列的条纹数目太多,也可以使用一组更小的 De Bruijn 序列^[31],5 种颜色构造出 3 阶 De Bruijn 序列可以编码 125 个条纹。在三维成像应用,构造条纹时要注意的重要的一点是相邻的颜色不可以相同。图 10 彩色 De Bruijn 编码图 11 网格索引编码如果存在相邻的条纹是相同颜色,由于表面形状导致变形的图案中两个同样颜色的条纹的宽度可能和一个条纹产生的宽度相同,对于这种情况,算法将无法保证正确解码。通过使用异或操作可以保证产生的 De Bruijn 序列中不存在具有同样颜色的相邻条纹。图 10 所示的是一组实际使用的条纹编码图案,其中所有相邻的条纹具有不同的颜色。De Bruijn 序列方法有很多变种实现,生成了各种彩色或者灰度索引图案广泛应用于 3D 成像应用。

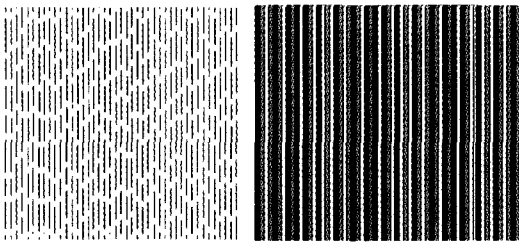


图9 (a)条纹编码(b)基于不重复序列灰度条纹编码

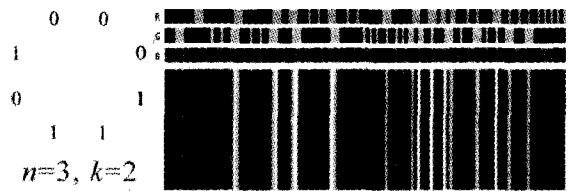


图10 彩色 De Bruijn 编码

3.4 二维空间网格编码

二维网格图案编码和是一种和前面所述的 De Bruijn 序列编码原理很相似的编码技术。在这种设计独特二维网格图案中,由于每个给定大小的子窗口块(通常 3×3 的小块)在图案中是唯一的,所以可以用来唯一的确定给定点在二维图案中的位置。

3.4.1 伪随机二进制点阵

一种网格索引编码的方法是使用伪随机二值序列来产生一组二进制点阵,这些网格点的位置将会用点或者其他图案标注,使得编码图案中不存在重复的子窗口块。伪随机二进制点阵通过一个 $n_1 \times n_2$ 随机二维序列定义,其中 $k_1 \times k_2$ 的子窗口块在点阵内是唯一的,因此可以用来唯一确定该块在图案的位置^[32-35]。编码图案基于伪随机二值序列,这个二值伪随机序列使用以 2^n 为模的原本多项式生成,图 11 左边显示了一个伪随机二进制点阵,其中 $k_1 = 5, k_2 = 2, n_1 = 31, n_2 = 33$ 。

3.4.2 使用迷你图案编码

这种方法和上面所述的伪随机二进制点阵原理相同,但是这种方法用不同的迷你图案作为码字(图 12),因此可以使用不同的迷你图案对于多个数值,实现伪随机多值点阵^[36]。使用多值随机点阵图案可以实现较大的图案中以较小的子窗口对位置进行唯一的编码。

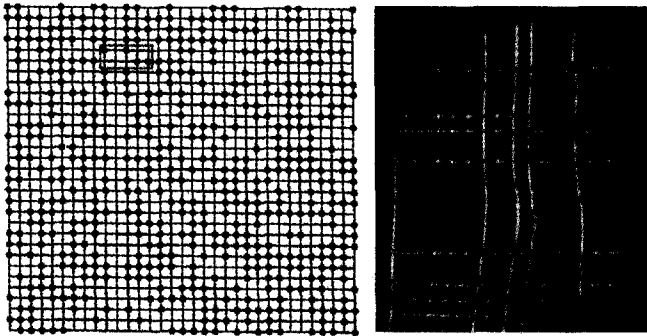


图11 网格索引编码

```
33132131123122121113323222333  
33132131123122121113323222333  
11213212231233232221321333111  
33132131123122121113213222333  
11213212231233232221321333111  
22321323312311313332132111222  
22321323312311313332132111222  
11213212231233232221321333111  
331321311231221211132122333  
11213212231233232221321333111  
33132131123122121113323222333  
33132131123122121113323222333
```

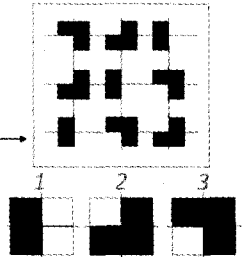


图12 使用迷你图案作为码字

3.4.3 彩色编码栅格

另一种编码方式使用彩色编码的横条纹和竖条纹^[37-39](图 11 右)可以获得一组二维网格。依照特定应用的需求,横条纹和竖条纹可以采用相同或者完全不同的编码策略。这种方法不能保证子窗口的唯一性,但是沿着彩色编码条纹的两个方向进行搜索,仍然可以保证在大多数情况下都可以建立比较完全的匹配。由于方法中彩色编码条纹线条比较窄,所以鲁棒性相对较差些。

3.4.4 二维彩色伪随机编码点阵

另一种网格索引编码策略使用不同的彩色的点或者方块作为投影图案编码的元素,如图 12 所示。Payeur 在文献[40,41]中提出了一种使用穷举搜索方法来产生所需的二维点阵图案。使用很直观的计算机算法可以实现这样的穷举搜索。如图 13 左,在 6×6 的点阵中使用 3×3 的子窗口,使用红绿蓝作为码子的穷举搜索过程:首先用随机值填充左上角的 3×3 子窗口,增加一个 3×1 的列,然后验证其所有子窗口的唯一性,如果满足则继续添加下一列。同样当左边填满了之后,开始往下填充,首先添加 1×3 的行,然后验证其子窗口的唯一性,如果满足则继续添加下一行。最后再由对角方向进行添加,直到填满所有的点为止。这个算法并不保证对于所有的尺寸和码子都能成功得搜索到解,但是在很多情况下都能得到较好的结果。图 13 右是一个 20×18 二维彩色伪随机编码点阵图案的例子。

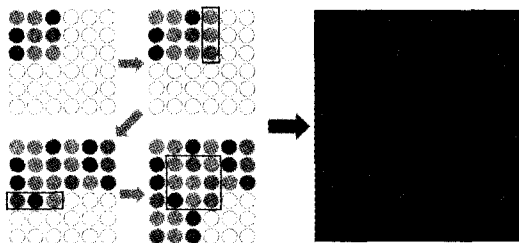


图13 二维彩色伪随机编码点阵

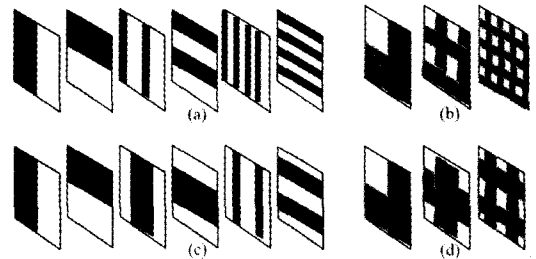


图14 混合方法,使用两组一维条纹编码产生二维网格编码

3.4.5 混合方法

在上面提到的编码中,每种编码都有各自的优缺点。通过把几种不同的方法进行组合,可以利用相互的优势来弥补不足,从而提高三维系统的性能。如图 14 所示。

4 三维表面成像系统的性能评估

三维表面成像系统的性能可以通过很多不同的角度进行评价。从应用的观点而言,通常通过四个主要因素对三维成像系统的性能进行比较:

(1) 测量精度。

测量精度反映出由三维表面成像系统采集到的数据和被测物体实际尺寸数据的最大偏差量。通常,三维成像系统由于系统设计结构或者原理上的原因导致在不同方向上的精度有所差异。同时,不同的生产厂家使用不同的方式去表示精度,如:平均误差,均方误差,以及统计误差。在对比不同的系统的时候,需要对这些参数有准确地理解,把这些参数转换到相同的框架上进行比较。

(2) 图像分辨率。

在二维图像中,分辨率主要用来表明光学系统成像结果对不同点或者线的分辨能力。同样在三维成像系统中,三维分辨率指三维成像系统中可以分辨的最小结构。但是在三维成像领域,往往将一次单独采集得到的点云数目称作分辨率。例如一个 640×480 的三维传感器可以一次采集到 307,200 或者 307200 个数据点。同时,三维成像系统中的还有不同方向上的分辨率,在有视场角,成像距离,成像空间深度等数据,这两种分辨率可以进行相互转换。

(3) 图像采集速度。

采集速度和单次采集时间成反比,单次采集时间可以分为图像采集时间和处理时间两个部分。图像采集时间对于检测运动物体很重要。对于时空编码的三维成像系统或者激光扫描系统,被测物体在运动时,由于这类系统采集时间比较长,在采集时间内物体可能发生较大的运动,因此得到的最终结果可能不准确。对于某些系统,可能采集时间很短,但后处理时间较长,这样的系统可以用来拍摄运动的物体,但是往往不能应用于对实时性要求较高的系统。

上面提到的三个最重要的性能指标可以用来对于不同的三维成像系统之间做对比。在实际应用的时候,除了这三个指标之外,性价比也是实际应用中需要考虑的重要因素。视场角,基线距离,以及测量距离也常用来描述结构光三维成像系统的特性,由于受到投影光能力的限制,所以往往在结构光三维系统中,测量距离会比较有限。相比之下基于 TOF 的系统可能测量数公里的距离。实际应用时应该根据应用需要对系统性能进行整体评估。

5 结束语

本文介绍了结构光三维重构方法中主流方法和最近出现的一些新方法,并且将这些不同的主动光三维成像方法进行归类。对其中具有代表性的方法进行详细的说明,并且配有实际投影图案使得它们更加容易理解。同时讨论了对三维成像系统性能评价的最主要的几个指标。每种不同的方法都有自己的优缺点,因此不存在一个单独方法可以适用于所有的应用场合。对于特定场合需求,必须根据应用场合的需求如分辨率、精度、速度成本和可靠性等不同的角度对不同的方法综合比较,筛选出最合适的方法。

结构光三维重构是一个集合光学设计,调制光技术,图像传感器技术,结构设计及软件算法等很多领域的技术。先前对于三维成像技术的研究往往都是来自各个不同的学科,因此往往有着不相同的侧重点。近年来的趋势是将不同的学科逐渐集合在一起,称为“计算成像学”,同时考虑了光学设计,传感器特性,软件算法等不同的方面。这种新的研究趋势将会确保将来的三维成像系统不断的朝着高性能,高性价比的方向发展。相对于已有研究了几十年的有着数百万经费投入的二维成像技术,三维成像领域仍然是一个相对比较年轻的方向。希望越来越多的新的三维成像系统和应用将会吸引更多有才能的研究者一起推动三维成像领域的发展。

参 考 文 献

- [1] Hartley, R. I., Zisserman, A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Second edn. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518 (2004).
- [2] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22 (2000):1330 - 1334

- [3] Projector – Camera Calibration Toolbox. <http://code.google.com/p/procamcalib/>.
- [4] Hu, Q., Huang, P. S., Fu, Q., Chiang, F. P.: Calibration of a 3 – d shape measurement system. *Opt. Eng* 42 (2003) 487 – 493
- [5] I. Ishii, K. Yamamoto, K. D., Tsuji, T.: High – speed 3d image acquisition using coded structured light projection. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. (2007) :925 – 930
- [6] Sato, K., Inokuchi, S.: Range – imaging system utilizing nematic liquid crystal mask. In: *Proceedings of International Conference on Computer Vision, ICCV, IEEE Computer Society Press* (1987) :657 – 661
- [7] Valkenburg, R. J., McIvor, A. M.: Accurate 3d measurement using a structured light system. In: *Image Vision Comput. Volume 16 of 2*. (1998): 99 – 110
- [8] Posdamer, J. L., Altschuler, M. D.: Surface measurement by space – encoded projected beam systems. In: *Comput. Graph. Image Processing. Volume 18 of 1*. (1982) :1 – 17
- [9] S. Inokuchi, K. S., Matsuda, F.: Range – imaging for 3 – d object recognition. In: *International Conference on Pattern Recognition, International Association for Pattern Recognition* (1984) :806 – 808
- [10] D. Caspi, N. K., Shamir, J.: Range imaging with adaptive color structured light. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell* 20 (1998) :470 – 480
- [11] W. Krattenthaler, K. J. M., Duwe, H. P.: 3d – surface measurement with coded light approach. In: in *Proceedings of the 17th Meeting of the Austrian Association for Pattern Recognition on Image Analysis and Synthesis. Volume 12.*, R. Oldenbourg Verlag (1993) : 103 – 114
- [12] Huang, P. S., Zhang, S.: A fast three – step phase shifting algorithm. *Apply. Opt* 45 (2006) :5086 – 5091
- [13] Zhang, S., Yau, S. T.: High – resolution, real – time 3d absolute coordinate measurement based on a phase – shifting method. *Opt. Express* 14 (2006) :2644 – 2649
- [14] Sagan, H.: *Space Filling Curves*. Springer (1994)
- [15] Liu, K., Wang, Y. C., Lau, D. L., Hao, Q., Hassebrook, L. G.: Dual – frequency pattern scheme for high – speed 3 – d shape measurement. *Opt. Express* 18 (2010) :5229{5244
- [16] Wang, Y., Liu, K., D. L. Lau, Q. H., Hassebrook, L. G.: Maximum snr pattern strategy for phase shifting methods in structured light illumination. *Journal of the Optical Society of America A* 27 (2010) : 1962{1971
- [17] Gorthi, S. S., Rastogi, P.: Fringe projection techniques: whither we are? *Opt. Lasers Eng* 48 (2010)
- [18] Geng, Z. J.: Rainbow three – dimensional camera: new concept of high – speed three – dimensional vision systems. *Opt. Eng.* 35 (1996) :376 – 383
- [19] Geng, J.: Color ranging method for high speed low – cost 3d surface pro_le measurement. U. S. patent 5,675,407 (1997)
- [20] Geng, J.: High speed three dimensional imaging method. U. S. patent 6,147,760 (2000)
- [21] Geng, J.: 3d surface pro_le imaging method and apparatus using single spectral light condition. U. S. patent 6,556,706 (2003)
- [22] Geng, J.: Method and apparatus for 3d imaging using light pattern having multiple sub – patterns. U. S. patent 6,700,669 (2004)
- [23] Boyer, K. L., Kak, A. C.: Color – encoded structured light for rapid active ranging. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 9 (1987) :14 – 28
- [24] S. Fernandez, J. S., Pribanic, T.: 2010 iee computer society absolute phase mapping for one – shot dense pattern projection. In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, San Francisco, Calif., IEEE Computer Society* (2010)
- [25] Maruyama, M., Abe, S.: Range sensing by projecting multiple slits with random cuts. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 15 (1993) :647 – 651
- [26] N. G. Durdle, J. T., Raso, V. J.: An improved structured light technique for surface reconstruction of the human trunk. In: *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Volume 2.*, IEEE (1998) :874 – 877
- [27] MacWilliams, F. J., Sloane, N. J. A.: Pseudorandom sequences and arrays. *Proc. IEEE* 64 (1976) :1715 – 1729
- [28] Fredricksen, H.: A survey of full length nonlinear shift register cycle algorithms. *Soc. Industr. Appl. Math. Rev.* 24 (1982) :195 – 221

- [29] Monks, T., Carter, J.: Improved stripe matching for color encoded structured light. In: in Computer Analysis of Images and Patterns, Springer (1993): 476 - 485
- [30] Pajdla, T.: Bcrf — binary - coded illumination range _nder reimplementation. in Technical Report KUL/ESAT/MI2/9502 (1995)
- [31] L. Zhang, B. C., Seitz, S. M.: Rapid shape acquisition using color structured light and multi - pass dynamic programming. In: in First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, IEEE (2002): 24 - 36
- [32] H. Morita, K. Y., Sakata, S.: Reconstruction of surfaces of 3 - d objects by m - array pattern projection method. In: in Second International Conference on Computer Vision, IEEE Computer Society (1988): 468 - 473
- [33] Moigne, J. L., Waxman, A. M.: Structured light patterns for robot mobility. In: IEEE J. Robot. Automat. Volume 4 of 5. (1988): 541 - 548
- [34] Payeur, P., Desjardins, D.: Structured light stereoscopic imaging with dynamic pseudo - random patterns. In: in Image Analysis and Recognition, Lecture Notes in Computer Science. Volume 5627. (2009)
- [35] A. Osman Ulusoy, F. C., Taubin, G.: One - shot scanning using de bruijn spaced grids. In: in 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, IEEE(2009): 1786 - 1792
- [36] P. M. Grin, L. S. N., Yee, S. R.: Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition. Pattern Recog 25 (1992): 609 - 616
- [37] E. M. Petriu, Z. Sakr, H. J. S., Moica, A.: Object recognition using pseudo - random color encoded structured light. In: in Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Volume 3., IMTC (2000): 1237 - 1241
- [38] J. Pagès, J. S., Matabosch, C.: Robust segmentation and decoding of a grid pattern for structured light. In: in Pattern Recognition and Image Analysis, Lecture Notes in Computer Science. Volume 2652., Springer (2003): 689 - 696
- [39] A. Osman Ulusoy, F. C., Taubin, G.: Robust one - shot 3d scanning using loopy belief propagation. In: in 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, IEEE Computer Society (2010): 15 - 22
- [40] Payeur, P., Desjardins, D.: Structured light stereoscopic imaging with dynamic pseudo - random patterns. In: in Image Analysis and Recognition, Lecture Notes in Computer Science. Volume 5627., Springer (2009)
- [41] Desjardins, D., Payeur, P.: Dense stereo range sensing with marching pseudo - random patterns. In: in Fourth Canadian Conference on Computer and Robot Vision, IEEE Computer Society (2007): 216 - 226

作者简介

李托拓,中国科学院自动化研究所博士研究生,2003年获合肥工业大学电气工程学院学士学位。主要研究方向为计算机视觉和三维重构。

胡锋,中国科学院自动化研究所硕士研究生,2009年获西安交通大学学士学位。主要研究方向为图像拼接和视频监控。

耿征,中国科学院自动化研究所研究员,博士生导师,1990年获乔治华盛顿大学博士学位。主要研究方向为三维成像,视频监控。