

三维成像中的二值时空编码照明方法

李 勇 陈云富 金洪震 王 辉

(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘要 提出了一种用于三维成像的二值时空编码照明方法。将投影平面的每一行分成由若干个像素组成的区间。利用区间内像素的空间坐标和时间坐标对区间进行编码。在测量时, 通过对拍摄的图像序列分析, 恢复区间的编码。在得到所有区域编码后, 将相邻的给定个数的区域编码组成代码子序列。然后在设计的代码序列中进行代码子序列匹配, 得到场景表面、摄像机像面及投影平面三者之间的对应点。最后, 采用三角测量原理得到被测物体的面形。实验结果表明, 这种方法在得到高密度距离像的同时可以得到物体的纹理, 而不需要额外拍摄图像。测量结果有较高的精度和稳健性。

关键词 机器视觉; 光学测量; 三维成像; 面形检测; 结构光照明; 时空分析

中图分类号 TN206 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0670

Binary Spatio-Temporal Encoded Illumination for 3D Imaging

Li Yong Chen Yunfu Jin Hongzhen Wang Hui

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang 321004, China)

Abstract An illumination method based on binary spatio-temporal encoding for 3D imaging is proposed. Every row of the projection plane is divided into some sections. The code of a section is encoded with the spatial and temporal coordinates of pixels in the section. During measurement, the codes of sections are retrieved by analyzing the captured image sequence. The adjacent codes with given number are assembled to form subsequences after all the codes of sections are recovered. The corresponding points between surface of scene, projection plane and camera image plane are worked out by matching subsequence in the designed sequence. Then, the shapes of objects are reconstructed with triangulation. The experimental results reveal that dense depth images can be obtained and texture can be acquired simultaneously without any additional images. The proposed method is robust and accurate.

Key words machine vision; optical measurement; 3D imaging; surface measurements; structured light illumination; spatio-temporal analysis

1 引 言

基于结构光照明的光学三维传感技术在工业检测、质量控制、机器视觉、影视特技和生物医学等领域有广泛的应用^[1~4]。已有的结构光投影技术, 按是否与颜色有关, 可分为基于颜色和基于灰度的编码方案。按用于编码的参数不同, 可分为正弦光栅相位编码方案和编码光强方案。相位编码方案主要有相位测量轮廓术(PMP)^[5,6]和傅里叶变换轮廓术(FTP)^[7]等。光强编码方案可分为时间编码方案, 空间邻域编码方案和直接编码方案三类^[8]。采用正

弦光栅投影的技术可以得到高分辨率的测量结果。但是采用单频正弦光栅投影, 对不连续物体的相位展开比较困难。这一问题可以采用时间相位展开法或与格雷码结合等方法解决^[9,10], 但测量的时间复杂度会增加。也可以采用复合光栅或与彩色及二值编码结合的方法解决, 但对测量范围或物体表面纹理有一定限制。时间编码方案由于需要投影较多的模式, 测量的时间复杂度通常较高, 但测量精度较高。空间编码方案测量速度快, 但解码过程比较复杂, 通常精度不高, 空间分辨率较低。直接编码方

收稿日期: 2008-06-03; 收到修改稿日期: 2008-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(60702078)资助项目。

作者简介: 李 勇(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学三维传感、三维显示技术方面研究。

E-mail: liyong@zjnu.cn

案通常仅适用于非彩色或浅色物体的测量，而且不易达到高的测量精度。基于颜色的空间邻域编码方案是目前研究较多的结构光投影技术，但这类技术有一个明显的缺点，即对测量物体的颜色有限制，也不能同时从编码图像中获取物体纹理。

高精度、高密度、快速、高稳健性、可同时获取纹理的三维成像一直是人们追求的目标。然而实际中，这些目标常常不能全部达到。我们提出了一种折衷的方案。这种方案具有较高的稳健性，不仅可以得到高密度的三维测量结果，还可以同时获得物体的纹理。实验结果显示该方案是可行的。

2 原 理

2.1 系统构成

图 1 为结构光照明三维成像系统示意图。系统由投影仪和摄像机构成。由投影仪投出用于编码的模式，摄像机在另一位置拍摄被物体表面形貌调制的变形模式。通过分析拍摄到的图像，获得对应的投影仪像素平面上的坐标。在只对投影平面的一个坐标编码时，通过解码只能得到与摄像机像素点对应的一个方向上的投影仪像素平面坐标。

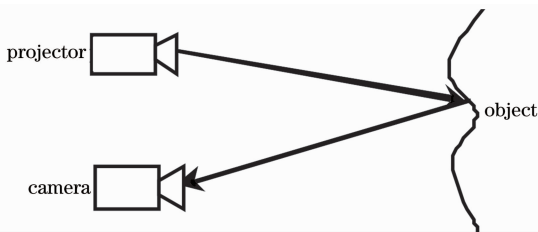


图 1 结构光照明三维成像系统示意图

Fig. 1 Sketch of 3-D imaging by structured light illumination system

根据光路可逆原理将投影仪看成逆向工作的摄像机，利用摄像机模型统一处理投影仪和摄像机。根据投影仪和摄像机位置的关系，采用针孔加畸变的摄像机模型，经推导得到用相对像素差表示的物

体采样点三维坐标 (X, Y, Z) 表达式^[11]

$$\begin{cases} Z(u, v) = \sum_{n=0}^N k_n(u, v) \Delta u_p^n(u, v) \\ X(u, v) = a_1(u, v) + b_1(u, v) Z(u, v) \\ Y(u, v) = a_2(u, v) + b_2(u, v) Z(u, v) \end{cases} \quad (1)$$

式中 u, v 为摄像机像素坐标， Δu_p 为与同一像素点对应的被测表面与参考平面的投影仪像素坐标差， a_1, a_2, b_1, b_2, k_n 分别为与摄像机像素坐标有关的常数。通常 N 取 5 就可以得到足够的精度。

2.2 编码及纹理获取原理

本文以用编码单元尺寸是 3 个像素为例，说明时空二值编码方案的原理。图 2 是编码原理的示意图。由于采用竖条纹，模式中的每一行都相同。这里，每个模式选一行进行说明。图中将模式按投影的顺序从上到下排列。每个模式被划分成若干由 3 个像素组成的小区域。尺寸为 3 个像素的区域，在时间上有三个模式对应。从图 2 中可以看到：空间上，在一个模式中，每个单元内有且只有一个像素是白色的，其它都为黑色；时间上，在同一单元内，每个像素在且只在一个模式中是白色的，在其它模式中都为黑色。这样，像素空间坐标和时间坐标的组合可以用来对区域进行编码。如图 2 中标记为“B”的区域，单元内第 1 个像素的空间时间坐标为 $(1, 1)$ ，即：第 1 个像素在单元内的空间位置为 1，时间序列位置（白色）为 1，第 2 个像素的空间时间坐标为 $(2, 3)$ ，第 3 个像素的空间时间坐标为 $(3, 2)$ 。将这些坐标按顺序排列得到码字“112332”，这里用字母“B”表示。同理我们可以得到其它码字。根据排列知识，可以得到 $3! = 6$ 个码字，分别用“A”-“F”表示。采用这种编码方法的另一个问题是编码单元的识别。可以采用时间坐标来区别，即再投影一个模式。这个模式中亮条纹的位置为编码单元的起始位置。也可以在两个相邻编码单元间插入一个隔离单元来区别。这样，投影的模式数要增加一个以上。

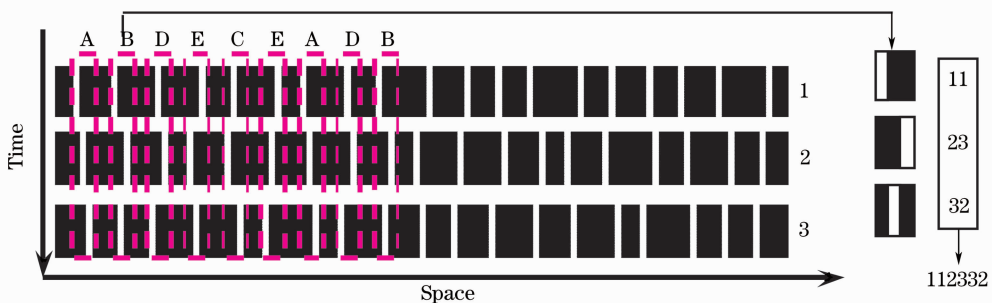


图 2 时空二值编码原理示意图

Fig. 2 Sketch of binary spatio-temporal coding

根据编码原理,所有投影模式叠加的结果为一幅全白图像。投影全白的图像就相当于用投影仪当光源照明物体,摄像机拍到的就是物体的纹理。因此,只要将拍摄到的图像序列进行叠加就得到物体的纹理,而不需要单独拍摄纹理。如果采用彩色摄像机,则可以得到彩色纹理。

2.3 代码序列构造算法

用 6 个代码对投影平面中的所有区域进行标记,在对应点匹配时会产生混淆。因此需要根据区域代码间的空间特性消除这种混淆。我们设计了具有如下空间特性的代码序列。在投影平面中,要求由所有区域标记代码构成的代码序列符合下面两点:1、在序列中任意具有规定长度的子序列唯一;2、在这些子序列中无重复代码。例如用“A”-“F”表示 6 个代码,序列“ABDECFADBEFDBECDABFECBDEFBDCEABCDAECFBDE”中任意长度为 4 的相邻代码构成的子序列是唯一的,而且子序列中无重复代码。我们采用在有向图中搜索哈密顿回路的方法构造代码序列。为方便理解,这里以 3 个代码,子序列长度为 2 的情况为例说明这一算法。首先列出各种可能的子序列。根据排列知识,从 K 个元素中取 M 个元素构成排列的个数

$$L = P_K^M = \frac{K!}{(K-M)!} \quad (2)$$

对于 3 个代码、子序列长度为 2 的情况,一共有 6 个子序列。他们分别为“AB”、“AC”、“BA”、“BC”、“CA”、“CB”。然后,用这些子序列构成一个有向图,如图 3 所示。有向图中后一个结点的值由前一个结点的值左移一位,再在后面加入一个新字符构成。有向图中边的值为加入的新字符,指向新结点。最后,在有向图中搜索一条哈密顿回路,将回路上每条边的值按顺序排列,构成一个环形序列,就得到了需要的序列。如图 3 中回路“AB”-“BC”-“CB”-“BA”-“AC”-“CA”-“AB”上,边的值按顺序排

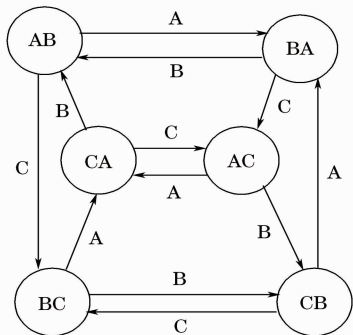


图 3 有向图
Fig.3 Directed graph

列构成的环形序列“CBACABC”。

2.4 三维重构过程

三维重构过程主要包括投影平面时间信息恢复,区域代码恢复,摄像机、投影仪对应点匹配,物体三维形貌重构及纹理恢复 5 个阶段。具体步骤如下:

- 1) 对于摄像机像面上的每一点,在拍摄的图像序列中寻找对应像素光强最大的那幅图。这幅图的采集顺序号就是对应模式的投影顺序号。用对应像素的投影顺序号构造一幅图像。称之为投影顺序图(POD);
- 2) 在投影顺序图中,按行扫描,根据编码规则恢复区域代码。用对应像素的代码构造一幅图像。称之为区域代码图(RCI);
- 3) 在区域代码图中,进行代码子序列匹配,得到摄像机、投影仪对应点图;
- 4) 在摄像机、投影仪对应点图中,根据系统的标定参数及公式(1)恢复物体三维形貌;
- 5) 将拍摄的图像序列对应点强度相加,得到物体纹理图。

3 实验及结果分析

为验证编码方案的可行性,用 DMD 投影仪(分辨率为 800×600)及 CCD 摄像机搭建了测量系统。在两个相邻编码单元之间插入间隔单元的方法来区分编码单元。在实验中发现由于实际系统的低通滤波特性,当两列为白的像素太接近时,就会无法分辨。研究发现,在本实验系统中采用尺寸为 3 像素的间隔单元就能可靠分辨两列为白的相邻像素。为确定间隔单元中的像素位置,需要另加 3 个模式。这 3 个模式可以仅仅作为间隔单元,以像素的时间坐标表示其空间位置即可;也可以将其作为编码单元使用。本文采用前一种方案,即:间隔单元中第一个像素在增加的第一个模式中为白,第二个像素在第二个模式中为白,第三个像素在第三个模式中为白。采用的序列为:“ABDECFADBEFDBECDABFECBDEFBDCEABCDAECFBDEABFCABDFAECBADEFCAEDCFEBDFECABFDEAFCEADBCADFBACDEACBDACEBDCABECAFECDDEADCEBAFDEBFADCEADEBCAEBDAEBCDEBADCBFAFEBACEDFABDCFAEBFDCAEFDCBEACDBAECDC”,子序列长度为 4。图 4(a)、(b)、(c)分别为设计的第 1、2、3 个模式的片段。

具体实验步骤如下:

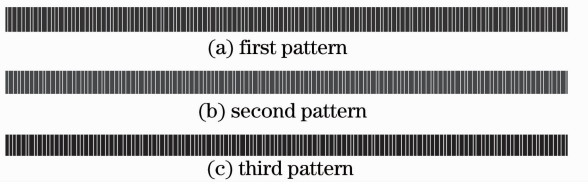


图 4 用于编码的三个模式片段

Fig. 4 Three patterns for encoding

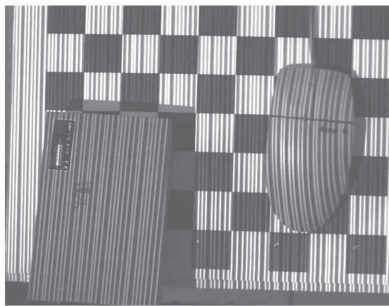
1) 根据投影仪的像素列数计算代码个数、编码单元尺寸及代码序列长度,采用 2.3 节所述算法构造代码序列;

2) 根据 2.2 所述编码原理,设计与每个代码对应的子模式;

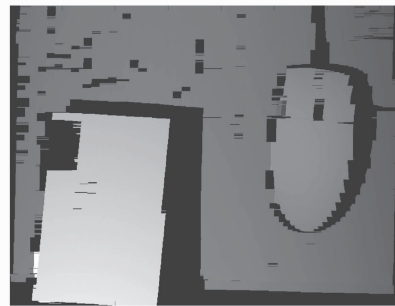
3) 按照(1)构造的代码序列,将子模式按顺序排列,最后得到与代码序列对应的完整模式;

4) 将设计得到的模式按其时间序列位置,先后投影到被测物体上,并同时用摄像机拍摄被物体形貌调制的变形模式;

5) 在投影完所有模式后,将拍摄到的变形模式按照 2.4 节所述步骤处理,得到物体的三维形貌和纹理。



(a) first captured image



(b) reconstructed surface

图 5 JAI_CVA50 摄像机测量结果

Fig. 5 Measurement result of camera model JAI_CVA50

我们在图 6 和图 7 中给出了解码中间结果及几个出现错误区域的放大图。我们用颜色来表示中间结果,使显示更清楚。图 6 为用彩色表示的投影仪像素投影顺序图,红色到洋红分别表示在第一个到第六个投影模式中为白色的像素。在图 7 中,上述颜色则分别表示“A”-“F”这六个代码。在图 6 的左边给出了由阶跃型物体表面纹理导致的像素投影顺序恢复错误区域的放大图及对应的纹理图。从图中可以看出,在纹理边缘附近投影顺序恢复错误,导致了编码单元的不完整,无法恢复区域代码,在

首先用 JAI_CVA50(分辨率为 740×572) CCD 工业摄像机对表面高度分布及反射率分布不连续、有阴影和遮挡的典型场景进行测量,说明测量过程中的问题。我们采用的场景为:一个方纸盒和一个鼠标放在一张贴有棋盘格图案的平板上。实验中没有采取纠错算法,丢弃投影顺序恢复不完整的编码单元。图 5(a)为投影第 1 个模式后采集的图像。图 5(b)为由拍摄的 6 幅图像序列恢复的摄像机、投影仪对应点图。为表示更清楚,用灰度来显示结果。从图中可以看到,大部分有效的区域都被测量出来,阴影对解码无影响。由代码序列特点,一个错误恢复的代码最多影响 4 个编码单元的测量结果。如果采用一定的错误检测及控制算法,大部分错误被进一步限制在本单元,不会影响其它单元。从图 5(b)可以看到解码错误被限制在小区域内,没有向外传播。图中出现空洞的主要原因有:1) 阴影;2) 物体表面反射率太低而导致无法测出光强变化;3) 摄像机视线被遮挡;在物体表面阶跃型纹理处,由于摄像机的低通滤波特性造成编码单元内投影顺序恢复错误。为进一步说明解码中出现的问题。

图 7 和图 5(b)的相应位置处出现空洞。图 6 的右上角给出了鼠标边缘处局部区域的放大图。由于遮挡造成编码单元缺损,区域中部分代码无法恢复。在图 7 和图 5(b)的相应位置处出现空洞。图 6 的右下角给出了纸盒边缘由于遮挡造成编码单元组合错误区域的放大图。与该区域对应,在图 7 中出现错误的区域代码,造成图 5(b)中相应位置处的距离恢复错误。实验表明,大部分由于编码单元缺损导致的空洞,可以根据其邻域情况恢复区域代码。孤立的错误代码可以根据序列的连续性检测出来。



图 6 颜色表示的投影顺序图

Fig. 6 POI represented with color



图 7 颜色表示的区域代码图

Fig. 7 RCI represented with color

另外, 采用 Sony 的 DCR-SR100 型民用彩色 CCD 摄像机(分辨率 2016×1512)进行实验。测量对象为石膏模型(最大深度在 100 mm 左右)和白屏的一部分(可以看成孤立物体)。图 8(a)为投影第 1 个模式后采集的图像。图 8(b)为投影仪像素投影顺序图。可以看出采用民用摄像机, 图像的信噪比低, 在像素投影顺

序图中无条纹处出现较大的噪音。图 8(c)为区域代码图。可以看到, 前一阶段产生的噪音对区域代码恢复影响很小。图 8(d)为通过简单叠加 6 幅图像恢复的物体彩色纹理图。图 9 为用彩色网格表示的被测物体与参考平面的投影仪横向像素坐标差。可以看出, 物体的形貌得到了很好的恢复。

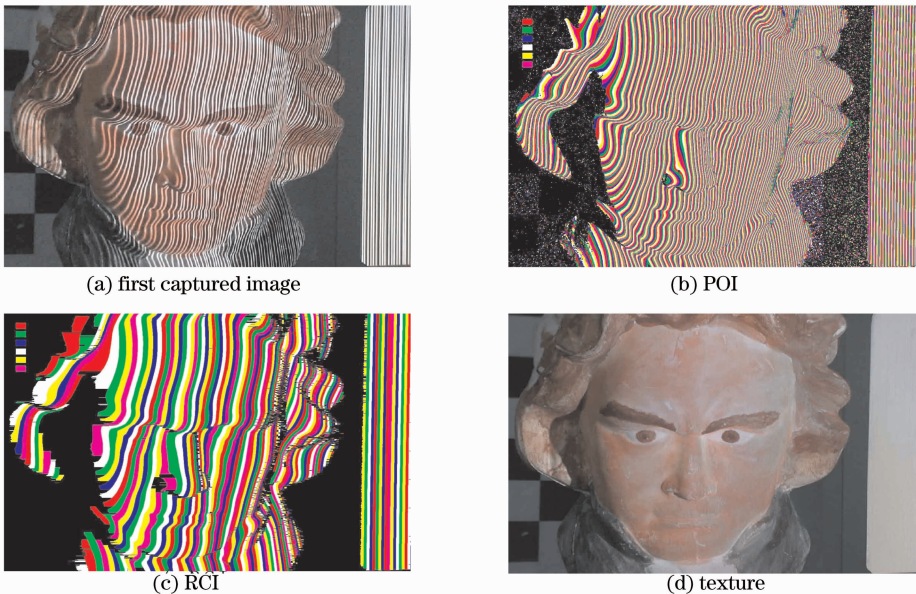


图 8 中间结果与彩色纹理

Fig. 8 Intermediate results and recovered color texture

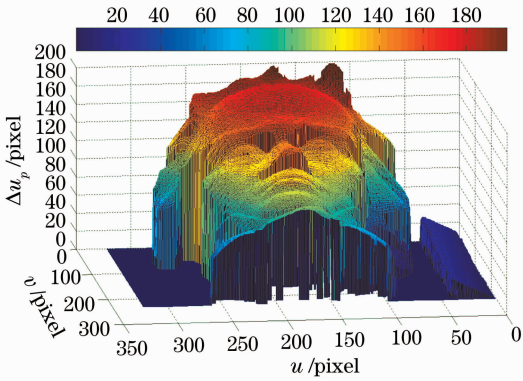


图 9 物体形貌恢复结果

Fig. 9 Reconstructed surface

4 结 论

本文提出了一种新的结构光照明三维成像方法。它将投影平面分成若干个区域，利用区域内像素的时空坐标对区域进行编码。实验结果表明，该编码方案用简单的行扫描来解码就可以得到较好的结果，如果采用区域生长算法，效果更好。解码错误被局限在小区域内，没有向外扩散，错误检测比较容易。只要有足够多的编码区域投影到孤立物体上，解码错误也可以被测量。解码结果具有较高的稳棒性，可以得到高密度的距离像及纹理。如果采用亚像素分析方法，还可以得到高精度的测量结果。

参 考 文 献

- 1 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 Blais, F. Review of 20 years of range sensor development[J]. *J. Elect. Imag.*, 2004, **13**(1): 231~240
- 3 Qican Zhang, Xianyu Su. High-speed optical measurement for the drumhead vibration[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 3110~3116
- 4 Li Y, Jin H ZH, Wang H *et al.*. Research for horizontal parallax only kinoform in 3D display [J]. *Chin. J. Lasers B*, 2002, **B11**(6): 465~468
- 5 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 6 Su Xianyu, Bally G. V, Vukicevic D. Phase stepping grating profilometry: Utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1): 141~150
- 7 M. Takeda, K. Motoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 8 J. Salvi, J. Pages, J. Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. *Patt. Recogn.*, 2004, **37**(4): 827~849
- 9 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1518~1522
- 10 郝煜栋, 赵 洋, 李达成. 非线性小数重合法及其在轮廓测量中的应用[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1518~1522
- 11 Zhao Hong, Chen Wenyi, Tan Yusha. A novel phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7): 898~901
- 12 赵 宏, 陈文艺, 谭玉山. 一种新的相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 1995, **15**(7): 898~901
- 13 Yong Li, Xianyu Su, Qingyang Wu. Accurate phase-height mapping algorithm for PMP[J]. *J. Mod. Opt.*, 2006, **53**(14): 1955~1964