

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)11-1629-06

检索信息: 胡正周, 陈胜勇, 管秋, 刘盛, 李兰兰. 基于单幅光模板的高分辨率可靠 3 维形貌重建[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(11): 1629-1634

基于单幅光模板的高分辨率可靠 3 维形貌重建

胡正周, 陈胜勇, 管秋, 刘盛, 李兰兰

(浙江工业大学计算机学院, 杭州 310023)

摘要: 如今在计算机视觉领域, 基于结构光从 2 维图像重建物体的 3 维轮廓已成为研究热点。然而低分辨率、纹理受限、对光照敏感是此项技术实际应用的主要制约。由于结构光视觉的关键技术是编码解码, 因此为了进行高分辨率可靠的 3 维形貌重建, 提出了一种新的彩色编码结构光技术, 用来对单幅图像进行 3 维重建。该技术首先设计一个基于 De Bruijn 序列的等距白色光条间隔的彩色光模板, 同时采用 K 均值聚类的方法来匹配投影仪和摄像机平面之间对应的光条颜色。然后引入聚类的统计特征量, 以自适应不同场景、纹理, 使之能够在无控光照条件下实现光条边界局部的精确定位、模板正确匹配和解码。另外, 针对静态场景, 同一光模板相移方法还可以获取高分辨率的 3 维形貌, 可适用于高密度重建任务。实验结果表明, 该方法可在日常光照下重建高分辨率可靠 3 维模型, 并可提高 3 维形貌获取的适用条件。

关键词: 形貌重建; 色彩聚类; 单幅投射时移; 彩色结构光

Robust reconstruction of high-resolution 3D shapes based on a single light pattern

HU Zhengzhou, CHEN Shengyong, GUAN Qiu, LIU Sheng, LI Lanlan

(Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract: It is an increasingly important topic to reconstruct 3D shape from images by structured light vision. However, their practical applications are mainly limited to low resolution, texture and sensitivity of environment illumination. This paper proposes a new color coded structured light technique for robustly reconstructing shapes from a single image. This technique works by projecting a pattern based on De Bruijn stripes with white gaps. The correspondence problem is solved using a color classification algorithm. The statistical cluster parameters of the captured image are adopted so that it is adaptive to different scenes and contexts. In this paper, the stripe boundary is located accurately by local a searching method. Additionally, a scheme is presented to achieve dense shape reconstruction by shifting the same pattern. Practical experimental results are provided to demonstrate the performance of the proposed method.

Keywords: shape reconstruction; color classification; shifted one-shot pattern; color structured light

0 引言

近 20 多年来, 物体 3 维轮廓重建一直是计算机视觉的重要目的之一。尽管基于结构光的 3 维重建

方法具有高精度、受控性强等特点而被广泛应用^[1], 然而, 由于彩色结构光受限于中性色彩的物体表面, 致使高分辨率且稳健的 3 维重建仍然面临着巨大的挑战^[2]。随着计算机硬件技术的发展, 研究人员把研究焦点集中在编码技术上, 使用一幅或

基金项目: 国家自然科学基金项目(60870002, 60605013)。

收稿日期: 2009-04-11; 改回日期: 2009-09-01

第一作者简介: 胡正周(1983—), 男, 2010 年获浙江工业大学计算机学院计算机应用技术专业硕士学位。主要研究方向为计算机视觉。E-mail: zhengzhou.hu@gmail.com。

通讯作者: 陈胜勇, E-mail: csy@zjut.edu.cn。

者多幅图像来重建物体。时间编码方法是通过投射一序列图片或者摄像机多角度拍摄来编码每个特征点^[3],虽能获得高精度和高分辨率的3维轮廓,但却限制了3维数据获取处理的速度,仅仅局限于静态场景的重建。空间编码方法是先利用特征点的行、列或者两者之间的空间关系进行编码,再通过局部空间数据解码匹配投影到摄像机的光条平面。其中一种空间编码方法是阵列 M 编码,用于定义模板中每个窗口的领域唯一性^[4-5]。例如, Morita 等人提出用一个位编码阵列圆心模板进行编码,窗口大小为 3×4 的圆点,每个窗口在阵列中只出现一次^[6]。阵列 M 可由一幅光模板解码,它能实现对动态场景的3维重建^[7],矩阵越大,重建的分辨率就越高。同时,获取模板的图像分割复杂性不得不考虑,因为分割对物体反射率、不均匀光照和图像噪声敏感。另一种基于空间编码的技术是条纹模板^[8]。其中 De Bruijn 序列是经典的编码方法^[9-10],定义 m 元 n 级的序列,子窗口的大小为 m 列或者 m 行。De Bruijn 编码技术是对子序列长度和编码颜色数的折中,颜色数目的增加导致匹配复杂化,而限制序列长度则既导致光条稀疏,又使分辨率下降。

本文提出了一种基于 De Bruijn 序列的改进光模板。这种技术尽管只能应用于具有中性或者暗淡颜色表面的物体,但它的在精度、分辨率和速度上有很大优势。另外,本文还提出一种基于 K 均值聚类的颜色分类方法,不仅大大降低了受限于物体纹理的程度,而且增强了对色彩串扰的稳健性。

1 颜色编码

1.1 彩色编码结构光系统

彩色结构光系统如图 1 所示。和传统的双目立

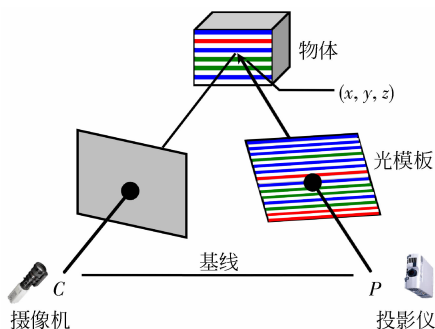


图 1 一个典型的结构光系统

Fig. 1 A typical structured light system

体视觉系统相似,只是其中一个摄像机被一个投射光模板的投影仪代替。光学投射器(可以是激光器,也可以是投影仪)将一定模式的结构光(光模板)投射于物体的表面,在表面形成由被测物体表面不连续形状所调制的光条3维图像,该图像与投射光模板之间的特征点可通过解码匹配被唯一正确检测,在系统已标定的基础上,所有匹配点可通过3维计算来获得物体形貌。

1.2 光模板设计

在彩色投射系统中,光条坐标需要从一幅图像中检测出来,本文提出了一种新的编码策略,用来对投射光模板的每一行进行编码。为了保证颜色空间的区分度足够大,要求在 RGB 空间中至少有两个颜色通道不同,因此选择红、绿、蓝三基色作为编码颜色,且对任何高饱和度的场景都保持足够的距离。同时,通过引进等宽的白色光条来间隔彩色光条,使相邻光条使用同一种颜色色调值,使有效编码率达到 100%。光模板由 $2n^m$ 条光条组成,其中颜色数目为 n ,窗口大小为 m ,而现有 De Bruijn 编码技术,采用同样参数只能生成 $n(n-1)^m$ 条光条。实际场景中,由于物体表面的不连续性,使得部分光条不可见,从而导致3维数据错误增加,这样的光条称为阴影光条。引进白色光条的优点是可以增加可解码光条的比率,因为相应的阴影光条被不参与解码的白色光条替代。定义 $P = \{1, 2, \dots, 2n^m\}$ 为对应每条光条的坐标序号值。由此生成的光模板如图 2(a) 所示,由每个条纹边界即可划分一个平面空间。同时,为了增加现有编码模板的分辨率,还提出了一个有效的时空编码方法,编码时,投射的每一帧图像由相同的光模板组成,后一帧由前一帧下移光条 $1/4$ 宽度组成,4 帧光模板如图 2(b) 所示。鉴于先前已有大量的文献在数理组合方面对 De Bruijn 序列进

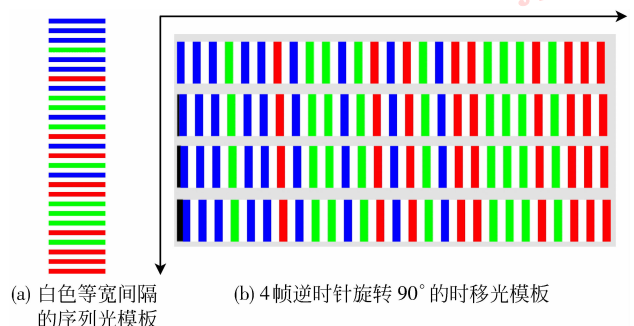


图 2 两种不同的光模板

Fig. 2 Two kinds of structure patterns

行了研究,并采用文献[11]的方法产生了序列。为此系统利用每帧光条边界空间编码的唯一性以及多帧的时间特性来增加重建模型的精度和分辨率。

2 光模板解码

建立图像平面与投影光平面之间的正确匹配是一个复杂的问题。其步骤包括光条边界定位、光条颜色分配以及解码光条在每帧模板中的位置。重复上述步骤就可以匹配全部特征点,进而重建 3 维形状。

2.1 光条边界的精确定位

由于彩色与白色边界周围存在着一定灰度值的细缝彩色条,致使捕捉到的图像中的边缘偏离实际定义的模板边界,因此,边界精确定位直接影响系统重建的精度。检测边缘前,由于光模板是 1 维条纹编码,因此沿着图像的每个列进行扫描,对每个像素点的各个通道用图 3 的 1 维列算子进行预处理,即可确定灰度变化强烈的像素点为候选边缘点。



图 3 边缘检测算子
Fig. 3 Edge detector

考虑到全局边缘点的搜索耗时,本文提出了一种局部搜索方法,即在图像像素的每一列上,以候选边缘点为中心,选取一定大小的区域,该区域最大值不超过光条宽度的 1/2。搜索局部邻域的步骤如下:

- 1) 将初始化的候选边缘点作为一区域中心 $z_{i,j}$;
- 2) 沿列方向搜索,将 $z_{i-k,j}, z_{i+k,j}$ 像素颜色空间转成色调、亮度和饱和度(HIS)空间;
- 3) 增加新的点到这个区域,只要满足与相邻像素点的色调值差 h 不超过设定的阈值 H 。

$$h = |z_{i\pm k,j} - z_{i\pm k\pm 1,j}| \quad (1)$$

$z_{i\pm k,j}$ 表示第 $i \pm k$ 行 j 列像素的色调值。分别对白、红、绿、蓝光条的相邻像素的色调差进行统计实验,取阈值 $H = 0.06$ 即可获得理想的边界区域。经算子处理后,像素点的三通道灰度值为 $G_{i,j}$,局部区域三通道灰度值之和的最大值的像素点可定义为边界点。

$$E_{\max} = \max(E) = \sum_{j=1}^C G_{i,j} \quad (C = 3) \quad (2)$$

E_{\max} 为算子处理后像素点灰度值之和的最大值。图 4 是一个运用上述方法进行边缘检测的实例。

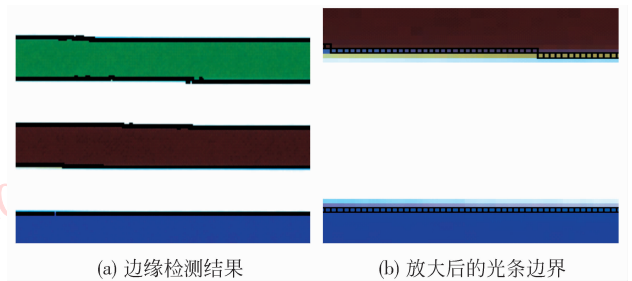


图 4 光条边界检测实例

Fig. 4 A example of stripe boundary detection

2.2 光条颜色匹配

图像中每条被检测出来的颜色和模板颜色有一定的相似度。因此,正确匹配光条的对应颜色是减少 3 维计算错误的键。Zhang 等人提出用动态规划方法来匹配每个像素点^[2],而不是匹配每条光条,非常耗时。Fechteler 等人采用一个复杂的直线聚类算法来寻找每个聚类直线的参数^[12],但直线之间的分离度不明显。本文采用颜色聚类的方法来建立颜色匹配特征向量,同时对图像颜色和投射颜色进行比较,并通过定义色彩特征向量与聚类中心的欧氏距离来分配候选光条红绿蓝白颜色。编码采用的三基色空间距离已足够大,可用经典的 K 均值算法搜索色彩类中心。实验时,首先选择拍摄的多幅图像,考虑到样本空间,实验中选择 3 幅图像,并把对应像素的 RGB 分量转成色彩 3 维特征向量作为输入的样本数据,聚类中心搜索如下:

- 1) 将红、绿、蓝、白色初始化为 $k = 4$ 个群的中心;
- 2) 把每个样本点分配给离色彩群中心距离最小的群;
- 3) k 个群中的质心点成为新的聚类中心;
- 4) 重复步骤 2) 和 3) 直到所有点都趋向稳定的聚集。

实验表明,捕捉的图像颜色与投影仪投射的模板颜色有各种不同的扭曲和失真。另外,各传感器存在噪声和颜色间的串扰。图 5 是三基色 RGB 空间,图 5(a)是在理想情况下从投影仪中提取的光条颜色 RGB 空间,图 5(b)是在办公环境下摄像机拍摄的光条颜色 RGB 空间。在图 5(b)中,不同的颜色群集聚在特定的 RGB 空间区域,可先通过样本点来训练颜色群的聚类中心,然后用点到点的距离来匹配光条颜色。

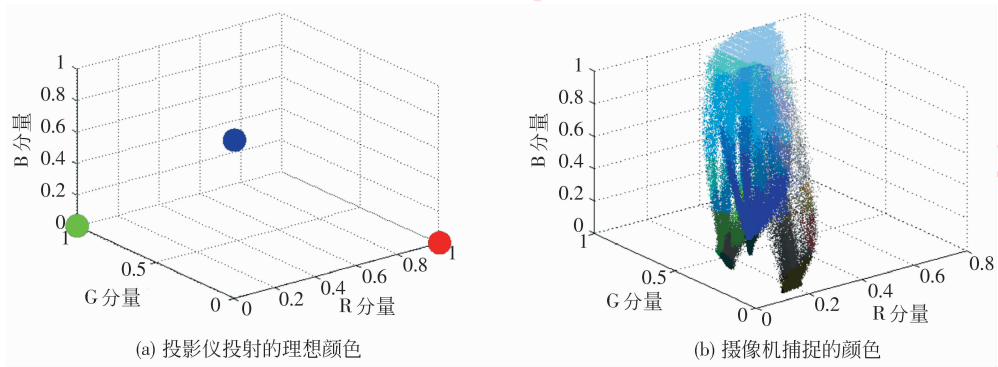


图 5 像素点颜色的 RGB 空间
Fig.5 The RGB space of pixel colors

$$D_{i,k} = d^2(P_i, C_k) \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

$D_{i,k}$ 是两点距离的平方, P_i 是第 i 个光条中心像素的 RGB 特征向量, C_k 是颜色聚类中心, $d(x, y)$ 是 x, y 两点之间的距离。设 $D = \min(D_{i,k})$, 那么光条颜色的分配按照下式进行:

$$c_k = \{k, \text{如果 } D = D_{i,k}\} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

式中 c_k 表示光条颜色。例如, $k=1$ 表示光条颜色为红色。 $k=1, 2, 3, 4$ 分别指示红、绿、蓝和白色。分配好颜色后, 每 3 条相邻的光条颜色组成一个码字 s_i , 找出每个码字在整个序列的位置就是解码。本文采用 Hsieh 提出的直接解码 De Bruijn 算法^[13]进行解码, 与穷举解码相比, 由于不需要存储额外的字母表, 其时间复杂度是穷举法的 $1/n$ (n 为编码元个数)。光条坐标值 x_i 定义为

$$x_i = DdBS(s_i) + \frac{1}{4}(j - 1) \quad (5)$$

式中 $DdBS(s_i)$ 是直接解码第 j 帧光模板子序列 s_i 的坐标位置。

3 系统标定

系统的标定是要获取各个传感器之间的关系以及自身的参数, 标定精度将决定整个系统的重建误差。本文把结构光系统标定分为摄像机标定和投影仪标定两步进行。摄像机标定技术已非常成熟, 本文直接使用一个经典的非线性模型来标定摄像机^[14], 标定精度已能满足应用。本文主要集中解决投影仪的标定问题, 用特征点 3 维坐标和对应投影光条的坐标即可标定投影仪到摄像机的映射关系。

3.1 投影仪模型

投影仪模型在概念上等同于摄像机的逆模型, 由于投影的光模板是 1 维编码, 因此可将投影仪简

化成 1 维模型。由投影仪坐标 x_i 和世界坐标 x_w 建立模型如下:

$$\lambda_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & m_{1,4} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} & m_{2,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

λ_i 是不同光条的投影系数, 消除 λ_i , 变换式(6)得到:

$$\frac{x_w m_{1,1} + y_w m_{1,2} + z_w m_{1,3} + m_{1,4}}{x_w m_{2,1} + y_w m_{2,2} + z_w m_{2,3} + m_{2,4}} = x_i \quad (7)$$

式(7)可构造为以 $m_{j,k}$ 为未知数的齐次线性方程组, 并可通过奇异值分解求解投影仪模型参数。

3.2 交比不变性的透视原理

特征点的世界坐标无法直接获得, 需要利用已知点的世界坐标来间接求取。建立的简化透视交比不变性几何模型如图 6 所示, 假设空间点 A, B, C 位于同一条直线 L 上, 则以 B 为参考点, 位置比率定义为

$$PR(A, B, C) = AB/AC \quad (8)$$

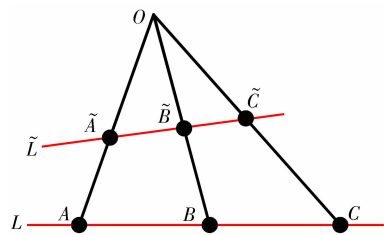


图 6 交比不变性原理
Fig. 6 Principle of cross-ratio invariability

$\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ 是在透视中心 O 作用下, 对应点 A, B, C 的成像点, 并且位于同一条直线 \tilde{L} 上, 图像坐标上的位置比率为

$$PR(\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}) = \tilde{A}\tilde{B}/\tilde{A}\tilde{C} \quad (9)$$

根据透视几何原理的交比不变性可以得到^[15]:

$$PR(A, B, C) = PR(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}) \quad (10)$$

在实验中,如果找到空间直线 L 上的 3 点 A, B, C ,那么对应图像中的点 $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ 也是位于同一直线 \bar{L} 上。提取光模板中特征点的图像坐标,根据式(10)求出参考点 B 的世界坐标。可通过建立空间 3 维到 1 维坐标之间的映射关系来标定投影仪。

3.3 标定结果

本文结构光视觉系统的基线长为 230 mm,对景深 $Z = 870 \text{ mm}, 862 \text{ mm}, 854 \text{ mm}$ 和 846 mm 的 4 个标靶平面进行重构,重构误差如表 1 所示。从表 1 中可看出,系统的平均绝对误差为 1.11 mm,平均相对误差为 0.13%。利用已标定参数分别对 4 个平面的标定点进行重构(如图 7 所示)。

表 1 系统标定误差

Tab. 1 The calibration result of system

Z/mm	标准差/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
870.10	1.236 5	1.105 2	0.14
861.90	1.256 8	1.112 6	0.13
853.74	1.251 2	1.124 5	0.13
845.62	1.243 5	1.096 8	0.13

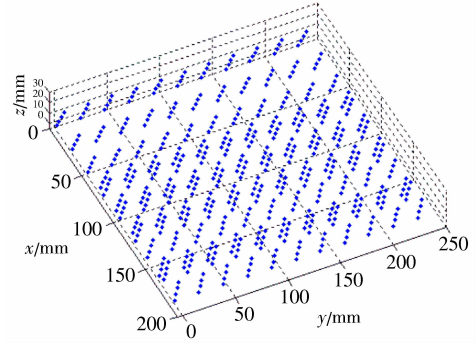


图 7 标定点 3 维重构

Fig. 7 The 3D reconstruction of calibrated points

4 3 维重建实验

结构光系统由一个 1.4 M pixels 的 CCD 摄像机和分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$ 的数字投影仪组成。光条的宽度为 16 pixels,采用 3 种颜色,窗口大小为 3,构成 De Bruijn 序列,光模板由 27 条彩色光条以及间隔的 27 条白色光条组成,整个实验共投射 4 帧,每帧时移前一帧的 4 pixel。光条边缘的检测和解码方法采用本文提出的算法,投射多帧以后即可以获得更高分辨率的形状。实验结果如图 8 所示,由图 8 可见,获

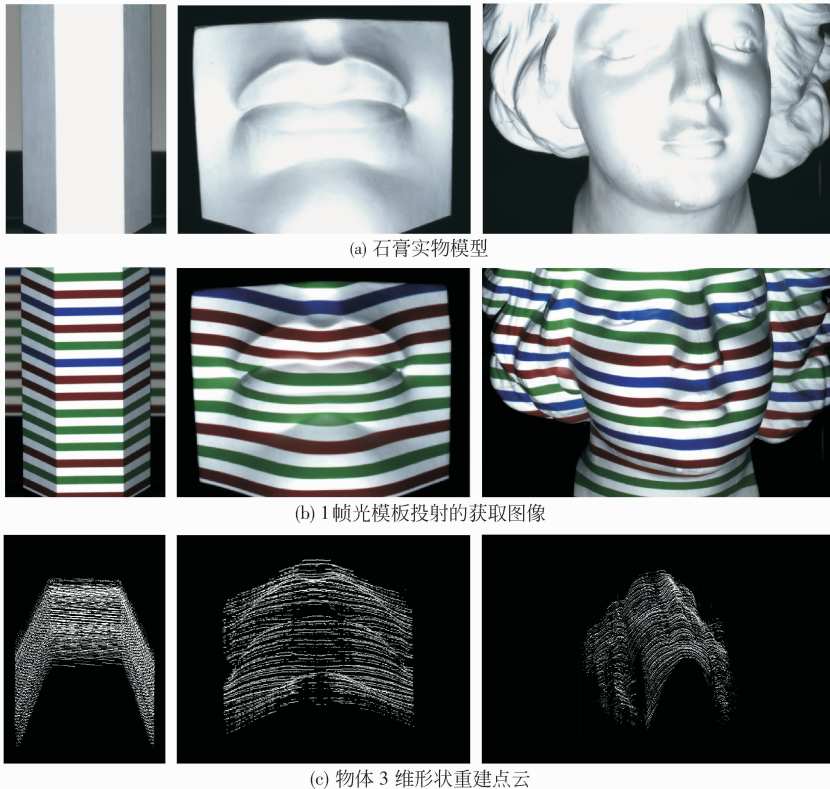


图 8 新光模板投射下的物体形状重建结果

Fig. 8 Shape reconstruction results under the proposed patterns illumination

得了良好的点云重建结果,模型中的细节,如棱柱边界、嘴和鼻子等都明显可见。光条的正确匹配率达到 100%。3 维重建分辨率的定量统计数据如表 2 所示,分辨率是指可重建 3 维点与图像总像素点的比率。

从表 2 可见,连续光滑表面,如六棱柱,其重建分辨率可达到 8.66%,非连续表面,如嘴和头模型的分辨率均值为 7.7%。

表 2 3 维重建分辨率的定量统计结果

Tab.2 Quantitative results of shape reconstruction

石膏模型	3 维点数	分辨率/%	帧数	光模板数
六棱柱	33 143	8.66	4	1
嘴	22 013	8.19	4	1
头	46 866	7.21	4	1

5 结 论

本文提出了一个高分辨可靠 3 维形貌重建系统,而色彩聚类的统计特征可使系统适应不同的场景和物体纹理,并获得了高精度的 3 维模型,实验证明,本文算法是有效的。同时利用条纹模板的优点提出了一种新的编码方法,该方法使用的颜色数目少,不仅编码窗口最小,且边界定位精确。根据捕捉到的图像的特征相似性,先运用经典的 K 均值聚类算法来正确匹配光条颜色,然后对特征点进行可靠的匹配和解码。另外,彩色光条被等距的白色光条间隔开来,不仅解除了相邻的彩色光条不能分配同一种颜色的限制,同时也提高了光条编码的效率。3 维重建过程中只需 1 次性光投射和 1 次性图像获取操作,结合时移方法,新的光模板可获取高分辨率的 3 维模型。

未来的工作将集中于自适应光模板的匹配和解码,同时满足实时性和高精度的要求。

参考文献 (References)

- [1] Salvi J, Pags J, Battle J. Pattern codification strategies in structured light systems [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4): 827-849.
- [2] Zhang L, Curless B, Seitz S M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming[C]//Proceedings First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission. Padova, Italy, IEEE Press, 2002: 24-36.
- [3] Young M, Beeson E. Viewpoint-coded structured light [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, MN, USA: IEEE Press, 2007: 2703-2710.
- [4] Morano Raymond A, Ozturk Cengizhan, Conn Robert, et al. Structured light using pseudorandom codes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(3): 322-327.
- [5] Chen S Y, Li Y F, Zhang Jianwei. Vision processing for realtime 3-D data acquisition based on coded structured light [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(2): 167-176.
- [6] Morita H, Yajima K, Sakata S. Reconstruction of surfaces of 3-D objects by m-array pattern projection method [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. Tampa, FL, USA, IEEE Press, 1988: 468-473.
- [7] Griffin P M, Narasimhan L S, Yee S R. Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition [J]. Pattern Recognition, 1992, 25(6): 609-616.
- [8] Rusinkiewicz S, Hall-Holt O, Marc L. Real-time 3D model acquisition [C]//Proceedings of SIGGRAPH'02, 3D Acquisition and Image Based Rendering. New York, USA: ACM Press, 2002, 1281: 438-446.
- [9] Li H, Straub R, Prautzsch H. Structured light based reconstruction under local spatial coherence assumption [C]//Proceeding of 3rd IEEE International Symposium 3D Data Processing, Visualization and Transmission. Washington, DC, USA: IEEE Press, 2006: 575-582.
- [10] Pages J, Salvi J. Optimised De bruijn patterns for one-shot shape acquisition [J]. Image and Computing, 2005, 23(8): 707-720.
- [11] MacQueen J B. Some Methods for classification and analysis of multivariate Observations [C]//Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley, CA, USA: University of California Press, 1967: 281-297.
- [12] Fechteler P, Eisert P. Adaptive color classification for structured light systems [C]// Proceedings of the 15th International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, AK, USA: IEEE Press, 2009: 3(2): 49-59.
- [13] Hsieh Yi Chih. Decoding structured light patterns for three-dimensional imaging systems [J]. Pattern Recognition, 2001, 34(2): 343-349.
- [14] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [15] Zhang Guangjun, He Junji, Yang Xianming. Calibrating camera radial distortion with cross-ratio invariability [J]. Optics and Laser Technology, 2003, 35(6): 457-461.