

# 基于结构光的三维点云重建方法研究\*

孙庆科, 何云涛, 陈瑞强, 江月松

(北京航空航天大学 电子信息工程学院 北京 100191)

**摘要:** 结构光三维成像是近年来三维成像领域的研究热点之一。整体设计及实现了条纹结构光三维重构系统, 并重点研究了点云生成三角网格方法。该系统使用整体阈值与局部滑动阈值相结合的方法提取到条纹中心特征点, 以像素索引值为中间媒介进行编码值插值计算, 并利用像素索引值为媒介对点云进行三角网格化处理。利用像素索引值的方法简化了点云插值和点云生成三角网格的处理过程, 并且能够精确得到每个点上的颜色值并进行颜色渲染。最后利用提出的方法对石膏模型和实际人脸面部进行了三维测量和重建, 并分析了该方法测量的精度。结果表明提出的方法达到了实验精度的要求并取得了非常好的三维重构效果。

**关键词:** 成像系统; 三角网格划分; 像素索引值; 特征点提取; 点云插值

**中图分类号:** TP391.4

## Research of three-dimensional point cloud reconstruction based on structured light

Sun Qingke, He Yuntao, Chen Ruiqiang, Jiang Yuesong

(School of Electronic & Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Structured light three-dimensional imaging is one of the hotspots in recent years in the field of three-dimensional imaging. This paper overall designed and implemented a system of three-dimensional reconstruction of stripe structured light, and focused on the method of triangle mesh generation of point cloud. Using combination of the global threshold and the local sliding threshold methods extracted the feature points in the strip center. By using the pixel index values of feature point for intermediary, encode values were interpolated and point cloud generated triangular mesh. It made the point cloud interpolation and the point cloud triangulation process greatly simplified by using the pixel index values of feature point for intermediary, and it was able to accurately get the exact color value of each point and do color rendering. Finally, the surface of a plaster model and a human face were taken as examples to be measured and reconstructed using the proposed method, and analyzed the accuracy of the measurement methods. This results show that the proposed method achieves the accuracy of test requirements and achieve very good performances.

**Key Words:** imaging system; triangle mesh; pixel index values; point cloud interpolation; point cloud interpolation

## 0 引言

三维成像技术, 能够获取三维物体各部分真正的三维测量数据信息, 即物体表面的三维坐标。近年来, 随着高分辨率和高速电子传感器件的发展, 三维成像技术的研究发展以及商业化应用取得了巨大的进展, 其主要应用于逆向工程、质量检测、军事、数字化文物、机械制造、整形治疗等范畴<sup>[1]</sup>。光学三维测量技术是主动式获取物体三维信息最有效的手段之一, 主要优点有无需接触被测物表面、采样密度高等。光学三维测量技术中, 结构光编码法以其准确度高、测量速度快、成本低等优点在三维重构、工业测量等领域有着广泛的应用前景<sup>[2-4]</sup>。

随着结构光三维点云采集技术的快速发展, 从三维点云重建三维物体表面的需求越来越多。点云处理技术的发展决定了

能否有效的将点云数据转换成高质量的三维数字模型, 从而为快速制造技术提供前期基础。点云插值以及三角网格生成操作是点云数据处理中非常重要的内容, 其方法在一定程度上影响着点云数据处理和点云建模的效率<sup>[5,6]</sup>。三角网格能保持原始网格模型的几何精度和形态信息, 网格规模小、质量高, 众多学者已进行了深入的研究。*Delaunay*三角化是很常用的方法, 这种基于约束的 *Delaunay*三角化方法的主要缺点是计算量太大。*Kazhdan*<sup>[7]</sup>利用快速傅里叶变换(FFT)对有向点云进行了快速有效的重建, 由于需要对点云的包围立方体进行均匀的细分, 稍高的分辨率就会导致内存需求过大。*Kazhdan*等人<sup>[8]</sup>利用空间 *Poisson* 公式对有向点云进行重建, 虽然弥补了细节产生的过大内存需求, 但是严重降低了重建效率。钱归平等通过曲面 *Splatting* 筛选采样近似物体点云, 采用新的非 *Delaunay*三角网

基金项目: 国家自然科学基金资助课题 (61101154)

作者简介: 孙庆科 (1991-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要研究方向为结构光三维成像方法研究 (qingkesun@163.com); 何云涛 (1982-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为成像技术、激光雷达探测等; 陈瑞强 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光测距及三维成像等; 江月松 (1959-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光电探测及遥感探测等。

图 2 为提取条纹中心特征点的流程图, 在提取特征点的过程中, 需要判断亮暗条纹的边界, 同时记录边界上的像素值, 计算得到条纹的中心点。在编码值的纠错判断即判断是否为有效特征点编码过程中利用了编码的有序性及编码值和像素索引值相关联的关系。这需要设置最小及最大条纹的宽度值, 并且与编码值的有序规律性相结合, 在判断一点是否为有效点的过程中需要和此点的上一点的像素值以及编码值进行比较判断,



进而有效减少错误编码的特征点。

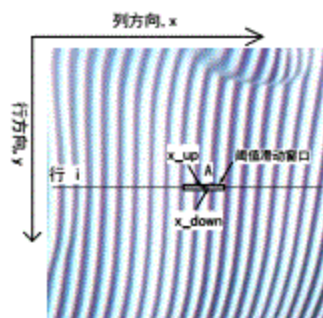


图3 提取特征点示意图

如图3所示为石膏像面部局部放大图像,可以说明提取特征点过程。在第*i*行(已用虚线标出)提取特征点,滑动窗口(矩形框)随着扫描点*A*的移动而移动,当扫描点进入亮条纹(退出暗条纹)时,若满足条件则记录此像素索引列坐标值*x<sub>up</sub>*,当扫描点退出亮条纹(进入暗条纹)时,若满足条件则记录此像素索引列坐标值*x<sub>down</sub>*,最终找到条纹中心。这样就可以把亮暗条纹中心的所有特征点找到。

其中需要注意,滑动阈值的选择不需要太大,避免增加计算量,同时也必须至少应不小于两个条纹宽度,以使得阈值的选择能够使特征点被有效提取。这样,本方法能够有效的找出亮条纹和暗条纹的中心特征点,并进行有效的纠错判断排除无效点的干扰。

## 2.2 对点云进行插值

目前应用广泛的插值方法都是在利用原始点及编码计算后得到的三维坐标点云基础上进行坐标插值<sup>[11-12]</sup>,插值的复杂度较大且计算量很大。本文插值方法中,不是在原始有效点计算得到的三维坐标基础上进行插值,而是利用像素索引值对编码值进行插值,之后再行三维计算得到点云的三维坐标。相当于像素点的行列索引值对应于物体上的平面信息,而编码值对应于物体的深度信息。这样间接的对三维坐标进行插值的方法不仅减少了运算量,同时也保持了原始特征点数据的有效性。

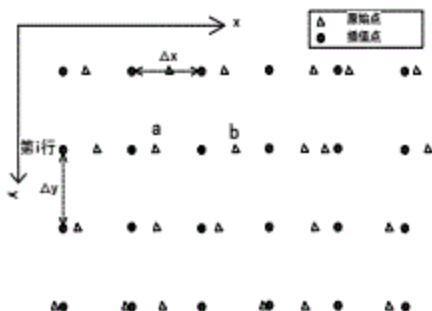


图4 点云插值示意图

由于在条纹特征点提取中,原始点像素索引值行坐标是确定的(其行间距由条纹特征点提取扫描间距决定),只是在垂直条纹方向的列坐标上变化。针对这一特点,即只需要在垂直条纹方向上对编码值进行插值即可,可减少运算量,并保持原始数据的有效性。对于已保存特征点数据的每一行的插值步骤如下:

- 从此行数据的第*j*个点为基准点循环操作(从第一个点到此行数据的倒数第二个点为止,在此点和下个点之间插值);
- 第*j+1*个点的像素索引列坐标与第*j*个点的像素索引列坐标之差小于插值阈值,则继续插值处理,否则返回第1步;
- 从第*j*个点的像素索引列坐标值到第*j+1*个点的像素索引列坐标值之间的索引列坐标*x*,若*x*正好被插值间隔 $\Delta x$ 整除,则进行插值,否则返回第1步;
- 找到了插值点,对此点应插入的编码值进行插值计算;
- 保存此点的插值像素索引行列坐标以及插入的编码值。返回第a)步继续寻找下一点。

这样就可以利用像素索引值和编码值在设定的点进行插值。插值阈值为设定的两点间插值像素点的最小值,若两点像素间隔大于插值阈值则不插值;插值间隔为设定的插值像素间隔大小,决定了插值的密度以及生成点云的密度大小。

在插值过程中,针对三维坐标点与像素索引值和编码值一一对应的关系对像素索引值和像素编码值进行插值,从而间接的对三维空间坐标点进行插值。利用此方法对特征点点云插值再进行三维计算后与三维实际空间坐标均匀插值相比,此方法插值后计算得到的三维空间点云虽然在三维坐标空间中不严格均匀分布,但是也能取得了非常不错效果,并且也有利于对点云数据的下一步处理。

## 2.3 点云生成三角网格曲面

随着三维点云采集技术的快速发展,从三维点云构建网格模型的需求越来越多。点云网格建模技术的发展决定了能否有效的将点云数据转换成高质量的三维数字模型,从而为快速制造技术提供前期基础。点云三角网格生成操作是点云数据处理中非常重要的内容,其算法在一定程度上影响着点云数据的处理和点云建模的效率<sup>[13-14]</sup>。实测点云常包含大量的数据量,三角网格化算法往往基于点云的实际坐标因而比较复杂,这限制了大规模点云的处理效率。

在本文的处理中,在原始点云被找到的情况下,同时记录其像素索引值及实际三维坐标值,其像素索引值和三维坐标值是一一对应的。这里不采用点云的实际三维坐标值,而是根据像素的索引值与三维坐标的一一对应关系间接对点云的三维坐标值进行三角网格化,这简化了算法的难度。在此利用像素索引值对点云数据进行有效的排列,即对三维坐标值点云三角网格的顶点序号进行有效排列。

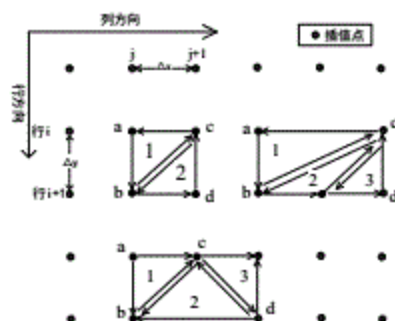


图5 点云生成三角网格示意图

在点云生成三角网格过程中,同时在已保存的两行数据上进行三角片顶点排序。图5为不考虑边界的情况下的点云分布情况,分为不缺少任何特征点、第一行缺少特征点和第二行缺少特征点三种情况。行方向为平行条纹方向,列方向为垂直条纹方向,同时搜索第 $i$ 行和第 $i+1$ 行保存的数据,在列方向由于插值后每列间隔都为等值像素宽度 $\Delta x$ ,对于已保存的插值后的数据三角网格化步骤如下:

a)列方向的像素索引值 $x$ 从0开始累加循环操作,每次累加等值像素宽度 $\Delta x$ 。

b)首先找到第 $i$ 行的第 $j_a$ 个点的数据,判断其像素索引值等于 $x$ ,即为第一个点 $a$ ,否则返回第a)步。

c)再找到第 $i+1$ 行的第 $j_b$ 个点的数据,判断其像素索引列坐标值等于 $x+n_b\Delta x$ ,即为第二个点 $b$ ,否则返回第a)步。设置 $n_b$ 的原因是防止对应的索引值 $x$ 没有对应的点,这样就可以继续往后搜索 $n_b$ 个 $\Delta x$ 像素间隔。同时判断点 $a$ 和点 $b$ 对应的三维坐标距离是否满足网格化阈值条件,进而得到有效的点 $b$ 。

d)再找到第 $i$ 行的第 $j_c$ 个点的数据,判断其像素索引列坐标值等于 $x+n_c\Delta x$ ,即为第三个点 $c$ ,否则返回第a)步。 $n_c$ 的设置与 $n_b$ 同理。同时判断点 $a$ 和点 $c$ 对应的三维坐标距离是否满足网格化阈值条件,进而得到有效的点 $c$ 。

e)若 $b$ 点没有在 $c$ 点的左下方( $n_b > n_c$ ),则停止,返回第1步继续循环查找。否则继续寻找第四个点,找到第 $i+1$ 行的第 $j_d$ 个点的数据,判断其像素索引列坐标值等于 $x+n_d\Delta x$ ,即为第四个点 $d$ 。 $n_d$ 的设置与 $n_b$ 、 $n_c$ 同理。同时判断点 $b$ 和点 $d$ 对应的三维坐标距离是否满足网格化阈值条件,进而得到有效的点 $d$ 。

f)若 $d$ 点是不在 $c$ 点的右下方,则把 $d$ 点值赋给 $b$ 点,寻找 $b$ 点的后一点作为 $d$ 点,再判断是否满足步骤e)的条件,逐次判断循环,直到 $d$ 点在 $c$ 点的右下方为止。

这样在两行之间循环查找,就可把邻近点都用三角网格连接起来。注意 $n_b$ 、 $n_c$ 、 $n_d$ 的取值范围,在 $d$ 点存在的情况下保证使得 $d$ 点在 $b$ 点的左下方,这样做就可以避免某些点重复计数。

由于OpenGL在显示三维图像并颜色渲染<sup>[15]</sup>过程中限制了三角片顶点连接的顺序,这里采用逆时针排列为正,故保存点云时需按规律排列。插值之后的点云数据进行三角网格化连接之后,就成为与现实世界相匹配的三维曲面。

## 2.4 纹理映射

在得到三维点云的处理过程中,只是为了得到点云上的三维坐标信息,这并不包含每个点上的颜色值。为了增加三维成像的真实感,需要为点云贴上真实的纹理颜色值。

纹理映射技术是把二维的纹理图像映射到三维物体的表面,其关键的技术就是建立物体三维空间坐标和纹理图像坐标之间的对应关系,即建立映射方程。

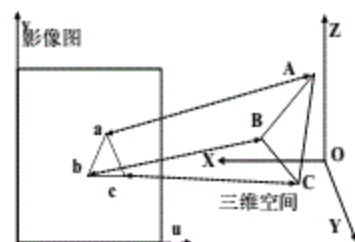


图6 纹理映射过程示意图

如图6所示,只要建立空间点和影像图间的关系,就可以得到空间点云所对应的颜色纹理值。本文中对点云的间接插值以及三角网格化处理过程中,一直采用的是对空间点云对应的影像特征信息进行处理,同时含有点云的三维坐标信息以及影像坐标信息,故不需要建立映射方程,直接可以从纹理影像图中取出点云所对应的纹理颜色,直接加载到三维空间点云中,即贴上纹理颜色。

本方法同时保存了点云的实际三维坐标值以及对应影像图中的像素索引坐标,故能够精确得到每一点的颜色值。点云网格化后再进行颜色渲染,就可以看到与真实物体相符的三维立体图。

## 3 三维重建实验及分析

### 3.1 石膏像三维重建

利用本文提出的特征点提取方法对石膏模型进行特征点提取,再编码计算得到的三维点云图如图7(b)所示,对比只提取亮条纹特征点的情况(图7(a)),可以明显看出此

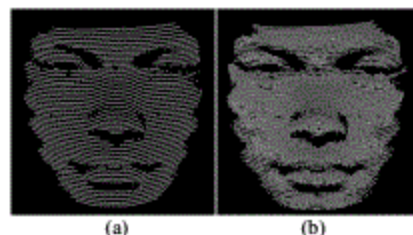


图7 特征点云(a)亮条纹特征点云;(b)所有条纹特征点云。

方法能够提取更多的特征点,取得更好的分辨率效果。利用本文提出的方法得到的条纹特征点个数为5436个,与只能找到2736个亮条纹的中心特征点相比,物体的特征点数目提高了将近一倍。在对所有条纹进行特征点提取的基础上,对特征点像素索引值和编码值进行插值,再经过三维计算后得到的三维点云效果图如图8所示。

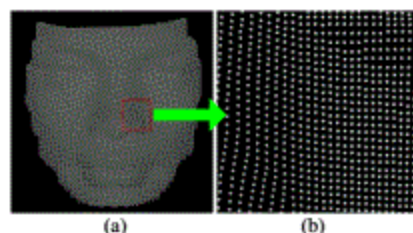


图8 石膏像插值后的点云图像。(a)整体图;(b)局部放大图。

图8(a)为石膏人头像的整体效果图,图8(b)为局部放大



图。可看到利用此方法得到的三维点云虽然在三维实际空间中不严格均匀分布,但是也取得了非常好的整体显示效果。利用此方法经过插值之后得到的点云数目达到 8341 个,增加了特征点的数量。

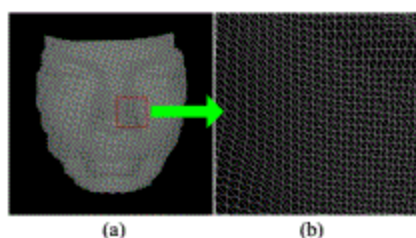


图9 点云三角网格化后效果图。(a)整体图;(b)局部放大图。

在点云插值后的基础上,利用本文中的方法对石膏像三维点云进行三角网格化处理能够得到 16153 个三角片,再利用 OpenGL 三维显示得到的效果图如图 8 所示。图 9(a)为石膏像整体效果图,图 9(b)为石膏像的局部方法图。可以看到利用此方法得到的网格图像非常清晰。

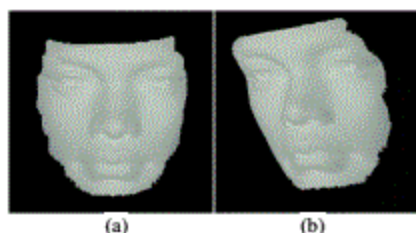


图10 石膏像三维重建效果图。(a)正面;(b)侧面。

最后在以上基础上,对石膏人头进行三维重建并加上颜色渲染之后用 OpenGL 显示的三维效果图如图 10 所示,可以看出得到的三维重建效果图与实际石膏人头模型非常相符,取得了非常逼真的显示效果。

### 3.2 人脸三维重建

由石膏像的三维重建过程可以证明本文方法的有效性,现在对实际人脸进行三维重建。石膏像表面对结构光的反射相对清晰,得到的图片条纹亮暗对比相对明显。但是由于人脸的特殊性,不同区域对光照反射率的不同,人脸纹理信息对光照变化相对比较敏感,在不同强度和角度的光照条件下获得的人脸图像在像素级上有较大的差异,对三维成像增加了难度。

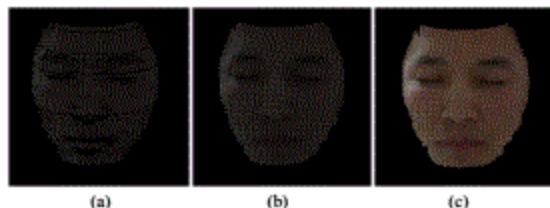


图11 人脸面部三维重建过程。(a)原始点云;(b)插值后点云;(c)三角网格化效果图。

利用本文的整体阈值和滑动窗口阈值相结合的方法,阈值会随着图像中像素点的不同而变化,可以有效的提取到实际人脸面部的特征点。图 11(a)为利用此方法提取到的特征点点云,总共有 7082 个点。图 11(b)为利用像素索引值为中间媒介插值

后计算得到的三维点云图,插值后的点云数量增加到 10740 个,图 11(c)为点云三角网格化后的效果图,共含有 20773 个三角形。通过这一系列处理,人脸面部显示图像逐渐变得清晰,并且有利于点云数据的进一步处理。

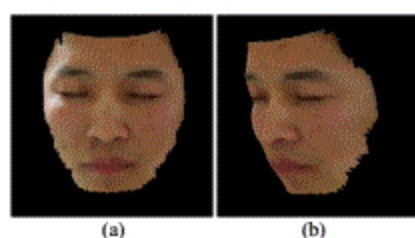


图12 人脸三维重构图。(a)正面;(b)侧面。

在以上基础上,对实际人脸面部进行三维重建并加上纹理映射进行颜色渲染之后用 OpenGL 显示的三维效果图如图 12 所示。从图中可以看到,人脸面部的稍微复杂的局部特征如鼻子、眼睛、嘴巴等等也非常清晰,使用本文的提出方法对实际人脸进行三维重构也取得非常好的三维显示效果。

### 3.3 实验精度分析

利用本文提出的结构光成像方法对实际的平板(高 150mm,宽 280mm)进行三维表面成像,相机距离平板 470mm。由于边界的特殊情况,在成像过程中不能确定边界能够成功提取到特征点并且正确编码,计算得到的特征点三维坐标也无法确定与实际测量得到的平板面上点的三维坐标一一对应,并且逐一测量平板上点的三维坐标工作量大并存在误差,无法保证平板与像平面平行。在此把利用本文方法计算得到的点云三维空间坐标数据利用 MATLAB 进行处理,并利用最小二乘法进行拟合得到平面进行分析。

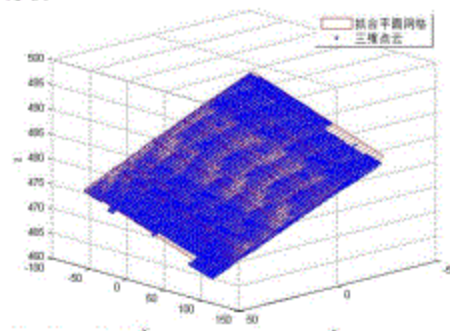


图13 三维点云及拟合平面

如图 13 所示,可以看到点云基本都处于平面上,符合度比较高。通过计算得到坐标原点(即相机位置)到拟合平面的距离为 470.15mm,与实测距离误差很小,表明了此分析方法的有效性。为进一步量化分析,计算每一点到拟合平面的距离,并且把计算得到的数据以 0.01mm 为区间单位进行划分并统计得到每一区间内的概率密度分布以及概率分布。

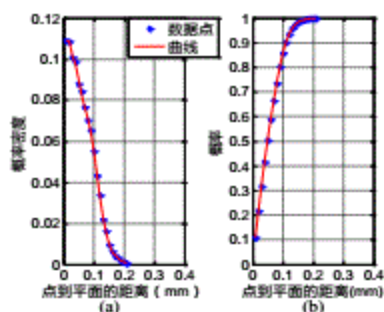


图14 点到平面数据分析。(a) 概率密度分布 (b) 概率分布

如图14所示为经过统计之后的概率密度以及概率随点到平面距离的变化情况。可以看到距离误差概率密度分布曲线靠近0的位置最大,从0到0.1mm的概率密度较大并逐渐减小,误差到0.2mm以上的概率密度基本为0;经测量得到的三维点云有大约90%的数据的距离误差控制在0.1mm以内,基本所有的点云数据都在0.2mm误差范围内。

由以上数据可以看到本方法得到物体表面的三维图像能够达到实验的精度要求。本文方法与传统方法相比,能够得到更多的特征点数据并且引入像素索引值间接对三维点云进行处理使得过程更加简洁,而且在实现立体显示过程中能够精确得到每一点的颜色值,精确得到与实际空间实物基本相同的显示效果,实现更加精细化更加逼真的三维模型重建。

#### 4 结束语

本文整体设计及实现了条纹结构光三维重构系统,使用整体阈值与局部滑动阈值相结合的方法,能够更加有效的提取到条纹的特征点;以像素索引值为中间媒介,能够更加方便的对数据进行编码值插值计算,并大大降低了数据插值的难度;同时提出利用像素索引值为媒介的点云三角网格化方法,利用像素索引值简化了点云三角网格化处理过程,并且能够精确得到每个点上的颜色值并进行颜色渲染。通过对石膏像和实际人脸成像可以看到本文重建方法取得了非常好的三维显示效果。

本文使用的方法避免了直接利用点云三维空间坐标进行插值和网格化的繁杂,以像素索引值为媒介,为点云插值和点云网格化处理提供了新思路。

#### 参考文献

[1] Koninckx T P, Griesser A, Gool L V. Real-time range scanning of deformable surfaces by adaptively coded structured light[C]//Proc of the

4th International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling. 2003: 293-300.

[2] Geng J. DLP-based structured light 3D imaging technologies and applications[C]//SPIE MOEMS-MEMS, International Society for Optics and Photonics, 2011: 79320B-79320B-15.

[3] 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.

[4] 李勇, 陈云富, 金洪震, 等. 三维成像中的二值时空编码照明方法[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 670-675.

[5] Rodrigues M, Kormann M, Schuhler C, et al. Structured light techniques for 3D surface reconstruction in robotic tasks[C]//Proc of the 8th International Conference on Computer Recognition Systems. Springer International Publishing, 2013: 805-814.

[6] Robinson A, Alboul L, Rodrigues M. Methods for indexing stripes in uncoded structured light scanning systems [J]. Journal of WSCG, 2004, 12(3): 371-378.

[7] Brink W, Robinson A, Rodrigues M A. Indexing uncoded stripe patterns in structured light systems by maximum spanning trees[C]//BMVC. 2008: 1-10.

[8] Tsai W H. Moment-preserving thresholding: A new approach[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 29(3): 377-393.

[9] 梅天灿, 仲思东, 何对燕. 可变环境光照条件下的结构光条纹检测[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2794-2801.

[10] 姜绪佳, 赵海, 张勤峰, 等. 基于边界信息的结构光编解码方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(6): 879-888.

[11] Jia Zhaoyin, Chang Yaojen, Lin Tzungshan, et al. Dense interpolation of 3d points based on surface and color[C]// Proc of the 18th IEEE International Conference on Image Processing. 2011: 869-872.

[12] Fantoni C, Hilger J D, Gerbino W, et al. Surface interpolation and 3D relatability[J]. Journal of Vision, 2008, 8(7): 29.

[13] 曾伟, 杨通, 姚山. 点云重构三角网格的生长型神经气算法[J]. 软件学报, 2013, 24(3): 651-662.

[14] 徐杰. 一种基于立方格的散乱点云曲面网格化方法[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2014, 50(2): 228-234.

[15] 于晓洋, 赫佳杰, 黄明, 等. 应用彩色图像的结构光重构三维表面颜色渲染[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2561-2568.