

# 基于二值空间编解码的结构光三维场景重建

葛启杰, 史金龙\*, 孙蕴瀚

江苏科技大学计算机学院, 江苏 镇江 212003

**摘要** 在双目结构光系统下, 提出一种基于二值空间的条纹边界编解码方法。提出二值空间的定义; 按投影顺序将投影图案分层, 并为第一层条纹图像构造初始二值空间; 根据初始二值空间内黑白条纹的顺序, 分别在两个子空间内提取第二层条纹图像的边界线; 重复上述操作, 每一层条纹图像的边界线都从上一层构造的二值子空间内提取, 在此过程中, 同时考虑左、右视角下二值空间状态的一致性, 并按边界线提取顺序对条纹边界解码, 对于断开边界, 则根据二值空间的方向在空间内连接边界线; 最后, 分别拟合正、反条纹边界点的灰度直线, 通过求直线交点得到亚像素边缘点。实验结果表明, 该方法能完整准确地提取条纹边界线, 解码正确率为 100%, 对平面重建的误差为 0.0993 mm, 对复杂场景的条纹图像具有较强的抗干扰性。

**关键词** 机器视觉; 光学三维测量; 结构光; 边界编解码; 三维点云

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.021509

## Structured Light Three-Dimensional Scene Reconstruction Based on Binary Space Coding and Decoding

Ge Qijie, Shi Jinlong\*, Sun Yunhan

School of Computer Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China

**Abstract** We propose a coding and decoding algorithm for stripe boundaries using binary space based on the binocular structured light system. First, the binary space is defined. Second, the projected patterns are layered in the order of projection; subsequently, the initial binary space for the first layer of the stripe image is constructed. Third, based on the sequence of black and white stripes in the initial binary space, the boundary lines of the second layer of the stripe image are extracted in two subspaces. By repeating the aforementioned operation, the next sets of boundaries of each layer are obtained from the binary subspace constructed using the previous layer. During this process, the boundaries are decoded according to the extraction order by considering the consistency of the state of the binary space in the left and right views. Moreover, broken boundaries are connected according to the direction of the binary space. Finally, by linearly fitting the forward and inverse stripe boundaries, we observe the sub-pixel edge points from the intersection of two lines. The experimental results indicate that the entire boundary line can be accurately obtained using the proposed algorithm. Furthermore, the decoding accuracy is up to 100%, and the reconstruction result for the plane has an error of 0.0993 mm. Furthermore, the proposed algorithm has a strong anti-interference for the stripe of a complex scene.

**Key words** machine vision; optical three-dimensional measurement; structured light; boundary coding and decoding; three-dimensional point cloud

**OCIS codes** 150.6910; 150.0155; 120.6650; 150.1135

## 1 引言

在光学测量领域, 结构光法由于具有速度快、精度高、成本低等优点, 已经成为最主要的非接触性光

学测量技术<sup>[1-3]</sup>。结构光法测量物体时, 通常分为两个步骤<sup>[4]</sup>, 即单幅场景测量、多幅测量场景三维点云拼接。因此, 影响整体测量性能的因素主要来自于两个方面, 第一是单幅场景测量中结构光解码的精

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-07-06; 录用日期: 2019-07-10

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0309100, 2018YFC0309104)

\* E-mail: jlshifudan@gmail.com

度问题<sup>[5-6]</sup>,第二是多幅测量场景三维点云拼接的精度问题<sup>[7-8]</sup>。本文的主要工作集中在解决单幅场景测量过程中解码精度的问题。

目前的结构光编解码策略主要分为直接编码、空间编码、时间编码3种方法<sup>[9]</sup>。时间编码按时间顺序将编码图案投射到物体表面,物体表面的每一个反射点都会得到一系列值,这些值构成反射点的编码。其中,很多方法以条纹边界上的点作为特征进行解码,通过改进边缘检测和边界解码算法<sup>[10]</sup>,减小误差,从而提高重建准确度。秦绪佳等<sup>[11]</sup>通过改进Canny算子提取边界,并建立条纹边界的编解码二叉树,较好地处理了由遮挡、阴影等引起的解码误差,但是该方法只能获得像素级边界。Trobin<sup>[12]</sup>比较了众多条纹投影方案,发现投影正、反条纹寻找边界交点可以获得亚像素定位精度。Hall-Holt等<sup>[13]</sup>分别跟踪奇数次、偶数次可见条纹边界,并添加隐藏条纹边界的约束,实现了对动态目标的重建,但是该方法没能指出边界跟踪引起的解码误差问题。林海新等<sup>[14]</sup>投影3幅二值编码条纹图像,根据条纹边界左右两侧的编码值对截断相位图中的截断线进行编码,但是该方法没能解决边界线提取错误的问题。

在实际的结构光测量过程中,由于物体的阴影以及表面的几何畸变,传统解码算法会对投影条纹进行错误的提取;此外,传统算法依据投影时序对边

界点邻域的灰度值进行解码,码值位数较多,因此解码错误的概率较大;对于断开边界,由于投影光栅对应的条纹边界会发生扩散,码值会产生误差,因此无法通过传统算法进行连接。

本文基于一个由黑、白条纹组成的二值空间,在空间约束下提取边界线,以解决边界线的错误提取问题;根据二值空间的方向连接断开边界;同时,保证左右视角对应二值空间内边界线的唯一性,使得解码位数为1~2位,以解决边界线匹配误差的问题;并结合线移法重建出稠密的场景点云。实验结果表明:该方法能够有效地解决条纹边界的线提取与匹配问题,并通过将条纹覆盖整个相机视角的方法,准确地重建单幅场景点云,非常适用于静态场景三维测量系统。

## 2 二值空间编解码方法

二进制灰度编码是时间编码的基础,本文采用二进制编码进行三维测量。如图1所示,传统双目结构光系统边界编解码原理为:首先用边缘检测算子检测出条纹之间的边界,并利用像素跟踪算法提取边界线;再按照投影顺序对其中一幅光栅图像的边界进行解码;最后根据边界码匹配条纹。在此基础上,本文定义了二值空间,并在二值空间内对边界线进行解码。

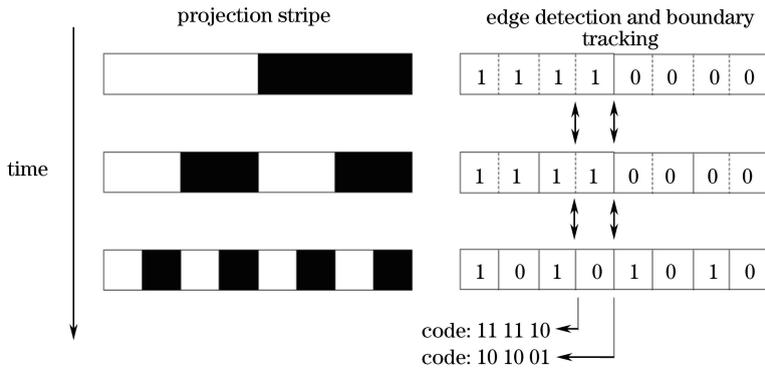


图1 传统边界编解码

Fig. 1 Conventional boundary encoding and decoding

### 2.1 二值空间编解码

二值空间定义:由黑、白条纹和两条纹之间的边界线组成的区域。其中黑条纹记为子空间0,白条

纹记为子空间1,如图2所示。

二值空间有两个准则:

- 1) 每个二值空间最多只包含一个子空间1,一



图2 二值空间的结构。(a)满状态;(b)非满状态

Fig. 2 Structure of binary space. (a) State is true; (b) state is false

个子空间 0, 并且每个二值空间内最多只存在一条边界线;

2) 同时包含子空间 1、0 的二值空间记为满状态, 如图 2(a) 所示, 只包含子空间 1(0) 的二值空间为非满状态, 如图 2(b) 所示, 且左右视角下对应二值空间的状态需保持一致。

二值空间编解码算法如图 3 所示(以投影 4 幅二进制光栅条纹图像为例)。按时间顺序投影  $m$  幅正、反光栅条纹, 并作正、反条纹相减的二值化预处理

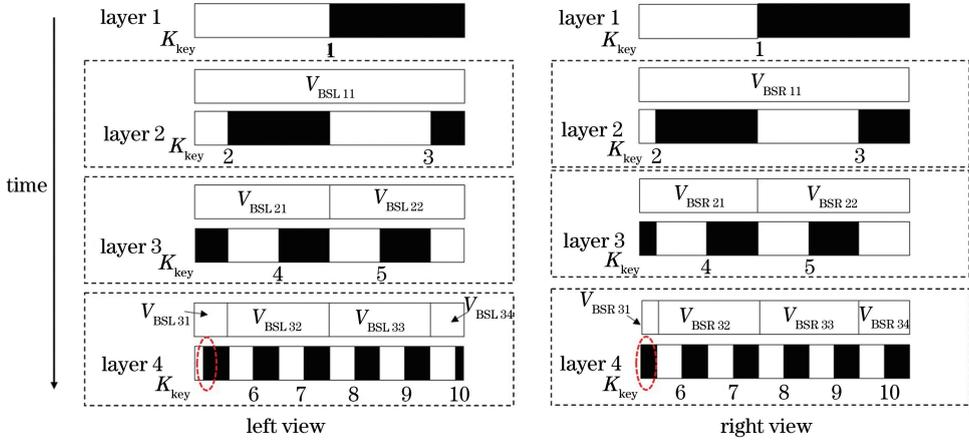


图 3 二值空间解码原理

Fig. 3 Principle of binary space decoding

1) 初始二值空间构造。第 1 层只有一个二值空间, 因此该层  $\max(j)=1$ 。利用梯度差分算子分别对左、右视角下第 1 层图像进行边缘检测, 并根据边界线提取算法提取条纹边界点集  $E_{L1}$ 、 $E_{R1}$ 。将左、右视角下的边缘点坐标分别压入  $V_{BSL11}(T)$ 、 $V_{BSR11}(T)$ , 记  $K_{key}=1$ 。此时, 子空间 1 表示的区域为  $V_{BSL11}(V_1)=[0, E_{L1}]$ ,  $V_{BSR11}(V_1)=[0, E_{R1}]$ ; 子空间 0 表示的区域为  $V_{BSL11}(V_0)=(E_{L1}, W-1]$ ,  $V_{BSR11}(V_0)=(E_{R1}, W-1]$ ; 此时左右视角下对应二值空间的状态为  $V_{BSL11}(S_{state})=V_{BSR11}(S_{state})=T$ 。

2) 边界提取。取第  $i(i=2, 3, \dots, m)$  层, 判断第  $i-1$  层的对应二值空间  $V_{BSL(i-1)j}$ 、 $V_{BSR(i-1)j}$  的状态 ( $j=1, 2, \dots, j, j \in N^*$ )。如果  $S_{state}=T$ , 则可利用边界线提取算法分别在  $V_{BSL(i-1)j}(V_1)$ 、 $V_{BSL(i-1)j}(V_0)$  内提取边界点集  $E_{L1}$ 、 $E_{L0}$ , 同样地, 在  $V_{BSR(i-1)j}(V_1)$ 、 $V_{BSR(i-1)j}(V_0)$  中提取边界点集  $E_{R1}$ 、 $E_{R0}$ ; 如果  $S_{state}=F$ , 则只在  $V_{BSL(i-1)j}(V_1)$ 、 $V_{BSR(i-1)j}(V_1)$  中提取边界线, 直至所有  $V_{BSL(i-1)j}$ 、 $V_{BSR(i-1)j}$  内的边界线提取结束。

3) 二值空间构造。构造第  $i$  层第一个二值空间  $V_{BSL1i}$  和  $V_{BSR1i}$ , 对  $V_{BSL(i-1)1}(V_1)$ 、 $V_{BSR(i-1)1}(V_1)$  提取到的  $E_{L1}$ 、 $E_{R1}$  进行分析。若  $E_{L1} \neq \emptyset$  且  $E_{R1} \neq \emptyset$ ,

理。将预处理后的图像按投影顺序标记为  $i=1, 2, \dots, m$  层, 同时规定: 图像的宽为  $W$ ;  $V_1$ 、 $V_0$  表示子空间 1、子空间 0;  $V_{BSLij}=\{V_1, V_0, T, S_{state}\}$  和  $V_{BSRij}=\{V_1, V_0, T, S_{state}\}$  分别表示左、右视角下的第  $i(i=1, 2, \dots, m)$  幅编码图案的第  $j(j=1, 2, \dots, j, j \in N^*)$  个二值空间, 其中  $T=\{(K_{key}, P_t) | t=1, 2, \dots, t, t \in N^*\}$  表示键值为  $K_{key}$  的边界点集,  $S_{state}=T$  表示满状态,  $S_{state}=F$  表示非满状态。

二值空间解码步骤如下。

则记  $V_{BSL1i}$  和  $V_{BSR1i}$  的  $S_{state}=T$ , 此时  $V_{BSL1i}(T)=E_{L1}$ ,  $V_{BSR1i}(T)=E_{R1}$ , 同时对应边缘点集的键值  $K_{key}$  加 1。假设用 \* 和 \*\* 分别表示子空间的开始与结束, 则此时子空间表示为  $V_{BSL1i}(V_1)=[V_{BSL(i-1)j}^*(V_1), E_{L1}]$ ,  $V_{BSL1i}(V_0)=[E_{L1}, V_{BSL(i-1)j}^{**}(V_1)]$ 。反之, 若  $E_{L1}=\emptyset$  或  $E_{R1}=\emptyset$ , 则  $S_{state}=F$ ,  $V_{BSL1i}(T)=\emptyset$ ,  $V_{BSR1i}(T)=\emptyset$ , 此时  $K_{key}$  不变, 记此时子空间区域表示为  $V_{BSL1i}(V_1)=[V_{BSL(i-1)j}^*(V_1), V_{BSL(i-1)j}^{**}(V_1)]$ ,  $V_{BSL1i}(V_0)=\emptyset$ , 同理可得  $V_{BSR1i}(V_1)$  及  $V_{BSR1i}(V_0)$ 。依次类推, 直至第  $i$  层所有二值空间都构造完毕。

4) 循环 2)~3), 直至所有层的边界线解码结束。

该算法最后可得到左、右视角下的边缘线集合, 每一条边缘线对应一个  $K_{key}$  值, 该值由提取时的次序决定, 并且增加了对应二值空间的状态约束, 以保证左、右视角下边缘线的  $K_{key}$  值同时变化。

## 2.2 边界线提取算法

为了简化提取算法, 可使投影条纹覆盖整个相机视角。算法流程如下, 其中  $P=(x, y)$  表示图像中的像素点。

1) 对于边缘检测之后的图像,在子空间内定义一个  $17 \times L$  的自适应动态矩形窗口,以寻找边界线起点。其中  $L$  与投影层数的关系为  $L = 2^i - 1$ 。假设灰度为 1 表示白色像素,0 表示黑色像素,则检测窗口内灰度值的表达式为

$$V_{\text{sum}} = \sum_{y=0}^{17} \sum_{x=V_m}^L I(x, y), \quad (1)$$

式中:  $I(x, y)$  表示点  $P = (x, y)$  处的灰度值;  $V_m$  表

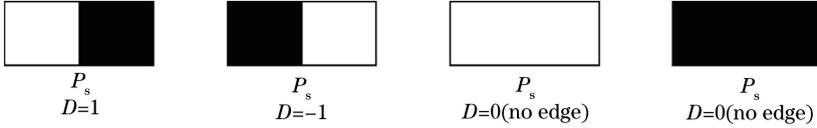


图 4 二值空间的方向

Fig. 4 Direction of binary space

2) 按纵坐标递增顺序进行像素点跟踪,分别在点集  $E$  最后一点  $P_e(x_e, y_e)$  的  $y_e + 1$  行的  $x_e - 1$ 、 $x_e$ 、 $x_e + 1$  邻域内搜索。若未检测到边缘点,转入步骤 3);若检测到边缘点,将边缘点压入  $E$ 。直至提取完所有边缘点坐标,算法结束。

3) 在二值空间内,以  $P_e$  为中心,设  $H$  表示图像的高度,若  $y_e + a = H - 1$ ,表示  $V$  内不存在断开边界,算法结束;若  $y_e + a < H - 1$ ,表示  $V$  内存在断开边界,则分别向左右两边搜索当前层图像,分别计算  $D_L$ 、 $D_R$ ,转入 4)。

$$D_L = \begin{cases} I(x_e, y_e + a) - I(x_e + 1, y_e + a), & s_L = T \\ -2, & s_L = F \end{cases}, \quad (2)$$

$$D_R = \begin{cases} I(x_e - 1, y_e + a) - I(x_e, y_e + a), & s_R = T \\ -2, & s_R = F \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $s_L$ 、 $s_R$  分别表示当前检测点是否在  $V$  内;  $-2$  表示一个不等于  $D$  的任意值。

4) 若  $D_L = D$  或  $D_R = D$ ,表示找到边缘点,将其压入  $E$ ,转入步骤 2);否则,  $a = a + 1$ ,返回步骤 3)。

### 3 实验结果与分析

本文的实验设备如图 5 所示,包括两台 Baumer 的 TXG50 型号工业相机、一台 BenQ 的 DLP 投影仪、一个三脚架等。其中相机分辨率为  $1224 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,投影仪分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 。

实验前,采用尺寸为  $10 \times 10$  的棋盘格标定板(尺寸为  $29 \text{ mm}$ )摆放 25 种不同姿态,采集 25 组图像完成双目相机标定。实验场景如图 6 所示,并且将整个场景分为 3 幅场景拍摄。本文实验包括三个

示  $\min\{V^*(p) | p=0, \dots, 17\}$ ,  $V^*(p)$  表示子空间  $V$  第  $p$  行起始点的纵坐标。

当  $V_{\text{sum}} > 8.5$  时,即认为已找到边缘线起点  $P_s = (x_s, y_s)$ ,并将其压入边缘点集  $E$ ;否则  $x + 1$ ,即窗口往右移动一个像素点,并重新计算  $V_{\text{sum}}$ 。

若已经找到  $P_s$ ,则定义一个方向矩阵  $[1 \ -1]$ ,计算当前图像中二值空间的方向  $D$  值,即  $D = I(x_s, y_s) - I(x_s + 1, y_s)$ ,  $D$  的意义如图 4 所示。



图 5 实验设备

Fig. 5 Experimental equipment

方面,即边界线提取与匹配、平面拟合、场景重建,并对各阶段实验结果分别进行详细地分析及比较。



图 6 实验场景

Fig. 6 Experimental scene

#### 3.1 边界线提取与匹配

本节实验投影 7 幅二进制条纹图像至场景表面,使投影条纹图像均尽量覆盖整个相机视角,同时保证左、右相机的视角范围大致相同。采用传统的边界线编解码算法和本文基于二值空间的编解码算法进行线提取。

如图 7(b)所示,传统的解码算法通过差分算子检测边缘线,并在边缘线的邻域内采用像素跟踪算法提取边界点,但是当目标表面起伏过大时,传统解

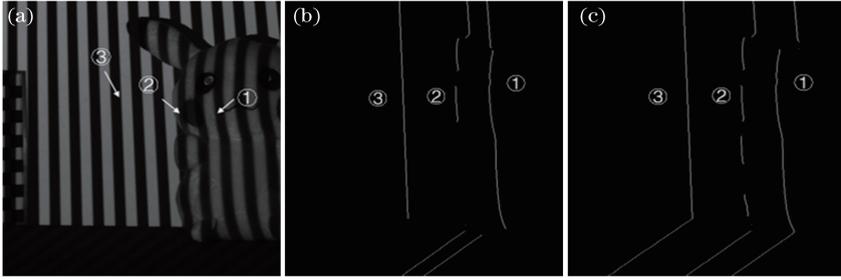


图 7 线提取结果对比。(a)场景原图;(b)传统解码算法;(c)二值空间解码算法

Fig. 7 Comparison of line extracting results. (a) Original scene ;(b) conventional decoding algorithm ;(c) binary space decoding algorithm

码算法会错误地提取边界线(如线 1);此外,当场景内存在遮挡(如线 2)或黑白条纹扩散(如线 3)引起的断开边界时,传统算法不能完全提取边界线。相比之下,本文算法考虑到黑白条纹的方向信息,并且添加了二值空间约束,能够完整准确地提取条纹边界线,如图 7(c)所示。

图 8 是本文算法在场景 1 左视角、右视角下的解码结果,颜色相同的线表明两条线的键值是一致的。可以看出,本文算法能完整地提取条纹图像的边界,实现对线的精确匹配。

由于投影条纹覆盖了整个右相机视角,故定义平均完整度(MC)来描述本文算法解码的精度,即

$$P_{MC} = \frac{1}{n} \times \frac{C}{1024}, \quad (7)$$

式中: $n$ 为匹配线个数; $C$ 为坐标点个数;1024是图像的高度。因此MC越大表示线提取越完整。

表 1 为两种方法在 3 幅场景中的解码误差。从表 1 看出,传统算法提取到场景 1 中 77 条线,然而码值一样的线只有 71 条,即匹配率只有 92.2%,并且这 71 条线的完整度仅为 0.8514,这意味着虽然传统算法提取的线更多,但是其中包含许多未能正确连接的断开边界线。相比之下,本文算法以 0.9305 的高完整度提取场景 1 的条纹边界线,并且能够匹配所有提取到的边界线,因此解码率为 100%。

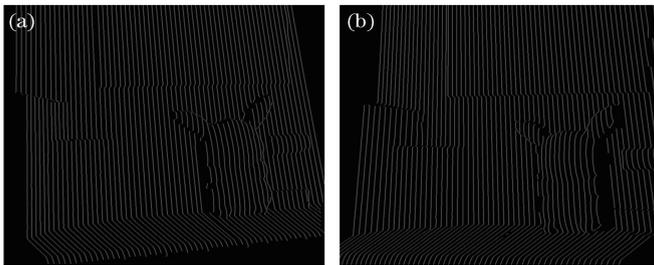


图 8 本文算法线匹配结果。(a)左视角边界线;(b)右视角边界线

Fig. 8 Line matching results of proposed algorithm. (a) Boundary line in left view; (b) boundary line in right view

表 1 不同场景下的解码误差

Table 1 Decoding errors for different scenes

Scene	Traditional decoding algorithm			Proposed decoding algorithm		
	Extracting lines (right)	Matching lines	MC (right)	Extracting lines (right)	Matching lines	MC (right)
1	77	71	0.8514	63	63	0.9305
2	83	71	0.8269	65	65	0.9212
3	75	70	0.8867	60	60	0.9443

表 2 为对 3 幅场景中的多条边界线上的点的提取和匹配。传统算法在线 3 和线 8 处的提取点和匹配点较少,说明对边界线 3 和 8 提取不完整。此外,线 5 处提取到的边界点有 1000 个左右,但是匹配点个数仅为 106 个,说明传统算法对线 5 解码有误,导

致边界线匹配错误。由于 2 台相机没有进行行对准,算法不能匹配到所有提取到的边界点,但是从表中可以得到,本文算法得到的匹配点平均在 940 个左右,几乎能匹配码值相同的边界线上的所有匹配点。

表2 多条线匹配误差对比

Table 2 Comparison of matching errors of multiple lines

Line	Traditional decoding algorithm			Proposed decoding algorithm		
	Line points		Matching points	Line points		Matching points
	Left	Right		Left	Right	
1	962	999	898	994	1023	932
2	1025	1001	931	1010	1025	938
3	980	316	316	993	1025	948
4	895	992	872	970	1014	959
5	999	1004	106	1008	1025	941
6	989	925	900	1010	975	903
7	959	958	907	958	1025	947
8	435	944	380	950	1025	945
9	982	1006	938	997	1025	948

从本节实验可以看出,由于物体表面起伏、遮挡的影响,使用传统的像素跟踪算法往往会提取到错误的边界线;此外,传统算法按照投影的顺序,根据边界点邻域的灰度编码,编码位数较多,容易出现解码误差,从而导致边界线匹配错误;另外,传统算法根据边界线的码值对断开边缘进行连接,但是在实际测量中,条纹的扩散将导致前后两幅光栅图像的对应边界不能完全保持一致,因此传统解码算法易导致断开边缘连接不完整、连接错误等问题。实验结果表明:相对于传统算法,本文算法能根据条纹的方向和二值空间约束提取和连接边界线,并能根据二值空间状态一致性增加边界线编码依据,同时能根据边界线提取次序编码来减少编码长度,因此能够较好地解决上述问题。

### 3.2 平面拟合

利用本文算法重建3幅场景中的平面并进行拟合。从表3可以得到,平面拟合的确定系数  $R$ -square(越接近1越好)的均值为0.9977,并且可得

本文对3幅场景中平面拟合的平均方均根误差(RMSE)为0.0993 mm。

表3 平面拟合的精度

Table 3 Accuracy of plane fitting

Scene	Points	$R$ -square	RMSE /mm
1	18584	0.9936	0.1551
2	20467	0.9996	0.0712
3	19487	0.9998	0.0715

### 3.3 场景重建

在极线约束<sup>[15]</sup>下匹配亚像素级边界线<sup>[16]</sup>上的坐标点,并基于最小二乘方法重建三维场景的点云坐标;同时,结合线移法<sup>[17]</sup>重建出稠密的三维点云。实验中利用统计滤波的方法过滤掉点云中的离群点,得到3幅重建场景,如图9(a)~(c)所示,其中,3幅场景点云个数分别为389951、397918、363425。该实验表明,本文方法可以有效进行局部场景的三维重建。最后,根据点云的FPFH(Fast Point Feature Histogram)特征<sup>[18]</sup>,拼接出整个场景的点云,如图9(d)所示。

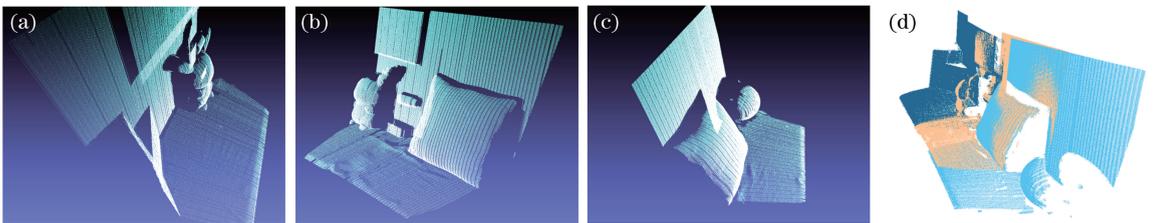


图9 三维场景重建。(a)场景1;(b)场景2;(c)场景3;(d)完整场景

Fig. 9 Reconstruction of 3D scenes. (a) Scene 1; (b) scene 2; (c) scene 3; (d) complete scene

## 4 结论

提出一种基于二值空间的条纹编解码方法。该方法利用二值空间内最多只存在一条边界线的准则,为边界线建立一个唯一性约束和空间约束;并始

终保持左、右视角下二值空间的状态一致性,使得解码位数只有1~2位,因此解决了边界线解码和匹配错误的问题;同时,根据黑白条纹的方向提取和连接边界线,能够准确完整地提取到条纹边界线。实验结果表明,本文方法具有有效性和精确性。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [2] Yang P B, Deng L J, Chen Y, et al. Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on structured light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0204004.  
杨鹏斌, 邓林嘉, 陈元, 等. 基于结构光的高反物体三维形貌测量方法 [J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0204004.
- [3] Li Y, Chen Y F, Jin H Z, et al. Binary spatiotemporal encoded illumination for 3D imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 670-675.  
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.
- [4] Rusinkiewicz S, Hall-Holt O, Levoy M. Real-time 3D model acquisition [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(3): 438-446.
- [5] Salvi J, Fernandez S, Pribanic T, et al. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(8): 2666-2680.
- [6] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 18-31.
- [7] Fan Y, Xu X, Wang M. A surface-based spatial registration method based on sense three-dimensional scanner [J]. *Journal of Craniofacial Surgery*, 2017, 28(1): 157-160.
- [8] Luo X B, Zhong Y X, Li R J. Data registration in 3-D scanning systems [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(8): 1104-1106.  
罗先波, 钟约先, 李仁举. 三维扫描系统中的数据配准技术 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(8): 1104-1106.
- [9] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128-160.
- [10] Wu H B, Yu X Y, Guan C R. Structured light encoding stripe edge detection based on grey curve intersecting point [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1085-1090.  
吴海滨, 于晓洋, 关丛荣. 基于灰度曲线交点的结构光编码条纹边缘检测 [J]. *光学学报*, 2008, 28(6): 1085-1090.
- [11] Qin X J, Zhao H, Zhang Q F, et al. A method of structured light coding and decoding based on the boundary information [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(6): 879-888.  
秦绪佳, 赵海, 张勤锋, 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.
- [12] Trobina M. Error model of a coded-light range sensor [R]. Zurich: Communication Technology Laboratory, ETH Zentrum, 1995.
- [13] Hall-Holt O, Rusinkiewicz S. Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects [C] // *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001, July 7-14, 2001, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE*, 2001: 359-366.
- [14] Lin H X, Wu Q Y, Huang J H, et al. Binary spatiotemporal encoded method for structured light projection of three-dimensional measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 1108002.  
林海新, 吴庆阳, 黄锦辉, 等. 应用于结构光投影三维测量的二值时空编码方法 [J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1108002.
- [15] Shi J L, Sun Z X, Bai S Q. 3D reconstruction framework via combining one 3D scanner and multiple stereo trackers [J]. *The Visual Computer*, 2018, 34(3): 377-389.
- [16] Yu X Y, Dong Q L, Zhang J H, et al. A sub-pixel stripe edge detection method based on forward and inverse gray code patterns [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2008, 22(3): 231-235.  
于晓洋, 董秋玲, 张加海, 等. 基于正反图案的亚像素条纹边缘检测方法 [J]. *测试技术学报*, 2008, 22(3): 231-235.
- [17] Gühring J. Dense 3D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4309: 220-231.
- [18] Rusu R B, Blodow N, Beetz M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration [C] // *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 12-17, 2009, Kobe, Japan. New York: IEEE*, 2009: 3212-3217.