

运动恢复结构生成点云的密度调控方法

蒙浩^{1,2}, 李自胜^{1,2}

(1.西南科技大学 制造科学与工程学院,四川 绵阳 621010;

2.西南科技大学 制造过程测试技术省部共建教育部重点实验室,四川 绵阳 621010)

摘要: 针对序列图像生成点云与激光扫描点云密度不一致问题,提出了一种基于运动恢复结构生成点云的密度调控方法。该方法首先比较序列图像生成的点云与目标点云的密度以确定密度增大减小方向;其次提取图像特征点,根据图像特征点与对应生成点云的空间映射关系设定单元格大小,对图像特征点区域均匀网格划分,以距各单元格中心距离最近的特征点来表示其所属单元格中的所有点,实现密度减小,最小二乘拟合插值各单元格中的特征点实现密度增大;然后采用 KLT 特征点跟踪算法得到匹配点;最后根据匹配点对生成图像点云。实验结果表明,该方法通过调整单元格大小或插值步长来控制图像生成点云密度,并取得了较好的调控效果。

关键词: 序列图像三维重建;密度调控;运动恢复结构方法;特征点区域网格划分

中图分类号: TN249;TP391.7

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191282

中文引用格式: 蒙浩,李自胜. 运动恢复结构生成点云的密度调控方法[J].电子技术应用,2020,46(9):88-93,97.

英文引用格式: Meng Hao, Li Zisheng. Density control method of point cloud generated by structure from motion[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(9): 88-93, 97.

Density control method of point cloud generated by structure from motion

Meng Hao^{1,2}, Li Zisheng^{1,2}

(1.School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2.Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Aiming at the inconsistency between the density of point cloud generated by sequence images and that generated by laser scanning, a density control method based on structure from motion is proposed. The method firstly compares the density of the point cloud generated by the sequence image with the density of the target point cloud to determine whether to increase or decrease the density of the point cloud generated by the sequence image. Secondly, the image feature points are extracted, and the cell size is set according to the spatial mapping relationship between the image feature points and the corresponding generated point cloud. The feature points closest to the center of each cell are used to represent all points in the cell to which they belong, so that the density is reduced, and the feature points in each cell are interpolated by least squares fitting to increase the density. Then, KLT feature point tracking algorithm is used to get matching points. Finally, the image point cloud is generated based on the matching point pairs. The experimental results show that this method can control the density of point cloud generated by the image by adjusting the cell size or interpolation step size, achieving a good control effect.

Key words: 3D reconstruction of sequence images; density regulation; structure from motion method; feature point area meshing

0 引言

点云密度匹配是不同点云源数据融合的基础,在点云数据配准及孔洞修复等方面有着重要作用。现有点云密度调控方法主要是通过精简方法来达到减小点云密度的目的。李仁忠^[1]等通过输入点云数据创建一个三维体素栅格,用每个体素栅格的重心来近似显示整个体素栅格中的所有点,从而达到点云精简的目的,该方法在充分保留点云几何特征的前提下,精简结果比较均匀。吴禄慎^[2]等提出了一种改进的重采样算法,将点云数据

划分为特征区域和平坦区域,对特征区域进行曲率采样,对平坦区域进行均匀采样,该方法既保持了曲率采样保留模型细节的特点,又保留了均匀采样避免出现空白区域的优点。袁小翠^[3]等提出一种特征保持的点云数据精简方法,首先对点云 K 均值聚类,然后估计点云法矢和候选特征点,将包含特征点的聚类细分为多个子类,最后基于自适应均值漂移法对数据进行分类,各聚类中心的集合即为精简结果,该方法能够较好地保留原始曲面的几何特征。SHI B Q^[4]等提出了自适应 K 均值

计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

精简法,对点云K均值聚类后根据类内法矢偏差是否大于给定阈值,将聚类分为两类,迭代判断各类内法矢偏差直至小于给定阈值,最后保留平坦区域的聚类中心以及非平坦区域法矢偏差最大的点,该方法对于噪声过于敏感。LI H^[5]等提出一种基于法向量标准差的点云精简算法,对点云数据采样后进行正态分布计算,通过相邻点之间的法向角计算特征点之间的分离阈值,在特征点之间逐步向下采样,实现点云的自适应精简,该方法可以较好地保留原模型的特点和形状。CHEN Y^[6]等通过将点云数据划分为特征区域与非特征区域,针对不同区域采用不同的精简方法可以较好地保留细节特征。在点云密度调控方法中,鲜有增大点云密度方面的研究。

本文基于运动恢复结构法^[7](Structure From Motion, SFM),从二维特征点的密度调控出发,对两幅序列图像生成点云的密度进行调控。密度调控既可以减小点云密度,精简点云数据,又可以增大点云密度,使细节信息得到加强。在本文中,二维特征点的密度用平面特征点的平均间距来度量,点云密度用空间点云的平均间距来度量。

1 序列图像生成点云方法概述

序列图像三维重建是视觉领域的重要研究部分,基于视觉的三维重建方法根据所使用摄像机数目可分为单目视觉法、双目视觉法和多目视觉法。表1是单目视觉法中几种典型的三维重建方法^[8]。

由表1可知,SFM相对于其他方法具有重建效果好、受环境约束条件少的优势,并且SFM是基于Marr理论框架所形成的多种理论方法中最广泛使用的方法之一^[9],故本文选用SFM从两幅序列图像中恢复物体的三维信息。SFM的基本步骤^[10]如下。

1.1 相机内参标定

摄像机内参数描述了摄像机的内部结构,它由一个 3×3 的矩阵K定义:

$$K = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, a_u 和 a_v 分别为图像在x和y方向上的缩放系数,s为倾斜度, (u_0, v_0) 为图像平面上与光轴相交的位置。

根据针孔相机模型,相机坐标系中的坐标点 (X_c, Y_c, Z_c) 与图像坐标系中的对应点 (x, y) 有式(2)中的转换关系:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,f为相机焦距。图像坐标系与像素坐标系之间有式(3)中的转换关系:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, (x, y) 为图像坐标系中的点,它在像素坐标系中的对应点坐标为 (u, v) ; d_x 和 d_y 分别为x方向和y方向像素的物理尺寸。将式(2)与式(3)结合可以得到:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2 特征点提取与匹配

图像特征点提取与匹配是摄像机位姿估计以及三维重建的基础,并且所提取特征点的准确性和稳定性将对特征匹配的精度与速度产生直接影响。

1.3 对极几何与基础矩阵计算

对极几何是空间中同一物体在不同成像图像之间的约束关系,可以用基础矩阵F来表示。在立体视觉中,对极几何关系可通过图像点的匹配来获取,也可以利用对极几何关系约束匹配,提高匹配的精度和鲁棒性。假设空间中一点M在两成像平面上的投影点分别为 m, m' ,那么这两点满足以下关系:

$$m'^T F m = 0 \quad (5)$$

基础矩阵F表示如下:

$$F = K'^T [t]_x R K^{-1} \quad (6)$$

表1 三维重建方法比较

重建方法	复杂度	重建效果	应用场景
明暗度法	使用单幅图像,空间和时间复杂度都较低,重建时间短	重建效果不佳,易受光源影响,鲁棒性较差	对光照条件要求较苛刻,难以应用在室外等光线条件复杂的情况
光度立体视觉法	使用多幅图像进行重建,复杂度低,是一种改进的明暗度法	重建效果较好,但易受光源影响	对光照条件要求高,难以应用在室外等光线条件复杂的情况
纹理法	使用单幅图像进行重建,复杂度较低,重建时间短	重建效果差,对光照和噪声不敏感,鲁棒性较好	只适用于具有规则纹理的物体,通用性较低
运动恢复结构法(SFM)	空间和时间复杂度都很高,在图像数量较多的情况下尤其明显	取决于图像数量和拍摄角度,重建效果依赖特征点的密集程度	对图像要求比较低,能够满足大多数应用需求

计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

式中, K, K' 分别为两个摄像机的内参数, R 为第二个摄像机相对于第一个摄像机的旋转矩阵, $S=[t]_x$ 为一包含平移信息的反对称矩阵。

$$[t]_x = \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, T 为第二个摄像机相对于第一个摄像机的平移向量, T_x, T_y, T_z 分别为 T 在 x, y, z 方向的分量。

1.4 本质矩阵计算

本质矩阵是基础矩阵在相机内参已知并使用归一化坐标系时的一种特殊形式。设 m_0, m'_0 分别是匹配点 m, m' 的归一化图像坐标, 则有:

$$m'^T_0 E m_0 = 0 \quad (8)$$

式中, 矩阵 $E=[t]_x R$ 为本质矩阵, 它描述了两幅规范化图像间的极几何关系。

1.5 相机外参数求解

求出两相机间的外参数后, 就可以得到摄像机的外参矩阵。假设摄像机第一个外参矩阵为 $P_0=[I|0]$, I 为单位矩阵, 为求得摄像机第二个外参矩阵 $P_1=[R|T]$, 要将本质矩阵 SVD 分解为反对称矩阵 S 与旋转矩阵 R 的乘积。本质矩阵 E 的 SVD 分解为:

$$E = U \text{diag}(\sigma, \sigma, 0) V^T \quad (9)$$

S, R 表示如下:

$$S = Z U Z^T \quad (10)$$

$$R = U W V^T \text{ 或 } R = U W^T V^T \quad (11)$$

式中, U, V 为 3 阶酉矩阵, W 为正交矩阵, Z 为反对称矩阵。

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

所以旋转矩阵 R 可表示为 $R = U W V^T$ 或者 $R = U W^T V^T$; 平移向量 T 可表示为 $T = u_3$ 或者 $T = -u_3$, u_3 为矩阵 U 的最后一列。则摄像机第二个外参矩阵 P_1 存在 4 组可能解: $P_1 = [U W V^T | u_3]; [U W V^T | -u_3]; [U W^T V^T | u_3]; [U W^T V^T | -u_3]$, 这 4 组解中只有一组解是合理的。

1.6 三维重建

根据前面得到的摄像机内外参数 K, R, T 以及匹配点 m, m' 的坐标, 就可以计算出空间点 M 的坐标。

2 图像点云密度调控

2.1 特征点的提取

本文使用 Shi-Tomasi 算法^[11] 对角点进行检测。设灰度图像在点 (x, y) 处的值为 $I(x, y)$, 以该点为中心建立一个 $n \times n$ 的窗口 O , 将图像窗口平移 $[u, v]$ 产生灰度变化 $E(u, v)$:

$$E(u, v) = \sum_{(x, y) \in O} w(x, y) [I(x+u, y+v) - I(x, y)]^2 \quad (14)$$

对于局部微小的移动量 $[u, v]$, 将 $I(x+u, y+v)$ 进行泰勒展开并忽略其二阶及以上项, 带入式(14)得:

$$E(u, v) = u^2 \sum_{(x, y) \in O} w(x, y) I_x^2 + 2uv \sum_{(x, y) \in O} w(x, y) I_x I_y + v^2 \sum_{(x, y) \in O} w(x, y) I_y^2 \quad (15)$$

式中, I_x 和 I_y 分别为灰度图像在 x 和 y 方向的偏导数; $w(x, y)$ 为特定的高斯滤波器, 将式(15)写成矩阵形式得:

$$E(u, v) = [u, v] M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, M 为 2×2 阶矩阵:

$$M = \sum_{(x, y) \in O} w(x, y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

E 可以近似看做局部互相关函数, M 描述了在这点上的形状, 通过矩阵 M 来衡量点 (x, y) 是否为角点。

图 1 是图像特征提取的实验图, 图中只显示了其中 1 000 个强角点。

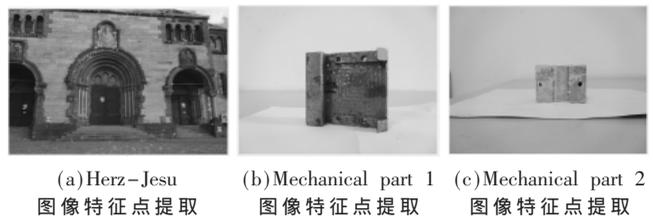


图 1 特征提取实验图

2.2 密度调控方法

2.2.1 密度减小方法

(1) 首先确定最小单元格的边长 oc_dis (单位为像素), 然后根据第一幅图像中所提取二维特征点坐标的最大、最小坐标值进行均匀网格划分, 图 2 是划分网格的示意图, 图中点 A, B 分别为 y 坐标值最大和最小的点, 点 C, D 分别为 x 坐标值最小和最大的点;

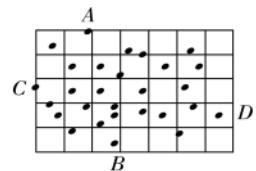


图 2 网格划分示意图

(2) 计算每个单元格中的特征点与所属网格中心点的距离, 用距网格中心最近的特征点来表示其所属网格中的所有点, 图 3 是密度减小的示意图, 其中 A 点距网

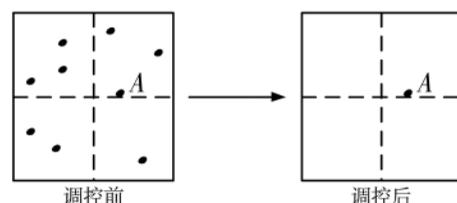


图 3 密度减小示意图

计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

格中心的距离最近,故用 A 点来表示其所属网格中的所有点;

(3)使用 KLT 特征点跟踪算法在第二幅图像中获取与步骤(2)中特征点相匹配的点;

(4)根据匹配点对生成图像点云。

其中,单元格的 oc_dis 值可以根据所要求的点云间距离由式(4)进行估算,通过改变 oc_dis 的值就可以减小图像点云的密度。

2.2.2 密度增大方法

在进行密度增大时,只需将 2.2.1 节中的步骤(2)进行修改而其余步骤保持不变,图 4 是其流程图,其中插值的步长值根据 oc_dis 的值进行估算,其最大值小于 oc_dis 值。图 5 是密度增大的示意图,图中实心点表示未进行密度调控时的点,空心圆圈表示密度增大时所增加的点。

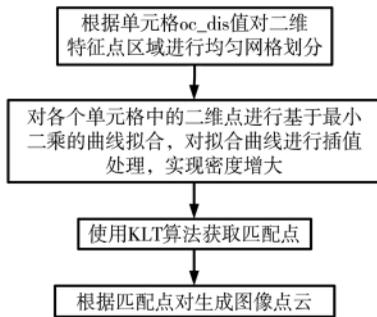


图 4 图像点云增大密度流程图

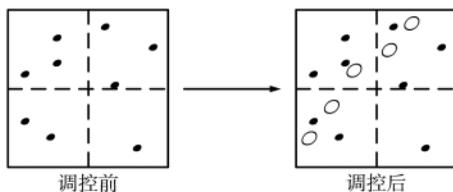


图 5 密度增大示意图

3 实验与分析

本文在 Intel Core i7 CPU、4 GB RAM、64 位操作系统的 Windows 7 环境下,使用 MATLAB R2016a 对 Herz-Jesu 图像^[12]和 IMX376 传感器(vivo 手机内置)拍摄的 Mechanical part 1 图像、Mechanical part 2 图像进行密度调控实验。

3.1 Herz-Jesu 图像

图 6 是 Herz-Jesu 图像在 oc_dis 为 30 个像素时的特征点网格划分细节图,图中显示了 10 000 个特征点。图 7 是它的图像及其重建结果,Herz-Jesu 图像的分辨率为 $3\ 072 \times 2\ 048$,图 7(a)只列举了其中一幅原图像,图 7(b)是未进行密度调控时的重建结果,图 7(c)、图 7(d)分别对应密度减少时 $oc_dis=5、15$ 的重建结果,图 7(e)、图 7(f)分别对应密度增大时插值步长值为 1 和 3 的重建结果。在增大密度的局部放大图中,实心点表示未进行密度调控时的点,空心圆圈表示密度增大时所增加的点。表 2 和表 3 列举了部分对点云密度进行调控时,重建点云的

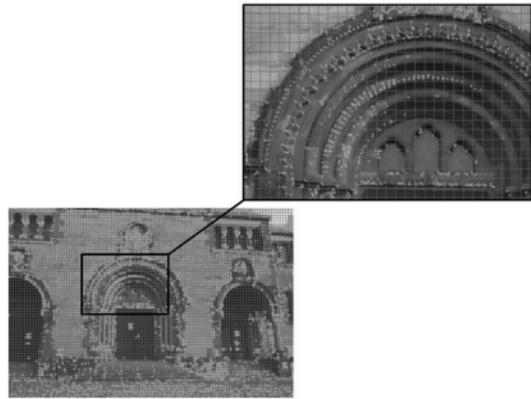


图 6 Herz-Jesu 图像特征点区域均匀网格划分

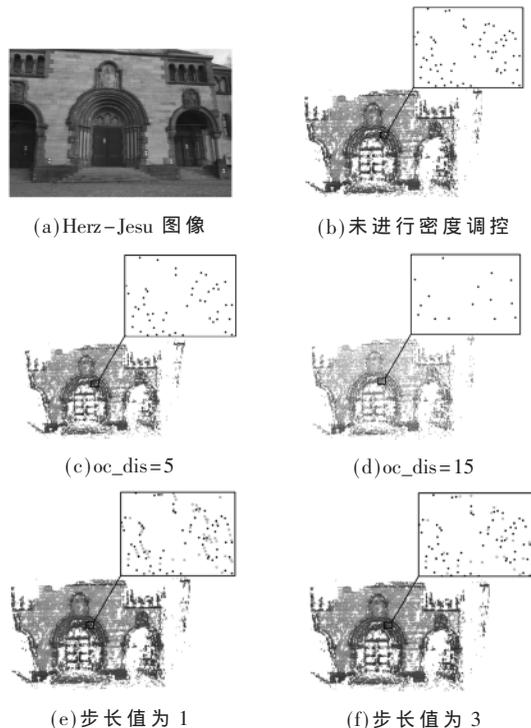


图 7 Herz-Jesu 的重建结果

表 2 Herz-Jesu 图像点云减小密度

oc_dis	点云数量/个	点云平均间距/m
—	51 687	$1.979\ 3 \times 10^{-4}$
5	37 227	$2.700\ 2 \times 10^{-4}$
10	21 617	$5.205\ 7 \times 10^{-4}$
15	11 393	$9.439\ 0 \times 10^{-4}$

注:—表示未进行密度调控

表 3 Herz-Jesu 图像点云增大密度

插值步长值	点云数量/个	点云平均间距/m
1	109 313	$7.440\ 3 \times 10^{-5}$
2	87 510	$1.008\ 9 \times 10^{-4}$
3	80 957	$1.029\ 8 \times 10^{-4}$

数量以及点云的平均间距。由图 7 和表 2 中的结果可知:设定的 oc_dis 越大,重建图像点云的密度越小;由图 7

计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

和表 3 中的结果可知:插值的步长值越小,重建图像点云的密度越大。

3.2 Mechanical part 1 图像

选用张正友相机标定法^[13]对 IMX376 传感器进行标定,得到对应式(1)中的摄像机内部参数: $a_x=3\ 491.939\ 587$, $s=0$, $a_y=3\ 493.764\ 222$, $u_0=2\ 251.665\ 491$, $v_0=1\ 735.773\ 362$ 。图 8 是 Mechanical part 1 图像及其重建结果, Mechanical part 1 图像的分辨率为 $4\ 608 \times 3\ 456$, 图 8(a) 只列举了其中一幅原图像, 图 8(b) 是未进行密度调控时的重建结果, 图 8(c)、图 8(d) 分别对应密度减少时 $oc_dis=5$ 、15 的重建结果, 图 8(e)、图 8(f) 分别对应密度增大时插值步长值为 2 和 4 的重建结果。在增大密度的局部放大图中, 实心点表示未进行密度调控时的点, 空心圆圈表示密度增大时所增加的点。表 4 和表 5 列举了部分对点云密度进行调控时, 重建点云的数量以及点云的平均间距。由图 8 和表 4 中的结果可知: 设定的 oc_dis 越大, 重建图像点云的密度越小; 由图 8 和表 5 中的结果可知: 插值的步长值越小, 重建图像点云的密度越大。

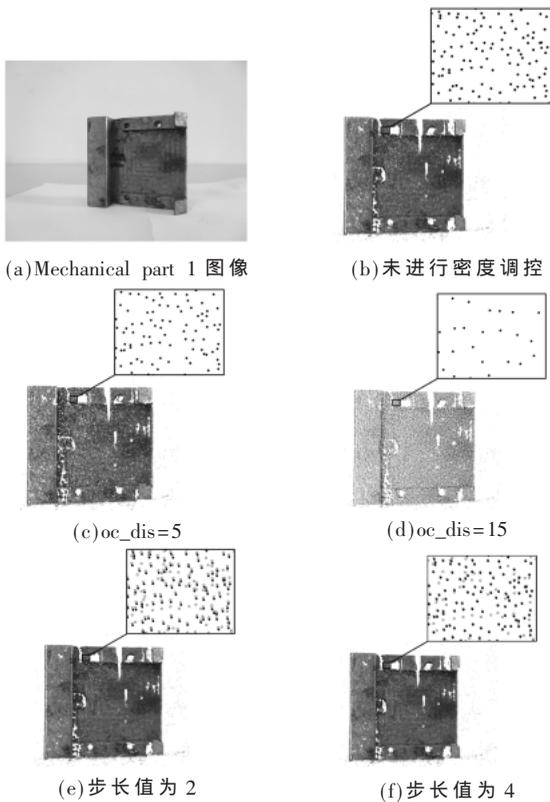


图 8 Mechanical part 1 的重建结果

表 4 Mechanical part 1 图像点云减小密度

oc_dis	点云数量/个	点云平均间距/m
—	64 859	$9.829\ 5 \times 10^{-4}$
5	46 835	$1.411\ 4 \times 10^{-3}$
10	28 121	$2.240\ 2 \times 10^{-3}$
15	14 559	$4.712\ 4 \times 10^{-3}$

注: — 表示未进行密度调控

表 5 Mechanical part 1 图像点云增大密度

插值步长值	点云数量/个	点云平均间距/m
2	110 267	$4.692\ 5 \times 10^{-4}$
3	101 892	$4.945\ 3 \times 10^{-4}$
4	97 255	$5.100\ 7 \times 10^{-4}$

3.3 Mechanical part 2 图像

图 9 是 Mechanical part 2 图像及其重建结果, Mechanical part 2 图像的分辨率为 $4\ 608 \times 3\ 456$, 图 9(a) 只列举了其中一幅原图像, 图 9(b) 是未进行密度调控时的重建结果, 图 9(c)、图 9(d) 分别对应密度减少时 $oc_dis=5$ 、15 的重建结果, 图 9(e)、图 9(f) 分别对应密度增大时插值步长值为 2 和 4 的重建结果。表 6 和表 7 列举了部分

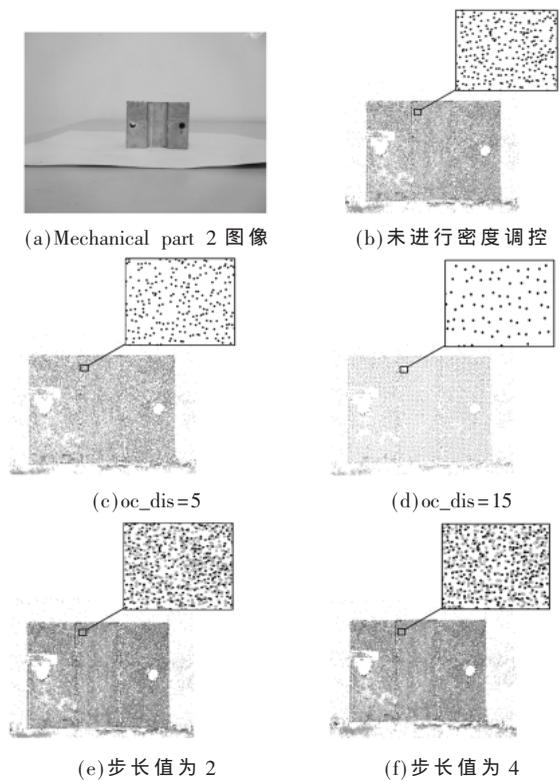


图 9 Mechanical part 2 的重建结果

表 6 Mechanical part 2 图像点云减小密度

oc_dis	点云数量/个	点云平均间距/m
—	31 888	$5.815\ 0 \times 10^{-3}$
10	15 149	$1.018\ 4 \times 10^{-2}$
15	8 647	$1.283\ 6 \times 10^{-2}$
20	5 421	$3.814\ 2 \times 10^{-2}$

注: — 表示未进行密度调控

表 7 Mechanical part 2 图像点云增大密度

插值步长值	点云数量/个	点云平均间距/m
2	54 185	$2.641\ 1 \times 10^{-3}$
3	50 149	$3.222\ 8 \times 10^{-3}$
4	47 935	$5.687\ 5 \times 10^{-3}$

计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

对点云密度进行调控时,重建点云的数量以及点云的平均间距。由图 9 和表 6、7 同样可以得出前面的结论。

4 结论

本文提出了一种运动恢复结构生成点云的密度调控方法,该方法通过对二维特征点的密度进行调控进而达到对三维图像点云密度的控制,使得图像点云的密度与激光点云的密度相差较小,利于二者的配准融合。但是在根据激光点云的密度求取同样密度的图像点云时,只能估算出近似的 oc_dis 值,而此时的图像点云密度与激光点云密度相比仍有较大的偏差,还需要进一步对 oc_dis 值进行调节才能达到更好的效果,下一步将研究如何对图像点云密度进行自适应调控以提高密度调控效率。

参考文献

[1] 李仁忠,杨曼,刘阳阳,等.一种散乱点云的均匀精简算法[J].光学学报,2017,37(7):97-105.

[2] 吴禄慎,李泽,陈华伟,等.改进的重采样算法研究[J].机械设计与制造,2015(4):244-247.

[3] 袁小翠,吴禄慎,陈华伟.特征保持点云数据精简[J].光学精密工程,2015,23(9):2666-2676.

[4] SHI B, Q, LIANG J, LIU Q. Adaptive simplification of point cloud using k-means clustering[J]. Computer-Aided Design,

2011, 43(8): 910-922.

[5] LI H, XU P, SHEN Y. A self-adaption fast point cloud simplification algorithm based on normal eigenvalues[C]. IEEE 7th International Congress on Image and Signal Processing, 2015: 929-937.

[6] CHEN Y, YUE L. A method for dynamic simplification of massive point cloud[C]. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2016: 1690-1693.

[7] CAO M, CAO L, JIA W, et al. Evaluation of local features for structure from motion[J]. Multimedia Tools & Applications, 2018, 77(9): 1-15.

[8] 佟帅,徐晓刚,易成涛,等.基于视觉的三维重建技术综述[J].计算机应用研究,2011,28(7):2411-2417.

[9] 蒋华强,蔡勇,张建生,等.基于改进 SFM 的三维重建算法研究[J].电子技术应用,2019,45(2):88-92.

[10] 杨阳.基于双目视觉的运动恢复结构[D].成都:电子科技大学,2016.

[11] SHI J, TOMASI C. Good features to track[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994: 593-600.

[12] STRECHA C, HANSEN W V, GOOL L V, et al. On ben-

(下转第 97 页)

(上接第 87 页)

参考文献

[1] 张武,黄帅,汪京京,等.复杂背景下小麦叶部病害图像分割方法研究[J].计算机工程与科学,2015,37(7):1349-1354.

[2] 马媛,冯全,杨梅.基于 HOG 的酿酒葡萄叶检测[J].计算机工程与应用,2016,52(15):158-161.

[3] MAI X, MENG Q H. Automatic lesion segmentation from rice leaf blast field images based on random forest[C]. IEEE International Conference on Real-time Computing & Robotics, 2016.

[4] 张善文,张传雷.基于局部判别映射算法的玉米病害识别方法[J].农业工程学报,2014,30(11):167-172.

[5] 陈俊伸.水稻叶瘟病灶区智能圈定与分级[D].北京:中国地质大学(北京),2019.

[6] 丰丙琴,艾春利,贾忠玲,等.水稻常见病虫害防治技术措施[J].农业与技术,2018,38(4):69.

[7] 蒲一鸣.基于机器学习的水稻病害识别和叶龄检测算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[8] BARBEDO J G A. An automatic method to detect and measure leaf disease symptoms using digital image processing[J]. Plant Disease, 2014, 98(12): 1709-1716.

[9] 苏巧,魏以民,沈越泓.基于神经网络的含噪动态源分离

算法[J].电子技术应用,2018,44(2):88-91,96.

[10] CHEN C C. Improved moment invariants for shape discrimination[J]. Pattern Recognition; The Journal of the Pattern Recognition Society, 1993, 26(5): 683-686.

[11] TAMURA H, MORI S, YAMAWAKI T. Textural features corresponding to visual perception[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1978, 8(6): 460-473.

[12] 蔡祝南.水稻病虫害防治[M].北京:金盾出版社,1992.

[13] 姚宇晨,彭虎.基于深度学习的通信信号自动调制识别技术[J].电子技术应用,2019,45(2):12-15.

[14] 于耕,方鸿涛.基于 BP 神经网络改进 UKF 的组合导航算法[J].电子技术应用,2019,45(4):29-33.

[15] 闫春,厉美璇,周潇.基于改进的遗传算法优化 BP 神经网络的车险欺诈识别模型[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(5):72-80.

(收稿日期:2019-09-07)

作者简介:

陈悦宁(1998-),女,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、基于机器学习的通信信道估计。

郭士增(1965-),男,博士,副教授,主要研究方向:专网无线通信技术、LXI 网络测试技术、宽带无线通信技术。

张佳岩(1974-),男,博士,副教授,主要研究方向:编码技术及实现、图像处理、物联网。



图 4 基本功能测试实例



图 5 压力测试实例

[4] 王达,赵千川,马喜春.基于 OPC 的 PLC 程序自动化测试[J].实验技术与管理,2011,28(10):100-104,108.

(收稿日期:2019-12-01)

作者简介:

刘红(1986-),女,硕士,工程师,主要研究方向:工业控

制系统测试、工控信息安全。

刘金(1990-),女,硕士,工程师,主要研究方向:工业控制系统测试、网络安全。

原惠峰(1990-),男,硕士,工程师,主要研究方向:工业控制软件、工控信息安全。

(上接第 93 页)

chmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery[C].2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.IEEE,2008:1-8.

[13] ZHANG Z Y.A flexible new technique for camera calibration[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and

Machine Intelligence,2000,22(11):1330-1334.

(收稿日期:2019-11-26)

作者简介:

蒙浩(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:数字化设计与制造、图像处理。

李自胜(1976-),男,博士,副教授,主要研究方向:智能制造技术、数字几何处理等。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所