引文格式：陈朴一,刘涛,杜萍,等. 结合改进RANSAC算法的建筑物点云色彩增强方法[J]. 地理空间信息, 2024, 22(5): 45-48. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.05.008

结合改进RANSAC算法的建筑物点云色彩增强方法

陈朴一[1,2,3]，刘　涛[1,2,3*]，杜　萍[1,2,3]，马天恩[1,2,3]，令振飞[1,2,3]
（1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院，甘肃 兰州 730070；2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心，甘肃 兰州 730070；
3. 甘肃省地理国情监测工程实验室，甘肃 兰州 730070）

摘　要：针对彩色三维点云中因建筑物阴影导致可视化效果不好的问题，提出了一种以建筑物面分割为基础对建筑物局部进行色彩增强的方法。首先采用改进随机抽样一致性（RANSAC）算法对建筑物进行表面分割，并提出光照向量的概念将表面分割结果分为阴面与阳面；再单独针对阴面进行色彩增强。实验表明，该方法有效改善了三维点云建筑物的视觉效果，在保证建筑物风格一致的前提下提高了建筑物点云的整体亮度与对比度，可在一定程度上消除建筑物阴影对可视化效果的影响，适用于各类以建筑物为主体的点云实景三维工程。

关键词：点云；建筑物；色彩增强；RANSAC
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）05-0045-04

Color Enhancement Method of Building Point Cloud Combined with Improved RANSAC Algorithm

CHEN Puyi[1,2,3], LIU Tao[1,2,3], DU Ping[1,2,3], MA Tian'en[1,2,3], LING Zhenfei[1,2,3]
(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;
3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract: According to the fact that buildings in colored 3D point cloud having poor visual effect due to the shadow, we presented a new color enhancement method for dark parts of buildings based on building surface segmentation. Fristly, we used the improved random sample consensus (RANSAC) algorithm to conduct surface segmentation of buildings and proposed a light vector to divide the segmentation results into dark and bright surfaces. Then, we conducted color enhancement for the dark surfaces alone. The experimental results show that the proposed method can effectively improve the visual effect of 3D point cloud buildings. The brightness and contrast of building point cloud are enhanced while the buildings' style is maintained, and the influence of building shadows on the visual effect is eliminated partly. The proposed method can be applied to all kinds of 3D point cloud projects with buildings as the main body.

Key words: point cloud, building, color enhancement, RANSAC

作为人类生产生活的重要场所，建筑物是实景三维地理实体的重要组成部分[1]，也是一种可用于估算能源需求、生活、城市人口和财产税的基本GIS数据[2]，其可视化效果的重要性不言而喻[3]。然而，在彩色三维点云中建筑物因光照角度产生的阴暗部分往往会对三维可视化效果产生不利影响，因此很有必要研究对阴暗部分进行色彩增强的方法，以改善彩色三维点云中建筑物的可视化效果。建筑物点云阴影色彩增强与图像阴影去除都需要分离出受光照影响的视觉效果部分，因此可利用图像阴影去除方法实现建筑物点云阴影色彩增强。目前图像阴影去除方法包括阴影掩码法[4]、边缘检测法[5]、光照原理法[6]和深度学习法[7]。在光照原理法中，位于北半球的建筑物偏北朝向的墙面受直射光的影响比偏南朝向的墙面小，东西朝向的墙面也会因直射光的影响导致亮度与对比度存在差异。本文通过改进随机抽样一致性（RANSAC）算法分割建筑物表面，再将建筑物墙面分为阴面和阳面，最后对阴面进行直方图规定化计算，从而实现建筑物

收稿日期：2023-02-03。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（42261076、42061060）。
第一作者简介：陈朴一（1998—），硕士研究生，研究方向为实景三维，E-mail：2727312620@qq.com。
通信作者：刘涛（1981—），博士，教授，博士生导师，研究方向为空间关系理论，GIS与遥感一体化，GIS、RS应用与开发，E-mail：liutao@lzjtu.edu.cn。

点云的色彩增强。

1 基于RANSAC的建筑物表面分割

RANSAC算法[8]是一种十分高效的模型拟合算法，目前已在点云平面分割中得到广泛应用。本文以RANSAC算法为基础，通过平面内点选取优化、DBSCAN分类剩余点和平面合并3个步骤实现建筑物表面分割。

1）平面内点选取优化。在理想状态下，平面点到平面的欧氏距离为零，但实际应用中很难得到理想的平面。一般设定容忍阈值为δ_0，将距离小于该阈值的点视为平面内点。考虑到大多数窗沿延伸长度在40 cm以内，本文取值为0.4 m。由于大多数建筑物具有许多凹凸结构，因此利用RANSAC算法提取的平面可能包含其他平面内点，且该算法易出现伪平面[9]。针对这些问题，本文采用法向量筛选平面内点的方法进行平面分割，即每次采用RANSAC算法分割出平面后，再计算平面内点法向量与平面法向量的夹角，只有夹角小于一定阈值时才将其视为平面内点，如图1中黑色箭头表示平面法向量，蓝色箭头表示通过法向量筛选的点的法向量，红色箭头则表示未通过筛选的点的法向量。

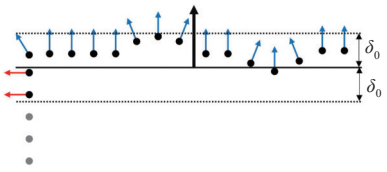


图1 法向量筛选平面内点

2）DBSCAN分类剩余点。DBSCAN算法是基于密度进行点云聚类的算法[10]，与K-means聚类方法相比，DBSCAN算法无需输入最终结果的簇数量即可进行分类。由于使用了法向量筛选平面内点，可能导致小面积垂直结构无法被分类，剩余点云呈现大量小聚集分布。因此，本文采用DBSCAN聚类对剩余点云进行分类，首先计算聚集，求取每个聚集的凸包，得到凸包点；然后采用最近邻算法统计凸包点类型，若多数凸包点被分至同一平面，则整个聚类都为该平面；最后采用最近邻算法对剩余点云进行分类。

3）平面合并。通过上述步骤，可能存在分割出的两个平面实际为同一墙体的情况，因此需要进行平面合并。本文首先计算所有平面法向量两两之间的夹角，对满足条件的两个平面分别计算有向包围盒并进行碰撞检测，将所有点在各自局部平面投影的距离向量投影到平面法向量上，并计算最大值，若小于设定的阈值，则视为同一平面。

2 基于面分割的点云色彩增强

基于面分割的点云色彩增强首先需划分建筑物表面的阴面与阳面，再进行色彩直方图规定化。

2.1 阴面与阳面划分

在建筑物的一个立面及其对应的平行立面中，本文将平均亮度较高的墙面定义为阳面，平均亮度较低的墙面定义为阴面。阴面与阳面的划分步骤为：

1）计算建筑物点云的HSV通道，采用大津法根据V通道将点云划分为亮点与暗点。然而，暗点并不一定属于阴影区域内点，亮点也并不一定属于非阴影区域内点，如窗户的灰度值通常较高，位于非阴影区也可能被划定为暗点。针对该问题，本文采用光照向量判断阴面与阳面，计算公式为：

$$\boldsymbol{V}_{\text{light}}=\frac{\sum_{x=1}^{N}\boldsymbol{V}_{\text{dark}}-\sum_{y=1}^{M}\boldsymbol{V}_{\text{bright}}}{M+N} \tag{1}$$

式中，N为暗点总数；M为亮点总数；$\boldsymbol{V}_{\text{dark}}$为第$x$个暗点的法向量值；$\boldsymbol{V}_{\text{bright}}$为第$y$个亮点的法向量值。

由式（1）可知，若阴面与阳面对应位置的点同为暗点或亮点，则二者法向量之和为0；若与阴面暗点对应的阳面点为亮点，则二者求和结果为方向与暗点法向量相同的法向量。综上所述，$\boldsymbol{V}_{\text{light}}$理论上体现了直射光的照射方向。

2）计算建筑物立面的法向量与$\boldsymbol{V}_{\text{light}}$的夹角，若小于90°，判定为阴面；反之则为阳面。该方法能解决不同朝向的建筑物立面中立面信息占比不同的问题，也能更好地分辨立面的明暗差异。

2.2 色彩直方图规定化

直方图规定化是一种应用广泛的图像增强技术[11]，能显著提高图像对比度与亮度。本文将阴面的RGB直方图通过直方图规定化转换为阳面的RGB直方图分布，即可在不改变建筑物立面风格的前提下有效提高阴面亮度，从而提升建筑物整体的可视化效果。对RGB通道进行直方图规定化的具体步骤为：

1）对阴面RGB直方图进行均衡化处理：

$$s_k=T(r_k)=\sum_{i=0}^{k}P_r(x)=\sum_{i=0}^{k}\frac{n_i}{n} \tag{2}$$

式中，n为阴面点云数量；n_i为RGB直方图每组r_i对应的点数量；k为直方图级数减1，本文中为255。

2）对阳面RGB直方图进行均衡化处理：

$$v_k=G(z_k)=\sum_{j=0}^{k}P_z(x)=\sum_{i=0}^{k}\frac{n_j}{n} \tag{3}$$

式中，n 为阳面点云数量；n_j 为RGB直方图每组 z_j 对应的点数量；k 为直方图级数减1，本文中为255。

3）对式（3）进行逆变换，则有：

$$z_k = G^{-1}(v_k) \tag{4}$$

由于式（2）与式（3）都进行了直方图均衡化，因此具有相同的分布密度 $P_s(s)=P_v(v)$，代入式（4）可得：

$$z_k = G^{-1}(s_k) = G^{-1}\left[T(r_k)\right] \tag{5}$$

最终得到阴面RGB直方图的直方图级数分布 z_k。

3　实验结果与分析

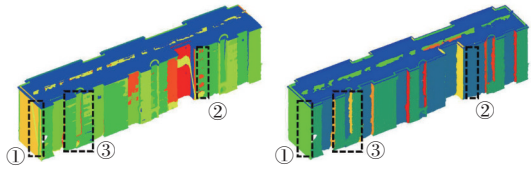
3.1　实验数据

本文利用无人机采集兰州交通大学建筑物点云数据进行实验，点云信息包括经度、纬度、高程以及RGB三个颜色通道。

3.2　结果分析

3.2.1　改进RANSAC算法与传统方法的分割结果对比

本文将改进RANSAC算法与传统RANSAC算法的分割结果进行对比，可以看出，图2a虚线框①内出现了绿色与黄色的“条带”，这是由于黄色、绿色平面先于橙色平面被分割所致，且其中黄色平面属于伪平面，而本文采用法向量筛选平面内点，有效改善了上述问题；图2a虚线框②中存在部分墙体结构无法正确分类的问题，而本文采取DBSCAN聚类进行重分类，可以有效分类小聚类；图2a虚线框③中一个平面被分为多个平面，而经过本文的平面合并，有效改善了一个平面被分为多个平面的情况。

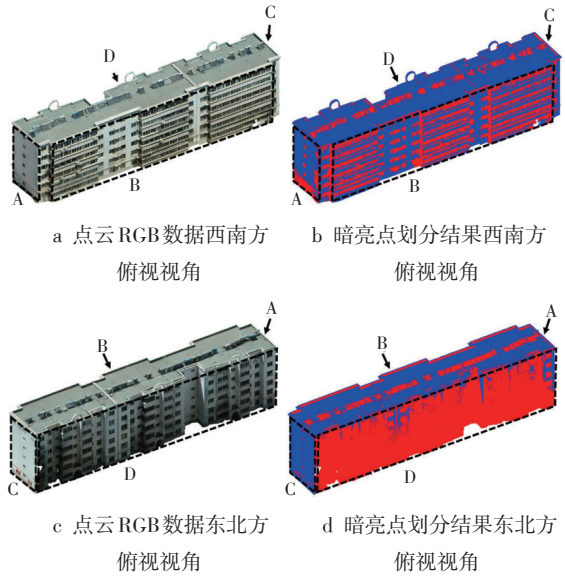


a 传统算法　　b 本文算法

图2　传统算法与本文算法分割结果对比

3.2.2　阴面色彩增强

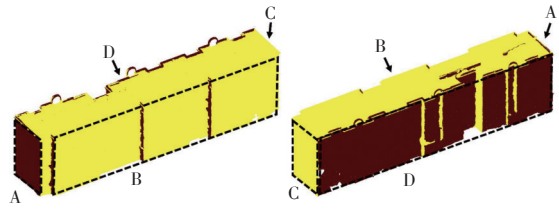
本文在建筑物平面分割的基础上划分阴面和阳面，再对阴面进行色彩增强。首先计算点云HSV通道，以V通道为点云亮度通道，采用大津法将点云分为亮点与暗点，再将结果与原始RGB点云进行对比，结果见图3，图中红点为暗点、蓝点为亮点。对于大部分阴面而言，其暗点占平面点的比例较高，如图3d中的平面D，但某些阴面的暗点占比并不高，如图3b中的平面A。图3a中的A平面与图3c中的C平面是一对朝向相反的对应平面，对比可见平面A为阴面而平面C为阳面。由于使用亮度通道自动划分暗亮点，导致平面A是阴面，却因窗户等亮度较低的物体面积占比过小，其暗点占比反而小于处于阳面的平面B（图3b）。为解决该问题，本文通过计算 $\boldsymbol{V}_{\text{light}}$ 并结合面法向量计算得到阴面与阳面，结果见图4，图中棕色表示阴面，黄色表示阳面，可以看出，本文算法将平面A与平面C成功地分类，而暗点占比很高的B面也被成功地分类为阳面。



a 点云RGB数据西南方俯视视角　　b 暗亮点划分结果西南方俯视视角

c 点云RGB数据东北方俯视视角　　d 暗亮点划分结果东北方俯视视角

图3　点云RGB数据与暗亮点划分结果对比



a 西南方俯视视角　　b 东北方俯视视角

图4　阴面与阳面划分结果

将点云划分为阴面与阳面后，以阳面的RGB直方图为目标，对阴面点云的RGB通道直方图进行直方图规定化处理，阳面不进行处理，得到阴影增强结果对比（图5、6）。



a 未增强点云西北方俯视视角　　b 增强后点云西北方俯视视角

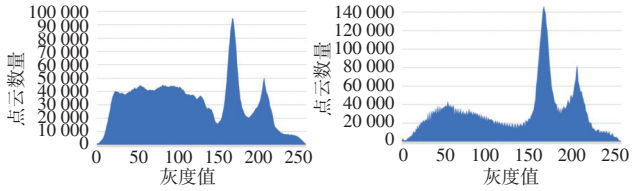
图5　点云色彩增强结果对比

本文采用对比度评价增强效果，计算公式[12]为：

$$C = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N}\sum_{n=0}^{4}\left|I_k - I_n\right| \tag{6}$$

式中，I_k 为第 k 个点灰度值；N 为点云数量；I_n 为采用最近邻算法寻找的第 k 个点周围4个点的灰度值。

提取出阴面点云，采用式（6）计算得到增强前、后点云对比度分别为2.466和2.791。上述对比结果表明本文算法可有效改善建筑物点云因光照原因产生的阴暗效果，明显提升可视化效果。



a 未增强点云灰度直方图　　b 增强后点云灰度直方图

图6 点云灰度直方图对比

4 结 语

本文提出了一种改进RANSAC算法用于建筑物表面分割，并依据 V_{light} 将其划分为阴面与阳面，再对阴面进行直方图规定化计算，最终对阴面进行建筑物局部色彩增强。实验结果表明，本文算法能更加有效地分割建筑物表面。将建筑物表面划分为阴面与阳面的色彩增强方法不仅有效提高了阴面亮度与对比度，而且保持了色彩风格，有效改善了建筑物点云的可视化效果。本文考虑了光照角度所造成的阴影，而实际还存在建筑物或其他物体遮掩造成的阴影，后续将针对其他原因造成的阴影进行判别与增强；本文在改进RANSAC算法中进行平面合并时，可能会出现较小立面被合并的现象，后续将对小面积立面的精确分割进行改进。

参考文献

[1] 张帆,黄先锋,高云龙,等. 实景三维中国建设技术大纲(2021版)解读与思考[J]. 测绘地理信息,2021,46(6):171-174

[2] 陈鑫祥,蒲冰鑫,俞建,等. 基于多视图像点云的建筑物屋顶分割算法研究[J]. 地理空间信息,2022,20(5):33-37

[3] 朱庆. 三维GIS及其在智慧城市中的应用[J]. 地球信息科学学报,2014,16(2):151-157

[4] Qu L, Tian J, He S, et al. Deshadownet: A Multi-context Embedding Deep Network for Shadow Removal[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2017:4 067-4 075

[5] Phan H N, Pham L H, Chung N M, et al. Improved Shadow Removal Algorithm for Vehicle Classification in Traffic Surveillance System[C]. 2020 RIVF IEEE International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF),2020:1-6

[6] Lubis M F, Muis A. Fast Shadow Removal Algorithm for River Garbage Pollution Monitoring System[C]. IEEE International Conference on Quality in Research (QiR),2015:175-179

[7] Abiko R, Ikehara M. Channel Attention GAN Trained with Enhanced Dataset for Single-image Shadow Removal[J]. IEEE Access,2022,10:12 322-12 333

[8] Fischler M A, Bolles R C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography[J]. Communications of the ACM,1981,24(6):381-395

[9] Dong Z, Yang B, Hu P, et al. An Efficient Global Energy Optimization Approach for Robust 3D Plane Segmentation of Point Clouds[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2018,137:112-133

[10] 何汉. 三维点云语义分割技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2020:39-41

[11] 陈天华. 数字图像处理及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2014

[12] 王浩,张叶,沈宏海,等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学,2017,10(4):438-448

（上接第44页）

[15] Luo W, Wang F. Measures of Spatial Accessibility to Health Care in a GIS Environment: Synthesis and a Case Study in the Chicago Region[J]. Environment and Planning B Planning and Design,2003,30(6):865-884

[16] Jiang S, Guan W, He Z, et al. Measuring Taxi Accessibility Using Grid-based Method with Trajectory Data[J]. Sustainability,2018,10(9):3 187

[17] 宋正娜,陈雯,张桂香,等. 公共服务设施空间可达性及其度量方法[J]. 地理科学进展,2010,29(10):1 217-1 224

[18] 罗钧韶,潘嘉杰. 基于GPS数据挖掘的出租车出行特征分析[J]. 交通与运输,2020,33(增刊2):49-54

[19] 胡森,李松廉,蔡忠亮. 院前急救时空热点分析:以醉酒为例[J]. 地理空间信息,2022,20(6):20-23

[20] 胡晓旭,何建华. 基于县域单元的武汉城市圈经济时空差异研究[J]. 地理空间信息,2014,12(3):27-32

[21] Yoo E, Roberts J, Eum Y, et al. Quality of Hybrid Location Data Drawn from GPS-enabled Mobile Phones: Does It Matter? [J]. Transactions in GIS,2020,24(2):462-482