末敏弹线阵列激光雷达的距离像分割方法

姜 云,郭 锐,刘荣忠,武军安

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室,江苏 南京 210094)

摘 要: 为了增强末敏弹在不同场景下对地面装甲目标的探测识别性能,充分考虑末敏弹弹载线阵激光雷达的应用背景,提出了综合交叉扫描线法和梯度连通域的地物距离像点云分割算法,用以提高对地面和目标的分割效果。首先,将激光雷达扫描得到的原始距离信息转换为距离水平地面高度值,通过交叉扫描线法将空间斜面转化至水平面,增强不同地形上的适应性;然后,采用地面点云连通域算法提取地面点云和形态学梯度阈值法分割得到目标点云;最后计算了地物分割效果的几何相似度。实验结果表明:该算法对于正斜坡、侧斜坡等多种地形都有较好的适用性,在不同高度、地形、坡度都能够准确、有效地分割地物点云,进而提高末敏弹对装甲目标的识别性能。

关键词: 末敏弹; 点云分割; 线阵激光雷达; 连通域

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0126002

Distance image segmentation method for terminal sensitive missile linear array laser radar

Jiang Yun, Guo Rui, Liu Rongzhong, Wu Jun′an

(ZNDY Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to enhance the detection and recognition performance of the terminal sensitive missile on the ground armor target in different scenarios, the application background of the terminal sensitive missile-loaded linear array laser radar was fully considered, and the integrated cross-scan line method and the ground-distance image point of the gradient connected domain were proposed. Cloud segmentation algorithm was used to improve the segmentation effect on the ground and target image. Firstly, the original distance information obtained by laser radar scanning was converted into the horizontal ground height value, and the spatial slope was transformed into the horizontal plane by the cross-scanning line method to enhance the adaptability on different terrains. Then, the ground point cloud connected domain algorithm was used to extract the ground. Point cloud and morphological gradient threshold method were used to segment the target point cloud. Finally, the geometric similarity of the feature segmentation effect was calculated. The experimental results show that the proposed algorithm has good applicability to various terrains such as positive slope and side slope. It can accurately and effectively segment the point cloud in different heights, terrains and slopes, and improve the target recognition performance of terminal sensitive missile.

Key words: terminal sensitive missile; point cloud segmentation; linear array laser radar; connected domain

收稿日期: 2019-10-11; **修订日期:** 2019-11-21

基金项目: 装备重点预研(301070201)

作者简介: 姜云(1994-),男,硕士生,主要从事末敏弹的目标激光探测识别技术等方面的研究。Email: a1003500872@qq.com

导师简介: 郭锐(1980-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事末敏弹总体技术等方面的研究。Email: guorui@njust.edu.cn

0 引 言

末敏弹是末端敏感弹药的简称，其概念最早是在 20 世纪 60 年代由美国研究人员提出，随后研制出了“萨达姆”末敏弹，是集敏感器探测系统、实时信息处理系统和爆炸成型弹丸战斗部系统于一身的信息智能化弹药 [1]。因为末敏弹性价比高、毁伤效果好、“发射不用管”等优点，德国、英国、俄罗斯和中国等国家也纷纷投入研究。要想提高末敏弹命中目标的准确度，稳定可靠的探测识别系统是重中之重。纵观各国装备的制式末敏弹大多都是采用红外、毫米波其中的一种，或者几种复合的探测识别系统。但由于战场情况的错综复杂以及随着隐身涂层、披挂材料、烟雾等干扰技术的不断发展，传统毫米波雷达、辐射计与红外敏感器已不能适应时代的进步。弹载激光雷达因为其采集信息速度快，三维点云所含信息丰富，能够主动对目标扫描成像，对末敏弹的探测性能有极大的提升[2]。线阵列激光雷达通过末敏弹边旋转边下落的稳态扫描机制，获取扫描区域的距离像信息，得到地面目标的几何轮廓特征，利用目标和地面的相关已知信息可以实现目标与地面背景准确分割。

目前，相关研究人员在对地面点云分割领域的研究大致可以归纳为以下几个方面：(1) 基于网格化高程值迭代[3-4]，建立规则或不规则的单元网格，根据需求计算和提取网格内点云的平均高度或密度等信息，利用梯度、概率或者函数方法实现地物点分割；(2) 基于距离图像特征[5-7]，利用扫描参数与距离图像的关系，将三维点云转化为图像，用成熟的图像处理方法，实现地物分割；(3) 基于扫描线[8-11]，一般假定地面连续，且高度梯度有限，依据扫描线上相邻两点或多个点云之间的坡度、高程差的变化，实现地物点云分割；(4) 基于特征聚类[12-13]，聚类算法通过分析点云之间的几何关系，将具有相近高度值、梯度值等相关信息的点划分到同一聚类，对不同的部分制定相应规则，从而实现分割；(5) 基于信息统计学[14]，通过向量机等统计决策模型，输入点云数据特征进行训练提取，进而实现对点云的分类分割。

尽管以上各种算法在解决各自领域中的问题都有着较好的效果，但不适用于末敏弹搭载激光雷达，这种由于弹载条件限制扫描导致点云数量较少、密度较低的特殊情况。末敏弹的工作特性要求：算法处理时间短，目标分割准确度高，而背景环境重建度不需很高。根据这种应用条件，文中提出了综合交叉扫描线与阈值连通域的分割算法。通过实验证明，该方法实现了对不同高度与多种地形下装甲目标与背景的有效分离。

1 算法处理流程与思路

末敏弹稳态扫描阶段近似为圆锥扫描(见图 1)，得到的实际扫描视场区域为圆环。在数据处理时，因弹载激光雷达视场角 ρ 和扫描转角 β 都较小，扫描区域小，且装甲目标所处环境的地面绝大多数可连续，坡度变化小，可将扫描区域近似处理为空间平面矩形。弹载的特殊条件限制了激光雷达的各项参数并且要求算法的实时性。

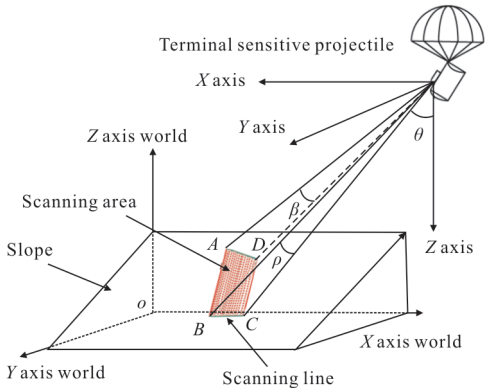


图 1 末敏弹线阵激光雷达扫描示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser scanning of the terminal sensitive linear array laser radar

文中提出的地面目标分割算法流程如下：

(1) 坡面转化 对实验采集数据进行去噪、滤波处理后，采用交叉扫描线法将装甲目标所在区域地形水平面化，使得算法能够适应坡面地形，提高算法适用性。

(2) 提取分界处阈值 为了能够凸显背景与目标的几何区别，利用地面目标与背景交接边缘处梯度不连续性，提取分界处梯度值作为分割阈值。

(3) 连通域阈值分割 根据分界处阈值大小，分割所用地面连通点和目标连通点，降低常用的单一高度阈值方法产生的误差，更加准确地分割，提高装

甲目标的识别率。

(4) 评估地物分割效果 根据已知的坦克目标几何尺寸与文中算法分割出的目标几何尺寸进行对比与计算，求对应的几何相似度。

如图 2 所示，为保证实验的有效性，在实验室进行的实验为全缩比实验，激光雷达的转速、采样率还有目标大小、高度等条件都整体缩小，比例约为 1:29。实验中采用的激光雷达是 16 线激光雷达，采样率 20 Hz，实际视场角 9°，电动转台转速 0.075 rad/s，分辨率 1 cm。人工搭建实验场景，来模拟装甲目标，以及山坡、树木、建筑等背景。

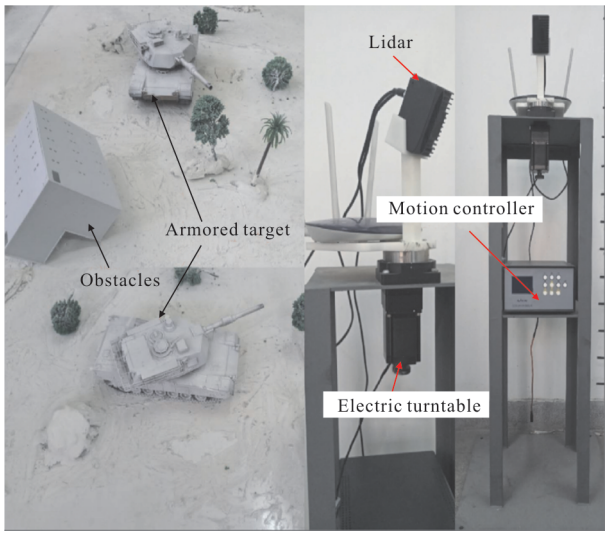


图 2 实验场景

Fig.2 Experimental scene

2 分割算法具体步骤与原理

2.1 交叉扫描线法原理

扫描采集的实验数据，经过去噪、平滑滤波等预处理过程后，由公式(1)根据线阵激光雷达不同点源与竖直方向之间的夹角以及扫描转角值，求出所有脚点处位置相对激光雷达竖直方向上的高度值。

$$h_{ij}=d_{ij}\cdot\cos(\theta_{ij}) \tag{1}$$

式中：h_{ij} 为点云在 Z 轴上相对高度；d_{ij} 为激光雷达端口到脚点间的绝对距离；θ_{ij} 为激光点源与竖直方向的夹角。

“交叉扫描线法”是指先后对与扫描线垂直相交激光雷达各点源的扫描路径线以及与线阵激光雷达扫描线数据进行处理的方法，能够快速、准确地把空间斜面上距离值转化为水平面方向上高度。

图 3(a)为待处理的相对高度值，图 3(b)为经过扫描路径线方向处理后结果，图 3(c)为经过扫描线方向

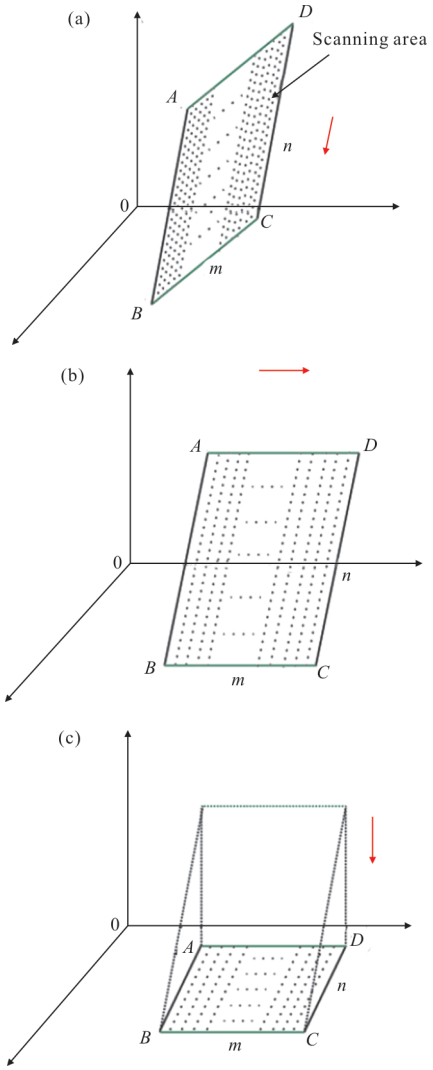


图 3 交叉扫描线法原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the cross-scan line method

处理后最终结果。设 $H=\begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{ij} & \cdots & h_{ij} \end{bmatrix}$，$i=1, 2,\cdots, m$，$j=1, 2,\cdots, n$，$H$ 为是原始高度矩阵，大小 $m\times n$。

$$H_a=n\cdot I-H \tag{2}$$

式中：I 为单位矩阵；n 为距离常数；H_a 为相对高度矩阵。因为空间平面内每条扫描路径线平行，所以斜率相同，并且在扫描转角一定的情况下，AB 两点与 CD 两点间在坐标轴上跨度相同，AB 与 CD 之间的高度差值相同。使得每条扫描路径线上各点云高度值

减去该线上最小高度值可以得到结果，见图 3(b)，即令 $k\in[1,\ i]$，k 为正整数，则有：

$$H_b(k,j)=H_a(k,j)-H_{a\min}(k,\cdot)\qquad k=1,2,\cdots,n \tag{3}$$

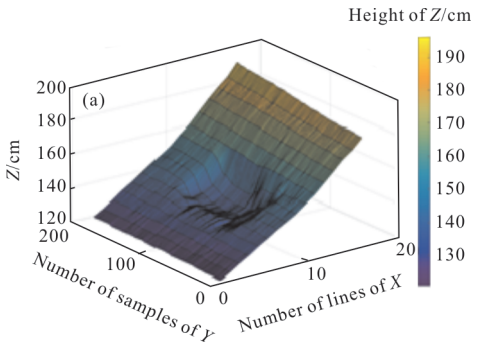
式中：$H_a(k,j)$为 H_a 中第 k 行、第 j 列各高度值，j 取值 1~n；$H_{a\min}(k,\cdot)$是第 k 行最小值。

在经过第一次处理的图 3(b)中，扫描线 AD 方向上的各点云高度值相近，每条扫描线上各点云的高度值减去该线上的最小高度值即可得到最终结果，见图 3(c)。令 $l\in[1,\ j]$，l 为正整数，则有：

$$H_c(i,l)=H_b(i,l)-H_{b\min}(\cdot,l)\qquad i=1,2,\cdots,m \tag{4}$$

式中：$H_b(i,l)$为 H_b 中第 l 列、第 i 行各高度值，i 取值 1~m；$H_{b\min}(\cdot,l)$为第 l 列的最小高度值。

图 4 为实验室实测数据处理结果，其中图 4(a)是激光雷达扫描获得的原始距离像数据；图 4(b)是经过公式(1)计算后竖直方向上相对高度值；图 4(c)是沿扫描路径线方向上处理后结果图；图 4(d)是最终处理得到的效果图。算法处理结果表明，采用交叉扫描线法能够快速地将斜坡等地形转化为水平面，减低了目标原本在斜坡上难以通过算法直接找到目标的难度。在图 4(d)中，可以发现实际的处理结果并没有和理论推导的结果一样，即将空间斜面转化成绝对水平面。主要原因：一是因为激光雷达测距时自身的误差以及激光反射率等因素，距离反常处理不够精细使得到的数据不够精准；二是末敏弹在稳态扫描期间通过圆锥扫描机制得到斜坡上扇面环形目标区域近似成矩形平面的处理产生了一定误差，并且这个误差会随着视场角 ρ 和扫描转角 β 增大而增大。虽然在实际运用的时候会产生误差，但是误差在算法允许范围之内，并不影响目标区域水平面化的整体效果，依然能够直观地观测出目标位置和地面区域范围，并且交叉扫描法能够适应末敏弹边旋转边下落的工作特性，消除高度不同的影响。



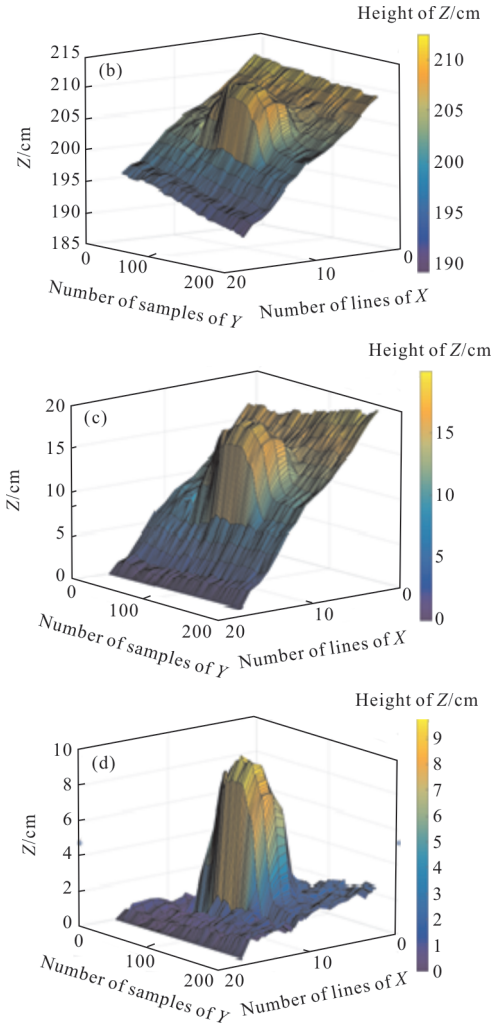


图 4 交叉扫描线法实测数据处理结果

Fig.4 Measured data processing results with cross-scan line method

2.2 形态学梯度预处理

梯度能够描述距离像中高度值的变化情况，地面点之间的高度值较小，地物相邻边界处高度差较大。采用形态学梯度能够有效、鲜明地突出目标的边缘，有利于目标与背景环境的分离。灰度级形态学的基本算子有：腐蚀、膨胀、开操作和闭操作。设 b 为 3×3 结构单元，b 在(i,j)处对距离像 f 的腐蚀可以表示为：

$$[f\Theta b](i,\ j)=\min_{(s,\ t)\in b}\{f(i+s,\ j+t)\} \tag{5}$$

类似的，结构单元 b 在任何位置$(i,\ j)$处对距离像 f 的膨胀可以表示为：

$$[f\oplus b](i,\ j)=\max_{(s,\ t)\in b}\{f(i-s,\ j-t)\} \tag{6}$$

距离像 f 膨胀和腐蚀相减可以得到图像的形态学梯度，由 g 可以定义为：

$$g=(f\oplus b)-(f\Theta b) \tag{7}$$

末敏弹是边旋转边下落的，工作高度在不断地发生变化，为了消除高度对阈值的影响，这里将距离像矩阵高度值归一化处理：

$$H'(i,j)=\frac{H(i,j)-H_{cmin}(i,j)}{H_{cmax}(i,j)-H_{cmin}(i,j)} \tag{8}$$

式中：$H'(i,j)$为无量纲的归一化值；$H_{cmax}(i,j)$为高度矩阵中最大值；$H_{cmin}(i,j)$为高度矩阵中最小值。

图 5 为高度归一化后采用形态学梯度的计算结果。由图可以看出视场中的坦克目标的边缘轮廓突出明显，目标边缘点与周围地面点的区别度很好。目标中心处的梯度值也较低，是因为坦克平顶处较为平坦，高度值变化小，和地面的梯度值接近，所以呈现较低的状态。这里若直接采用梯度阈值的方法就会错把坦克平顶处当作地面处理，为解决这个问题，引入连通域方法。

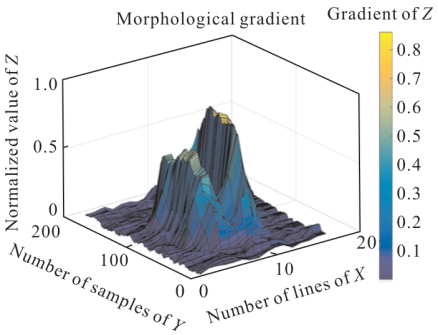


图 5 形态学梯度处理示意图

Fig.5 Schematic diagram of morphological gradient processing

2.3 连通域阈值分割算法

连通域是由有相似特征的点，其周围八邻域连通形成的成片区域。连通域方法具体是将目标边缘处合适的梯度值 q 作为阈值，阈值的大小与装甲目标几何尺寸、视场角等因素相关。在阈值的限制下，目标边缘较高的梯度值能够阻隔地面点的侵蚀，使目标平顶处梯度值较小的点不能与地面点连成同一区域。由梯度值围成的区域是目标点，其他的地方是目标点，从而实现目标与地面的分割。

具体算法思路是：在形态学梯度矩阵 G' 中，梯度值小于阈值 q 的所有点，即：

$$G'(i,j)\leqslant q \tag{9}$$

$G'(i,j)$中这些点八邻域联通周围的其他点，可以形成多个连通域 $Y_s(i,j)$，s=1, 2…。对各个连通域进行标记，求出连通域大小，获取连通域大小的索引，获取指定连通域。

图 6 是逻辑值矩阵，阈值小于 q 的点逻辑值置一，组成了多块连通域 $Y_s(i,j)$。算法设定视场内的最大连通域为地面点集合，而坦克目标的平顶部分虽然也是小于阈值 q，形成了一块小的连通域，由于阈值的限制坦克平顶处连通域同地面点相连通，则其不在地面点的提取范围内，从而实现了地面点和目标点的有效分离。

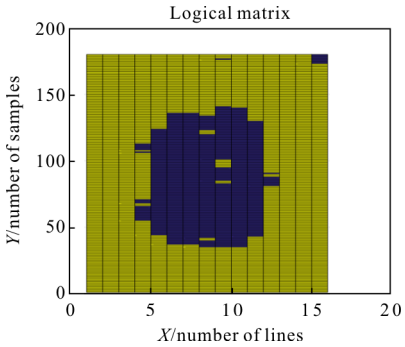


图 6 连通域逻辑判断矩阵

Fig.6 Connected domain logical judgment matrix

图 7 是采用形态学梯度与连通域方法对地面和目标进行分离的处理结果。由图可以看出在距离像

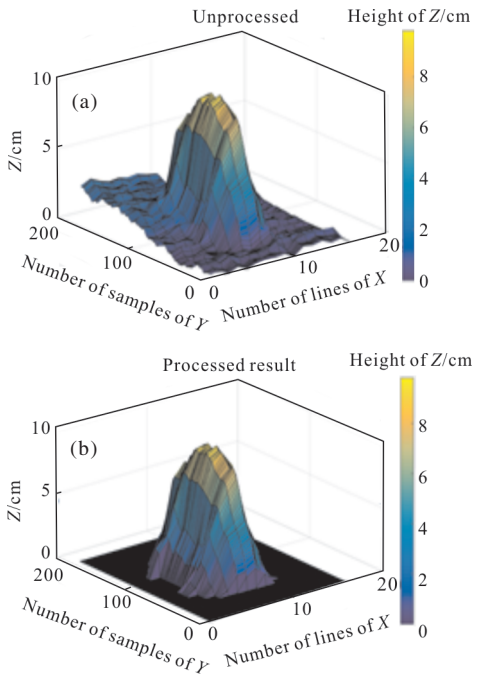


图 7 地物分离处理结果

Fig.7 Target and background separation processing results

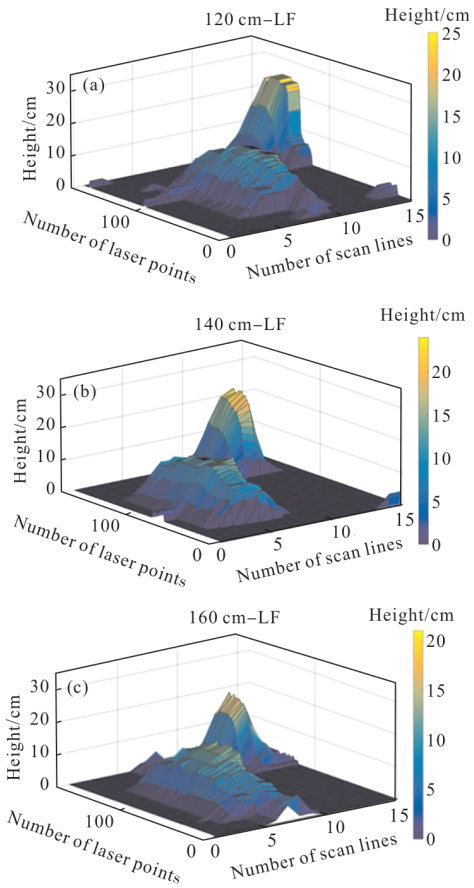
中完全将地面点剔除，留下目标点。此算法能够准确可靠地分离地面点和目标点。作为末敏弹搭载激光雷达，处理算法对实时性要求较高，对比采用区域生长法，迭代时间较长；而最大连通域的方法，具有处理速度的优势。

文中程序均是在MATLAB 2014b 版本上编写算法，实验采用的计算机的处理器是 Inter(R)Core (TM)i5-7500 ，主频 3.40 GHz。主体程序的计算时间约为 28 ms，根据末敏弹的弹载情况而言，其搭载的处理器能够到达该算法计算的配置要求，能够满足弹载条件下的实时性要求；在算法整体方法思路不变的情况下，也可以通过多级流水线、并行处理等方法优化算法实行速度。

2.4 不同高度、坡形的分割算法效果与评判标准

为了验证文中算法在不同高度、坡形条件下的适用性，实验设立了四个高度 120、140、160、190 cm；四种地形：平面坡(P)，正左斜坡(L)，偏左斜坡(LF)，正迎坡(F)，斜坡的角度均为 20°。实验处理结果如下。

图 8 中可以看出在高度较高的 190 cm 处，视场中目标较小，但也能有很好的分割效果。由图 8、9 可以看出在不同高度和坡形的情况下，该算法能够较为准确地分割地面与目标。



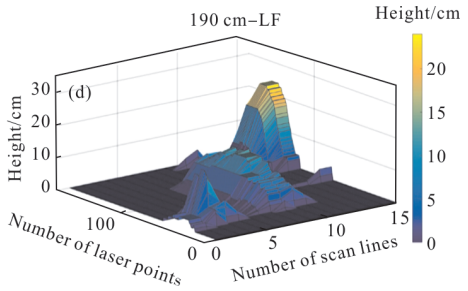


图 8 不同高度下的分割效果

Fig.8 Segmentation effect at different heights

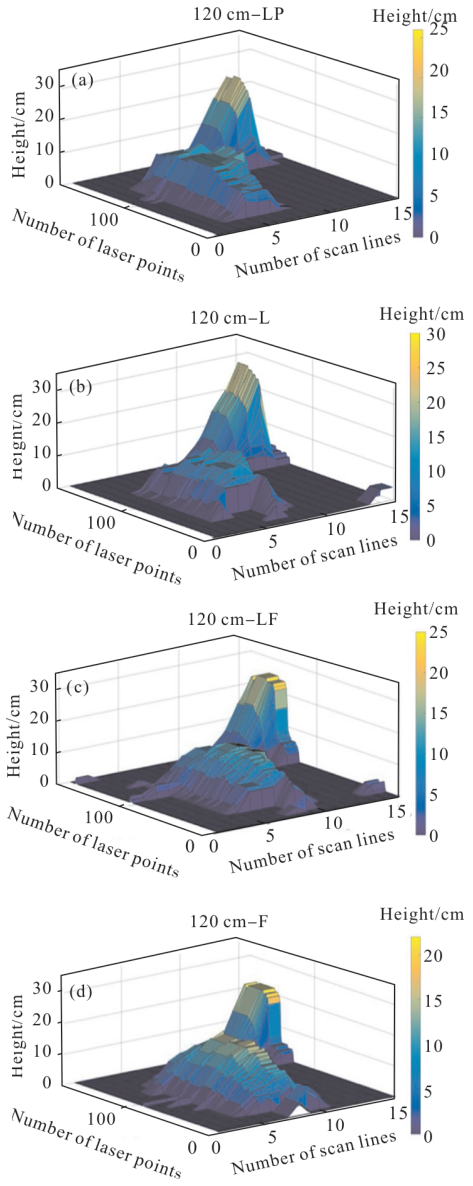


图 9 不同坡形下的分割效果

Fig.9 Segmentation effect under different slope shapes

为了量化评判地物分割效果，此处引入几何相似度 P_s[11,15]：

$$P_s=(s_l+s_w+s_h)/3 \tag{10}$$

式中：s_l、s_w、s_h 分别为分割出的目标尺寸与坦克模型实际尺寸的相似比：

$$\begin{cases} s_l=1-\dfrac{|L-L_s|}{L_s} \\ s_w=1-\dfrac{|W-W_s|}{W_s} \\ s_h=1-\dfrac{|AH-H_s|}{H_s} \end{cases} \tag{11}$$

式中：L_s、W_s、H_s 分别为坦克目标模型的长、宽和平均高度，其值分别为：32、15、8.2 cm；L 与 W 分割出目标的长和宽；AH 为分割出目标的平均高度。

由表 1、2 可以看出，此算法在不同高度和坡形下分割出目标的几何相似度均在 80%以上。

表 1 不同高度下分割出的目标尺寸与几何相似度

Tab.1 Segmentation of target size and geometric similarity at different heights

H/cm	L/cm	W/cm	AH/cm	P_s
120	35.07	16.67	8.69	91.1%
140	36.64	16.21	8.62	90.8%
160	35.06	15.98	7.28	90.4%
190	36.41	16.61	7.19	87.7%

表 2 不同坡形下分割出的目标尺寸与几何相似度

Tab.2 Segmentation of target size and geometric similarity under different slopes

H/cm	L/cm	W/cm	AH/cm	P_s
P	34.5	14.35	8.45	94.9%
L	38.06	14.6	7.39	89.8%
LF	35.07	16.67	8.69	91.1%
F	35.72	17.82	7.21	85.8%

3 结 论

文中针对末敏弹弹载激光雷达地物点云分割困难的问题，运用三维点云转化为二维距离像的思路，通过实验室搭建实验平台，采集实测数据进行分析，得到以下成果与有待探讨的方面：

(1) 采用交叉扫描线法，能够将空间斜面上目标与地面点云转化到水平面上，具有在较为复杂地面工作的能力，在不同高度、坡形条件下都能有很好的效果。

(2) 考虑地面点与目标点之间的连续性不同，采用形态学梯度先求取梯度图像，然后运用连通域方法，彻底分离地面点与目标点。

(3) 整体算法能够完成目标点与地面点的分离，为末敏弹初步分离目标与地面提供了新思路与方法。

(4) 在空间斜面转化为水平面时，扫描角与视场角对算法精度有较大的影响，如何调节扫描角与视场角大小，降低误差，以及不同高度、地形、姿态条件下的弹目交汇情况仍需进一步的研究。

参考文献：

[1] Yin Ximei, Feng Pengpeng. Current status and prospects of the end-sensitive projectiles[J]. ***Journal of Detection & Control***, 2017, 39(5): 1-6. (in Chinese)
殷希梅, 冯鹏鹏. 末敏弹对抗技术现状及展望 [J]. 探测与控制学报, 2017, 39(5): 1-6.

[2] Qu Hengkuo. Scanning imaging tracking Lidar [J]. ***Chinese Optics***, 2012, 5(3): 242-247. (in Chinese)
屈恒阔. 扫描成像跟踪激光雷达 [J]. 中国光学, 2012, 5 (3): 242-247.

[3] Hu H, Ding Y, Zhu Q, et al. An adaptive surface filter for airborne laser scanning point clouds by means of regularization and bending energy[J]. ***ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing***, 2014, 92: 98-111.

[4] Ma Chaojie, Yang Hua, Li Xiaoxia, et al. Automatic target recognition using Ladar in complex scenes [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2009: 17(7): 1714-1721. (in Chinese)
马超杰, 杨华, 李晓霞, 等. 复杂场景下应用成像 Ladar 的自动目标识别[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(7): 1714-1721.

[5] Zhang Mingfang, Fu Rui, Guo Yingshi, et al. Ground segmentation algorithm based on three -dimensional irregular point cloud [J]. ***Journal of Jilin University (Engineering Science)***, 2017(5): 64-71. (in Chinese)
张名芳, 付锐, 郭应时, 等. 基于三维不规则点云的地面分割算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017(5): 64-71.

[6] Zhang J, Lin X. Filtering airborne LiDAR data by embedding smoothness-constrained segmentation in progressive TIN densification [J]. ***ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing***, 2013, 81: 44-59.

[7] Huang Tao, Hu Yihua, Zhao Gang, et al. Target extraction and classification technique based on laser imaging radar distance image [J]. ***Journal of Infrared and Millimeter Waves***, 2011, 30(2): 179-183. (in Chinese)
黄涛, 胡以华, 赵钢, 等. 基于激光成像雷达距离图像的目标提取与分类技术 [J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 179-183.

[8] Yu Jiaqi, Yang Shuxing, Zhu Boli. Target extraction base on range image from missile-borne imaging ladar [J]. ***Transactions of Beijing Institute of Technology***, 2016, 36(12): 1279-1282. (in Chinese)
于加其, 杨树新, 朱伯立. 弹载激光成像雷达距离像的目标提取技术[J]. 北京理工大学学报,2016, 36(12): 1279-1282.

[9] Guo Jie, Liu Jianyong, Zhang Youliang, et al. Ground point cloud filtering based on scanning line adaptive angle tolerance method [J]. ***Journal of Computer Applications***, 2011, 31(8): 2243-2245. (in Chinese)
郭杰, 刘建永, 张有亮, 等. 基于扫描线自适应角度限差法的地面点云滤波[J]. 计算机应用, 2011, 31(8): 2243-2245.

[10] Guan Haiyan, Zhang Jianqing, Deng Fei, et al. Research on filtering algorithm of urban airborne laser scan data based on scanning line [J]. ***Bulletin of Surveying and Mapping***, 2007(12): 9-13. (in Chinese)
管海燕, 张剑清, 邓非, 等. 基于扫描线的城区机载激光扫描数据滤波算法研究[J]. 测绘通报, 2007(12): 9-13.

[11] Du Yuhong, Wang Peng, Shi Yijun, et al. Data feature adaptive lidar data segmentation method [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(8): 0830001. (in Chinese)
杜玉红, 王鹏, 史屹君, 等. 环境特征自适应激光雷达数据分割方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 0830001.

[12] Liu Zhiqing, Li Pengcheng, Guo Haitao, et al. Fusion of strong threshold triangulation and total least squares surface fitting filtering [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(4): 0406003. (in Chinese)
刘志青, 李鹏程, 郭海涛, 等. 融合强阈值三角网与总体最小二乘曲面拟合滤波 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0406003.

[13] Xin Qunrong, Yao Jili, Xu Guangpeng. Extraction of point cloud noodle line by shared neighbor clustering algorithm[J]. ***Surveying Science***, 2018, 43 (1): 115-119. (in Chinese)
辛群荣, 姚吉利, 徐广鹏. 共享近邻聚类算法点云面线提取[J]. 测绘科学, 2018, 43(1): 115-119. (in Chinese)

[14] Liu Zhiqing, Li Pengcheng, Chen Xiaowei, et al. Classification of point cloud data of airborne lidar based on information vector machine [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2016, 24(1): 210-219. (in Chinese)
刘志青, 李鹏程, 陈小卫, 等. 基于信息向量机的机载激光雷达点云数据分类[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(1): 210-219.

[15] Wu Jun′an, Guo Rui, Liu Rongzhong, et al. Extraction algorithm of ground armor target by laser-based radar array radar [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2019, 48(3): 0330002. (in Chinese)
武军安, 郭锐, 刘荣忠, 等. 末敏弹线阵激光雷达对地面装甲目标的提取算法 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3) 0330002.