

末敏弹线阵激光雷达对地面装甲目标的提取方法

武军安¹, 郭锐¹, 刘荣忠¹, 刘磊², 柯尊贵³

(1. 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;

2. 埃因霍温理工大学 机械工程系, 荷兰 埃因霍温 5600MB;

3. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 为了提高末敏弹在复杂战场环境下对地面装甲目标的识别概率, 提出了一种用于弹载线阵激光成像雷达的目标提取方法, 结合末敏弹边旋转边下降的稳态运动特点, 实现了线阵列激光雷达对扫描区域的三维点云成像。首先通过对点云中高度数据分析, 提出了基于高度与梯度的组合阈值分割算法, 实现了地面背景的快速分割; 然后利用坐标变换, 对有坡度的地面进行调整, 并通过典型装甲目标的几何尺寸自动获取种子点进行区域增长分割; 最后利用最小外接矩形特征获取目标的几何信息, 由目标的几何特征实现装甲目标的提取。仿真结果表明: 此方法可以实现线阵列激光雷达在 50~120 m 高度下对地面装甲目标的准确提取, 从而为新型末敏弹目标探测提供技术支持。

关键词: 线阵激光雷达; 末敏弹; 三维点云; 目标提取

中图分类号: TN958 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0330002

Armored target extraction method based on linear array LiDAR of terminal sensitive sub-ammunition

Wu Jun'an¹, Guo Rui¹, Liu Rongzhong¹, Liu Lei², Ke Zungui³

(1. ZNDY Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, Holland Eindhoven, 5600MB;

3. Southwest Institute of Technical Physic, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to improve identification probability of terminal sensitive sub-ammunition under complex battle circumstances, the method of extracting the armor target based on the linear array LiDAR was proposed. Combined with stable scanning theory, 3D point cloud imaging on the scanning area was realized. Firstly, the height and gradient combination threshold segmentation algorithm was proposed by analyzing the height data in the point cloud; Then the coordinate transformation was used to adjust the slope ground, and the seed were automatically acquired through the geometric size of the typical armored targets for regional growth segmentation; finally, the extraction of armored targets was achieved through the geometric features of the target. The simulation shows that linear array LiDAR can accurately extract the armor target at the height of 50–120 m in battlefield, which provides technical support for the target detection of new terminal sensitive sub-ammunition.

Key words: linear array LiDAR; sensitive sub-ammunition; 3D point cloud; target extraction

收稿日期: 2018-10-05; 修订日期: 2018-11-03

基金项目: 装备重点预研(301070201)

作者简介: 武军安(1989-), 男, 博士生, 主要从事末敏弹的目标探测识别技术方面的研究。Email: 574732664@qq.com

导师简介: 刘荣忠(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事末敏弹总体技术方面的研究。Email: Liurongz116@163.com

0 引言

末敏弹作为灵巧弹药的代表,是一种将复合探测系统与爆炸成形弹丸技术应用于子母弹的新型弹种。因其具有毁伤效果好、效费比高、“发射后不用管”等突出优点^[1],在反装甲应用中具有良好的作战效果,但是随着战场的复杂化,特别是隐身涂层/披挂材料和红外干扰使等技术的发展得使用传统毫米波雷达/辐射计与红外传感器对目标的探测能力均有所下降。因此,需要更新末敏弹的探测技术来适应现代战场的变化。线阵列激光成像雷达可以获取扫描区域的三维距离信息,反映目标的几何轮廓特征,能够充分利用先验信息对目标进行判断分析,因此在复杂背景下对目标探测和识别具有独特的技术优势。美国 BLU-108“Skeet”末敏子弹和瑞典与法国联合研制的 155 mm“BONUS”末敏子弹都加入了一元激光雷达进行复合探测,通过获得目标的一维距离像来提高末敏弹对装甲目标的识别概率。但是在相同的条件下使用单点激光雷达进行扫描探测时,无法有效获得目标的整体几何特征,只能获取目标局部的一维距离像,因此无法对目标进行准确的提取与识别。而线阵激光雷达却可以通过弹体的稳态扫描运动而得到扫描区域的成像信息,得到目标整体的几何特征,从而提取出满足装甲目标特征的目标。

目前,扫描成像激光雷达的目标提取与分割方法可以根据激光雷达对数据的组织形式分为两大类。一类是直接使用三维点云进行目标分类,三维点云提供了点与点在设定参考系中的坐标值,可以对扫描区域进行较精确的表达但是在处理方法上较为复杂,主要包括:聚类法^[2-5],直接根据各点之间的最小距离分布提取出同一目标上的点;网格法^[6-8],将三维点云转换到规则或不规则网格中,根据网格细胞内的点云高度信息将点云中的目标进行分类与提取;统计学习法,使用支持向量机方法对 LiDAR 点云数据进行分类^[12-13]。第二类将扫描角与距离值作为对应关系的二维距离像或者高度像,这样可以用成熟的图像处理的方法进行分析,主要包括:距离像或高度像统计特征法^[9-10],通过对距离像的统计直方图分析,从而提取出背景与目标;边缘轮廓法^[11],利用图像中的边缘检测技术得到目标轮廓,从而实现

目标的提取。但是,上述方法大多数都依赖于较高的点云密度数据,由于末敏弹弹载环境对探测器体积的限制,线阵激光雷达所获得的点云密度较低,并且由于末敏弹滞空时间短,对算法的实时性也有较高要求,因此绝大部分算法无法应用在弹载线阵激光雷达上。

因此,文中根据末敏弹弹载线阵激光雷达所获得的点云数据,结合末敏弹独特的旋转运动特点,提出了一种适用于低密度点云又不受地面坡度影响的装甲目标提取方法。该方法实现了对地面装甲目标的快速探测识别,并基于 50~120 m 高度条件下仿真得到的激光点云数据进行了验证。

1 线阵激光雷达目标提取分析及流程

当末敏子弹进入稳态扫描阶段时,其转速和落速基本保持不变。对于有伞末敏弹而言,转速 4 r/s,落速 10 m/s,弹体和传感器同轴并与铅锤线成 30°(扫描角 β)。线阵激光雷达的主要参数见表 1,其中 FoV 代表视场角 γ ,线阵规模 n 为 16 元,测距频率 20 kHz。线阵激光雷达每转过一个一定角度时可以获取一组 (d_1, d_2, \dots, d_m) “扫描线”数据,其中 d_i 表示第 i 个激光接收单元测得的距离,通过末敏弹的稳态扫描运动,当扫描过 ψ 角度后即可得到一幅由 m 条扫描线数据所组成的距离像。由于扫描角的存在,扫描线中的数据需要通过公式(1)转换为图 1,以弹体作为坐标系原点 O 的 xyz 坐标系中的三维点云。

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = d_{ij} \cdot \begin{bmatrix} \sin\rho_j \cos\tau \\ \sin\rho_j \sin\tau \\ \cos\rho_j \end{bmatrix}, i=1:n; j=1:m \quad (1)$$

式中: ρ_j 表示第 j 条扫描线中第 i 个激光接收单元与竖直方向的夹角; τ 为线阵激光雷达扫过的角度。激光雷达扫描时包含了地面、目标等多种信息,从这些数据中快速分离并提取出满足装甲车辆特征的目标是目标提取算法的目的。

表 1 激光雷达主要性能参数

Tab.1 Main performance parameters of lidar

FoV/(°)	Detection range/m	Array size	Data rate/kHz · s ⁻¹
6	15-120	16	20

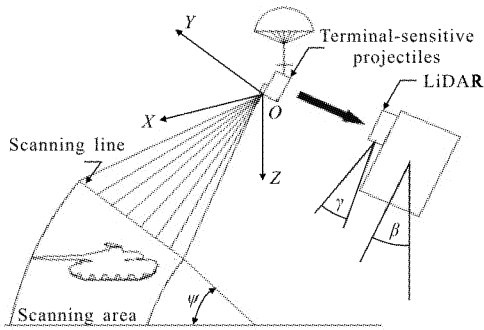


图 1 坐标系及成像模型示意图

Fig.1 Definition of coordinate system and diagram of imaging model

现役末敏子弹的工作高度一般在 150 m 左右。由于激光雷达中接收元数量有限,并且视角固定,在下落扫描的过程中,视场会越来越来大,扫描线也会越来越密集,因此使用线阵激光雷达时最佳工作高度会受到雷达视角、元数的限制;另外,末敏弹旋转对地扫描时线速度快,要求算法有较高的实时性。

因此,文中提出的线阵激光雷达目标提取算法流程如下。

(1) 地面背景的提取:根据点云中距离数据的分布特征提取出地面点,同时还要保证算法不受视角和地形的影响。

(2) 点云数据的变换:为了使用几何特征对扫描区域中的疑似目标进行提取,因此要对原坐标系下的点云进行变换,并对有较大坡度的地面进行补偿,得到以地面为基准的目标顶视图的高度像。

(3) 装甲目标提取:根据装甲目标的长、宽几何特征,估计出在高度像中所占像素的比例,从而确定区域生长分割算法的种子点,对分割出的目标计算最小外接矩,并以长、宽和平均高度作为装甲目标提取的依据。

文中所使用的扫描区域场景模型是通过 Solidworks 所生成的几何模型,其中坦克模型仿俄制 T72 坦克建模,其几何特征为长 6.2 m、宽 3.3 m、平均高度 1.8 m,此外,设置了障碍(树)以及斜坡地面。

图 3 是在 120、80、60、50 m 四种高度下对图 2 场景模型仿真得到的三维点云。考虑到地面环境与测量误差的影响,加入了 10~30 cm 随机高度噪声,坐标系的建立是依据图 1 所示。从图中可以看出场景中包括了地面、坦克和树木三个部分,由于在较低高度下目标在视场中占据较大范围,因此在 50 m 高度时没有添加树木目标。文中将以图 3 所示的数据对后续算法进行说明和验证。

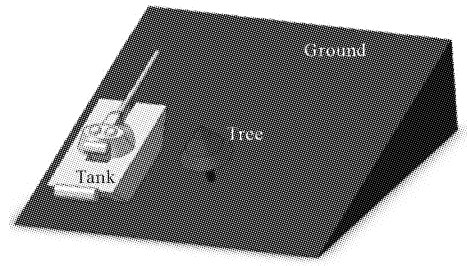


图 2 扫描区域模型

Fig.2 Scanning area model

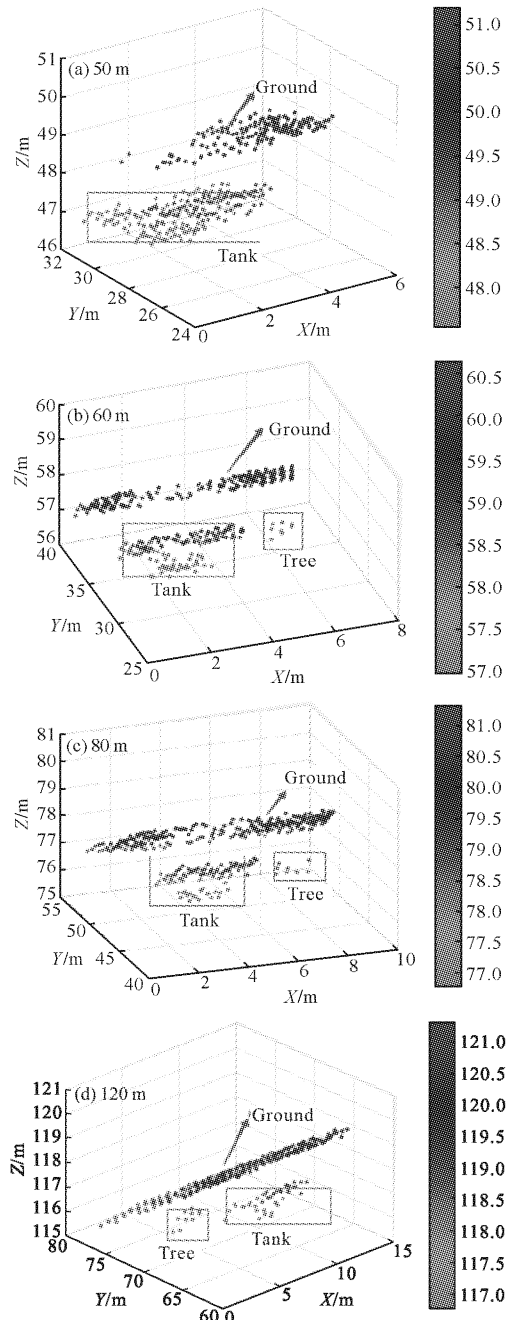


图 3 三维线阵雷达点云图

Fig.3 3D point cloud of line array LiDAR

2 线阵激光雷达目标提取算法

2.1 地面背景的提取

在三维空间中,背景与目标之间的区别可以由高度的变化直接体现出来,也就是说扫描区域中高度变化越平坦且高度较低,则是地面的可能性就越大,据此,提出了基于高度与梯度组合阈值分割算法对点云中的地面点进行提取。

设三维点云中对应的高度数据为:

$$H=\{Z_{ij}, i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, n\} \quad (2)$$

式中: Z_{ij} 为点云在三维坐标系下对应的Z轴数据; H 可以表示为大小 $m \times n$ 的二维高度像,通过公式(3)和公式(4)求得高度像的梯度 G :

$$\begin{cases} G_x=\{H[i+1, j]-H[i-1, j]\}/2 \\ G_y=\{H[i, j+1]-H[i, j-1]\}/2 \end{cases} \quad (3)$$

$$|G(i, j)|=\sqrt{G_x^2+G_y^2}, i=1 \sim m; j=1 \sim n \quad (4)$$

G 直接反映了扫描区域高度变化和地形起伏程度,数值越小表示越平坦。使用 3×3 大小的窗口对梯度 G 和高度 H 进行均值滤波,得到 G_m 与 H_m ,再对数据进行归一化处理:

$$G_{norm}(i, j)=\frac{G_m(i, j)-G_{min}}{G_{max}-G_{min}} \quad (5)$$

$$H_{norm}(i, j)=\frac{H_m(i, j)-H_{max}}{H_{max}-H_{min}} \quad (6)$$

式中: H_{max} 、 G_{max} 、 H_{min} 、 G_{min} 代表高度像 H_m 与梯度像 G_m 中最大值与最小值。由于梯度像 G_m 还反映目标的边缘特征,这就导致了在具有“平顶”特征的目标上方梯度值也会很小。图4为120 m高度下三维点云数据(图3(d))中所对应的高度梯度值,图4(a)可以看出在坦顶部中间区域梯度值较小,如果直接使用梯度特征进行分类容易导致地面点的错误分类。为了

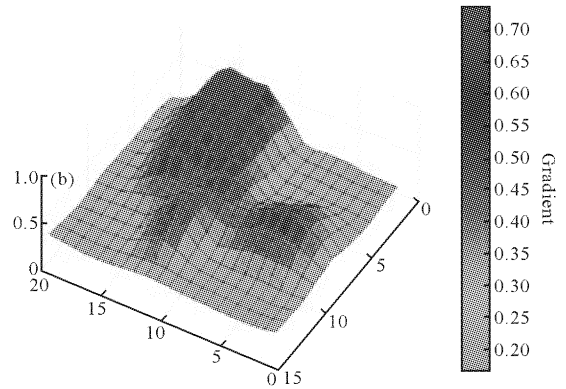


图4 高度的梯度像(G_m)

Fig.4 Gradient image of altitude (G_m)

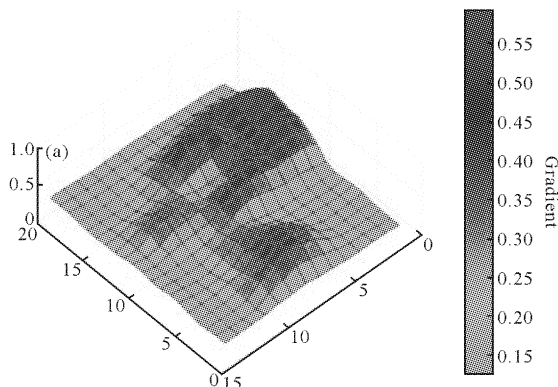
降低此影响使用形态学滤波对 G_m 用 3×3 子窗口作一次闭运算^[11],经闭运算滤波后从图4(b)可以看出在坦克顶部的梯度值被“抬”了上来。在对梯度数据处理时,滤波窗口的大小选择 3×3 ,主要原因在于激光雷达所获得的高度像与梯度像较小,如果使用较大的滤波窗口,对于图像边缘的数据要作额外处理,从而增加了计算的复杂度,因此选用最小尺寸的窗口进行滤波处理。

梯度特征虽然反映了地面的波动情况,但是无法反映高度。随着末敏弹工作高度的降低,视场中的目标(或障碍物)比例也会变大,这就使得在目标上方有较大区域梯度值较低的情况,如果只使用梯度特征势必会造成错误分类。因此文中引入了高度特征对上述情况进行修正,与梯度特征组合构成阈值函数来提高分割的正确率。

引入线性组合函数:

$$g(i, j)=\lambda_1 G_{norm}(i, j)+\lambda_2 H_{norm}(i, j) \quad (7)$$

式中: λ_1 、 λ_2 为组合系数,且 $\lambda_1+\lambda_2=1$,由于在小视角条件下梯度更能反映地面背景与目标的区别,因此作为主要指标,而高度作为辅助指标,组合系数的选取 $\lambda_1=0.7$ 、 $\lambda_2=0.3$ 。函数取值范围在[0 1]区间,数据越靠近0,则表示该点是地面点的可能性就越高,因此只要设置一个阈值 q ,当满足 $g(i, j)<q$ 时将点云中的数据点划分到地面点中,从而实现地面背景的提取。图5是对图3经上述分割算法处理得到的地面点(红色点所示)。可以看出:在高度为80 m与120 m时目标在视场中比例相对较小,因此可以提取出较多地面点;而在50 m与60 m时,随着目标在视场中比例的增大,提取的地面点也随之减少,但是地面点的数



量依然可以用于后续的地面拟合与坡度估计。

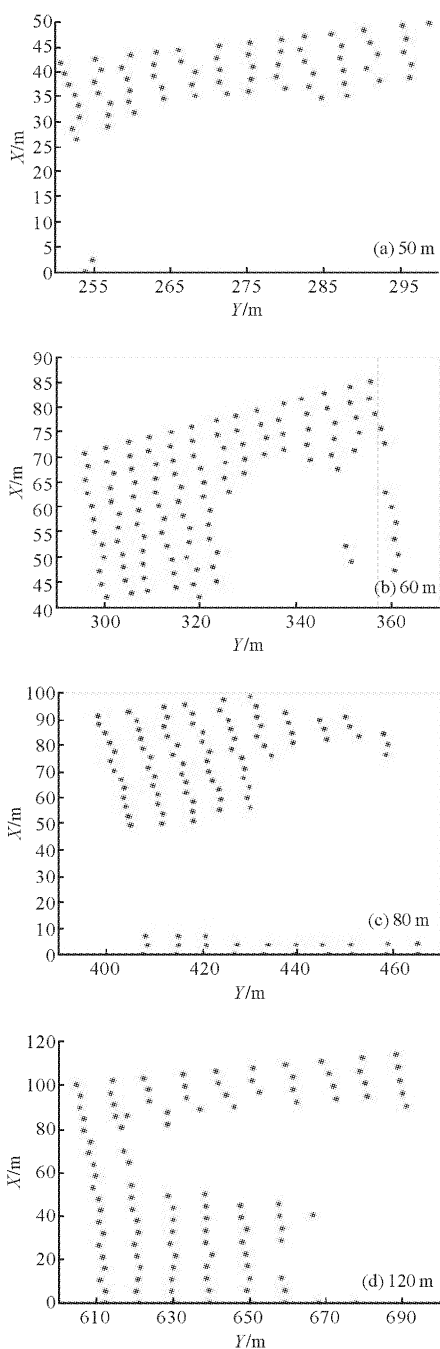


图 5 提取出的地面点
Fig.5 Extracted ground points

2.2 地面坡度的估计与调整

由于文中采用的目标提取算法对坡度敏感,因此必须对分离出的地面点进行地面坡度估计,对有坡度的地面情况进行坐标变换,变换到以地面为基准的正投影点云。具体步骤如下。

(1) 对第 2.1 节提取出的地面数据点使用最小

二乘法进行第一次平面拟合,所拟合的平面为:

$$z_0 = a_0x + b_0y + c_0 \quad (8)$$

(2) 计算出各点与拟合平面距离 h_i , 根据公式(9)计算出 h_i 的标准差:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}} \quad (9)$$

式中:

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (10)$$

设置阈值 T , 如果提取出的地面点与拟合平面距离值大于阈值, 则删除该点, 由于测量误差的存在, 所以再增加一个置信区间, 并假定允许 5% 具有标准偏差的数据被拒绝, 则阈值为:

$$T = \bar{h} + 1.62\sqrt{2} \delta \quad (11)$$

使用剩余点再重新进行平面拟合, 同时也进一步避免了非地面点被误分为地面点对平面拟合的影响, 最终得到的地面方程:

$$z = ax + by + c \quad (12)$$

(3) 使用罗德里格旋转矩阵变换激光点云数据使得地面法向量与 Z 平行, 如图 6 所示。平面法向量 \bar{N} 为步骤(2)拟合得到的平面法向量, 旋转轴为 $\bar{R} = \bar{N} \otimes \bar{Z}$, 其中 \bar{Z} 代表坐标系 Z 轴单位向量, 旋转角为 θ 大小为平面法向量与 Z 轴的方向余弦值, 旋转矩阵为:

$$R = (\cos\theta)I + \sin\theta[u]_{\times} + (1 - \cos\theta)u \otimes u \quad (13)$$

式中: $[u]_{\times}$ 为旋转轴的叉乘矩阵; I 为单位矩阵。

(4) 通过公式(13)最终得到如图 6 右侧 xyz 坐标系下的三维点云顶视图。

$$Img = -(Img_o \cdot R - H_g) \quad (14)$$

式中: H_g 为地面与末敏子弹的高度值。

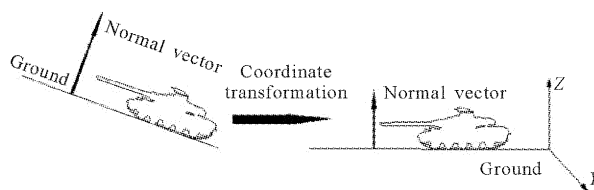


图 6 坡度地面调整示意图

Fig.6 Diagram of slope ground adjustment

2.3 基于自动区域生长的目标分割算法

经转换后, 点云数据中的高度数据是相对地面

的高度,所对应的二维高度像直接反应了扫描区域的高度变化的真实值,并且在二维高度像中,可以根据未敏弹的离地高度大概估计出实际目标在高度像中所占像素的大小。据此根据目标大小与高度设定搜索窗口,通过计算窗口中的平均距离来确定种子点。

设经过调整后的点云的高度数据为:

$$H' = \{z_{ij}', i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, n\} \quad (15)$$

种子点的选取通过一个 $n \times n$ 大小的搜索窗口进行搜索,窗口的大小依据不同的高度选取。由此可得到该窗口中的高度均值为:

$$M(H'(i, j)) = \frac{\sum_{(x,y) \in W} H'(x, y)}{n \times n} \quad (16)$$

式中: $H'(x, y)$ 为窗口内的距离数据; n 为窗口大小,当滑动窗口靠近目标时,窗口中的平均距离越接近装甲目标的平均高度。

当滑动窗口的平均高度满足:

$$h_a \leq M(H'(i, j)) \leq h_b \quad (17)$$

将 $H'(i, j)$ 作为种子 S , 把种子点与相邻点的高度变化作为区域生长条件, 该条件满足:

$$\begin{cases} |S - S_k| < D \\ S_k > G \end{cases} \quad (18)$$

式中: S_k 为与种子点 S 的相邻数据; D 为相邻两点的高度差阈值; G 为高度阈值。即, 相邻点既要满足与种子的高度差小于 D 又要高于阈值 G 。具体算法如下:

- (1) 用 $n \times n$ 大小的滑动窗口遍历高度像, 计算窗口高度均值, 当满足公式(17)阈值条件的作为种子点;
- (2) 从种子点开始, 搜索周围八邻域的高度数据, 判断是否满足生长条件公式(18), 如果满足则标记;
- (3) 更新种子, 将标记的点当作新的种子, 如果种子点有增加则回到步骤(2), 若无则完成目标分割。

2.4 基于几何特征的装甲目标提取

通过区域增长法分割出的目标还需要对目标进一步判别方能完成装甲目标的检测, 因此引入几何相似度作为判决准则。

几何相似度:

$$p = (s_i + s_j + s_k) / 3 \quad (19)$$

式中: s_i, s_j, s_k 分别代表了模拟装甲目标的长、宽相似比和平均高度相似比。

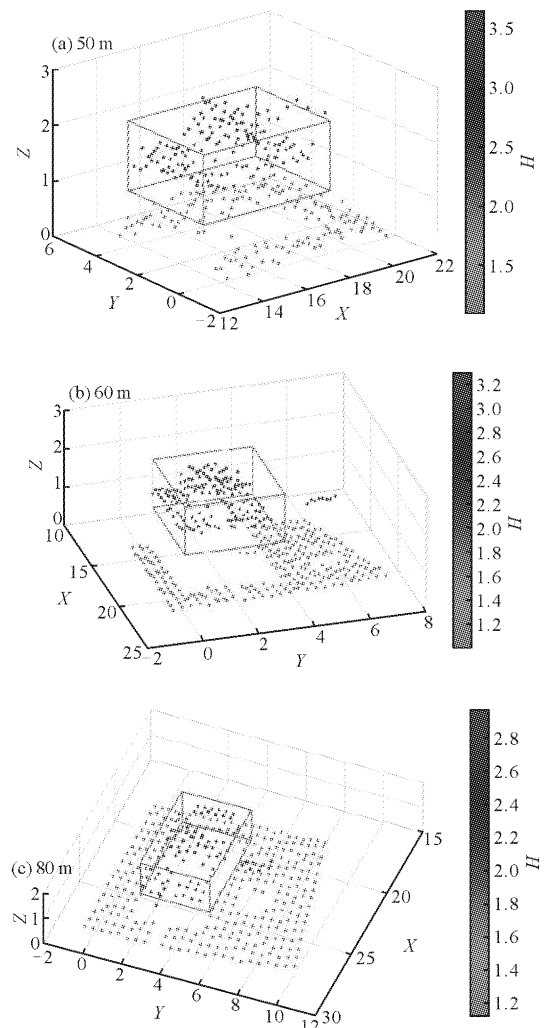
$$s_i = \begin{cases} \frac{L}{L_s} & (L < L_s) \\ \frac{L_s}{L} & (L > L_s) \end{cases}$$

$$s_j = \begin{cases} \frac{W}{W_s} & (W < W_s) \\ \frac{W_s}{W} & (W > W_s) \end{cases}$$

$$s_k = \begin{cases} \frac{EH}{H_s} & (H < H_s) \\ \frac{H_s}{EH} & (H > H_s) \end{cases} \quad (20)$$

式中: L_s, W_s, H_s 分别为装甲目标模型的长、宽和平均高度; L 与 W 是在三维点云中对应 XY 平面数据的最小外接矩形特征; 若几何尺寸相似度 $P \geq 75\%$, 则认为提取出的目标为装甲目标。

图 7 为最终的处理结果, 可以看出: 通过对地面的坡度估计与补偿, 可以将点云转换到以地面为基准的顶视点云图, 从而降低目标提取的困难; 从表 2 可以看出, 所提取的几何特征与模型的几何特征相似度均大于 75%, 这些参数可以作为装甲目标提取的依据, 并且通过几何特征的筛选将障碍目标正确



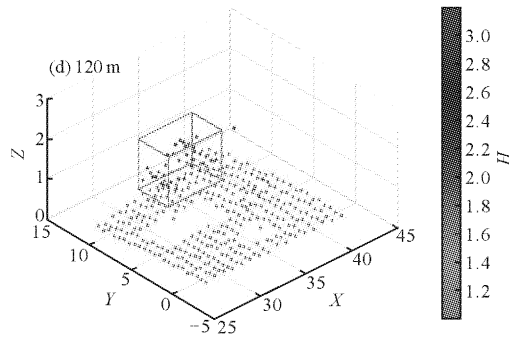


图 7 最小外接矩提取结果

Fig.7 Extraction of target by Minimum Bounding Rectangle

的剔除;在高度较低时由于目标在视场中比例较大,因此在 50 m 与 60 m 时几何相似度较高,而在 120 m 时,由于此时点云密度变稀疏而导致提取的长、宽特征小于在低高度条件下的几何尺寸,但几何相似度依然可以作为装甲目标提取的依据。

表 2 最小面积矩阵与相似度

Tab.2 Minimum area bounding rectangle and similarity degree

Height/m	L/m	W/m	EH/m	P
50	6.17	3.01	1.75	95%
60	5.96	2.72	1.85	91%
80	7.21	2.06	1.91	88%
120	5.61	2.74	2.04	87%

注:L、W 为最小外接矩的长和宽;EH 为分割区域的平均高度

文中利用 MATLAB 在主频 3.2 G (Inter i5-6500)的 PC 机上,用上述方法处理文中所用的数据最终耗时约 32 ms。如果使用性能更好的软硬件平台进行运算,将大幅提高计算速度,因此可以满足实时性要求。

3 结论

文中针对现有探测体制的末敏弹难以应付最新复杂战场环境的缺点,提出了一种运用线阵激光成像雷达提取地面装甲目标的方法。仿真结果表明:

(1) 方法适于新型末敏弹的弹载环境,能够在 50~120 m 高对地面装甲目标进行提取。

(2) 根据应用场景提出了基于高度、梯度组合阈值分割算法,可以快速地提取出地面点。

(3) 考虑了在斜坡场景下的情况,通过坐标变换消除坡度的影响,并通过目标的几何特征实现了装甲目标的准确提取。

(4) 考虑了系统对实时性的要求,将三维点云目标提取问题部分简化到二维的图像处理上,因此计算复杂度小,从而提高了计算速度。

(5) 由于弹载的体积限制,线阵激光雷达的线元数量较少,如何在低密度点云条件下对扫描区域缺失的信息进行有效还原仍将是下一步研究方向。

参考文献:

- [1] Zhang Jun, Liu Rongzhong, Guo Rui, et al. Experimental study on infrared characteristics of terminal-sensitive projectile at steady-state scanning stage [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2876-2881. (in Chinese)
张俊,刘荣忠,郭锐,等.末敏弹稳态扫描段红外特性的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 2876-2881.
- [2] Yu Jiaqi, Yang Shuxin, 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.
- [3] Wang Shuai, Sun Huayan, Guo Huichao. Overlapping region extraction method for laser point clouds registration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (S1): S126002. (in Chinese)
王帅,孙华燕,郭惠超.适用于激光点云匹配的重叠区域提取方法[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(S1): S126002.
- [4] Tian Qinghua, Bai Ruilin, Li Du. Point cloud segmentation of scattered workpiece based on improved euclidean clustering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121503. (in Chinese)
田青华,百瑞林,李杜.基于改进欧式聚类的散乱工件点云分割[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121503.
- [5] William R Green, Hans Grobler. Normal distribution transform graph based point cloud segmentation [C]//Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mecha-tronics International Conference, 2015: 54-59.
- [6] Mossman F. Interlacing self-localization moving object tracking and mapping for 3D range sensors [D]. Germany:

- KIT Science Publishing, 2013.
- [7] Zhang Mingfang, Fu Rui, Guo Yingshi, et al. Road segmentation method based on irregular three dimensional point cloud[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2010, 39(5): 979–984. (in Chinese)
张名芳, 付锐, 郭应石, 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), 2010, 39(5): 979–984.
- [8] Wang Keyong, Song Chengtian, Deng Jiahao. Block feature extraction method for target detection in imaging fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 979–984. (in Chinese)
王克勇, 宋承天, 邓甲昊. 用于成像探测目标识别的块特征提取方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 979–984.
- [9] Ma Chaojie, Yang Hua, Li Xiaoxia, et al. Implementation of automatic target recognition by imagine Ladar in complex scenes [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1714–1720. (in Chinese)
马超, 杨华, 李小霞, 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): 1714–1720.
- [10] Huang Tao, Hu Yihua, Zhao Gang. Target extraction and classification base on imaging LADAR range image [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2011, 30(2): 170–183. (in Chinese)
黄涛, 胡以华, 赵钢. 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): 170–183.
- [11] Palm H C, Havardsholm T V, Ajer H, et al. Extraction and classification of vehicles in Ladar imagery[C]//Processing of SPIE Defense, Security, and Sensing Baltimore, USA: International Society for Optics and Photonics, 2009,7382: 738203.
- [12] Liu Zhiqing, Li Pengcheng, Guo Haitao, et al. Airborne LiDAR point cloud data classification based on relevabce vector machine [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130006. (in Chinese)
刘志青, 李鹏程, 郭海涛, 等. 基于相关向量机的机械 LiDAR 点云数据分类[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S130006.
- [13] Liu Zhiqing, Li Pengcheng, Chen Xiaowei, et al. Classification of airborne LiDAR point cloud data 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.
- [14] Hui Zhenyang, Hu Youjian, Review on morphological filtering algorithms based on LiDAR digital elevation model construction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53:080001. (in Chinese)
惠振阳, 胡友健. 基于 LiDAR 数字高程模型构建的数学形态学滤波方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53: 080001.