

# 采用投影轮廓特征的激光雷达快速目标识别

郭裕兰 鲁敏 谭志国 万建伟

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要** 激光雷达可以获得目标的三维形状信息, 已成为目标识别领域新的研究热点。针对传统匹配识别算法计算量大的问题, 提出了一种快速的激光雷达目标识别方法。采用由粗到精的策略, 提出了一种新的点云正交投影轮廓特征(PCF)实现模型的快速预选, 在此基础上利用迭代最近点(ICP)算法将目标与模型点云精确匹配, 并综合利用特征匹配和点云匹配信息构建相似性度量实现目标识别。采用 25 类地面装甲目标在 96 个不同视角下的点云数据进行实验, 结果表明该算法的运算效率远优于逐一匹配法, 且对目标姿态估计误差和目标遮挡具有很强的稳健性, 具有较好的综合性能和应用推广价值。

**关键词** 激光光学; 激光雷达; 目标识别; 投影轮廓特征; 迭代最近点

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0209003

## Fast Target Recognition in Ladar Using Projection Contour Features

Guo Yulan Lu Min Tan Zhiguo Wan Jianwei

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Ladar has become a hot research topic in target recognition community for its ability to capture the object's explicit 3D shape. To avoid the heavy computation burden faced by the traditional recognition methods, a fast ladar target recognition method is proposed. Adopting the coarse-to-fine strategy, the models are quickly pre-screened by using the proposed orthogonal projection contour features (PCF). Then the target is registered with the hypothesis models precisely by using the iterative closest point (ICP) method. Finally, the similarities between the target and models are calculated by integrating the features matching and points matching results. Therefore, the target is recognized to the model who owes the highest similarity. The experiments are performed using the point-clouds of 25 ground targets under 96 different viewing angles. The results show that the proposed method outperforms the existing methods greatly in the term of computation efficiency, and it is very robust to orientation error and occlusion. Thus, this method is the state-of-the-art and have a high application potential.

**Key words** laser optics; ladar; target recognition; projection contour feature; iterative closest point

**OCIS codes** 100.3008; 100.4999; 150.1135; 150.6910; 280.3640

## 1 引言

工作在红外波段的激光雷达<sup>[1~3]</sup>兼具红外成像和微波雷达的优点, 可实现高分辨率的距离-角度-角度成像, 从而获得目标的三维几何形状信息(三维点云)<sup>[4]</sup>, 同时主动成像保证了其全天候工作能力<sup>[5]</sup>。此外, 激光雷达成像不受光照、视点和尺度变

化的影响, 具有较强的抗伪装能力和丛林穿透能力<sup>[6]</sup>, 因而在自动目标识别等军事应用中具有良好前景, 已成为各军事强国研究的热点<sup>[7]</sup>。

激光雷达三维目标识别的基本思路是将分割后的目标与模型点云进行匹配以获得目标的类别<sup>[8]</sup>。Mahalanobis 等<sup>[9]</sup>提出了基于体相关器的方法, 通

收稿日期: 2011-07-19; 收到修改稿日期: 2011-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(60972114), 中国博士后科学基金(20100481511)和国家留学基金委 CSC 奖学金(留金发[2011]3005)资助课题。

作者简介: 郭裕兰(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达信息处理及自动目标识别等方面的研究。

E-mail: yulan.guo@nudt.edu.cn

导师简介: 万建伟(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代信号处理方面的研究。E-mail: kermitwjw@139.com

过计算目标点云与体相关器之间的相关度完成识别,但体相关器建立较为困难。Vasile 等<sup>[10]</sup>通过计算目标和模型点云的 spin image 局部特征<sup>[11]</sup>并依据特征匹配获得目标与模型之间的变换关系,进而采用迭代最近点(ICP)算法<sup>[12]</sup>实现精确匹配以完成目标识别。该方法不依赖于目标的姿态,识别率较高、虚警率较低,但其识别时间长,且 spin image 特征的计算要求点云均匀分布并具有较高的分辨率。Grönwall 等<sup>[13]</sup>采用矩形拟合方法估计目标姿态,进而将目标与模型匹配实现识别,该方法识别率较高,但同样面临识别时间较长的问题。

针对现有算法普遍存在的计算量大和识别时间较长的问题,本文提出了一种高效的目标识别算法。该方法采用投影轮廓特征(PCF)实现模型的预选,极大地减少了识别所需的时间;综合利用投影轮廓特征所反映的目标整体信息以及点云所代表的细节信息构造相似度实现目标识别,大大提高了算法对外形相似目标的区分能力;此外,算法对目标姿态估计误差和遮挡具有较强的稳健性。采用 25 类地面装甲目标的 2400 个距离图像数据进行实验,验证了算法的有效性、高效性和稳健性。

## 2 投影轮廓特征提取

激光雷达获得的距离图像也称为深度图像,可采用伪灰度、点云或者网格的形式表示<sup>[14]</sup>。伪灰度表示的距离图像是一个三维矢量  $[u_i, v_i, r_i]$  ( $i = 1,$

$2, \dots, N$ ),其中  $u$  和  $v$  为像素坐标,  $r$  为传感器焦平面到目标成像点之间的距离,  $N$  为总的像素数。结合成像点的距离和角度信息经坐标变换可获得点云表示的距离图像,它是一个三维矢量  $[x_i, y_i, z_i]$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ),其中  $x$ 、 $y$  和  $z$  为成像点的三维空间坐标。

激光雷达获得的点云数据精细地反映了目标的三维外形信息[图 1(a)为 M60 坦克在某视点下的距离图像,伪彩色显示],因而非常有利于目标识别的实现,但三维数据运算量大,识别时间较长,不能很好地满足实时系统的应用需求。然而,当实现目标姿态估计和校正<sup>[15]</sup>后,尽管自遮挡使得数据不完全,但其点云在三个坐标平面的投影依然很好地体现了目标的外形信息,如图 1(b)、(c)、(d)所示。基于此,本文提出了一种投影轮廓特征提取方法,并据此给出了一种由粗到精的识别策略,以提高算法的运行效率。下面以 XY 平面为例,对投影轮廓特征进行分析。

对于包含  $N$  个点的点云  $\mathbf{P}$ ,将其投影到 XY 坐标平面,得到投影点云  $\mathbf{P}_{XY}$ ,  $\mathbf{P}_{XY}$  中点云的分布体现了俯视时目标的形状信息。

以参考点  $O_i$  (在此选为点云  $\mathbf{P}_{XY}$  的质心)作为坐标原点,以 X 轴方向为正方向建立极坐标系,因而  $\mathbf{P}_{XY}$  中的任一点  $p_i$  在极坐标系下均可表示为  $(r_i, \theta_i)$ ,其中  $r_i$  为该点与参考点的距离,  $\theta_i$  为该点与参考点连线同 X 轴正方向之间的夹角 ( $\theta_i \in (-\pi, \pi]$ )。

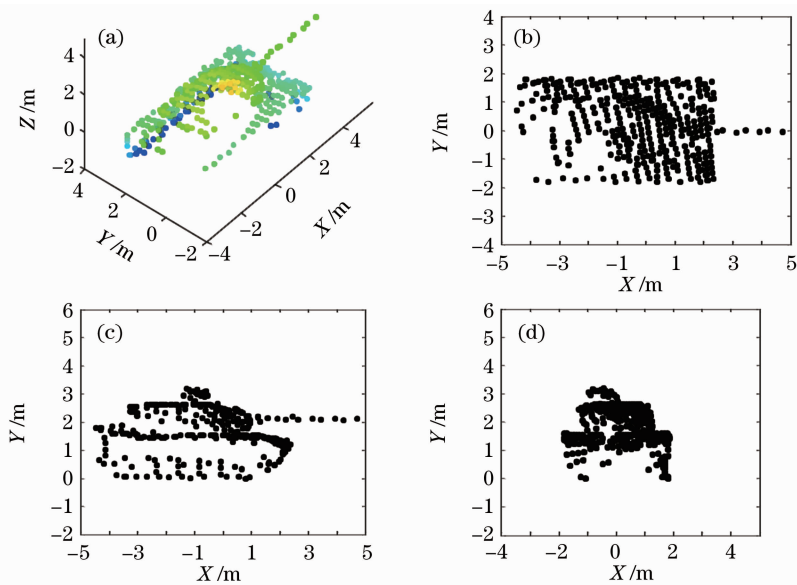


图 1 M60 坦克距离图像及其正交投影。(a)距离图像;(b) XY 平面投影点云;(c) XZ 平面投影点云;(d) YZ 平面投影  
Fig. 1 Range image of tank M60 and its orthogonal projections. (a) Range image; (b) projections on plane XY; (c) projections on plane XZ; (d) projections on plane YZ

将  $\theta_i$  离散化成  $N_\theta$  份, 即角度量化间隔  $\Delta\theta$  为

$$\Delta\theta = 2\pi/N_\theta. \quad (1)$$

则第  $k$  个角度区间  $\Theta_k$  为

$$\Theta_k = \{\theta \mid -\pi + (k-1)\Delta\theta < \theta \leq -\pi + k\Delta\theta\},$$

$$k = 1, 2, \dots, N_\theta. \quad (2)$$

以  $\theta$  落在角度区间  $\Theta_k$  内的点的最大距离值作为 PCF 的第  $k$  个值, 即

$$f_{\text{PCF}}(k) = \max_{p_i \in P_{\text{XY}}, \theta_i \in \Theta_k} (r_i), \quad k = 1, 2, \dots, N_\theta. \quad (3)$$

上述过程将二维点云分布的轮廓转化为一维的

描述向量 PCF。

图 2 所示为 M60 坦克完整模型点云、某视点下距离图像点云以及在 XY 平面的 PCF ( $N_\theta$  取为 72)。总体而言, 目标在 XY 平面的 PCF 能与模型 PCF 较好地吻合。此外, 目标 PCF 在 0~20 点之间存在较多的零值, 这主要是由于自遮挡导致了 M60 坦克距离图像的不完整, 使得部分点云不可见[见图 2(b)]而造成的。

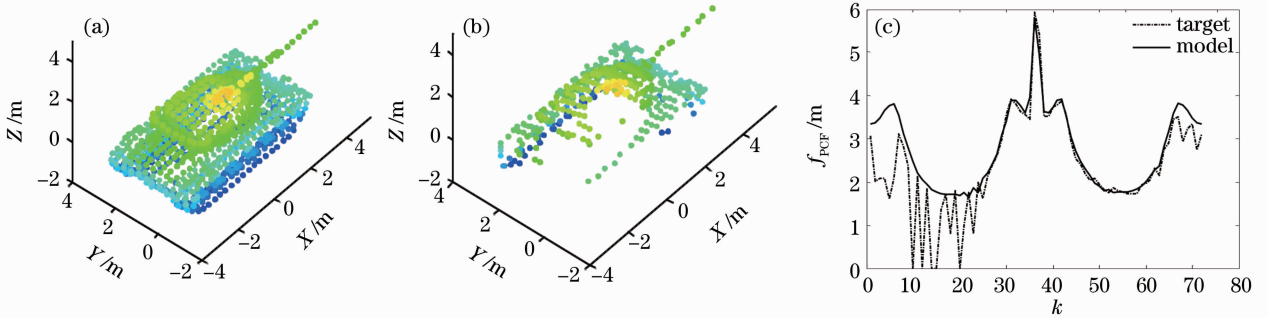


图 2 M60 坦克点云及其在 XY 平面的 PCF。(a) 模型点云; (b) 距离图像点云; (c) PCF

Fig. 2 Point-clouds and their PCFs on plane XY of tank M60. (a) Model's point-cloud; (b) range image; (c) PCF

## 3 目标识别算法

### 3.1 基于 PCF 的模型预选

获得目标距离图像后, 提取其在某坐标平面的 PCF, 进而计算其与数据库中对坐标平面模型 PCF 之间的距离。PCF 之间的距离  $d$  定义为

$$d = \frac{1}{N'_\theta D} \sum_{i=1}^{N_\theta} \omega(i) \| f_{\text{PCF}_t}(i) - f_{\text{PCF}_m}(i) \|. \quad (4)$$

式中  $f_{\text{PCF}_t}$  和  $f_{\text{PCF}_m}$  分别为目标和模型的 PCF,  $N_\theta$  为 PCF 点数,  $D$  为模型的最大尺寸, 用于对距离进行归一化,  $\|\cdot\|$  表示取范数。  $N'_\theta$  为  $f_{\text{PCF}_t}$  中不为 0 的点数, 权值  $\omega(i)$  在  $f_{\text{PCF}_t}(i)$  为 0 时取为 0, 否则为 1。这是由于距离图像分辨率较低以及遮挡等的影响, 会使得在某些角度区间  $\Theta_i$  中不存在投影点, 从而导致该处的  $f_{\text{PCF}_t}(i)$  为 0 (见图 2), 为尽量减少遮挡的影响, 值为 0 的  $f_{\text{PCF}_t}(i)$  将不参与距离的计算。

由于遮挡很难同时使得目标在三个平面的投影轮廓都严重偏离其模型值, 因而综合利用三个坐标平面的 PCF 获得目标与模型之间的 PCF 距离有望进一步减小遮挡和背景干扰的影响。文中以目标与模型在 XY, XZ 和 YZ 平面 PCF 距离的均值作为目标与模型之间的 PCF 距离。

### 3.2 基于特征距离和点云匹配的目标识别

通过 PCF 获得候选模型后, 采用 ICP 算法将目

标点云  $P$  与模型点云  $M$  精确匹配。依据最近点方法获得对应点对并计算目标与模型之间的匹配误差  $e$ , 进而采用单位四元数法计算目标与模型之间的三维刚体变换, 迭代上述过程直到匹配误差趋于稳定以获得最小二乘意义下的最优匹配。

对于匹配后的目标和模型点云, 若对应点对之间的距离小于模型点云的分辨率, 则认为是一个匹配点对, 统计得到匹配点对的数量  $N_c$ 。定义目标与模型之间的点云匹配度为

$$l_m = \frac{N_c}{N_e}, \quad (5)$$

式中  $N$  为目标点云包含的点数。对于一个正确的匹配, 匹配误差  $e$  较小而匹配点对数  $N_c$  较大, 此时  $l_m$  较大, 故  $l_m$  能很好地度量目标与模型之间的点云匹配程度。

综合利用投影轮廓特征距离和点云匹配度构造点云与模型的相似度, 即

$$l = \frac{l_m}{d} = \frac{N_c}{N_e d}. \quad (6)$$

该相似度  $l$  综合了目标表面轮廓所反映的整体信息和目标点云所代表的细节信息, 因而具有较强的鉴别能力。

综上, 得到目标识别算法流程如下:

1) 离线构建感兴趣目标的完整三维模型点云

$M$ , 计算模型点云在  $XY, XZ$  和  $YZ$  三个坐标平面的 PCF, 并存储在模型库中。

2) 在线计算目标点云在三个坐标平面的 PCF, 并计算目标点云与模型库中各个模型点云 PCF 之间的距离。对这些距离进行排序, 选择与目标 PCF 的距离不超过最小距离  $\eta$  倍的模型作为候选模型。

3) 采用 ICP 算法将目标点云与候选模型点云精确匹配, 采用(6)式计算目标与候选模型的相似度  $l$ , 以相似度  $l$  最大的模型定义目标所属的类别。

## 4 实验结果与分析

采用仿真的激光雷达距离图像对本文算法的性能进行评估, 并对结果进行讨论。采用激光雷达成像仿真系统得到包括 M1 坦克、T80 坦克、M29 装甲车和 BRDM3 装甲车在内的 25 类地面装甲目标的完整模型点云及其在 96 个不同视点下的距离图像,

因而测试数据总共包含 2400 个距离图像。实验中所有目标距离图像点数的均值为 734 点, 模型点数的均值为 1474 点。所有实验结果均在 Intel Core 2 2.33 GHz 处理器, 2 G 内存及 Windows XP 操作系统下采用 Matlab R2009a 编程测试得到。

### 4.1 模型预选的有效性

假定目标方位、俯仰和横滚角的姿态估计误差均服从均值为 0, 标准差为  $3^\circ$  的正态分布, 以上述 25 类目标在 96 个视点下的共 2400 个距离图像点云作为输入。采用 PCF 进行模型预选, 分析当预选门限  $\eta$  变化时, 目标所属模型在预选模型中被正确召回的概率(召回率  $R$ ), 以及预选模型数  $n$  的变化情况, 结果如图 3 所示。实验中发现 PCF 点数  $N_\theta$  在  $[72, 720]$  区间取值时, 对  $R$  和  $n$  的影响很小, 即算法对  $N_\theta$  具有很强的适应性和稳健性, 为减小运算量, 将  $N_\theta$  设置为 72。

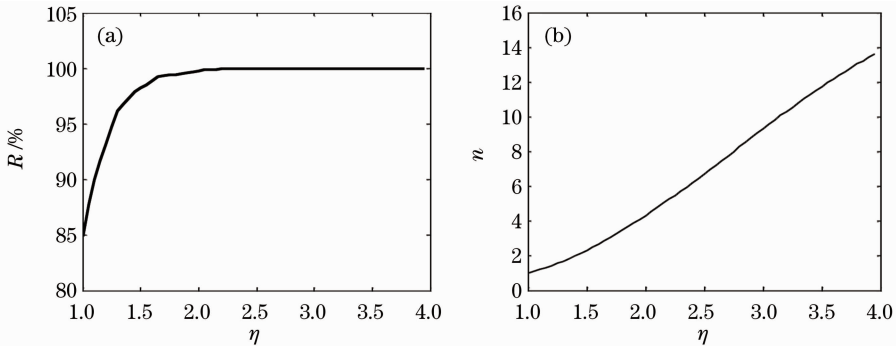


图 3 模型预选的有效性分析。(a) 召回率与门限的关系; (b) 预选模型数与门限的关系

Fig. 3 Efficiency analysis of model pre-screening. (a) Recall rate versus threshold; (b) number of selected models versus threshold

由图 3 可以得到以下结论:

1) 当  $\eta$  开始增大时, 召回率  $R$  急剧上升, 因而有利于提高后续匹配识别的实现。同时, 预选模型数  $n$  也线性增加, 从而导致整个识别时间的增加, 故需要根据识别率要求和识别时间折衷选择恰当的预选门限  $\eta$ 。

2)  $R$  增加的速度远远快于  $n$ , 当  $\eta$  为 1.25 时, 召回率  $R$  已达到 95%, 而平均预选模型数  $n$  只有 1.54; 而当  $\eta$  为 2.5 时,  $R$  已达到 100%, 即每一次都能正确地将目标所属模型包含在预选模型中, 此时对应的  $n$  为 6.72, 远小于总的模型数 25, 故模型预选能大大减少目标距离图像与模型匹配所需的时间。

3) 在不同的视点下, PCF 均能有效地实现模型预选。尽管不同的视点会使得目标被遮挡的部位不

一样, 使得距离图像点云在视点间有很大的差异, 但是自遮挡很难使得距离图像点云在三个平面的投影轮廓都严重偏离真实值。文中以三个平面的 PCF 距离均值作为目标与模型的 PCF 距离, 在一定程度上减少了视点变化带来的影响。

### 4.2 目标识别性能

假定目标方位、俯仰和横滚角的姿态估计误差均服从均值为 0, 标准差为  $3^\circ$  的正态分布, 以上述 25 类目标在 96 个视点下的共 2400 个距离图像点云作为输入。分别设定预选门限  $\eta$  为 2.50, 1.60 和 1.25, 依图 3 可知此时对应的  $R$  分别为 1.00, 0.99 和 0.95, 对应的  $n$  分别为 6.72, 2.66 和 1.54。将本文方法与采用 ICP 逐一进行匹配的识别算法(记为逐一匹配法)进行对比, 统计每种方法对各类目标的正确识别率  $r$  和识别时间  $t$ , 结果如图 4 所示。



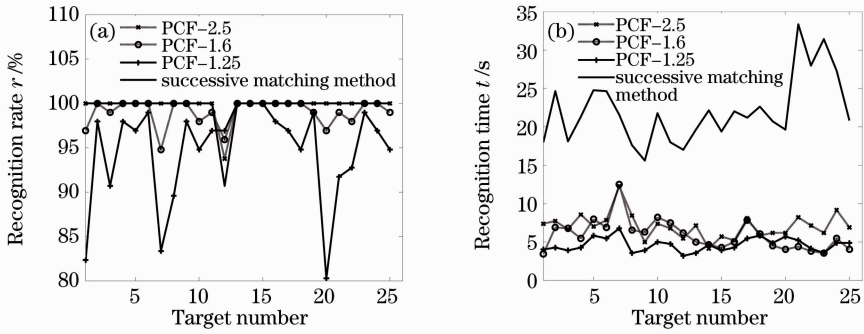


图4 不同方法的识别率(a)和识别时间(b)

Fig. 4 Recognition rate (a) and time (b) of different methods

由图4可得到如下结论：

1) 当  $\eta$  取为 2.5 时, 本文方法性能优于逐一匹配法, 本文方法和逐一匹配法对 25 类目标总的平均识别率分别为 99.75% 和 99.62%。两种方法对第 12 类目标的识别率均有所下降的原因在于第 12 目标(T80 坦克)与第 9 类目标(T62 坦克)的外形极为相似, 只有油箱和炮管等的细微差别, 因而容易导致错误识别。但对于第 12 类目标本文方法的识别率(93.75%)明显高于逐一匹配法(90.63%), 这主要得益于本文方法综合利用了 PCF 所代表的整体信息和点云匹配所代表的细节信息, 因而更有利于区分相似度高的目标。

2) 当  $\eta$  取为 2.5 时, 本文方法不仅识别率高于逐一匹配法, 而且识别时间还不到逐一匹配法的 1/3。而若将  $\eta$  取为 1.6 和 1.25, 则本文方法的识别时间将进一步降低, 分别约为逐一匹配法的 1/4 和 1/5, 且平均识别率依然能达到 99% 和 95%, 充分体现了本文方法的高效性和灵活性。

3) 本文方法性能的提升在于两个方面: 一是识别时间的减少。由于 PCF 提取的算法复杂度为  $O(N)$ , 远小于 ICP 匹配的运算量, 通过模型预选减少了进行 ICP 匹配模型数, 因而在相同的识别性能下, 识别时间明显减少。二是识别率的提高, 由于 PCF 反映的目标的整体信息, 与 ICP 算法结合能更加有效地区分相似度高的目标。

#### 4.3 对姿态估计误差的稳健性

以上述 25 类目标在 96 个视点下的共 2400 个距离图像点云作为输入, 设定预选门限  $\eta$  为 1.6, 假定目标方位、俯仰和横滚角的姿态估计误差均服从均值为 0, 标准差为  $0^\circ \sim 10^\circ$  的正态分布, 统计 25 类目标在不同姿态估计误差下总的平均识别率  $r$  如图 5 所示。

总体而言, 识别率随着目标姿态估计误差的增

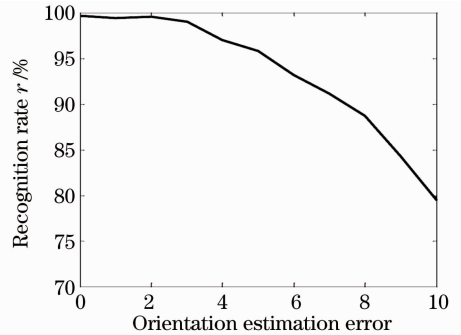


图5 不同目标姿态估计误差下的识别率  
Fig. 5 Recognition rate under different orientation estimation errors / ( $^\circ$ )

大而逐渐下降, 且在估计误差标准差大于  $4^\circ$  后, 识别率下降较快。若采用文献[15]提出的投影点云密度熵方法进行目标姿态估计, 其误差标准差基本在  $3^\circ$  以内, 因而由图 5 可知此时识别率依然可以达到 99%。即使估计误差标准差达到  $10^\circ$ , 目标识别率也能保持在 80% 以上, 因而本文算法对目标姿态估计误差具有较强的稳健性。

#### 4.4 对目标遮挡的稳健性

假定目标方位、俯仰和横滚的姿态估计误差均服从均值为 0, 标准差为  $3^\circ$  的正态分布, 以上述 25 类目标在 96 个视点下的共 2400 个距离图像点云作为输入, 设定预选门限  $\eta$  为 1.6。为模拟遮挡情形, 对于点云  $P$ , 在其中随机选取一个点  $p$ , 将点云  $P$  中与点  $p$  距离最近的  $N_d$  个点删除,  $N_d$  取目标总点数的  $0 \sim 80\%$  以模拟不同程度的遮挡, 统计不同遮挡下的平均识别率  $r$ , 得到图 6。

可知: 1) 总体而言, 随着遮挡率的上升目标识别率逐渐降低; 2) 当遮挡率不超过 30% 时, 算法性能受影响很小, 识别率均能保持在 97% 以上, 即使当遮挡率达到 50% 时, 识别率依然能达到 90%, 因而算法对遮挡具有较强的稳健性。算法受遮挡影响较小的原因在于: 一是在模型预选时综合利用了三

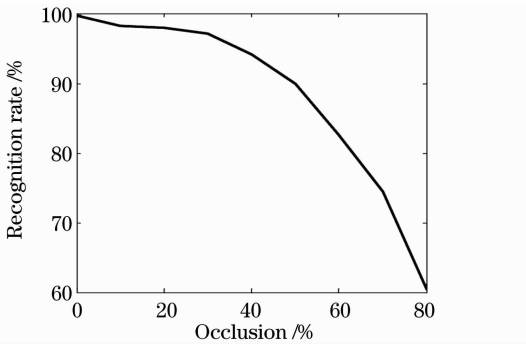


图 6 不同遮挡下的识别率

Fig. 6 Recognition rate under different occlusions

个平面的投影轮廓信息,而遮挡很难同时使得目标在三个平面的投影轮廓均严重偏离真实值;二是识别时综合利用了投影轮廓和点云匹配信息,而遮挡对点云匹配的影响不大,未被遮挡的点依然能很好地与模型点云精确匹配,因而此时得到的相似度依然可以很好地反映目标与模型的相似程度。

## 5 结 论

针对传统激光雷达目标识别算法运算量大,难以实时应用的缺点,提出了一种基于投影轮廓特征的快速目标识别算法。该方法首先提取目标距离图像点云的正交投影轮廓特征,并依此实现模型预选以减少后续匹配的时间,进而将目标与模型点云进行匹配,并综合利用特征匹配和点云匹配构建相似度完成目标识别。本文方法综合利用投影轮廓特征和迭代最近点算法实现目标识别,对外形相似目标具有较高的鉴别力,且对姿态估计误差和目标遮挡具有很强的稳健性。

## 参 考 文 献

1 Meng Zhaohua, Hong Guanglie, Hu Yifa *et al.*. Research on chirped amplitude modulation coherent lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2046~2050

孟昭华, 洪光烈, 胡以法 等. 啁啾调幅相干探测激光雷达关键技术研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2046~2050

2 Li Xiaofeng, Xu Jun, Zhang Shengxiu *et al.*. Edge detection algorithm of laser active imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1599~1601

李晓峰, 徐 军, 张胜修 等. 激光主动成像图像边缘检测技术[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1599~1601

3 Sun Jianfeng, Wei Jingsong, Liu Jinbo *et al.*. Target reconstruction algorithm for streak tube imaging lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 510~513

孙剑锋, 魏靖松, 刘金波 等. 条纹管激光成像雷达目标重构算法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 510~513

4 E. Sobel, J. Douglas, G. Ettinger. 3D ladar ATR based on recognition by parts[C]. *SPIE*, 2003, **5094**: 29~40

5 H. Garten, Y. Tal, Y. Swirski *et al.*. Recognition of tanks using laser radar (LADAR) images [C]. *SPIE*, 2004, **5613**: 166~176

6 T. Chevalier, O. Steinvall, H. Larsson. Performance of laser penetration through forest vegetation [C]. *SPIE*, 2007, **6550**: 1~11

7 J. F. Sun, W. Lu, Q. Li *et al.*. Correlation target recognition for laser radar[C]. *SPIE*, 2006, **6027**: 602731

8 J. Neulista, W. Armbruster. Segmentation, classification, and pose estimation of military vehicles in low resolution laser radar images[C]. *SPIE*, 2005, **5791**: 218~225

9 A. Mahalanobis, A. J. Nevel. Performance of multidimensional algorithms for target detection in ladar imagery[C]. *SPIE*, 2002, **4789**: 134~147

10 A. N. Vasile, R. M. Marino. Pose-independent automatic target detection and recognition using 3D laser radar imagery[J]. *Lincoln Laboratory J.*, 2005, **15**(1): 61~78

11 A. E. Johnson, M. Hebert. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal.*, 1999, **21**(5): 433~449

12 P. Besl, N. McKay. A method for registration of 3D shapes[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal.*, 1992, **14**(2): 239~256

13 C. Grönwall, F. Gustafsson, M. Millnert. Ground target recognition using rectangle estimation[J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2006, **15**(11): 3401~3409

14 A. S. Mian. Representations and Matching Techniques for 3D Free-Form Object and Face Recognition[D]. Perth: University of Western Australia, 2006. 2~3

15 Guo Yulan, Lu Min, Tan Zhiguo *et al.*. A novel method for ladar target orientation estimation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0414002

郭裕兰, 鲁 敏, 谭志国 等. 一种新的激光雷达目标姿态估计算法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0414002

栏目编辑:何卓铭