

一种新的激光雷达目标姿态估计算法

郭裕兰 鲁敏 谭志国 万建伟 左超

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 在激光雷达目标识别中, 通常需要估计目标姿态, 进而将点云和模型匹配以完成识别。对目标姿态与投影点云分布的关系进行了分析, 提取了投影点云密度熵(PDE)特征对点云分布进行度量。依据目标姿态与 PDE 之间的关系, 提出了一种新的目标姿态估计方法, 将点云绕坐标轴旋转, 并计算旋转后点云的 PDE, 以 PDE 最小值所对应的旋转角作为目标姿态角。仿真了 5 类地面装甲目标在不同视点下的激光雷达点云, 对比分析了 PDE 方法和矩形拟合法及主成分分析(PCA)方法在自遮挡下和遮挡下的目标姿态估计性能, 讨论了参数选择对算法性能的影响, 给出了 PDE 方法的快速实现方式。实验结果表明, PDE 方法在自遮挡和遮挡情况下的姿态角估计性能及算法稳健性明显优于矩形拟合法和 PCA 方法, 特别适合严重遮挡下的目标姿态估计。

关键词 信号处理; 激光雷达; 目标识别; 姿态估计

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0414002

A Novel Method for Ladar Target Orientation Estimation

Guo Yulan Lu Min Tan Zhiguo Wan Jianwei Zuo Chao

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

Abstract In the area of ladar target recognition, orientation estimation is always needed to align the point cloud with models for recognition. The relationship between the target's orientation and the point cloud projection distribution is analyzed, a feature called projection density entropy (PDE) is extracted to measure this distribution. A novel method for target orientation estimation is proposed according to the relationship between the target's orientation and PDE. The point cloud is rotated around one coordinate axis, then the PDE of the rotated point cloud is calculated, and the rotation angle with the least PDE is taken as the orientation angle. Point clouds of five kinds of ground armored targets under different viewpoints are simulated, and the performances of PDE, rectangle fitting and principle component analysis (PCA) methods under the situations of self-occlusion and occlusion are analyzed. The strategy of parameter selection is discussed, and a fast realization method of PDE is proposed. The experimental results show that the estimation performance and robustness of PDE method outperform rectangle fitting and PCA methods greatly in the cases of self-occlusion and occlusion. PDE is very suitable for application under severe occlusion.

Key words signal processing; ladar; target recognition; orientation estimation

OCIS codes 070.0070; 100.0100; 140.0140; 150.0150; 280.3640

1 引 言

激光雷达^[1~4]作为一种光学和雷达相结合而产生的新型传感器, 既能获得反映目标表面物质特性

的强度像^[5], 又能获得反映目标空间几何结构的三维点云^[6], 对目标识别^[7]和精确制导等军事应用具有重大意义, 已成为各军事强国的关注重点和研究

收稿日期: 2010-11-30; **收到修改稿日期**: 2011-01-05

基金项目: 中国博士后科学基金(Z0100481511)和国防科学技术大学优秀研究生创新基金(S090401)资助课题。

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

E-mail: gfkduoyulan@163.com

导师简介: 万建伟(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代信号处理方面的研究。

E-mail: kermitwan@hnmcc.com

热点^[8~10]。在基于点云的激光雷达目标识别中,通常需要对目标姿态进行估计,进而将目标点云与模型匹配以完成目标识别,或获得目标武器(如坦克炮管)的指向以判断其作战意图。现有的目标姿态估计方法主要有主成分分析(PCA)方法^[11,12]、三视投影特征值分解法^[13]和三视投影矩形拟合^[14~16]方法。PCA方法通过对点云的协方差矩阵进行特征值分解得到目标姿态,具有简单高效的特点,故在3D形状检索中得到了广泛应用,但该方法要求点云完备且均匀分布^[11,12],因而不适用于激光雷达目标姿态估计。三视投影特征值分解法通过对点云进行三视投影并提取出投影点云边界点,再对边界点方向散射矩阵进行特征值分解得到投影点云方向,该方法要求方向散射矩阵具有正定性^[16],故通用性不强。而三视投影矩形拟合法(以下称矩形拟合法)基于人造目标具有类似矩形的外形结构这一假设,通过计算包围投影点云的最小面积矩形的长轴方向得到投影点云方向,该方法对地面装甲目标点云具有较好的姿态估计效果,但当目标存在自遮挡及遮挡时,其投影点云分布与矩形常存在较大差异,从而导

致姿态估计性能严重下降。本文对目标姿态估计问题进行了分析,提取了投影点云密度熵(PDE)特征,并利用其与目标姿态的关系提出了一种新的目标姿态估计方法。采取仿真的地面装甲目标点云进行了自遮挡和遮挡情况下的目标姿态估计实验,并对比矩形拟合法和PCA方法对结果进行了详细的分析和讨论。

2 目标姿态估计算法

2.1 问题的提出

激光雷达可以获得反映目标表面几何结构的三维点云,相比于二维图像,三维点云包含了目标的深度信息,且不受尺度、光照及透射变换等因素的影响,因而非常有利于自动目标识别的实现。图1为M1、M60、LECRERC型坦克以及M2A2、BRDM3型装甲车的计算机辅助设计(CAD)模型,图2为图1中目标对应的激光雷达点云(伪彩色显示,红色到紫色代表高度从高到低,见电子版),可见三维点云很好地反映了目标外形特征。

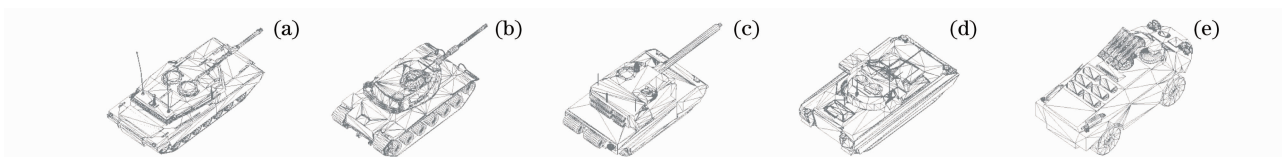


图1 M1(a),M60(b),LECRERC(c)型坦克和M2A2(d),BRDM3(e)型装甲车的CAD模型

Fig.1 Target's CAD models of tanks (a) M1, (b) M60, (c) LECRERC and armored vehicles of (d) M2A2, (e) BRDM3

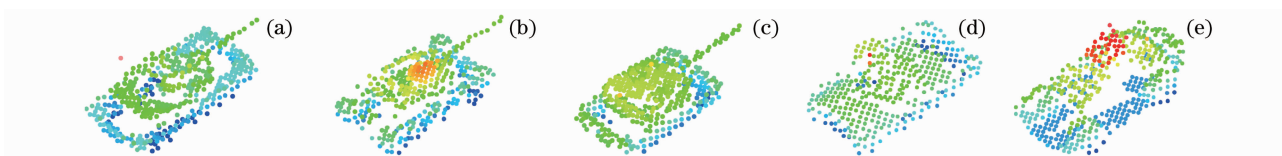


图2 M1(a),M60(b),LECRERC(c)型坦克和M2A2(d),BRDM3(e)型装甲车的点云数据

Fig.2 Target's point clouds of tanks (a) M1, (b) M60, (c) LECRERC and armored vehicles (d) M2A2, (e) BRDM3

在激光雷达点云目标识别中,通常需要对目标姿态进行估计。矩形拟合法^[16]是目前较为常用的激光雷达目标姿态估计方法。矩形拟合法将三维点云 \mathbf{P} 分别投影到XY、XZ和YZ平面,得到投影点云 P_{XY} 、 P_{XZ} 和 P_{YZ} ,并计算包围点云 P_{XY} 、 P_{XZ} 和 P_{YZ} 的最小面积矩形 R_{XY} 、 R_{XZ} 和 R_{YZ} ,以矩形 R_{XY} 、 R_{XZ} 和 R_{YZ} 的长轴方向作为目标的偏航角 ψ 、俯仰角 θ 和横滚角 ϕ 。但由于自遮挡及遮挡的影响,矩形拟合得到的姿态角常存在较大误差。图3显示了姿态角为 $(30^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 时的M1型坦克点云及其在3个平面的投影点云和包围矩形。在图3(d)中,由于自遮挡的

影响,坦克左下部分点云不可见,导致横滚角估计严重偏离真实值。而实际应用场景中目标总是存在自遮挡的,且有时遮挡十分严重,比如树林中或伪装网下的坦克,因而实现遮挡情况下的姿态估计就显得十分迫切。

2.2 投影点云密度熵特征

对于地面装甲目标,由图1所示的CAD模型可以看出,其表面主要由一系列近似平行或垂直的平面组合而成。当姿态角均为 0° 时,与坐标平面垂直的目标表面上的点云在该平面上的投影将相对聚集,图4(a)即为横滚角为 0° 时的M1坦克点云,其

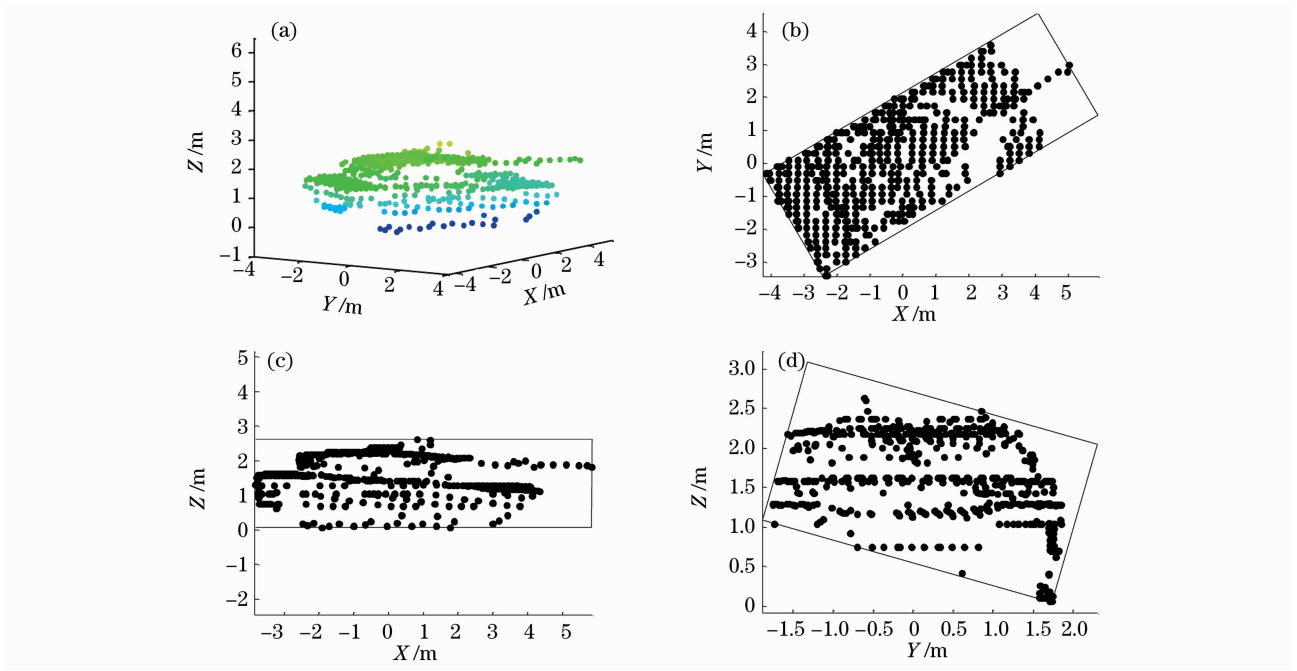


图 3 M1 型坦克点云及其投影。(a)三维点云,(b)XY 平面投影,(c)XZ 平面投影,(d)YZ 平面投影
Fig. 3 Point cloud and its projections of tank M1. (a) 3D point cloud, (b) projections on XY plane, (c) projections on XZ plane, (d) projections on YZ plane

在 XZ 平面的投影见图 4(b),可见由于炮塔和车身上表面基本垂直于 XZ 坐标平面,故其在 XZ 平面的投影将大量集中在平行于炮塔和车身上表面的几条直线周围,此时投影点云分布密度的不均匀性最大;当姿态角不为 0° 时,由于目标表面均不与坐标

平面垂直,故投影点云将较为均匀地分布在整个投影平面上,图 4(c)为将图 4(a)的点云绕 X 轴旋转 45° 后的点云,其在 XZ 平面的投影见图 4(d),可见其点云在整个投影平面较为均匀地分布,此时投影点云分布密度的不均匀性较小。由于不同的姿态会

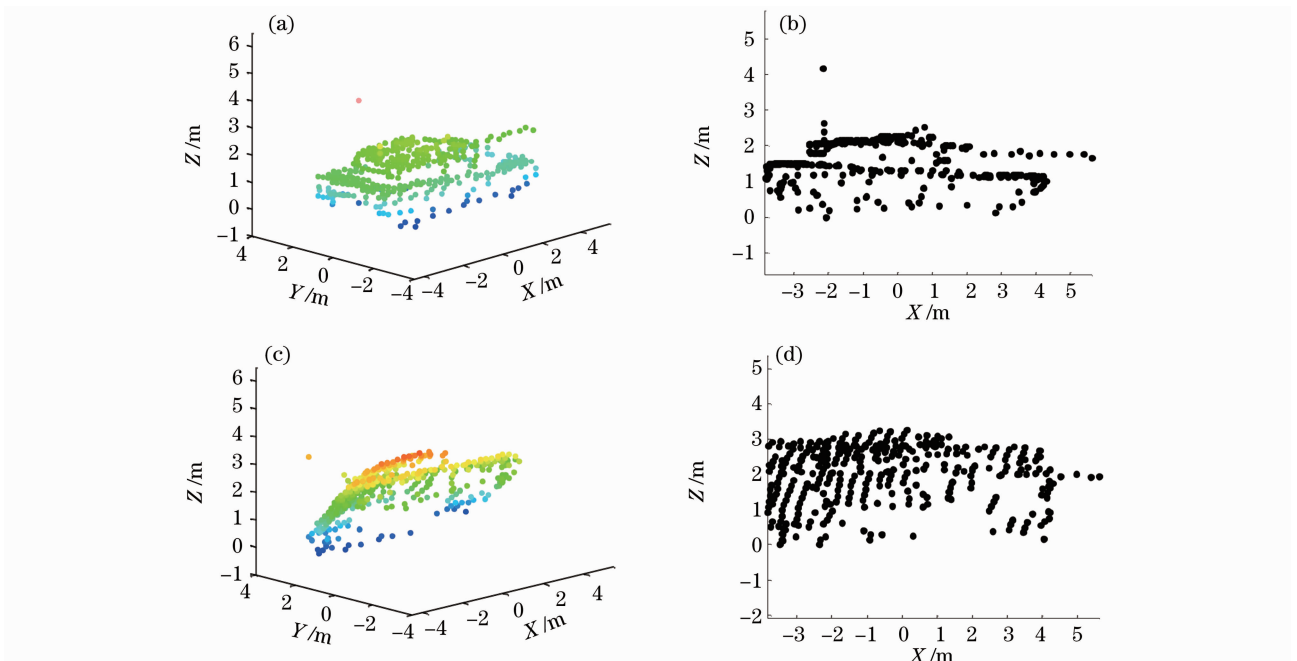


图 4 M1 型坦克点云及在 XZ 平面的投影。(a)三维点云,(b)投影,(c)旋转后点云,(d)旋转后投影
Fig. 4 Point cloud and its projection on XZ plane of tank M1. (a) 3D point cloud, (b) projections, (c) point cloud after rotation, (d) projections after rotation

得到不同的投影点云分布,因而有望利用投影点云分布密度反解出目标的姿态信息。

根据上述分析,采用信息论中熵的概念来度量投影点云的分布,提取了一种新的点云特征,即 PDE 特征。

对于包含 N 个点的点云 \mathbf{P} ,将其投影到某平面得到二维投影点云 \mathbf{P}' 。将投影平面的横坐标和纵坐标均按间隔 ΔL 进行栅格化,统计非空栅格的个数 N_g 及每个非空栅格内的点云数 n_i ,得到每个栅格的点云出现频率 \bar{n}_i 为

$$\bar{n}_i = \frac{n_i}{N}, \quad (1)$$

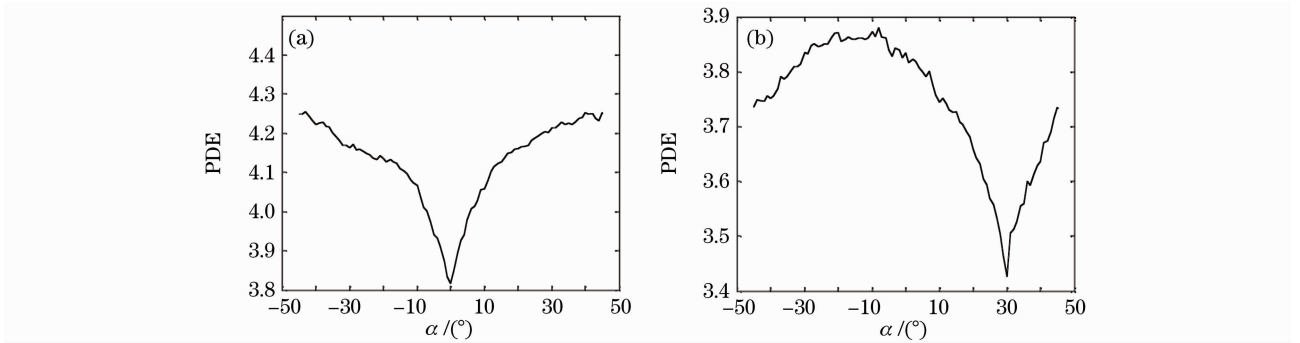


图 5 M1 坦克点云在 XZ 平面的投影点云密度熵。(a)偏航角为 0° , (b)偏航角为 30°

Fig. 5 Point cloud's PDE on XZ plane of tank M1. (a) yaw is 0° , (b) yaw is 30°

2.3 目标姿态估计算法

依据目标点云的 PDE 特征,提出了一种新的目标姿态估计算法。该算法对点云绕坐标轴进行旋转,并计算其在与旋转轴相连的两个坐标平面上的 PDE,以 PDE 最小的角作为目标姿态角。下面假定俯仰角 θ 和横滚角 ϕ 已知或已得到很好估计的情况下,对偏航角的估计算法进行详细阐述。

对于包含 N 个点的点云 \mathbf{P} ,首先将其分别绕 X 轴和 Y 轴旋转 $-\phi$ 和 $-\theta$ 得到点云 \mathbf{P}' ,此时 \mathbf{P}' 的俯仰角和横滚角均为 0° 。然后将 \mathbf{P}' 绕 Z 轴旋转 α ,得到点云 \mathbf{P}_r ,即

$$\mathbf{P}_r(\alpha) = \mathbf{P}'\mathbf{R}(\alpha), \quad (3)$$

式中 $\mathbf{R}(\alpha)$ 为旋转矩阵,即

$$\mathbf{R}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

将点云 \mathbf{P}_r 投影到 XZ 和 YZ 平面,依(1)、(2)式计算得到点云 \mathbf{P}_r 在 XZ 和 YZ 平面的 PDE 分别为 $E_{XZ}(\alpha)$ 和 $E_{YZ}(\alpha)$,定义总的投影点云密度熵 $E(\alpha)$ 为

$$E(\alpha) = E_{XZ}(\alpha) + E_{YZ}(\alpha). \quad (5)$$

则点云 \mathbf{P} 在该平面的 PDE 定义为

$$E = - \sum_{i=1}^{N_g} \bar{n}_i \lg \bar{n}_i. \quad (2)$$

为验证 PDE 与目标姿态之间的关系,对于偏航角为 0° 的 M1 坦克点云,将其绕 Z 轴旋转 $\alpha, \alpha \in (-45^\circ, 45^\circ)$,并计算旋转后的点云在 XZ 平面的 PDE,得到 PDE 随旋转角 α 的变化曲线如图 5(a) 所示,可见 PDE 在旋转角等于姿态角($\alpha=0^\circ$)时取得最小值。偏航角为 30° 的 M1 坦克点云其 PDE 随旋转角 α 的变化曲线[图 5(b)]亦能得到相同的结论。故 PDE 特征很好地反映了目标的姿态信息,可用于姿态估计。

由熵的定义可知,投影点云分布越均匀, $E(\alpha)$ 越大。对于装甲目标,当旋转角 α 正好等于偏航角 ψ 时,其点云分布密度不均匀性趋于最大值,此时对应的密度熵 $E(\alpha)$ 趋于最小值。故偏航角 ψ 取 $E(\alpha)$ 最小值所对应的旋转角度,即

$$\psi = \arg\{\min_{\alpha \in \Psi} [E(\alpha)]\}, \quad (6)$$

式中 Ψ 为旋转角度 α 的取值空间,范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,亦可由点云凸包及轮廓信息等确定大致的范围,从而减少运算量。

同理,将 \mathbf{P} 的方位角和横滚角旋转至 0° 后再绕 Y 轴旋转 β 角,依上述方法得到在 XY 和 YZ 平面总的投影点云密度熵 $E(\beta)$,使得 $E(\beta)$ 最小的 β 即为俯仰角 θ 。将 \mathbf{P} 的方位角和俯仰角旋转至 0° 后再绕 X 轴旋转 γ 角,依上述方法得到在 XY 和 XZ 平面总的投影点云密度熵 $E(\gamma)$,使得 $E(\gamma)$ 最小的 γ 即为横滚角 ϕ 。

3 实验结果与讨论

采用仿真的激光雷达点云数据对本文提出的 PDE 方法、文献[16]的矩形拟合法和文献[11]的 PCA 方法进行对比分析,并对结果进行讨论。仿真

时,以目标中心为坐标原点建立球坐标系,目标姿态由偏航角 ψ 、俯仰角 θ 和横滚角 ϕ 确定。激光雷达的位置由球坐标 (R, ϕ_L, θ_L) 确定,其中 R 为激光雷达距离目标中心的距离, ϕ_L 和 θ_L 为激光雷达在球坐标系中的经度和纬度,用以确定视点,激光雷达视线始终指向目标中心。生成点云时,先输入目标CAD模型(如图1所示),再设定目标姿态和激光雷达所处的经纬度和距离,采用激光雷达点云仿真软件即可得到此视点下的目标点云(如图2所示)。

3.1 自遮挡下的目标姿态估计

以M1、M60、LECRERC型坦克和M2A2、

表1 5类目标的姿态估计结果

Table 1 Orientation estimation results of five targets

		M1		M60		LECRERC		M2A2		BRDM3	
		Mean / Standard / (°)	(°)	Mean / Standard / (°)	(°)	Mean / Standard / (°)	(°)	Mean / Standard / (°)	(°)	Mean / Standard / (°)	(°)
Yaw	PDE	29.9792	0.5553	29.8611	0.6626	29.6250	1.1997	29.9132	0.9331	29.9201	0.9909
	Rectangle	30.0267	0.2856	29.9242	0.4242	29.8032	0.9580	30.0045	0.3098	30.0460	0.3148
	PCA	29.7437	2.0996	29.8113	4.3190	30.7920	2.4411	29.9994	4.5083	29.9170	2.9612
Pitch	PDE	31.3860	2.4546	30.7263	1.9006	31.0069	3.1569	28.4236	2.1446	28.7298	2.6508
	Rectangle	28.3376	2.9980	30.3457	2.2248	30.7100	3.1812	32.0513	6.0214	28.2902	6.0191
	PCA	30.9550	0.9941	29.9814	2.4184	32.8656	2.0962	33.9621	3.6899	25.6913	4.6306
Roll	PDE	29.3542	1.9952	29.1219	4.2211	28.2188	3.0458	27.5193	4.3130	29.8125	3.5133
	Rectangle	28.1839	5.4015	24.9598	9.7408	25.6956	11.3617	20.7878	6.8207	21.8941	14.8138
	PCA	25.2731	6.1694	24.9603	10.4400	23.5006	5.6910	23.3370	8.0254	15.3124	10.4460

由表1可得到以下结论:

1)对于航向角,PDE方法和矩形拟合法性能相当,明显优于PCA方法。

PDE和矩形拟合法得到的估计值与真实值接近,且标准差均小于 1° ,矩形拟合法略优于PDE方法。这是由于目标在顶视图(XY平面)中的自遮挡较少,目标投影点云分布与矩形相似,故矩形拟合法有较好的性能。而PDE方法利用的是点云在XZ和YZ平面的投影点云密度熵,即使存在自遮挡,仍有部分近似垂直于XZ和YZ平面的目标表面上的点云可见,其估计性能得到保证。但由于装甲目标表面结构与坐标平面并不是严格的垂直或平行关系,如坦克炮塔侧面与地面夹角稍小于 90° ,故PDE方法估计的标准差略大于矩形拟合法,但二者相差不大,且均能满足应用需求。PCA方法性能较差,这是由于激光雷达目标点云均是某视点下存在自遮挡的非完备点云,点云分布的主方向与目标的姿态方向并不一致。

2)对于俯仰角和横滚角,PDE方法性能明显优于矩形拟合法和PCA方法。

BRDM3型装甲车的CAD模型作为输入,设置目标姿态角为 $(30^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$,激光雷达距离像分辨率为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$,激光雷达距离 R 为1000 m,其经度 ϕ_L 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间以 15° 等间隔取24个值,纬度 θ_L 在 $30^\circ \sim 75^\circ$ 之间以 15° 等间隔取4个值,于是共有96个不同视点下的点云。分别采用PDE方法、矩形拟合法和PCA方法得到目标偏航角。同样采取上述方法分别仿真了目标姿态角为 $(0^\circ, 30^\circ, 0^\circ)$ 和 $(0^\circ, 0^\circ, 30^\circ)$ 的96组点云,并采用上述3种方法得到目标的俯仰角和横滚角。最后统计96组目标偏航角、俯仰角和横滚角估计值的均值和标准差,得到表1。

由于矩形拟合法实际上是利用投影点云的轮廓信息来估计目标的姿态角,但自遮挡使得目标不完全可见,点云反映的目标轮廓不完整(如图3中坦克只有一侧面点云可见),此时矩形拟合法得到的姿态角与真实值相差较大(如表1中粗体所示),特别是横滚角估计与真实值偏差很大,几乎不可用;PCA方法实际上是利用点云分布的惯性矩来确定目标的方向,在自遮挡情形下得到的目标姿态与真实值相差较大;而PDE方法是利用目标的面结构信息实现姿态估计,自遮挡虽然会使部分点云不可见,但对于可见部分的点云,它依然真实地反映了目标的表面几何关系,因而依然可以很好地实现姿态估计。

3.2 遮挡的影响分析

采用3.1节中M1目标姿态角为 $(30^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 的点云分析遮挡对目标姿态估计性能的影响。为模拟遮挡情形,对于点云 \mathbf{P} ,在其中随机选取一个点 p_s ,将点云 \mathbf{P} 中与点 p_s 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,分别采用PDE方法、矩形拟合法和PCA方法得到目标偏航角并统计其均值和标准差,得到偏航角均值

和标准差随遮挡百分比变化的曲线如图 6 所示。

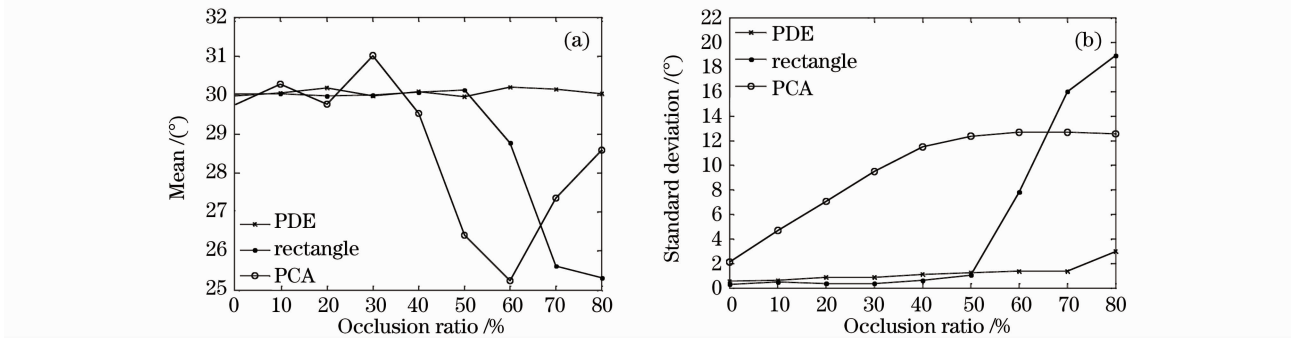


图 6 遮挡下偏航角估计均值和标准差。(a)均值,(b)标准差

Fig. 6 Mean and standard deviation of yaw estimation in occlusion. (a)mean, (b) standard deviation

由图 6 可知,严重遮挡下 PDE 方法姿态估计性能明显优于矩形拟合法和 PCA 方法。PCA 方法受遮挡影响最大,无法在遮挡下有效完成目标姿态估计。当遮挡百分比小于 50% 时,矩形估计方法与 PDE 方法的偏航角估计性能相当,其均值接近真实值,标准差均在 1° 以内。但当遮挡百分比大于 50% 时,矩形拟合法偏航角估计性能急剧下降,而 PDE 方法即使在遮挡达到 80% 时仍有很好的估计性能,估计值与真实值的标准差小于 3°,因而 PDE 方法对遮挡具有很强的稳健性。

3.3 参数选择与实时性分析

由于 PDE 方法中(2)式的对数求解过程运算量较大,为减少运算量,采用一次泰勒展开近似对数求

解,将(2)式修正为

$$E = - \sum_{i=1}^{N_E} \bar{n}_i (\bar{n}_i - 1), \quad (7)$$

得到快速 PDE(FPDE)算法。

采用 3.1 节中 M1 目标姿态角为(30°, 0°, 0°)的点云为例分析栅格 ΔL 的取值对姿态估计算法性能的影响。对于 M1 目标 96 个不同视点下的点云, ΔL 以 0.1 为步进量在 0.1~1.0 之间取 10 个数值,统计 ΔL 取不同值时 PDE 和 FPDE 方法方位角估计的均值、标准差和平均运算时间(Intel Core2 2.33 GHz CPU, 2 G 内存及 Windows XP 操作系统下采用 Matlab R2009a 编程测试得到),如图 7 所示。

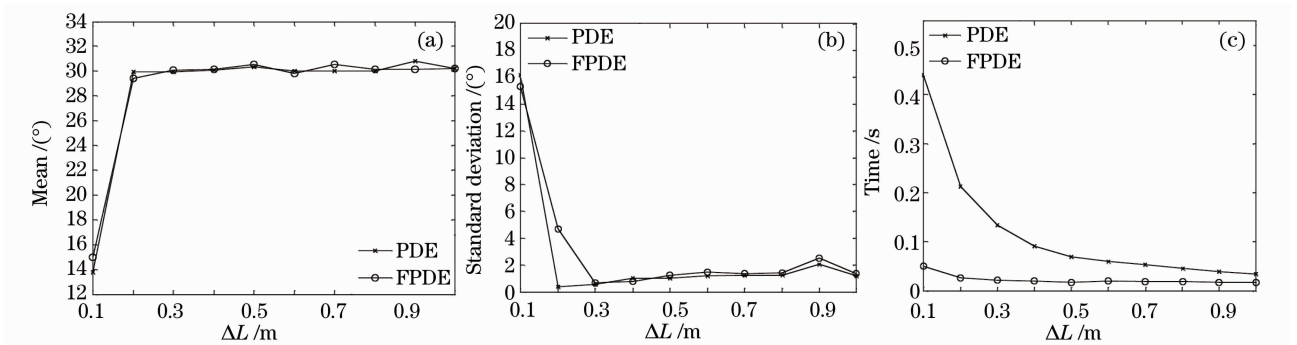


图 7 ΔL 取值对算法性能的影响。(a)均值,(b)标准差,(c)运算时间

Fig. 7 Estimation performance versus ΔL . (a) mean, (b) standard deviation, (c) computation time

可知当 ΔL 由大变小时,姿态角估计性能逐渐提高,在 ΔL 取 0.2~0.4 时达到最优,当 ΔL 继续变小时,估计性能急剧恶化。这是由于栅格的细化能更精细地体现点云的分布特征,当栅格 ΔL 的大小正好与点云中相邻点的平均距离(文中数据为 0.25~0.30)大致相当时,能取得最好的估计性能,但栅格太小会使得每个栅格内都只有 1 个或者 0 个投影点云,无法体现出点云分布的均匀性特征,因而

性能急剧恶化。

PDE 和 FPDE 方法得到的均值和标准差基本一致,性能相当,运算时间均随 ΔL 的减小而逐渐增大,但 FPDE 运算效率明显高于 PDE,且 ΔL 越小,运算效率提高越明显。FPDE 方法在 ΔL 取 0.3 时的平均运算时间为 0.0207 s,略大于矩形拟合法(0.0072 s),因而在实际应用中,需要综合考虑算法性能和运算量选取合适的 ΔL 。

3.4 讨 论

由于实际得到的激光雷达点云总是存在自遮挡的非完备点云,且有时还会受到其他物体的严重遮挡,如在树林中或伪装网下的坦克目标等,此时矩形拟合法和 PCA 方法将很难满足应用需求,而 PDE 算法却能很好地完成姿态估计,因而 PDE 算法特别适合于自遮挡和严重遮挡情形下的地面装甲目标姿态估计。

需要指出的是,PDE 方法仅适用于有两个姿态角已得到较好估计的情形,这是由于在两个以上的姿态角未知的情况下目标表面与坐标平面的关系不能简单地采用垂直和平行来表示,故此时最小熵值所对应的角度不一定是目标的姿态角。但这在很多实际应用场合是可以接受的,如可以首先采用矩形拟合法估计偏航和俯仰角,再采用 PDE 方法估计横滚角以提高总的估计性能;或者通过地面估计等方法事先获得目标的俯仰和横滚角,再采用 PDE 方法计算偏航角以提高抗遮挡性能。下一步研究的方向包括 PDE 方法对非装甲类目标(如飞机、舰船等)姿态估计的适用性分析,以及 PDE 特征用于形状识别的研究等。

4 结 论

从目标的表面结构信息出发,通过计算点云在与旋转轴相连的两个坐标平面上的投影点云密度熵,以最小的投影点云密度熵对应的旋转角作为姿态角,得到了一种新的目标姿态估计方法。仿真分析结果表明,该方法在自遮挡下具有良好的姿态估计性能,其俯仰和横滚角估计明显优于矩形拟合法和 PCA 方法,且在严重遮挡下仍具有较好的稳健性。因而该方法特别适合于遮挡情况下的激光雷达目标姿态估计,且其思想可进一步用于特征提取,具有较高的推广价值。

参 考 文 献

1 Sun Jianfeng, Li Qi, Lu Wei *et al.*. Implementing the algorithm of target recognition for laser imaging radar based on digital signal processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1467~1471

- 孙剑峰,李琦,陆威等.基于数字信号处理器的激光成像雷达目标识别算法实现[J].*中国激光*,2006,**33**(11):1467~1471
- 2 Meng Zhaohua, Hong Guanglie, Hu Yihua *et al.*. Research on chirped amplitude modulation coherent lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2446~2450
- 孟昭华,洪光烈,胡以华等.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):2446~2450
- 3 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方法[J].*中国激光*,2010,**37**(6):1599~1601
- 4 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
- 孙剑峰,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
- 5 J. C. Bezdek, N. R. Pal. Blind detection of targets from LADAR data [C]. Proc. of 20th NAFIPS International Conference, 2001, 2: 1127~1133
- 6 S. Jordan. Range estimation algorithms comparison in simulated 3-D flash LADAR data[C]. 2009 IEEE Aerospace Conference, 2009. 1~7
- 7 M. T. Mamanakis, R. R. Fullmer, R. T. Pack *et al.*. Active and attentive lidar scanning for automatic target recognition[C]. *SPIE*, 2008, **6971**: 1~12
- 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. N. Vasile, R. M. Marino. Pose-independent automatic target detection and recognition using 3D laser radar imagery[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, **15**(1): 61~78
- 10 A. Mahalanobis, A. J. V. Nevel. Performance of multidimensional algorithms for target detection in LADAR imagery[C]. *SPIE*, 2002, **4789**: 134~147
- 11 J. W. H. Tangelder, R. C. Veltkamp. A survey of content based 3D shape retrieval methods[C]. Proc. of Shape Modeling Application 2004, 2004, 145~156
- 12 Y. Yang, H. Lin, Y. Zhang. Content-based 3-D model retrieval: a survey[J]. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, 2007, **37**(6): 1081~1099
- 13 D. Q. Zhu, C. C. Chu. Characterization of irregularly shaped bodies[C]. *SPIE*, 1995, **2466**: 17~22
- 14 C. Grönwall, T. Chevalier, A. Persson *et al.*. Methods for recognition of natural and man-made objects using laser radar data [C]. *SPIE*, 2004, **5412**: 310~320
- 15 C. Gronwall, P. Andersson, F. Gustafsson *et al.*. Least squares fitting of articulated objects[C]. Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, **6919**: 5~9
- 16 C. Grönwall, F. Gustafsson, M. Millnert *et al.*. Ground target recognition using rectangle estimation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(11): 3401~3409