

文章编号 1004-924X(2012)04-0843-08

## 激光雷达目标三维姿态估计

郭裕兰\*, 万建伟, 鲁敏, 谭志国

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**针对现有激光雷达目标姿态估计算法对遮挡较为敏感的问题,提出了一种新的三维姿态估计算法。分析了现有算法的内在本质和地面装甲目标固有的表面结构特性,提出了投影点云密度熵(PDE)特征,研究了PDE特征与目标姿态的内在关系,给出了对目标点云迭代地进行旋转投影并寻找PDE最小值以实现三维姿态估计的方法。采用25类地面装甲目标的激光雷达点云数据进行仿真实验,分析了自遮挡、遮挡以及噪声下的估计性能,讨论了参数选择对估算结果的影响。实验结果表明,本文方法在自遮挡下的估计误差小于 $3^\circ$ ,在遮挡率达到80%时的估计误差小于 $10^\circ$ 。实验显示,本文方法对遮挡和噪声具有很强的稳健性,且收敛迅速,能很好地实现激光雷达目标三维姿态估计。

**关键词:**三维姿态估计;激光雷达;目标识别;遮挡;投影点云

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122004.0843

### Three dimensional orientation estimation for ladar target

GUO Yu-lan\*, WAN Jian-wei, LU Min, TAN Zhi-guo

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

\* Corresponding author, E-mail: yulan.guo@nudt.edu.cn

**Abstract:** Since the existing target orientation estimation methods for laser radars are not robust to the occlusion, a novel 3D orientation estimation method was proposed. The principles of the existing methods and the intrinsic characters of the surface structures for ground targets were analyzed carefully, then the feature of Projection Density Entropy (PDE) was introduced, and the relationship between PDE and target orientation was analyzed. Finally, a 3D orientation estimation method was formulated by iteratively rotating and projecting the target point cloud onto the coordinate planes together with PDE calculation. Comparative experiments were performed on the dataset containing point clouds of 25 ground targets, the performance in self-occlusion, occlusion and the noise were investigated, and the parameter tuning was discussed. The results show that the estimation error of this method is below  $3^\circ$  in self-occlusion, and also no more than  $10^\circ$  even in 80% occlusion. It is clear that the proposed method is robust to occlusion and converges quickly, thus is capable of estimating the 3D orientation of ladar targets in complex scenes.

**Key words:** 3D orientation estimation; ladar; target recognition; occlusion; projected point cloud

收稿日期: 2011-09-27; 修订日期: 2012-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60972114); 国家博士后科学基金资助项目(No. 20100481511); 国家留学基金委 CSC 奖学金资助项目(No. 2011611067)

## 1 引言

作为雷达与光学技术相结合而产生的一种新型传感器,激光雷达能实现场景的距离-角度-角度成像,并通过坐标变换获得反映场景表面形状信息的三维点云<sup>[1-3]</sup>。激光雷达由于分辨率高、抗干扰能力强、全天候工作性能好等优点使得其在自动目标识别和精确制导领域备受关注,并已成为新的研究热点<sup>[4-5]</sup>。

目标三维姿态估计作为目标识别的重要内容之一,是精确打击和战场态势分析的基础。激光雷达采用三维成像模式,避免了二维图像成像过程中从三维场景到二维图像的投影变换过程,因而能更加精确地估计目标姿态。Zhu 等<sup>[6]</sup>通过对目标点云正交投影后进行特征值分解来获得目标姿态;Gronwall<sup>[7-8]</sup>等采用矩形拟合法,将目标点云正交投影到 3 个坐标平面并以最小外接包围矩形估计目标姿态,该方法在地面装甲目标识别中应用广泛<sup>[9-10]</sup>;另一类方法则直接对三维点云进行主成分分析,依据点云分布的 3 个主方向来估计目标三维姿态,这类方法在三维模型检索中得到了大量应用<sup>[11-12]</sup>。但上述方法普遍存在对遮挡较为敏感的问题,针对此,文献<sup>[13]</sup>提出了一种新的目标姿态估计思路,但该方法只能实现目标的一维姿态估计,因而应用范围受到一定的限制。

本文从目标固有的表面结构信息出发,提出了一种新的投影点云密度熵(Projection Density Entropy: PDE)特征,并采用迭代方式对目标点云进行旋转以获得 PDE 最小的旋转角,从而实现目标的三维姿态估计。采用 25 类地面装甲目标的激光雷达点云数据进行对比实验,结果表明本文算法收敛快速,在自遮挡下的姿态估计性能明显优于现有算法,且对遮挡具有很强的稳健性,当遮挡率达到 80% 时依然有很好的估计性能。

## 2 现有算法分析

现有的投影特征值分解法、主成分分析法和投影矩形拟合法的实质均是利用目标点云的空间分布来估计目标姿态。其中投影特征值分解法分别计算点云在 3 个坐标平面上的投影点云的特征向量方向来确定目标姿态(如图 1(b)(c)(d)中的

实线所示);主成分分析法则直接计算点云在三维空间的 3 个主方向来确定目标姿态(如图 1(a)中的实线所示)。这 2 种方法的核心都是借助特征值分解获取特征向量来确定姿态角,其区别在于是对三维点云还是二维投影点云进行特征值分解。这类方法的问题表现在依据特征值分解得到的主方向依赖于点的分布。当目标点云是完整的三维点云时,如将多视点距离图像配准拼接后的完整点云,这类方法估计的姿态是准确的,这也是主成分分析法在模型检索中得到大量应用的原因,而当目标点云是单个视点下得到的存在自遮挡和遮挡的数据时,点云的主方向(估计的姿态)与目标的真实姿态相差较大(如图 1(a)(d))。投影矩形拟合法则假设地面装甲目标都具有类似矩形的形状,因而将点云投影到 3 个坐标平面后,可以依据每个平面上投影点云的最小面积包围矩形的主方向来估计目标姿态(如图 1(b)(c)(d)中的矩形所示)。文献<sup>[13]</sup>的实验结果表明,该方法对目标偏航角的估计有较好的性能,但对横滚角的估计性能较差。这是由于自遮挡的存在使得目标部分点云不可见(如图 1(d)右下角部分),以致投影点云轮廓与矩形存在较大差别,因而最小面积包围矩形的方向与目标的真实方向不一致。

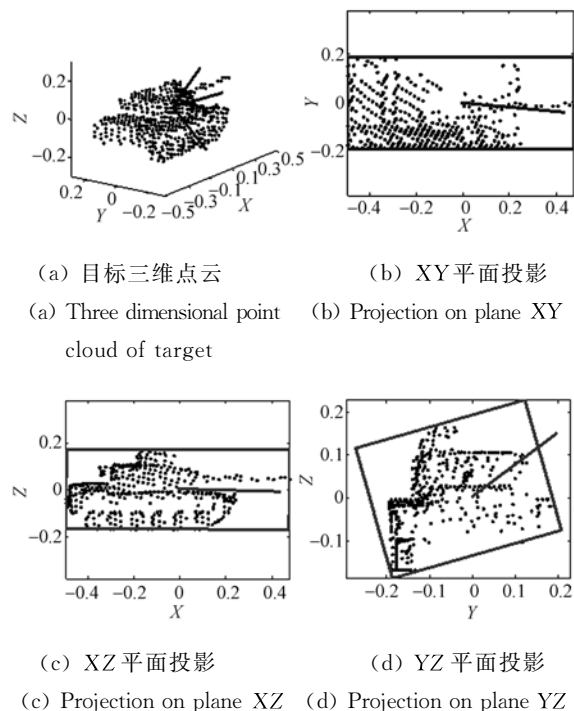


图 1 现有算法原理示意图

Fig. 1 Principle illustrations of existing methods

由于激光雷达不能穿透目标成像,故单个视点下的目标点云总是存在自遮挡,加之背景和多目标遮挡的影响,目标点云肯定是不完整的,因而实现遮挡下的目标三维姿态估计就显得尤为重要。与现有方法单纯依赖点的空间分布来实现姿态估计不同,本文力图从点云中提取不受遮挡影响的目标固有信息,并据此实现姿态估计。事实上,大部分地面装甲目标(如坦克和装甲车等)都是由一系列相互垂直或近似垂直的平面结构组合而成,如车身上表面与前后侧及左右侧表面近似垂直,从物理角度看即目标的外形构成了一种有序的状态。由于激光雷达点云真实地反映了目标表面的结构信息,当姿态得到正确估计和校正时,与坐标平面垂直的目标表面上的点将在该坐标平面上投影成一条线段。如车身上表面与 XZ 和 YZ 平面近似垂直,因此该表面上的点在 XZ 和 YZ 平面的投影将相对聚集,此时 XZ 和 YZ 平面中少数区域点分布十分密集而大部分区域点分布稀疏,即投影点云分布不均匀性最大,也即此时的投影点云分布最为有序。当姿态未得到正确估计时,由于不存在大量与坐标平面相垂直的目标表面,故投影点云不会出现密集分布,此时投影点云分布的不均匀性较小,即较为无序。因此,投影点云分布的不均匀性(有序性)与目标姿态之间存在一定的关系。由于信息论中的熵可以很好地度量这种分布的有序性,故依此提出了 PDE 特征用于目标姿态估计。从直观的角度看,PDE 特征是投影点云分布有序性的体现,从本质上而言,PDE 是目标自身固有的平面结构信息的表征。

### 3 目标三维姿态估计算法

#### 3.1 PDE 特征提取

对于目标点云  $P \subset \mathbb{R}^3$ ,  $p_i = (x_i, y_i, z_i)^T \in P$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。将其投影到某指定的坐标平面上,得到投影点云  $P' \subset \mathbb{R}^2$ 。即:

$$P' = T_p P, \quad (1)$$

其中  $T_p$  为  $2 \times 3$  的投影变换矩阵。

得到投影点云  $P'$  的横坐标最大最小值分别为  $x_{\max}'$  和  $x_{\min}'$ ,  $P'$  的纵坐标最大最小值分别为  $y_{\max}'$  和  $y_{\min}'$ 。将投影平面的横坐标和纵坐标按  $\Delta L$  的间隔进行分割得到一个  $M \times N$  的栅格,初始化  $M \times N$  的计数矩阵  $A$ ,其中:

$$M = [(x_{\max}' - x_{\min}') / \Delta L], \quad (2)$$

$$N = [(y_{\max}' - y_{\min}') / \Delta L],$$

对于  $P'$  中的每一个点,计算其所处的栅格  $(m, n)$ ,并将计数矩阵  $A$  中对应的元素  $A_{mn}$  加 1。其中:

$$m = [(x_i' - x_{\min}') / \Delta L], \quad (3)$$

$$n = [(y_i' - y_{\min}') / \Delta L],$$

其中  $[\cdot]$  为向上取整符号。计数矩阵  $A$  反映了投影点云  $P'$  在该坐标平面上的分布情况,采用熵来度量分布的不均匀性,得到目标点云在该平面的 PDE 特征为:

$$E = - \sum_{\substack{1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N \\ A_{mn} > 0}} \left( \frac{A_{mn}}{N} \right) \lg \left( \frac{A_{mn}}{N} \right). \quad (4)$$

为验证 PDE 与目标姿态之间的数值关系,将图 1(a) 所示的姿态角为  $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$  的 M60 坦克点云绕 X 轴旋转  $\alpha$  角后再绕 Y 轴旋转  $\beta$  角,其中  $\alpha \in [-45^\circ, 45^\circ]$ ,  $\beta \in [-45^\circ, 45^\circ]$ 。计算每一次旋转后的目标点云在 XY、YZ 和 XZ 3 个平面上总的 PDE,得到图 2。可知,PDE 随着姿态估计误差的增大而增大,当姿态得到正确估计(即 2 个旋转角度均为  $0^\circ$ )时取得最小值,与上文的理论分析一致,因此有望利用这种关系实现目标的三维姿态估计。

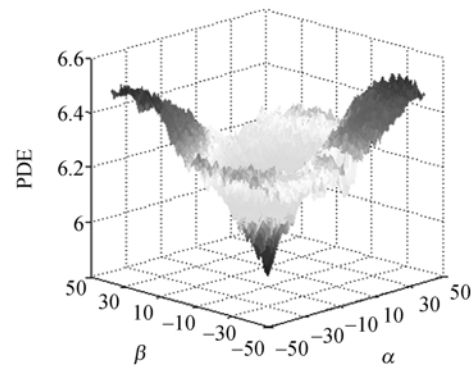


图 2 PDE 与目标姿态的关系

Fig. 2 Relationship between PDE and target's orientation

#### 3.2 基于迭代 PDE 的目标三维姿态估计

在上述 PDE 特征提取的基础上,通过迭代对目标点云进行旋转并计算在 XY、YZ 和 XZ 3 个坐标平面总的 PDE 以实现目标的三维姿态估计,得到基于迭代 PDE 的姿态估计算法,简记为 IPDE 算法。下面对算法步骤进行详细阐述:

1) 设置最大迭代次数  $K$ , 迭代停止阈值  $\eta$ , 令

迭代次数  $k=0$ , 旋转矩阵  $\mathbf{R}=\mathbf{I}$ , 旋转后点云  $\mathbf{P}^k=\mathbf{P}$ 。

2) 将  $\mathbf{P}^k$  绕 X 轴旋转  $\alpha$  角,  $\alpha \in [-45^\circ, 45^\circ]$ , 计算旋转后点云在 3 个坐标平面上总的 PDE  $E(\alpha)$ , 得到 PDE 最小值对应的旋转角  $\phi = \operatorname{argmin}(E(\alpha))$ 。以绕 X 轴旋转  $\phi$  角后的点云更新  $\mathbf{P}^k$ , 即:  $\mathbf{P}^k = \mathbf{R}_1^k \mathbf{P}^k$ , 其中:

$$\mathbf{R}_1^k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

3) 将  $\mathbf{P}^k$  绕 Y 轴旋转  $\alpha$  角,  $\alpha \in [-45^\circ, 45^\circ]$ , 计算旋转后点云在 3 个坐标平面上总的 PDE  $E(\alpha)$ , 得到 PDE 最小值对应的旋转角  $\theta = \operatorname{argmin}(E(\alpha))$ 。以绕 Y 轴旋转  $\theta$  后的点云更新  $\mathbf{P}^k$ , 即:  $\mathbf{P}^k = \mathbf{R}_2^k \mathbf{P}^k$ , 其中:

$$\mathbf{R}_2^k = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

4) 将  $\mathbf{P}^k$  绕 Z 轴旋转  $\alpha$  角,  $\alpha \in [-45^\circ, 45^\circ]$ , 计算旋转后点云在 3 个坐标平面上总的 PDE  $E(\alpha)$ , 得到 PDE 最小值对应的旋转角  $\psi = \operatorname{argmin}(E(\alpha))$ 。以绕 Z 轴旋转  $\psi$  后的点云更新  $\mathbf{P}^k$ , 即:  $\mathbf{P}^k = \mathbf{R}_3^k \mathbf{P}^k$ , 其中:

$$\mathbf{R}_3^k = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

5) 第  $k$  次迭代的旋转矩阵为  $\mathbf{R}^k = \mathbf{R}_3^k \mathbf{R}_2^k \mathbf{R}_1^k$ , 总的旋转矩阵更新为  $\mathbf{R} = \mathbf{R}^k \mathbf{R}$ 。若第  $k$  次迭代时目标姿态得到了正确估计, 则  $\mathbf{R}^k$  接近于单位矩阵  $\mathbf{I}$ 。文中依据旋转矩阵  $\mathbf{R}^k$  的迹作为迭代停止条件, 若  $(\operatorname{tr}(\mathbf{R}^k) - 1)/2 \geq \eta$  或者迭代次数  $k \geq K$ , 则停止迭代, 得到总的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和姿态校正后的点云  $\mathbf{P}^k$ , 否则返回步骤 2) 继续迭代。

由于  $\mathbf{R}$  是将目标点云从当前姿态转换到规范化姿态时的旋转矩阵, 因而其逆矩阵  $\mathbf{R}^{-1}$  即为估计的目标偏航角、俯仰角和横滚角所对应的旋转矩阵。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验条件设置

采用激光雷达数据仿真软件<sup>[1]</sup>获得目标点云数据。仿真时, 预先设置好目标的三维姿态、激光

雷达系统参数、目标距离及成像视点, 输入目标 CAD 模型即可获得相应的目标点云。

实验目标包括 M1A2、LECRERC、T80 坦克和 BRDM3 装甲车在内的 25 类地面装甲目标。对于每一类目标, 随机设置目标的三维姿态, 并保存该姿态对应的真实旋转矩阵  $\mathbf{R}_{\text{true}}$ , 采用激光雷达数据仿真软件生成在 96 个不同视点下的目标三维点云数据。对于每一个视点下的点云, 采用姿态估计方法获得估计的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{\text{Est}}$ , 并采用下式计算估计误差  $e$ :

$$e = \arccos \left[ \frac{\operatorname{tr}(\mathbf{R}_{\text{true}} \mathbf{R}_{\text{Est}}^{-1}) - 1}{2} \right] \frac{180}{\pi}. \quad (8)$$

$e \in [0, 180]$ , 若估计值与真实值一致, 则  $e$  为 0, 二者相差越大, 则  $e$  越大。

### 4.2 算法收敛性分析

为测试本文提出的 IPDE 算法的收敛性, 采用 IPDE 算法对上述 25 类目标在 96 个视点下的点云数据进行姿态估计。设置最大迭代次数  $K$  为 10, 迭代停止阈值  $\eta$  为 0.999, 统计每类目标姿态估计时的平均迭代次数, 得到图 3。可知, 对所有的 25 类目标, IPDE 算法的最大迭代次数为 3 次, 平均迭代次数为 2.82 次, 故算法收敛快速, 具有很好的收敛性能。

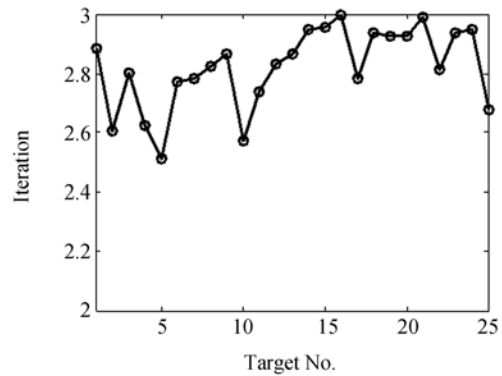


图 3 IPDE 算法迭代次数

Fig. 3 Iteration number of IPDE method

### 4.3 自遮挡下的估计性能

分别采用文献[6]的投影特征值分解法(PP-CA)、文献[11]的主成分分析法(PCA)、文献[7]的投影矩形拟合法(Rect)和本文的 IPDE 方法对偏航角未知、偏航角和俯仰角未知以及 3 个姿态角未知下的目标姿态进行估计, 得到估计的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{\text{Est}}$ , 采用式(8)计算估计误差。统计不同情

形下4种方法对25类目标点云的估计误差均值和标准差,得到表1。

由表1可知,PPCA法和PCA法的估计性能最差,这是由于在自遮挡存在的情况下,无论是点云的三维分布还是二维投影分布,都与目标的完整形状有很大差别,故估计误差很大。RECT法在偏航角未知以及偏航角和俯仰角未知的情形下估计性能优于前2种方法,这是因为在仅有自遮挡存在的情况下,目标点云在XY和XZ平面的投影受遮挡影响较小,最小包围矩形能较好地反映目标的真实姿态。而在3个姿态角均未知的情形下估计性能严重下降,这主要由于:1)目标点云在YZ平面的投影受遮挡的影响较大(如图1(d)),大量点云不可见导致其投影轮廓与目标的

真实外形轮廓相差较大;2)由于3个角度采取序贯估计的方式,偏航角和俯仰角的估计误差会传递给横滚角估计,从而使总的估计误差增加。

本文的IPDE方法明显优于现有的3种方法,在一个角度未知和多个角度未知的情形下都拥有一致的估计性能,误差均值均小于 $3^\circ$ 。这是由于IPDE方法既不依赖于目标的点云分布状况,也不依赖目标的轮廓信息,而是采用目标本身固有的面结构信息。只要传感器得到的目标点云中所包含的面结构信息与目标的真实信息一致,即使自遮挡使得部分点云不可见,但得到的点云依然是目标外形结构的真实反映,仍能有效地用于姿态估计,因而IPDE方法受自遮挡影响较小,估计性能较好。

表1 自遮挡下的姿态估计性能

Tab.1 Orientation estimation performance in self-occlusion

	Yaw unknown		Yaw/pitch unknown		Yaw/pitch/roll unknown	
	Mean/( $^\circ$ )	Std./( $^\circ$ )	Mean/( $^\circ$ )	Std./( $^\circ$ )	Mean/( $^\circ$ )	Std./( $^\circ$ )
PCA	15.060 7	6.818 0	15.060 7	6.818 0	15.060 7	6.818 0
PPCA	15.077 3	6.818 4	15.742 4	6.463 2	15.181 6	6.772 1
Rect	10.451 2	5.239 7	13.677 2	5.286 3	37.961 4	9.335 6
IPDE	2.610 9	1.186 3	2.676 0	1.109 7	2.684 5	1.167 8

#### 4.4 遮挡下的估计性能

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。采用IPDE方法对3个姿态角均未知时的目标姿态进行估计,得到估计旋转矩阵 $\mathbf{R}_{Est}$ ,采用式(8)计算估计误差,统计25类目标的估计误差均值随遮挡率的变化如图4所示。

可知,在遮挡率小于 $50\%$ 时,姿态估计性能受遮挡的影响较小,估计误差均值在 $5^\circ$ 以内。当遮挡率进一步增加时,估计性能有所下降,但即使在 $80\%$ 的遮挡下,本文方法的三维姿态估计误差依然在 $10^\circ$ 以内,对比表1可知此时的估计误差比投影矩形拟合法在仅有自遮挡时的估计误差还小,因而本文的IPDE方法对遮挡具有很强的稳健性。这主要得益于:1)本文方法的实质是利用点云的面结构信息而非整体形状信息实现姿态估计,即使存在遮挡,残存部分的点云依然正确地反映了目标对应部位的平面结构,因而目标姿态依然能得到正确地估计;2)只要目标的面结构信息

在点云中得到保留,迭代运算就能够使算法寻找到PDE趋于最小值所对应的目标三维姿态。

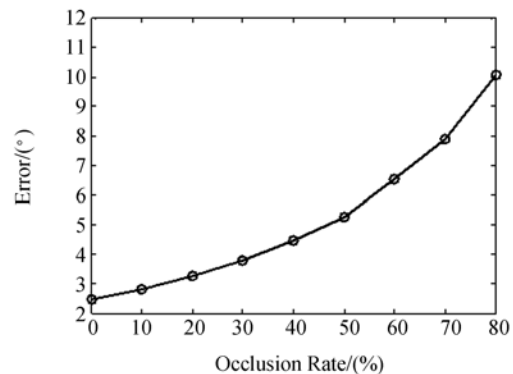


图4 遮挡下的姿态估计性能

Fig.4 Orientation estimation performance in occlusion

#### 4.5 噪声下的估计性能

假设点云的测量噪声服从高斯分布,对于点云 $\mathbf{P}$ 中的每一个点 $P_i$ ,在其三维坐标 $(x_i, y_i, z_i)^T$ 上分别叠加均值为0,方差为 $\sigma_n^2$ 的高斯噪声。其中噪声标准差 $\sigma_n$ 取为点云数据分辨率的 $0 \sim 2.0$

倍以测试不同强度噪声影响下的估计性能。采用 IPDE 方法对 3 个姿态角均未未知时的目标姿态进行估计,得到估计旋转矩阵  $\mathbf{R}_{Est}$ ,采用式(8)计算估计误差,统计 25 类目标的估计误差均值随遮挡率的变化如图 5 所示。

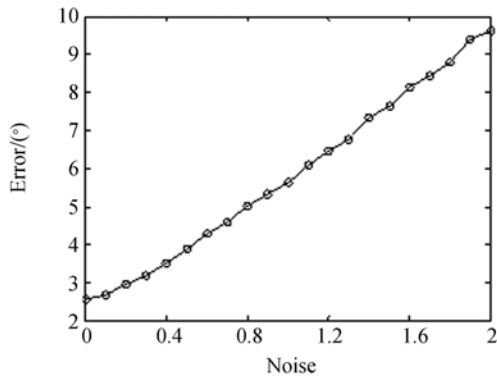


图 5 噪声下的姿态估计性能

Fig. 5 Orientation estimation performance in noise

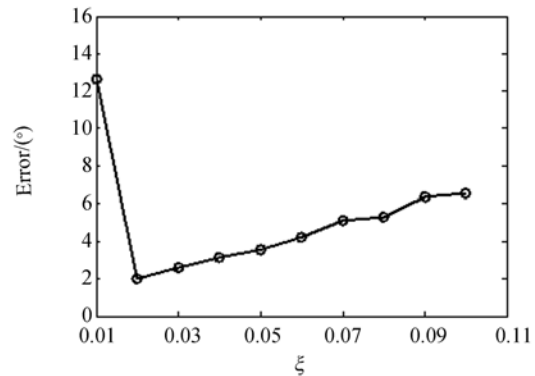
图 5 的结果表明,随着噪声的增加,估计误差逐渐增大。当噪声标准差与数据分辨率大小一样时,目标姿态估计误差为  $5.6330^\circ$ 。当噪声标准差达到数据分辨率 2 倍时,目标点云受噪声污染已经严重偏离真实形状,但此时姿态估计误差仍然在  $10^\circ$  以内,对比表 1 可知此时的估计误差比 RECT 法在无噪声下的估计误差还小。因此,本文算法在噪声下依然具有较好的估计性能。

#### 4.6 参数选择

采用 25 类目标点云,以 3 个姿态角未知时的姿态估计为例分析栅格  $\Delta L$  的取值对姿态估计算法性能的影响。 $\Delta L$  取为目标尺寸的  $\xi$  倍,其中  $\xi$  以 0.01 为步进量在 0.01~0.10 之间取 10 个数值,统计  $\xi$  取不同值时 IPDE 方法姿态角估计误差均值和平均运算时间(Intel Core2 2.33GHz CPU, 2G 内存及 Windows XP 操作系统下采用 Matlab R2009a 编程测试得到),如图 6 所示。

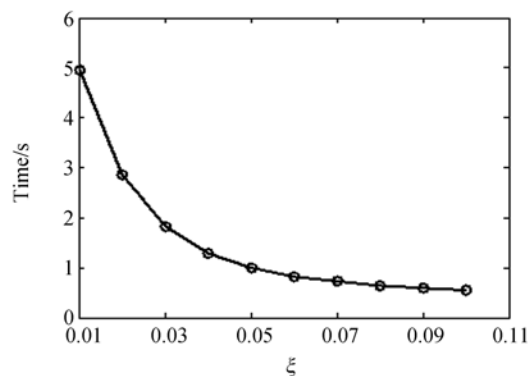
由图 6(a)可知,估计误差随  $\xi$  即  $\Delta L$  的减小而逐渐减小,这是由于更小的  $\Delta L$  能更加精细地体现目标的平面结构,因而能得到更加准确的姿态估计结果,当  $\Delta L$  取目标尺寸的 0.02~0.03 倍时,能取得最优的估计性能。但若  $\Delta L$  过小(如  $\xi$  取 0.01),则估计性能急剧恶化,这是由于过小的栅格会导致计数矩阵  $\mathbf{A}$  中元素出现非 0 即 1 的情况,从而失去了正确表征目标投影点云分布状况

的能力,因而无法有效地完成目标姿态估计。总体而言,目标姿态估计性能随  $\Delta L$  变化的影响较小, $\xi$  在很宽的范围(如 0.02~0.06)内取值均能保证目标姿态估计有很好的性能。需要指出的是,算法运算量也将随着  $\Delta L$  的减小而增加(如图 6(b)),因而需要根据姿态估计性能要求及运算量限制折衷选择合适的  $\Delta L$ 。



(a) 估计误差

(a) Estimation error



(b) 运算时间

(b) Computation time

图 6 不同栅格下的姿态估计性能

Fig. 6 Orientation estimation performance in different bin sizes

## 5 结 论

本文基于地面装甲目标表面由一系列平面构造而造成这一基本假设,提出了一种新的 PDE 特征,并据此采用迭代旋转投影寻找最小熵值的方法实现目标三维姿态估计。实验结果表明,本文方法收敛迅速,估计精度高,在自遮挡情形下的估

计误差小于 $3^\circ$ ,明显优于现有的3种方法,且本文方法对遮挡具有很强的稳健性,在80%遮挡的情况下三维姿态估计误差依然小于 $10^\circ$ 。此外,本文方法对噪声干扰同样具有较强的稳健性。因此,本文算法特别适合实际场景中,尤其是较高遮

挡情况下的地面装甲目标姿态估计。另外,本文算法的思想可以进一步应用到其它外形具有大量平面结构的目标(如民用汽车、舰船等)的姿态估计,也可以用于三维模型检索中的姿态归一化,因而具有较高的推广价值。

#### 参考文献:

- [1] TAN Z G, WANG H, LU M, *et al.*. Range gated LADAR imaging data simulation[C]. *SPIE 7th International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition*, 2011.
- [2] XIN Z, DEVORE M D. Analysis of data and model accuracy requirements for target classification using ladar data [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008,44(4):1416-1432.
- [3] 胡峰,胡春生,王省书,等. 成像激光雷达与摄像机外部位置关系的标定[J]. *光学精密工程*, 2011,19(4):938-943.  
HU F, HU CH SH, WANG X SH, *et al.*. Calibration of external relation between imaging laser radar and camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):938-943. (in Chinese)
- [4] VASILE A N, MARINO R M. Pose-independent automatic target detection and recognition using 3D laser radar imagery[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005,15(1):61-78.
- [5] 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.  
MA CH J, YANG H, LI X X, *et al.*. Implementation of automatic target recognition by imaging Ladar in complex scenes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(7):1714-1721. (in Chinese)
- [6] ZHU D Q, CHU C C. Characterization of irregularly shaped bodies [C]. *Proc. of SPIE*, 1995, 2466:17-22.
- [7] GRONWALL C, GUSTAFSSON F, MILLNERT M, *et al.*. Ground target recognition using rectangle estimation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006,15(11):3401-3409.
- [8] GRONWALL C. *Ground object recognition using laser radar data-geometric fitting, performance analysis, and applications* [D]. Linkping: Linkping University, 2006.
- [9] FELIP R L, FERRADANS S, DIAZ-CARO J, *et al.*. Target detection in LADAR data using robust statistics[C]. *Proc. of SPIE on Electro-Optical Remote Sensing*, 2005,5988:1-11.
- [10] FELIP R L, BINEFA X, DIAZ-CARO J. Discerning objects from ground and target pose estimation in ladar data using robust statistics [C]. 2006 *IEEE International Conference on Image Processing*, 2006,4244:2109-2112.
- [11] YANG Y, LIN H, ZHANG Y. 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.
- [12] TANGELDER J W H, VELTKAMP R C. A survey of content based 3D shape retrieval methods [C]. *Proc. of Shape Modeling Application 2004*, 2004:145-456.
- [13] 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):242-248.  
GUO Y L, LU M, TAN ZH G, *et al.*. A novel method for ladar target orientation estimation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011,38(4):242-248. (in Chinese)

## 作者简介:



郭裕兰(1985—),男,江西吉安人,博士研究生,2008年于国防科技大学获得学士学位,现为国防科技大学博士研究生及西澳大学联合培养博士研究生,主要从事激光雷达信息处理与三维目标识别等方面的研究。E-mail: yulan.guo@nudt.edu.cn



鲁敏(1977—),男,江西上饶人,博士,副教授,2003年于国防科技大学获工学博士学位,主要从事激光雷达及图像自动目标识别、计算机视觉与模式识别等方面的研究。E-mail: lumin@nudt.edu.cn



万建伟(1964—),男,江西南昌人,博士,教授,博士生导师,1998年于国防科技大学获工学博士学位,加拿大温莎大学高级访问学者,主要从事现代信号处理、图象处理和雷达技术等方面的研究。E-mail: kermit\_jww@nudt.edu.cn



谭志国(1978—),男,湖南株洲人,博士,2008年于国防科技大学获工学博士学位,主要从事机器学习、计算机视觉、模式识别与激光主动成像信息处理等方面的研究。E-mail: tan5460@sina.com

## ● 下期预告

## 超声技术在石英光纤腐蚀中的应用

钟年丙,廖强\*,朱恂,王永忠,陈蓉

(重庆大学低品位能源利用及系统教育部重点实验室,重庆 400030;

重庆大学工程热物理研究所,重庆 400030)

为了获得光滑的腐蚀光纤表面并精确管理光纤的腐蚀直径,本文采用自行设计的超声腐蚀系统,在质量百分比浓度为 12.5% 氢氟酸(HF)溶液中,研究了超声功率、腐蚀温度对石英光纤包层和纤芯腐蚀速率以及腐蚀后光纤表面形貌的影响。结果表明:在 HF 溶液中,超声扰动有利于提高光纤的腐蚀速率,光纤腐蚀速率与腐蚀时间呈现出非线性关系,腐蚀表面随着腐蚀的进行越来越粗糙。因而进一步提出采用质量百分比浓度为 12.5% 的 HF 溶液和 25% 的  $\text{NH}_4\text{OH}$  溶液配制了缓冲氢氟酸(BHF)溶液,探讨了光纤腐蚀速率及表面形貌的变化,结果表明:在  $V(\text{HF}):V(\text{NH}_4\text{OH})=2$  的 BHF 溶液中,当超声功率为 165 W、腐蚀温度为 40 °C 时,可获得光滑的腐蚀光纤表面,并且腐蚀速率与腐蚀时间成线性关系。