

## 利用三维点云的圆锥状弹头目标参数估计

陈 晓,石志广,杨卫平,凌建国

(国防科学技术大学 自动目标识别实验室,湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 以激光雷达三维点云对弹头目标形状、姿态、位置估计与目标识别为应用背景。针对导弹弹头的形状特点,将其近似建模为一个圆锥,并可通过 6 个参数来表征。提出了基于激光成像雷达得到的三维点云与 Levenberg-Marquardt(L-M)算法的圆锥状目标参数估计方法,并指出这种方法也可用于对圆锥状目标的识别。通过仿真实验,给出了弹头参数估计误差与三维点云的距离分辨率、点云规模的关系。仿真和实测数据的实验结果表明:该方法在一定的观测距离分辨率下可以较精确地估计出圆锥状弹头目标的参数,并可以根据得到的参数以及对目标函数的优化结果,对目标进行识别。

**关键词:** 参数估计; 三维点云; 激光雷达; 圆锥状弹头; 目标识别

**中图分类号:** TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3480-06

## Parameter estimation of conical warhead target based on 3D point cloud

Chen Xiao, Shi Zhiguang, Yang Weiping, Ling Jianguo

(Automatic Target Recognition Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Take the shape, orientation, location estimation and recognition of the target object, which is based on the laser imaging radar 3D point cloud, as the application background. According to the characteristics of the warhead shape, model it as a cone approximately, and characterize it by 6 parameters. The estimation method of conical target parameters by the L-M (Levenberg- Marquardt) algorithm was put forward, which were based on LADAR 3D point clouds, and pointed out that this method could also be used for the recognition of conical target. The result of the simulation experiment shows the relationship between the estimation errors of parameters with the distance resolution and point cloud scale of the laser radar separately. The simulation and experimental results show that, this method could accurately estimate the parameters of conical warhead target in a certain observation distance resolution, and according to the optimization results of objective function and the obtained parameters the target could be identified.

**Key words:** parameter estimation; 3D point cloud; LADAR; trochiformis warhead; target recognition

收稿日期:2014-02-12; 修订日期:2014-03-08

基金项目:国家自然科学基金

作者简介:陈晓(1990-),男,硕士生,主要从事激光雷达目标识别方面的研究。Email:chenxiao86@163.com

导师简介:石志广(1975-),男,副研究员,博士,主要从事激光雷达目标识别方面的研究。Email:szg0428@tom.com

## 0 引言

激光成像雷达能够同时获取目标的强度像和三维点云信息,并且全天候工作、抗干扰能力强,有着比普通雷达和红外探测器更多的观测信息和更高的精度,使其在智能目标识别领域备受关注。

基于激光成像雷达的目标自动识别过程中,目标的三维姿态估计是研究的难点及关键问题<sup>[1]</sup>。现有的目标姿态估计方法主要有主成分分析法(PCA)<sup>[2]</sup>、三视投影特征值分解法<sup>[3]</sup>、三视投影矩形拟合法<sup>[4-5]</sup>、投影点云密度熵的方法<sup>[1]</sup>,都得到了广泛的运用。主成分分析法要求点云完备且分布均匀,三视投影特征值分解法要求边界点方向散射矩阵具有正定性,三视投影矩形拟合法要求目标具有类似矩形的外形结构,投影点云密度熵的方法基于地面装甲目标表面由一系列平面构造而成这一基本假设。但除了主成分分析方法,其他方法主要使用于地面较大的目标,要求目标由多个矩形的平面构成,并不适合于曲面较多的目标,而且对点云的空间分辨率要求较高,也要求点云具有较大的规模。对于圆锥状的弹头,一般体积比较小,通常其半径甚至小于激光雷达的距离分辨率,给目标的姿态确定和识别造成了很大困难,而且弹头的几何结构简单,不利于提取特征。

文中以基于激光成像雷达的智能识别应用为背景,对弹头运动参数估计问题与目标识别问题进行研究。考虑到导弹弹头一般是圆锥状或者可以近似为圆锥状,根据这一基本假设,结合 L-M 算法,提出了一种基于激光成像雷达三维点云的圆锥曲面的拟合方法,也即对圆锥弹头参数进行估计的方法。该方法将弹头形成的点云分布情况参数化,算法不仅可以精确地估计圆锥状弹头的姿态角,还可以对目标的形状和位置进行估计,并且在只获取目标局部区域点云的情况下,也不会显著影响算法效果。相对于其他的目标姿态估计方法,该算法更具针对性。同时,这种方法也可用于区分圆锥与其他类型的几何体,为目标识别提供特征。

## 1 算法原理

### 1.1 圆锥的描述方程

设激光成像雷达可以测量目标上每一点相对于

激光雷达的位置,并将每个像素测量得到的距离像信息转换为测量坐标系  $OXYZ_c$  下的坐标。

在测量坐标系  $OXYZ_c$  中的圆锥可以由 6 个参数来描述:  $[k, \theta, \varphi, X_0, Y_0, Z_0]^T$ , 这 6 个参数分别表示圆锥形状参数  $k$ 、2 个姿态角  $\theta$  和  $\varphi$ , 以及 3 个空间平移量  $T=[X_0 Y_0 Z_0]^T$ 。下面给出在测量坐标系中任意圆锥的方程以及空间一点到圆锥的距离公式。

在一个空间直角坐标系  $Oxyz$  中,如图 1 所示,一个以  $z$  轴为对称轴的圆锥可以通过如下公式来描述:

$$k\sqrt{x^2+y^2}=z \quad (1)$$

式中:  $k=H/R=\cot\alpha$ ,  $k>0$ , 描述圆锥高度与底面半径之比。

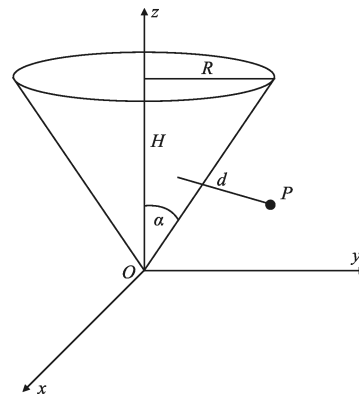


图 1 空间中的圆锥

Fig.1 Cone in space

空间任意一点  $P=[x_0 y_0 z_0]^T$  到圆锥表面的最近距离  $d$  为:

$$d = \left| z_0 - k\sqrt{x_0^2 + y_0^2} \right| / \sqrt{1+k^2} \quad (2)$$

定义图 1 中的坐标系为圆锥坐标系  $Oxyz$ , 其中每一点的坐标为:  $[x, y, z]^T$ 。现在考虑一个倾斜的圆锥。图 1 中的圆锥,可以通过其对称轴  $z$  轴的指向来描述其方向,所以,描述一个圆锥的倾斜方向只需要两个姿态角即可。 $OXYZ_1$  为一个指向与测量坐标系  $OXYZ_c$  一样、原点位于圆锥顶点的坐标系。在  $OXYZ_1$  中的圆锥对称轴的方向  $n$  可以用姿态角  $\theta$  和  $\varphi$  来表示,见图 2。

将坐标系  $OXYZ_1$  中点的坐标转换为  $Oxyz$  中的坐标,其旋转矩阵为:

$$T_{1 \rightarrow \infty} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi & \sin\theta\cos\varphi & -\sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\theta & 0 \\ \cos\theta\sin\varphi & \sin\theta\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

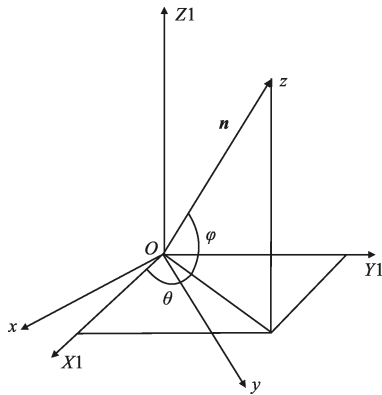


图 2 圆锥对称轴的空间指向  
Fig.2 Direction of cone's symmetry axis

坐标转换公式为：

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = T_{1 \rightarrow i} \begin{bmatrix} X1 \\ Y1 \\ Z1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

设坐标系  $OXYZ1$  相对于测量坐标系  $OXYZc$  有一个平移  $T=[X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T$ ,那么在测量坐标系中任意点  $P_i^c=[X_{ci} \ Y_{ci} \ Z_{ci}]^T$ , 转换到  $Oxyz$  坐标系的方程为：

$$\begin{bmatrix} x_{ii} \\ y_{ii} \\ z_{ii} \end{bmatrix} = T_{1 \rightarrow i} \begin{bmatrix} X_{ci} - X_0 \\ Y_{ci} - Y_0 \\ Z_{ci} - Z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过公式(2)、(5),可以得到一个点  $P_i^c$  到测量坐标系下参数为  $[k, \theta, \varphi, X_0, Y_0, Z_0]^T$  的圆锥的距离为：

$$d_i = \left| \frac{k}{\sqrt{k^2+1}} \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \frac{k}{\sqrt{k^2+1}} z_i \right| \quad (6)$$

其中：

$$x = \cos\theta \cos\varphi (X_{ci} - X_0) + \sin\theta \cos\varphi (Y_{ci} - Y_0) - \sin\varphi (Z_{ci} - Z_0);$$

$$y = -\sin\theta (X_{ci} - X_0) + \cos\theta (Y_{ci} - Y_0);$$

$$z = \cos\theta \sin\varphi (X_{ci} - X_0) + \sin\theta \sin\varphi (Y_{ci} - Y_0) - \cos\varphi (Z_{ci} - Z_0)$$

若令公式(6)中  $d_i=0$ , 则可得到测量坐标系下圆锥的方程。

### 1.2 圆锥参数的估计

激光雷达测量得到目标上  $N$  个点在测量坐标系下的位置, 则可通过公式(6)计算这些点与空间中任意圆锥的距离。为了拟合得到圆锥的参数, 通过下述方法构造目标优化函数: 即找到这样的一组圆锥参数, 使得所有观测点到这组参数描述的圆表面的均方距离最小, 就认为这个圆锥最接近目标的形状、姿态角和位置。这组参数也即对目标形状、姿态和位置的估计。

构造的目标函数如公式(7):

$$D = \|d\|_2 = \sum_{i=1}^N (d_i)^2 = \frac{1}{k^2+1} \sum_{i=1}^N (k\sqrt{x^2+y^2}-z)^2 \quad (7)$$

式中:  $d=[d_0, \dots, d_i, \dots, d_N]^T, x, y, z$  同公式(6)。优化表达式为:

$$[\hat{k}, \hat{\theta}, \hat{\varphi}, \hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0]^T = \underset{k, \theta, \varphi, X_0, Y_0, Z_0}{\operatorname{argmin}} (D) \quad (8)$$

采用 L-M 方法求解公式(8), 即解决一个高维非线性最优化问题。

L-M 方法是一种快速收敛的正则化方法<sup>[6]</sup>。具体的用法是先设定一个初始解  $p_0$ , 先将初始解代入公式(6)计算每个观测点到圆锥距离, 并将结果写成交量的形式:  $e_0=d|_{p_0}$ 。然后计算 Jacobian 矩阵:  $J_{p_i} =$

$\frac{\partial d_i}{\partial p}|_{p=p_i}$ , 利用迭代公式:

$$p_{k+1} = p_k + (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T e_k \quad (9)$$

进行迭代, 最终算法收敛到  $p_\infty$  即为公式(7)的局部最小解。其中  $\lambda$  是一个正则化系数。选取初始  $\lambda=1$ , 若两次相邻迭代间的误差减小, 则取  $\lambda=\lambda/10$ , 否则取  $\lambda=10\lambda$ , 重新求解, 直至误差下降则进行下一步迭代。直到最终目标函数下降幅度小于某给定阈值, 或迭代次数大于规定次数为止。

### 1.3 算法初值的选取

L-M 算法对初始值比较敏感, 如果初始参数选择不好, 迭代会陷入局部最小值。解决方法有遗传算法、模拟退火法等。但是, 如果可以事先给出圆锥参数的初值, 那么算法也可以较快地收敛到全局最小值。

已知圆锥的锥角只能在某一范围内变化, 并且通过分析发现, 算法对于圆锥形状参数  $k$ 、弹头位置  $T$  的初值并不敏感, 只需要给出大致的估计即可。如对于导弹弹头而言,  $k$  一般在 3~5 的范围内, 弹头的位置  $T$  应当在观测到目标上的点的附近。对算法影响大的是目标的姿态角  $\theta$  和  $\varphi$  的初值, 可以尝试多种初值, 选择其中效果最好的, 或者在第一次对目标参数进行估计时通过主成分分析法对目标姿态进行初步估计, 考虑到目标的姿态在较短的时间间隔内变化不会很大, 之后的计算可以利用前一帧计算得到的姿态角作为初值。

## 2 仿真与实测结果

### 2.1 仿真实验结果

#### 2.1.1 仿真条件与评判规则

为了考察不同的距离分辨率 ( $\Delta R=[0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0]$ m) 和观测的点云规

模(观测得到目标上点的个数  $N=[20, 80, 150]$ )对参数估计误差的影响, 该节对文中算法在每个距离分辨率和点云规模下进行了 2 500 次的 Monte-Carlo 仿真。算法运行环境为: Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU T6500@2.10 GHz 1.60 GHz 处理器, 2 G 内存, Windows XP Professional Service Pack 3 操作系统, Matlab 2011a 软件。

仿真通过对比真实的圆锥锥角、圆锥方向、圆锥位置参数同计算得到的参数的差别, 检验算法的性能。另外, 仿真实验还对比了用主成分分析法和文中方法对目标姿态角估计的误差。

仿真时, 先用已知的参数生成一个底面半径  $R_c=0.3\text{ m}$  的圆锥, 圆锥参数在一定的区间内随机选择: 形状参数  $k$  的取值范围是  $[5, 8]$ , 姿态角  $\theta$  在  $[0^\circ, 360^\circ]$ ,  $\varphi$  在  $[0^\circ, 90^\circ]$ , 圆锥  $x, y, z$  方向上位置的范围都是  $[0\text{ m}, 10\ 000\text{ m}]$ 。然后根据待考察的不同距离分辨率, 将点云的距离分辨率降低, 再在其中随机抽取  $N$  个点, 应用文中算法计算圆锥的参数。

为了更直观地表示参数估计的误差, 将参数的误差进行变换:

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha} &= \cot^{-1}k - \cot^{-1}\hat{k} \\ \tilde{\mu} &= \arccos(\sin(\theta)\sin(\hat{\theta}) + \cos(\theta)\cos(\hat{\theta})\cos(\varphi - \hat{\varphi})) \\ \tilde{r} &= \|T - \hat{T}\|_2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $\hat{\cdot}$  表示对参数的估计值。圆锥半顶角角度误差  $\tilde{\alpha}$  代表实际圆锥的半顶角角度同估计值的差(见图 3), 圆锥方向误差  $\tilde{\mu}$ (对于主成分分析法得到的记

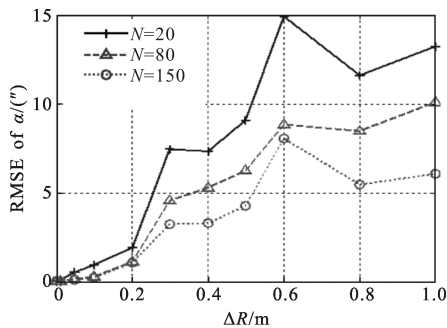


图 3 半顶角估计性能

Fig.3 Performance of semiapex angle estimation

为  $\tilde{\mu}_{PCA}$ ) 对应着实际圆锥的方向同估计方向的偏差角度(见图 4), 位置误差  $\tilde{r}$  对应着圆锥位置偏移的大小(见图 5)。主成分分析法与文中方法对于姿态

角估计误差的比较  $RMSE_{\tilde{\mu}_{PCA}} - RMSE_{\tilde{\mu}}$  见图 6。

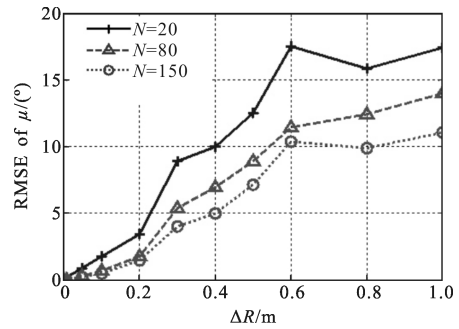


图 4 姿态角估计性能

Fig.4 Performance of orientation estimation

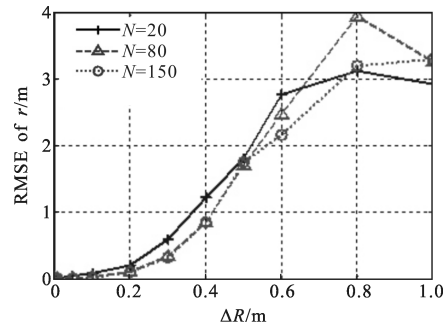


图 5 位置估计性能

Fig.5 Performance of position estimation

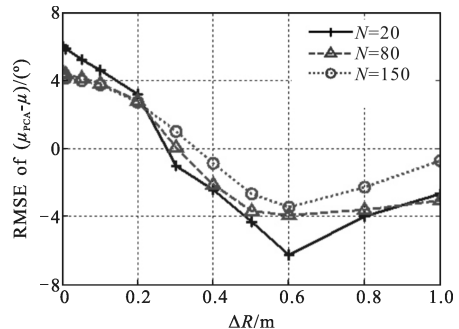


图 6 文中方法和 PCA 法姿态角估计性能比较

Fig.6 Comparison of proposed method and PCA method about performance of orientation estimation

### 2.1.2 距离分辨率对估计误差的影响

图 3~5 的横坐标表示的均是距离分辨率  $\Delta R$ , 从这三幅图中可以看出, 距离分辨率对目标参数估计的误差影响很大, 在距离分辨率比圆锥底面半径小 ( $\Delta R < R_c$ ) 时, 算法具有优秀的性能, 而随着分辨能力继续降低, 参数估计的误差将逐渐增大。这很显然, 因为距离分辨率降低会导致获得的目标信息减少, 尤其是一般弹头目标尺寸较小, 甚至小于距离的分



辨率,那么深度信息将可能严重丧失。该算法仅在最小二乘意义下给出圆锥参数的最优解,而无法补充测量时丢失的信息。

从图 3 中可以看出,对于圆锥的半顶角的估计,其在距离分辨单元较小( $\Delta R < R_c$ )时误差在  $5^\circ$  以下,可以以此作为目标识别的一个特征。而当距离分辨单元变的更大时,半顶角的估计误差就会变得较大,但也只是在  $10^\circ$  左右。从图 4 可以看出,如果点云的规模较大,则对姿态角的估计精度可以达到  $10^\circ$  以下。从图 6 中用主成分分析法和文中方法的对比可知,当  $\Delta R < R_c$  时,则文中方法会好于主成分分析法,而当  $\Delta R > R_c$  时,主成分分析法更占优势。图 5 中看出,如果  $\Delta R < R_c$ ,则对圆锥的位置精度估计的误差小于距离分辨率的大小,反之误差会迅速扩大,造成位置估计的不准确。

由仿真实验表明:如果激光雷达的距离分辨能力足够( $\Delta R < R_c$ ),那么使用文中算法可以达到很好的效果。

#### 2.1.1.3 点云规模对估计误差的影响

从图 3~5 可以看出:算法的效果也受点云规模的影响,总体上来说,点云规模  $N$  越大,算法对参数的估计精度越高。设  $N=20$  时为状态 1,  $N=80$  时为状态 2,  $N=150$  时为状态 3。

可见参数估计的精度由高到低依次是状态 3、状态 2、状态 1。但是他们之间的差异是随着  $\Delta R$  而改变的,在  $\Delta R < R_c$  时,状态 2 和状态 3 的估计误差十分接近,而且远高于状态 1;在  $\Delta R$  继续增大的情况下,状态 3 同状态 2 的性能差异逐渐增大。这表明,在每个特定的  $\Delta R$  下,点云规模有个临界值,规模大于临界值并不会显著提高估计的精度。

#### 2.1.1.4 算法运算效率

文中算法涉及大量的矩阵运算和迭代,可能会比较消耗计算时间和空间。分析表明,每次迭代间需要储存的数据只有圆锥的参数和迭代的一个正则化系数  $\lambda$ ,对储存空间的要求并不高。而运算时间,经过仿真发现,对于状态 1,平均每次计算要用  $9\text{ ms}$ ,状态 2 用  $7\text{ ms}$ ,状态 3 用  $7\text{ ms}$ 。可见运算时间同点云规模的关系并不大,其中状态 1 运行时间偏长是由于点云规模过小导致算法收敛慢所造成的。如果使用更高效的硬件和软件平台,算法的执行时间会更短,并不会造成严重的计算负担。

## 2.2 实测结果

### 2.2.1 实验条件

KINECT 是美国微软公司于 2010 年 11 月 4 日推出的 XBOX360 游戏机体感周边外设,是一种 3D 摄影机<sup>[7]</sup>。其价格便宜,可以在实验室中作为简单的 3D 测量设备。KINECT 不是专业的测量设备,测量的精度不能定量地描述。不过实验发现,在目标距离 KINECT  $1.5\text{ m}$  的范围内,其测距误差在  $1\text{ cm}$  以下,测角的误差也可以接受。试验中,使用 KINECT 来模拟激光雷达来获得多种形状目标的三维点云信息。

实际检测的几何形状包括:圆锥、圆球、圆柱、十字架、正十二面体、四面体(见图 7)。通过对距离图像的分割得到目标的距离像(见图 8),并将得到的距离图像转换为三维点云。使用该算法对这些物体向圆锥进行拟合,求解拟合后的圆锥参数和拟合的误差,以此来判断目标是否是一个圆锥。

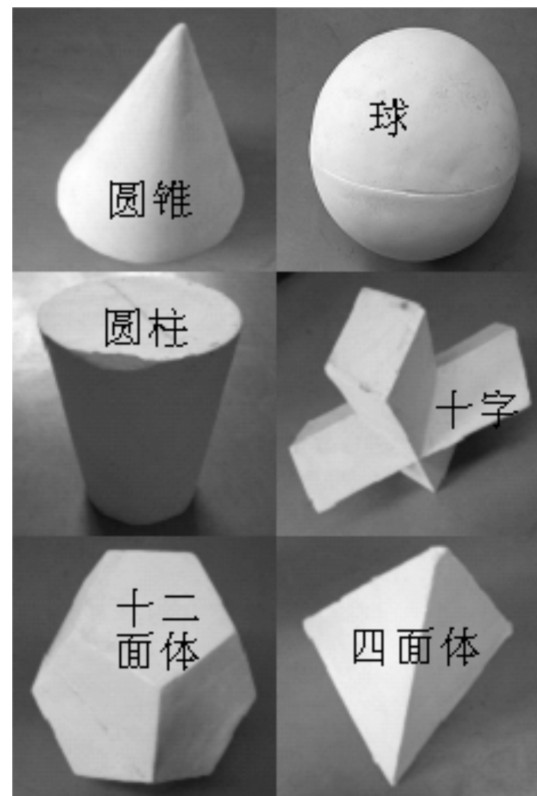


图 7 实测几何体

Fig.7 Measured data of real geometric solid

另外,由于实验条件所限,除了用 KINECT 以外,没有条件精确测定空间物体的具体位置、方向以及形状的具体参数,所以对于几何体的圆锥参数估计结果,只能通过拟合后的目标函数值大小以及参

数的合理性来判断。

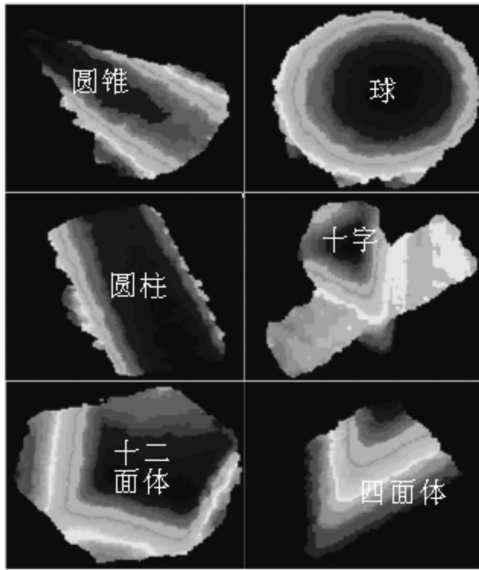


图 8 实测几何体的深度图像

Fig.8 Depth image of measured data of real geometric solid

### 2.2.2 对不同物体的估计结果

对图 7、8 中的 6 种几何体,用文中算法计算空间中同观测数据最接近的圆锥,并将这些点到圆锥的均方根距离作为观测点对圆锥曲面的拟合残差,表 1 给出拟合出的圆锥形状参数  $k$ ,以及拟合残差。

表 1 对不同几何体的估计结果

Tab.1 Estimation result of various geometric solids

	Cone	Sphere	Cylinder	Cross	Dodecahedron	Tetrahedron
$k$	3.026	0.977	26.56	8.785	15.28	-13.11
RMSE/mm	2.267	5.817	1.866	10.23	11.11	5.826 3

从表 1 中可以看出,只有圆锥和圆柱的拟合残差比较小,其他物体的拟合残差都很大。这是由于圆锥体的测量值可以很好地符合一个圆锥的方程,而圆柱体同样很接近于一个  $k$  值很大的圆锥。所以算法对这两种几何体的拟合精度较高。从而可以通过拟合残差将圆锥和圆柱从多种几何体中分离出来。另外,由于对圆柱的拟合结果中, $k$  值一般都很大,这也是圆柱和一般圆锥的区别,所以通过  $k$  值的大小可以进一步将圆锥区分出来。

## 3 结 论

文中通过对空间中一般圆锥方程的推导,结合

使用 L-M 算法,提出了一种对空间中任意圆锥状弹头目标形状、姿态角、位置参数进行估计的方法。算法如果收敛到全局最小值,则该算法在最小二乘意义下是对圆锥参数的最优估计。在初值设置合理的情况下,算法能够较快收敛。平均 0.01 s 内就可以完成一次参数的估计,满足实时性要求,如果更换为更高效的计算平台,算法效率可以进一步提高。

仿真实验中发现,在观测的距离分辨率比圆锥底面半径小的情况下,该算法计算得到的圆锥参数和实际的圆锥参数相差很小,其姿态角估计误差要小于用主成分分析法得到的姿态角估计值,圆锥的顶角角度也足够精确,可以用于目标的识别,对位置的估计误差也小于距离分辨率,可以为跟踪系统提供更精确的目标位置信息。而当距离分辨率接近甚至大于目标底面半径时,算法的性能明显下降,这主要是由目标的距离信息严重损失而造成的。所以算法适用于三维点云的分辨率较高的情况下。

该算法在对除了圆锥和圆柱以外的其他类型的几何体计算圆锥参数时,会产生较大的误拟合残差。在对圆柱进行计算时,锥角的参数  $k$  会比普通圆锥的大很多。通过这一性质,文中提出的方法也可作为提取目标特征的一种新的方法。

### 参考文献:

- [1] Guo Yulan, Wan Jianwei, Lu Min, et al. Three dimensional orientation estimation for ladar target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(4): 843-850. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] Zhu D Q, Chu C C. Characterization of irregularly shaped bodies[C]//SPIE, 1995, 2466: 17-22.
- [4] Gronwall C, Gustafsson F, Millnert M, et al. Ground target recognition using rectangle estimation [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2006, 15(11): 3401-3409.
- [5] Felip R L, Ferradans S, Diaz-Caro J, et al. Target detection in LADAR data using robust statistics [C]//SPIE on Electro-Optical Remote Sensing, 2005, 5988: 1-11.
- [6] Yuan Yaxiang, Sun Wenyu. Optimization Theory and Methods [M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)
- [7] Zhang Di. Discussion of the kinect applications [J]. *Logistics Engineering and Management*, 2012, 32(6): 39-41. (in Chinese)