

空间目标激光雷达成像仿真技术

王 盈, 黄建明, 刘 玉, 陈 凤, 魏祥泉

(上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 为了使空间目标激光雷达成像仿真尽量反应实际在轨探测状态, 提出了一种适用于复杂空间目标的在轨激光雷达成像仿真流程, 并强调了面积法在复杂目标成像可见判断方面的适用性。首先, 阐述了空间目标激光雷达成像仿真的理论模型。然后, 以空间目标上某一舱段为例, 进行在轨激光雷达成像建模与仿真。结果证明: 所提出的空间目标激光雷达成像仿真方法对实现空间非合作相对导航算法研究具有重要意义。

关键词: 激光雷达成像仿真; 空间目标; 在轨

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0906002

Simulation of lidar imaging for space target

Wang Ying, Huang Jianming, Liu Yu, Chen Feng, Wei Xiangquan

(Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to make the lidar images of space target indicating its active state in orbit as real as possible, combined with the information of the detector parameters in orbit, a lidar imaging simulation method for complex space target was proposed in this article. A visibility algorithm based on the area method was presented. Firstly, the method which was used to simulate the lidar imaging was explained in detail. Then, the method was used to simulate the lidar imaging of a simple cube cabin. The emulation results show that the method was feasible to simulate the lidar imaging of the space target, which has significance for the researches of target detection, recognition and tracking techniques.

Key words: lidar imaging simulation; space target; in orbit

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(61573247)

作者简介: 王盈(1986-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事空间目标光学特性方面的研究。Email: wangyqyaya@sina.com

0 引言

基于构型的非合作目标导航时,通常采用受光照条件影响小的激光成像雷达作为敏感器进行导航参数测量。为了进行基于激光成像雷达非合作目标相对导航技术研究,首先需要进行激光成像雷达的成像数据仿真以便后续进行导航技术的仿真验证。

在成像仿真技术中,关键是仿真成像点云数据,一般处理方式是先在 CAD 点云数据基础上通过二维插值的方式获得完整模型的激光雷达坐标系中网格数据,然后通过光线追踪方法提取可见网格节点数据,并生成成像点云数据。由于在 Matlab 中插值函数是单调函数,对于回转体而言需要在插值前需要对模型进行单调化分段处理,但对于面型复杂的模型而言,分段用时长,适用性不强,因此文中提出一种可适用于复杂目标的激光雷达成像的仿真流程,先进行可见点云筛选,再生成成像数据网格。虽然对可见性判断算法要求高,但由于对模型不需事先进行人为划分,减少了人为划分误差,提高效率。

另外具体在成像可见性判断方面,文中比较了两种常用方法,分析结果表明针对复杂目标,面积法更具有适用价值。

1 激光雷达距离像成像原理

1.1 距离成像原理

理想环境下,激光在真空中以光速 c 进行传播,通过高精度的波形检测和采样技术可以获得接收脉冲的细微结构,从而精确测量发射脉冲与返回脉冲的时间间隔 t ,则激光出射端与目标反射面元距离为:

$$S=ct/2 \quad (1)$$

获取场景中每一个通视点与激光雷达的距离(例如,应用光学扫描机制对场景进行扫描),就可以得到观测场景的整幅“距离像”。将单个像素点对应距离值进行灰度等级转换,绘制目标图像。一幅图像中单个像素对应目标距离值分别为 S_{\max} 和 S_{\min} ,设图像灰度等级最低下限为 \lim ,最高上限为 255,则对应于距离为 S 的像面单元,其灰度值为:

$$G(j)=\frac{S(j)-S_{\min}}{S_{\max}-S_{\min}} \times 25 \quad (2)$$

若 $G(j) \leq \lim, G(j)=0, \lim$ 对应于设置的灰度下限。

1.2 几何关系

图 1 为目标坐标系 $O_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 与激光雷达坐标系 $O(X, Y, Z)$ 相对几何关系,令 $M_0(X_{m0}, Y_{m0}, Z_{m0})$ 点为扫描点 M 在目标坐标下坐标, $M(X_m, Y_m, Z_m)$ 点为扫描点 M 在激光雷达坐标系下坐标, L 为探测距离, α, β 分别为扫描点在激光雷达坐标系下的方位角与俯仰角。

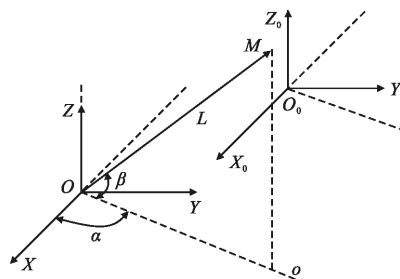


图 1 激光雷达扫描的几何关系

Fig.1 Geometric relations of lidar scanning

令 R 为目标坐标系旋转到激光雷达坐标系的旋转矩阵, T 为激光雷达坐标系原点到目标坐标系原点的平移向量,则相对几何关系方程为:

$$M=RM_0+T \quad (3)$$

$$M=\begin{cases} X_m=L\cos\alpha\cos\beta \\ Y_m=L\sin\alpha\cos\beta \\ Z_m=L\sin\beta \end{cases} \quad (4)$$

测试中已知扫描点探测距离与扫描点在激光雷达坐标系下的方位角与俯仰角,则由公式(4)可以得到扫描点 M 在激光雷达坐标系下坐标,由图像配准与三维重建获得扫描点在目标坐标系下坐标,通过公式(3)得到激光雷达与目标相对位姿信息。

将测试得到的位姿信息与仿真位姿信息进行对比,验证位姿测量算法精度。

2 激光雷达成像影响因素

激光雷达信号在真空传播过程中,由于散斑效应、目标场景反射特性、背景噪声和接收机噪声等因素的影响,回波信号的功率可能出现较大幅度的起伏,所成距离像中的某些像素严重偏离真实的距离值,主要包括失落信息和距离反常噪声,统称为漏值。失落信息指接收机无法探测到观测点的距离值;距离反常指测量到的距离值远远偏离真实距离值。

2.1 散斑效应

散斑效应是影响激光雷达成像质量的一个重要因素。散斑噪声的强度 S_s 具有随机特性,可用下面的概率密度函数描述。

$$f(S_s) = \frac{\left[\frac{M}{S}\right]^M S_s^{M-1} e^{-M\frac{S_s}{S}}}{\Gamma(M)}$$

式中: $M=D_{rec}/D_{sp}$ 表示探测区域内散斑单元的个数(一维); D_{rec} 为光学接收系统的孔径(直径); S 为随机变量的均值; $D_{sp}=\lambda/\phi$ 为散斑单元大小(直径); λ 为照射激光的波长; ϕ 为激光束的束散角。大量研究成果表明,散斑噪声属于乘性噪声。

设理想状态下的回波信号功率为 P_r , 则存在散斑效应的回波信号功率为:

$$P_{r,spec} = S_s/P_r$$

2.2 接收机噪声

接收机噪声主要包括探测器噪声和各类放大器噪声。探测器噪声主要有信号光散粒噪声、背景光散粒噪声、暗电流噪声和热噪声等,各类放大器噪声主要体现为热噪声。

探测器的噪声等效功率 (Noise Equivalent Power, NEP) 可表示为:

$$NEP_d = \frac{\sqrt{2e_c B (I_{d_s} + I_{d_b} + I_s) M^2 F}}{\psi_i}$$

式中: e_c 为元电荷常数; B 为接收机带宽; I_{d_s} 为探测器表面暗电流; I_{d_b} 为探测器体暗电流; I_b 为背景照度电流; I_s 为信号电流; M 为探测器倍增因子; F 为探测器的额外噪声常数; ψ_i 为探测器电流响应度。 I_s 和 I_b 可通过下式求得:

$$I_s = \Psi_i P_{r,spec}$$

$$I_b = \Psi_i \rho h T_r \pi r_a^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \Delta\lambda$$

式中: ρ 为背景平均反射率; h 为背景照度电流; T_r 为接收系统的光学传输效率; r_a 为接收机的光学孔径; θ 为接收机视场; $\Delta\lambda$ 为光学滤波带宽。

放大器的噪声等效功率为:

$$NEP_a = \sqrt{\frac{4kTBN}{R_L \Psi_i^2}}$$

式中: k 为玻耳兹曼常数; T 为绝对温度; N 为噪声因子; R_L 为负载电阻。

进而可求得接收机的总噪声等效功率:

$$NEP_t = \sqrt{\frac{4kTBN}{R_L \Psi_i^2}}$$

接收机噪声一般属于高斯加性噪声,其噪声方差即为 NEP_t , 因此最终输出的回波信号功率可表示为:

$$P_{r,t} = P_{r,spec} + N(0, NEP_t^2)$$

3 空间目标成像仿真方案

3.1 仿真流程

对朗伯体空间目标进行激光雷达成像仿真时,首先利用 Hyperworks 软件对空间目标几何模型进行网络划分,生成 CAD 点云数据;其次,结合激光成像雷达与目标坐标系的旋转平移关系,以及视线投影方向,进行可见性判断,生成激光雷达坐标系下空间目标成像点云数据;最后结合激光雷达参数和探测距离进行灰度成像。

在仿真过程中关键是获得成像点云数据。为获得成像点云数据,首先对 CAD 点云数据进行可见性筛选,再对获得的可见点云数据进行网格插值,获得成像网格点云数据。该方法由于先进行可见点云筛选,再生成扫描网格,对可见性判断算法要求高。但由于对模型不需事先进行人为划分,减少了人为划分误差,同时提高效率。

具体仿真流程如图 2 所示。

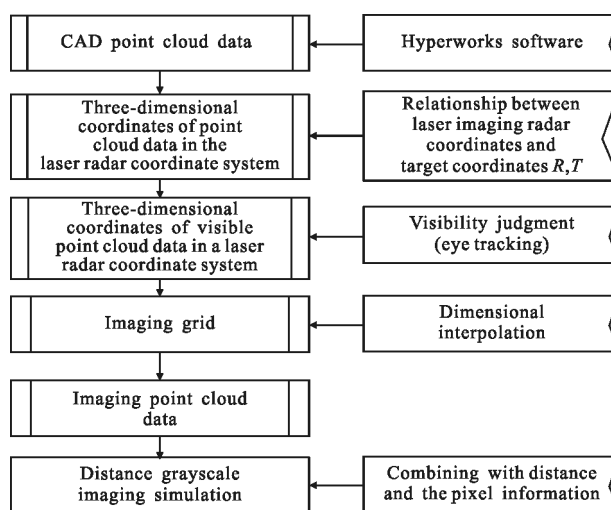


图 2 仿真流程

Fig.2 Simulation flow chart

3.2 详细设计方案

3.2.1 CAD 点云数据生成

将输入的 CAD 模型导出成 igs 格式文件, 利用

Hyperworks 软件进行网络划分,生成 fem 文件,其中包含网格节点的三维坐标数据与节点组成网格单元的相关信息。

3.2.2 坐标系转换

由于激光成像系统系统中的点云位置数据描述的是目标空间点在激光成像雷达坐标系中的坐标,因此首先需要完成坐标转换,即结合激光成像雷达与目标坐标系的旋转平移关系,将曲面上网格节点在本体坐标系中的三维坐标数据转换成激光雷达坐标系中的三维坐标数据。

$$M=RM_0+T$$

$$l=Ltan\theta$$

3.2.3 可见节点判断

假定激光雷达 $-z$ 方向为视线方向,进行可见性判断,保存最近点数据,即可见点在激光雷达坐标系中的三维坐标数据。

如图 3 所示,取视线方向为 $-Z$ 轴方向,令模型点 O 在 XY 投影面上的投影为 O_1 ,在面元上的投影为 O_2 ,图中的四边形为面元在 XY 投影面上的投影,若 O_1 与四边形交点构成的面积之和与面元的面积相等,并且 O 的 z 坐标值小于 O_2 的 z 坐标值,则判断 O 点被遮挡,反之不被遮挡。

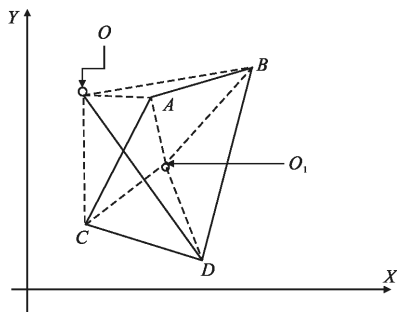


图 3 面积法

Fig.3 Area method

3.2.4 成像点云数据生成

利用 Matlab 按照激光雷达角分辨率对应目标投影距离 l 信息进行可见节点进行曲面拟合,得到新网格间距下的网格曲面。在理想网格曲面上,结合激光成像雷达的测距测角精度,加上符合正态分布的随机噪声模型获得噪声影响下的点云数据仿真结果。

3.2.5 灰度图像生成

灰度图像给出的是激光扫描点在像面上的投

影,用 uv 与激光雷达坐标系下坐标比例公式得到,像素灰度信息为扫描点到靶面上的垂直距离。

4 成像仿真实例

4.1 目标 proe 模型

图 4 给出了空间目标某舱段 proe 模型。



图 4 目标 proe 模型

Fig.4 Target proe models

4.2 仿真要求

- (1) 探测距离为 150 m;
- (2) 成像点数为 500×500 ;
- (3) 视场角为 $15^\circ \times 15^\circ$;
- (4) 测距精度为 2 cm;
- (5) 测角精度为 $36''$ 。

4.3 仿真结果

针对空间目标部分结构,结合仿真流程二及可见性判断方法二,进行成像仿真,验证算法与仿真流程,得到成像仿真序列图,结果如下。

4.3.1 输入姿态矩阵文件

定义 r_1 为目标坐标系绕自身 x 轴的旋转角, r_2 为目标坐标系绕自身 y 轴的旋转角, r_3 为目标坐标系绕自身 z 轴的旋转角。不考虑坐标平移,按照绕 $z \rightarrow y \rightarrow x$ 的旋转顺序将目标坐标系转换至激光雷达坐标系,表 1 给出了具体姿态旋转矩阵数据。

表 1 旋转姿态矩阵

Tab.1 Rotation attitude matrix

No.	r_1	r_2	r_3
1	0	0	0
2	0	45	0

4.3.2 CAD 模型在激光雷达坐标系下点云数据

通过 Hyperworks 软件对目标进行网络划分,在此基础上结合激光成像雷达与目标坐标系的旋转平移矩阵数据,将本体坐标系中的三维坐标数据转换成激光雷达坐标系中的三维坐标数据,得到结果如图 5 所示。

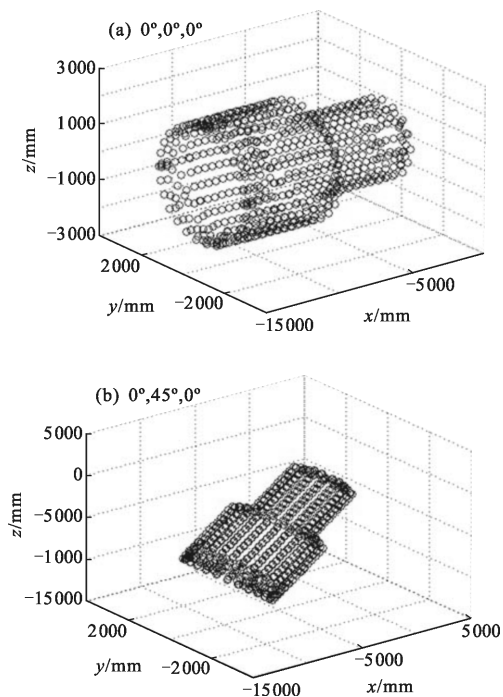


图 5 在激光雷达坐标系下点云数据

Fig.5 Point cloud data in the lidar coordination

4.3.4 CAD 可见点云在激光雷达坐标系下数据

以激光雷达坐标系的 $-z$ 轴为视线方向,通过面积法可见性判断后,得到 CAD 网格密度下可见节点在激光雷达坐标系下的坐标数据,如图 6 所示。

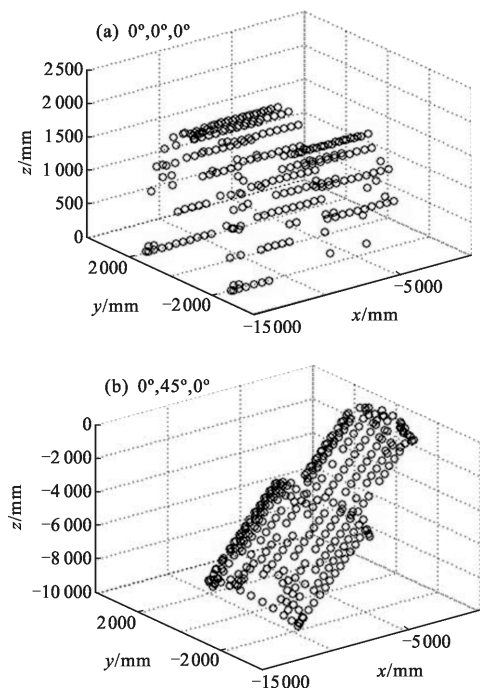


图 6 可见点云在激光雷达坐标系下的数据

Fig.6 Visible point cloud data in the lidar coordination

4.3.5 成像网格生成

根据激光雷达成像视场角、分辨率和成像距离,得到激光雷达在物面上的扫描点云物理分辨率,按照该分辨率密度重新拟合插值 CAD 可见点云,得到激光雷达扫描密度下的成像网格点数据,如图 7 所示。

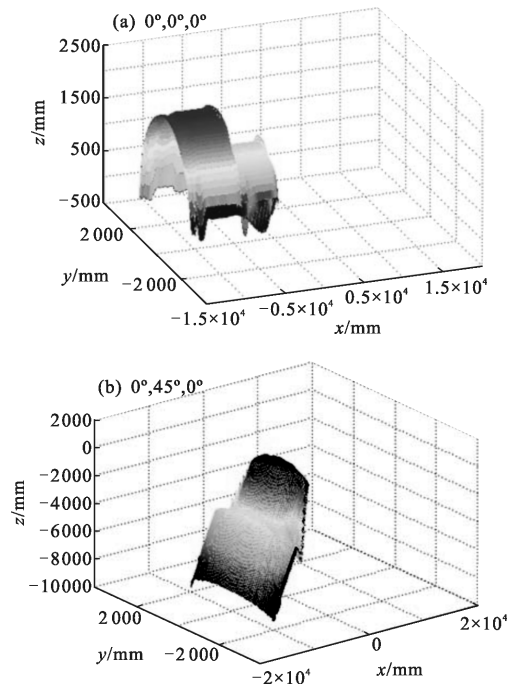


图 7 差值后的网格

Fig.7 Grids based on interpolation

4.3.6 扫描点云数据

网格对应的节点数据即为理想条件下激光成像雷达扫描点云数据,如图 8 所示。

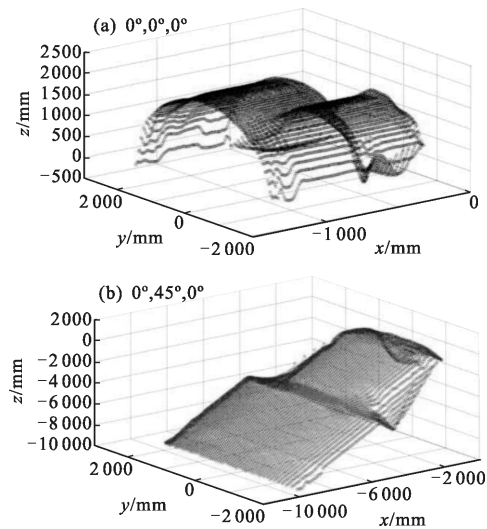


图 8 理想可视部位点云

Fig.8 Visible point cloud data

噪声模型下仿真结果,如图 9 所示。

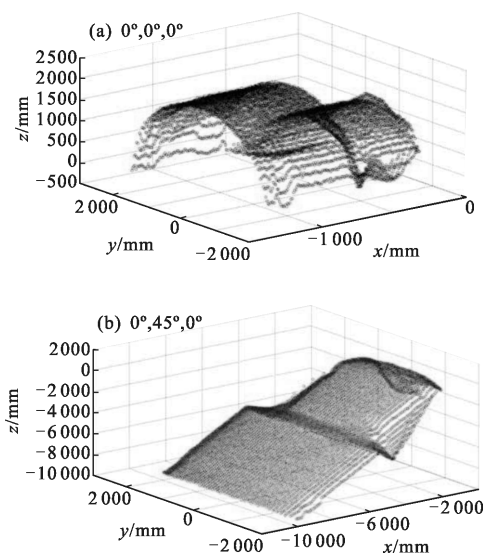


图 9 含噪声可视部位点云

Fig.9 Visible point cloud data with noise

5 结论

文中结合空间目标模型,提出了一种适用于复杂目标的激光成像仿真方法,并完成了不同相对姿态下空间目标在激光雷达中的理想三维距离成像点云数据仿真,验证了可见性判断算法与仿真流程方法的可靠性,对开展基于激光雷达非合作目标相对导航技术算法研究提供重要基础。由于在实际成像过程中,目标表面材质的影响容易造成边缘模糊和部分面元无法成像的等问题,后期将进一步引入材质 BRDF 模型进行成像分析。

参考文献:

[1] Wang Jifang, Gao Huiting, Wang Zhiqiang, et al. Simulation of Space-borne lidar 3D imaging for complex space target

[J]. *Manufacturing Automation*, 2011, 33 (5): 85-89. (in Chinese)

王吉芳,高慧婷,王治强,等.复杂空间目标的天基激光雷达三维成像仿真[J].*制造自动化*,2011,33(5):85-89.

[2] Yi Yusheng, Chen Xiaoguang, Liu Chao. Study of laser rader imaging for rendezvous and docking of spacecraft[J]. *Electronic Technology*, 2012, 25(10): 125-127. (in Chinese)
易予生,陈晓光,刘超.航天器交会对接激光雷达成像技术[J].*电子科技学报*,2012,25(10):125-127.

[3] Li Ziqin, Li Qi, Tian Zhaoshuo, et al. Processing for laser radar range images [J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(4): 210-212.

[4] Kim A M. Simulation full-waveform Lidar [D]. USA: Naval Postgraduate School, 2009.

[5] Wang Biao. Simulation of laser radar 3D range imaging of target and influencing factors analysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2011. (in Chinese)

王彪.目标激光雷达三维距离成像仿真及影响因素分析[D].西安:西安电子科技大学,2011.

[6] Deng Zhihui, Yang Huajun, Zhu Ying. Improvement and simulation of 3D scannerless imaging lidar [J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(4): 386-389. (in Chinese)

邓志辉,杨华军,朱颖.三维无扫描成像激光雷达原理改进与仿真[J].*激光与红外*,2011,41(4):386-389.

[7] Li Fangfei, Zhang Keshu, Gong Qiang. 3D scannerless imaging lidar: principles and simulations [J]. *Technology Review*, 2009, 27(8): 19-22. (in Chinese)

李芳菲,张珂殊,龚强.无扫描三维成像激光雷达原理分析与成像仿真[J].*科技导报*,2009,27(8):19-22.

[8] Yu Dejun, Gong Junbin, Ma Jie, et al. Study for the techniques of lidar imaging simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S4): 160-166. (in Chinese)

余德军,龚俊斌,马杰,等.激光成像雷达成像仿真技术研究[J].*红外与激光工程*,2006,35(S4):160-166.