

# 扫描型成像激光雷达仿真加速算法

陈 晓 石志广 杨卫平 鲁新平

(国防科技大学 ATR 实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 扫描型成像激光雷达的建模和仿真是激光雷达信号处理和系统设计领域的一项重要研究内容。提出了一种快速成像仿真方法,在不影响仿真精度的同时提高了仿真效率。通过推导像元运动轨迹以及模型面元在像平面上投影的运动轨迹,得到判断像元和面元相交关系的不等式,利用时间剖分和近似处理,求解出像元和面元可能的相交关系,再对可能的相交关系判断是否确实相交,达到降低求交次数的目的。基于该方法,对 6 种目标进行仿真,算法仿真结果与传统方法得到的结果相同,求交次数与运算时间降低至传统方法的 1%。

**关键词** 激光技术;激光雷达;仿真;快速算法;求交操作

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201441.0814002

## A Fast Simulation Algorithm of Scanning Laser Radar

Chen Xiao Shi Zhiguang Yang Weiping Lu Xinping

(ATR Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Modeling and simulation of scan-imaging laser radar is an important research content in the field of signal processing and system design of laser radar. In order to improve the simulation efficiency without affecting the accuracy of the simulation simultaneously, a novel fast simulation algorithm is proposed. An inequation that can judge the intersection relations between the pixel and bins can be obtained by deriving the projection of their trajectories on the image plane. Then utilizing the time subdivision and approximate treatments to judge the potential intersection relations of pixel and bins. Finally, the goal of reducing the number of intersection operations can be achieved by testing all the potential relations and finding which of them is real intersection. The consequence of performing the new proposed simulation algorithm and the traditional algorithm in simulating 6 targets shows that they yield the same result, whereas the number of intersection operations of former is equivalent to only 1% of the latter.

**Key words** laser technique; lidar; simulation; fast algorithm; intersection operation

**OCIS codes** 280.3640; 110.6880; 200.4560; 150.6910; 120.5800

## 1 引 言

成像激光雷达可分为扫描型激光雷达<sup>[1-3]</sup>和凝视型激光雷达。扫描型激光雷达存在由于扫描和相对运动带来的图像失真问题,但其具备作用距离远、视场大等优点,因此得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>。开展激光雷达的仿真研究不仅有助于硬件设计人员检验所设计激光雷达的性能,而且还可以为从事激光雷达信息处理的研究人员提供数据支持。

目前国外已有不少成熟的激光雷达仿真软件<sup>[5]</sup>,国内在此领域也进行了相关的研究<sup>[6-7]</sup>。在设计激

光雷达仿真软件时,要同时考虑仿真的真实度以及仿真效率问题。国内外有大量文献<sup>[6,8-9]</sup>对激光雷达的工作过程进行了深入分析,理论成熟。运用计算机图形学的方法,仿真的效率问题得到了一定程度的解决。但是,大部分的计算机图形学的方法<sup>[10-11]</sup>并不考虑场景变化对扫描成像的影响。文献<sup>[12]</sup>研究了机载激光雷达的成像,用光线追踪法计算激光在目标场景中的投影点,以考察运动对扫描成像的影响,但没有对计算速度进行优化。文献<sup>[6]</sup>提出了一种可用于扫描型成像激光雷达仿真的加速方法,先计算每个

收稿日期: 2014-01-03; 收到修改稿日期: 2014-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(61101185,61302145)

作者简介: 陈 晓(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达信号处理方面的研究。E-mail: chenxiao86@163.com

导师简介: 石志广(1975—),男,博士,副研究员,主要从事激光雷达信号与处理等方面的研究。

E-mail: szg0428@tom.com

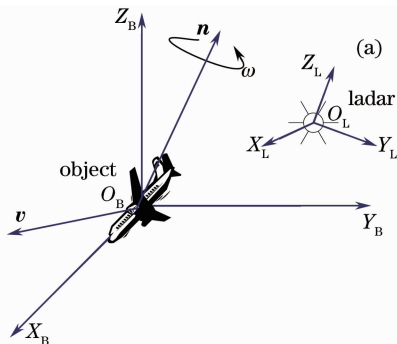
像元和场景三维(3D)模型的三角形面元(下文简称面元)的交,再将此像元的光线细分后计算回波,大幅降低了运算时间,但需要进行大量的像元与面元的求交操作,计算效率不够理想。

目前解决像元与面元求交效率的方法<sup>[10]</sup>有:1)提高每次求交速度;2)减少求交次数;3)精简光线条数;4)并行计算。对于扫描型激光雷达而言,运动的面元在像平面上的投影区域随时变化,像元也进行扫描的运动,无法直接用面元向像平面投影的方法判断像元与面元的相交关系。针对像元与面元求交十分耗时的问题,本文提出一种像元与面元求交运算的新方法,提高扫描型成像激光雷达仿真的运算效率。

## 2 扫描型激光雷达成像模型

### 2.1 模型的近似和假设

在给出具体的仿真算法之前,先对仿真模型进行设定。考虑到激光雷达的载体和场景都有可能发生运动,并且场景中可能存在多种不同运动的物体,



为了便于计算,固定激光雷达所在的坐标系,将激光雷达的运动叠加到场景的每个独立运动的物体上面,只考虑一个运动的目标。目标和激光雷达的坐标系见图 1(a),其中  $OXYZB$  代表目标的本体坐标系, $OXYZL$  代表激光雷达的坐标系。在激光雷达的一个扫描周期内,近似认为目标做匀速直线运动和绕定轴的匀速转动,在  $OXYZB$  坐标系下,目标质心运动的速度矢量为  $v$ ,转动轴为  $n$ (单位矢量),转动角速度为  $\omega$ 。假设目标和激光雷达在成像周期内距离变化量远小于距离,图像可近似为仿射变换。激光雷达的扫描方式同文献[2],见图 1(b),每条扫描的光线的方向对应于焦平面阵列上的一个点。设像平面上竖向从下到上为  $y$  方向,横向从左到右为  $z$  方向,每个方向上都有一  $M$  到  $M$  共  $2M+1$  个整数点,代表每一个像元在像平面上的位置,图 1(b)显示了  $M=2$  的情况。

注意,上述假设和近似均是为了简化公式,不影响第 3 节提出的算法的使用和效果。

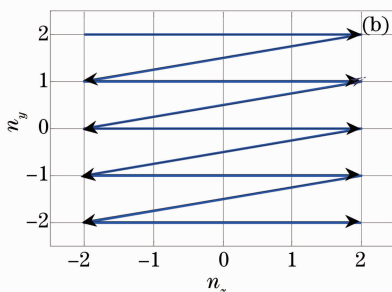


图 1 成像模型。(a) 坐标系设定;(b) 激光扫描方式

Fig.1 Imaging model. (a) Coordinate system setting; (b) scanning mode

### 2.2 像元的运动轨迹

基于 2.1 节的设定,每次扫描周期  $T$  内,共要扫描  $(2M+1)^2$  个点。将  $T$  离散化, $i$  代表扫描到了第  $i$  个点。则有

$$\begin{aligned} n'_y &= M - \lfloor \frac{i-1}{2M+1} \rfloor, \\ n'_z &= i - \lfloor \frac{i-1}{2M+1} \rfloor (2M+1) - M - 1, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $n'_y, n'_z$  分别代表像元在像平面  $y$  方向的坐标和  $z$  方向的坐标,  $\lfloor \cdot \rfloor$  代表取最大整数。像元的运动轨迹见图 2 曲线 L。

### 2.3 面元在像平面上的运动轨迹

三角形面元可由三角形的三个顶点来描述,这里只推导其中一个点的运动方程,其余两个顶点的方程可同理推导。刚体绕定轴转动方程为

$$\begin{bmatrix} x'_B \\ y'_B \\ z'_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta + u^2(1 - \cos \theta) & uv(1 - \cos \theta) + w \sin \theta & uv(1 - \cos \theta) - v \sin \theta \\ uv(1 - \cos \theta) - w \sin \theta & \cos \theta + v^2(1 - \cos \theta) & vw(1 - \cos \theta) + u \sin \theta \\ uvw(1 - \cos \theta) + v \sin \theta & vw(1 - \cos \theta) - u \sin \theta & \cos \theta + w^2(1 - \cos \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $[x_B \ y_B \ z_B]^T$  为刚体上某点原始的坐标,  $[x'_B \ y'_B \ z'_B]^T$  为旋转后的坐标,  $u, v, w$  为自转轴的方向,即  $n = [u \ v \ w]^T, \theta = (i-1)\omega T / (2M+1)^2$  为扫描到第  $i$  个像元时刚体旋转的角度。

对(2)式进行变换,有

$$\begin{bmatrix} x'_B \\ y'_B \\ z'_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_B w - z_B v & -y_B uv - z_B wu + x_B - x_B u^2 & y_B uv + z_B wu + x_B u^2 \\ z_B u - x_B w & -z_B vw - x_B uv + y_B - y_B v^2 & z_B vw + x_B uv + y_B v^2 \\ x_B v - y_B u & -x_B wu - y_B vw + z_B - z_B w^2 & x_B wu + y_B vw + z_B w^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

将(3)式中右式的  $3 \times 3$  矩阵记为  $\mathbf{T}_r(x_B, y_B, z_B)$ 。将点的空间运动投影到像平面上：

$$\begin{bmatrix} n_y^{bkj} \\ n_z^{bkj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_d \delta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_d \delta} \end{bmatrix} \mathbf{T}_{LB} \mathbf{T}_r(x_{Bkj}, y_{Bkj}, z_{Bkj}) \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $n_y^{bkj}, n_z^{bkj}$  分别代表第  $k$  个面元上第  $j$  个点在像平面  $y$  方向的坐标和  $z$  方向的坐标,  $[x_{Bkj} \ y_{Bkj} \ z_{Bkj}]^T$  表示第  $k$  个面元上第  $j$  个点在本体坐标系中的坐标,  $j \in \{1, 2, 3\}$ ,  $R_d$  代表目标到激光雷达的距离,  $\delta$  代表激光雷达像元对应的角分辨率,  $\mathbf{T}_{LB}$  描述视线的方向, 是目标到激光雷达坐标系的旋转矩阵。面元的运动轨迹见图 2 曲线 vertex。

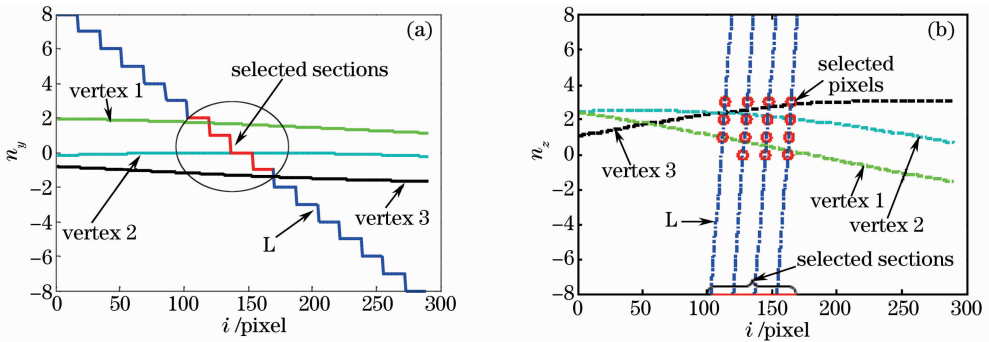


图 2 像元和面元顶点在像平面上的运动轨迹。(a)  $y$  方向; (b)  $z$  方向

Fig. 2 Path of pixel and bin vertexes in the image plane. (a)  $y$  direction; (b)  $z$  direction

### 3 面元投影点筛选方法

如果使用文献[6]的方法计算面元在像平面上的投影,需计算每一个像元同  $N$  个面元的交,共需要进行  $(2M+1)^2 N$  次求交操作,当像平面较大或面元较多时,很浪费时间。若先通过少量的计算筛选出面元和像元有可能的相交关系,再进一步判断是否相交,可以大幅降低运算时间。

#### 3.1 面元投影点与像元关系

若像元落在面元的投影区域内,它在像平面上  $y$  和  $z$  方向的值必然落在面元三个顶点的最大值和最小值之间。解不等式:

$$\begin{cases} \max_{j=1,2,3} \{n_y^{bkj}\} - \epsilon_y \leq n_y^l \leq \max_{j=1,2,3} \{n_y^{bkj}\} + \epsilon_y \\ \max_{j=1,2,3} \{n_z^{bkj}\} - \epsilon_z \leq n_z^l \leq \max_{j=1,2,3} \{n_z^{bkj}\} + \epsilon_z \end{cases}, \quad (5)$$

得到所有可能与第  $k$  个面元相交的像元。其中常数  $\epsilon_y, \epsilon_z$  是为了考虑一些如扫描误差、噪声、计算误差、像元面积等因素而设计出的裕度。考虑一个像元在像平

图 2 给出像元与某块面元的顶点在像平面上运动轨迹的示意图。像平面大小为  $17 \text{ pixel} \times 17 \text{ pixel}$ , 像元做图 1(b) 中的扫描运动。面元在像平面上约占  $6 \text{ pixel} \times 6 \text{ pixel}$ , 做平移和旋转运动。为表达清晰,在图 2(b) 中只画出了四段 ( $i \in [103, 170]$ ) 像元的运动轨迹,其他忽略的部分同这四段类似。

面上占据  $1 \times 1$  大小的一个正方形区域,为保证不将边缘上可能的相交关系排除在外,  $\epsilon_y, \epsilon_z$  选为 0.5。

#### 3.2 时间剖分

(5)式没有解析解,而如果所有像元代入求解,则计算复杂度并没有降低。像元的位置随时间变化不连续,见图 1(b) 和(1)式。将像元和面元的运动函数按时间剖分为连续函数,即把原来的  $i \in [1, (2M+1)^2]$  分为  $i_s \in [(2M+1)(s-1)+1, (2M+1)s]$ ,  $s \in [1, 2M+1]$ 。这样就将(5)式拆分成了  $2M+1$  个不等式组。在每个区间内,像元运动方程都是线性的,降低了求解难度。对于其他的具体应用,还可以采取其他类型的剖分方法。

#### 3.3 近似处理

由于  $n_y^{bkj}, n_z^{bkj}$  是非线性函数,不易分析,所以在上述划分的第  $s$  个区间内 ( $[x_{1s}, x_{2s}]$ ), 对其进行泰勒展开(如果  $n_y^l, n_z^l$  也是非线性的,同样进行展开)。设待展开的函数为  $f(x)$ , 并且二阶可导,在  $x_0$  处展开,则有

$$f(x) = f(x_{0s}) + f'(x_{0s})(x - x_{0s}) + f''(\zeta)(x - x_{0s})^2/2, \zeta \in [x_{1s}, x_{2s}]. \quad (6)$$

在 2.1 节的假设条件下,对  $n_y^{bkj}$  的近似,有

$$|n''(\zeta)| \leq \left[ \frac{\omega T}{(2M+1)^2} \right]^2 \sqrt{[T_{r(2,1)}^2 + T_{r(3,1)}^2]}, \quad (7)$$

$$|e_y^{bkj}| \leq |n''(\zeta)| M^2/2 = \left[ \frac{\omega TM}{(2M+1)^2} \right]^2 \sqrt{(T_{r(2,1)}^2 + T_{r(3,1)}^2)}/2,$$

式中  $|e_y^{bkj}|$  表示对  $n_y^{bkj}$  近似误差的最大值,  $T_{r(a,b)}$  为(3)式中定义的矩阵的第  $a$  行第  $b$  列。同理对  $n_z^{bkj}$  也有类似公式。

由于对函数进行了一阶展开,所以在第  $s$  个区间内有

$$n_y^{bkj}(x_{0s}) + \min[n_y^{bkj}(x_{1s}), n_y^{bkj}(x_{2s})] - e_y^{bkj} \leq n_y^{bkj} \leq n_y^{bkj}(x_{0s}) + \max[n_y^{bkj}(x_{1s}), n_y^{bkj}(x_{2s})] + e_y^{bkj}. \quad (8)$$

记  $n_y^{bkj}$  在第  $s$  个区间的上下限分别为  $n_{ysmin}^{bkj}, n_{ysmax}^{bkj}$  对  $n_z^{bkj}$  进行同样操作,代入(5)式,则在每个区间,只需求解

$$\min_{j=1,2,3} \{n_{ysmin}^{bkj}\} - \epsilon_y < n_y^l < \max_{j=1,2,3} \{n_{ysmax}^{bkj}\} + \epsilon_y, \quad (9)$$

$$\min_{j=1,2,3} \{n_{zsmin}^{bkj}\} - \epsilon_z < n_z^l < \max_{j=1,2,3} \{n_{zsmax}^{bkj}\} + \epsilon_z, \quad (10)$$

即可得到可能与此面元相交的像元。虽然进行了近似处理,但考虑了近似误差的影响,所以不会将正确的解排除在外。若近似误差太大,会造成出现很多虚假相交关系,增加后续的计算量。缩短时间的区间可以降低误差,但增加了求解方程的次数,所以要根据具体问题选择合适的区间大小。

### 3.4 投影点筛选

在每个区间内,  $n_y^l$  为定值,所以先遍历全部区间,对(9)式进行计算,选出可能相交的行,见图 2(a)。在满足不等式的区间内对(10)式进行计算,得到可能相交的列,见图 2(b)。这样,只用最多  $4M+2$  次简单的线性运算,即可完成  $(2M+1)^2$  次遍历所做的工作。

经过遍历全部区间,面元对应的像元数量已经经过了极大程度的精简,这时,再使用文献[6]的方法,对保存下来的像元判断是否与此面元相交,则几乎可以完全排除不相交的关系。

对每一面元进行上述操作,即可得到面元与像元的相交关系。之后对每一像元,在已知其对应的面元后,利用激光雷达回波模型,就可以得到回波信号。

## 4 仿真实验结果及分析

对普林斯顿 3D 模型库<sup>[13]</sup>中的模型进行仿真,通过对比传统方法<sup>[6]</sup>和该算法的仿真结果和仿真所耗费的时间,验证算法性能。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, Matlab 2011a 软件。

### 4.1 仿真结果

对模型库中编号 m1450 的模型进行仿真,视线方向相对于目标坐标系的方位角为  $40^\circ$ , 俯仰角为

$30^\circ$ , 距离 600 m。激光雷达图像尺寸为  $129 \text{ pixel} \times 129 \text{ pixel}$ , 扫描周期 0.1 s。目标运动速度  $\mathbf{v} = [10, 30, 50]^T$  (m/s), 自转轴  $\mathbf{n} = [0.59, 0.49, -0.64]^T$ , 角速度  $40^\circ/\text{s}$ 。图 3(a)、(b)为对静止目标仿真得到的激光雷达距离图、强度图,图 3(c)、(d)为目标做匀速直线运动、定轴匀速转动时仿真得到的距离图、强度图,均未添加噪声。从图中看出,是否考虑激光扫描和目标运动的影响,将对仿真结果造成很大差异。

用均方误差(MSE,  $E_{MS}$ )作为指标,对比传统仿真算法和该算法仿真结果的差异:

$$E_{MS} = \frac{1}{MN} \sum_{(x,y)} [f_r(x,y) - f(x,y)]^2, \quad (11)$$

式中  $M, N$  分别对应图像的列数和行数,  $f_r(x,y), f(x,y)$  分别对应传统算法和该算法仿真得到的图像。

仿真中,在同等条件下,传统算法和该算法仿真图像的 MSE 均为 0。使用加速算法,并不会影响仿真的真实度。

### 4.2 仿真时间

仿真用到了 6 种模型,分别为四方体、船(m1450)、坦克(m1420)、飞机(m1124)、植物(m991)和建筑(m418),括号中表示其在模型库中的编号。

表 1 给出了仿真过程中需要判断像元与面元相交的次数以及总的运行时间,图像大小为  $33 \text{ pixel} \times 33 \text{ pixel}$ 。从表 1 中可以看出,计算方法对于任何模型,在文献[6]的基础上进一步大幅降低了面元和像元求交的次数,仿真所需的总时间都显著下降。其中,模型中面元的数量越多,仿真时间下降地越明显,说明在面元数量较大时,求交操作占用

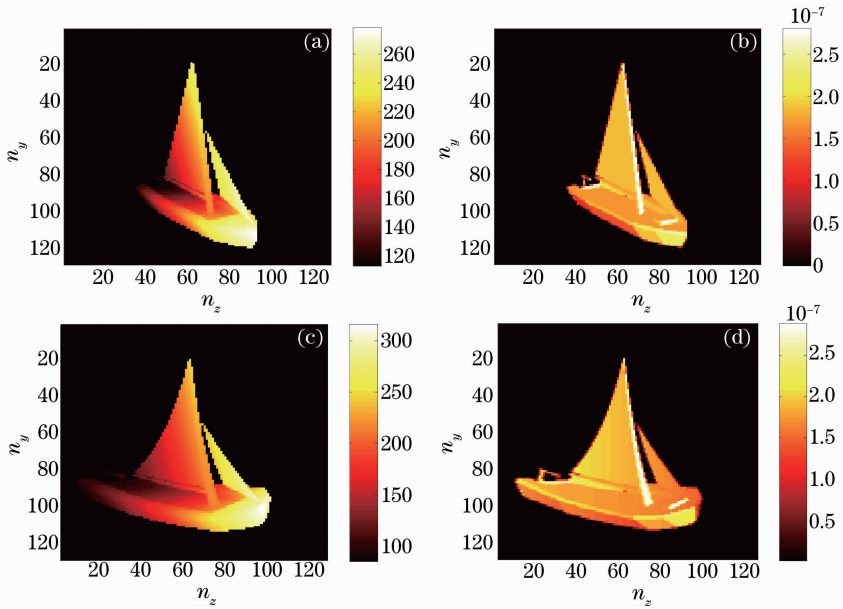


图 3 仿真结果。静止目标的(a) 距离像;(b) 强度像;运动目标的;(c) 距离像;(d) 强度像

Fig. 3 Simulation result. (a) Range image of the stationary object; (b) intensity image; (c) range image of the motion object; (b)intensity image

了绝大部分的运算时间。结果表明,该计算方法具有更高的运算效率和很好的稳定性。

表 1 不同仿真算法需要判断的求交次数以及总运行时间

Table 1 Number of intersection operations and total running time of different simulation algorithm

Target scene model	Total number of triangular elements	Number of intersection operations of Ref[6]	Running time of Ref[6] /s	Number of intersection operations of proposed algorithm	Running time of proposed algorithm /s
Cubic	12	13068	0.268	1541	0.159
Boat	156	169884	2.83	3851	0.231
Tank	19631	21378159	318	76765	4.75
Aircraft	572	622908	10.4	7635	0.347
Plant	6370	6936930	114	23378	1.62
Building	2836	3088404	50.9	27342	1.05

图 4(a)给出总运行时间和图像宽度之间的关系(利用飞机模型,像元总数目为图像宽度的平方)。图 4(b)给出总运行时间与模型面元数量之间的关

系(从坦克模型中随机选取一定数量的面元),图像大小为 33 pixel×33 pixel。可见,该算法的运算速度随图像宽度近似为正比关系,而文献[6]方法随图

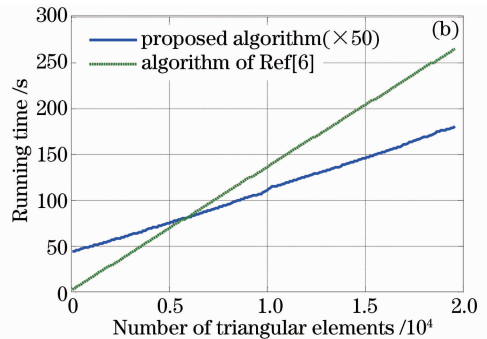
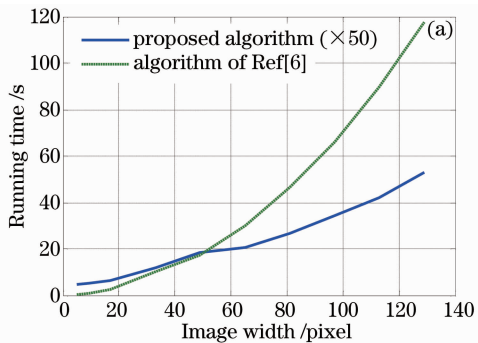


图 4 运算时间随(a)图像宽度;(b)面元数量的关系(对本算法运算时间放大 50 倍以方便显示)

Fig. 4 Relationship between running time and (a) image width; (b) number of triangular elements. (To present in a more convenient way, the running time of proposed algorithm will be amplified as 50 times as it used to be)

像宽度的平方近似为成正比关系。文献[6]中方法和该方法的运算速度都随面元个数成近似线性增长。所以该算法特别适合在像元数量很多情况下的快速仿真。

## 5 结 论

为提高扫描型成像激光雷达的仿真效率,对面元和像元的运动进行建模,将需要遍历的求交问题转化为求解不等式问题,并通过时间的剖分以及方程的线性化处理,快速筛选出面元与像元可能的对应关系,降低求交操作的次数,大幅提高计算效率。利用该算法的原理,也可以对任意方式运动的刚体甚至非刚体进行仿真,激光雷达的模型不局限于第2.1节中的假定。该方法还可扩展到其他扫描体制成像的探测器图像仿真,极具推广价值。

另外,如使用并行计算、在3.2节的时间剖分时采用二叉树的逐级剖分、对模型上的面元进行空间剖分等方法,还可能进一步提高仿真的效率,这也将是未来研究的方向。

## 参 考 文 献

- 1 Conant R. Micromachined Mirrors[M]. New York: Springer, 2002.
- 2 Mahjoubfar A, Goda K, Wang C, *et al.*. 3D ultrafast laser scanner[C]. SPIE, 2013; 8611: 86110N.
- 3 Kong Lingjiang, Yi Wei, Yang Jianyu, *et al.*. Research on scanning accuracy of liquid crystal phased array component of laser radar[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1080-1085.

孔令讲, 易 伟, 杨建宇, 等. 激光雷达液晶相控阵组件扫描精

度分析[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1080-1085.

- 4 McManamon P F. Review of lidar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology[J]. Opt Eng, 2012, 51(6): 060901.
- 5 Han Yi, Sun Huayan, Li Yingchun, *et al.*. Advances in foreign simulation softwares of imaging laser radar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010004.
- 6 Zhao Mingbo, He Jun, Fu Qiang. Simulation modeling and analysis of full-waveform lidar signatures[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0628002.
- 7 Tang Meng, Zhao Yuan, Zhang Yu, *et al.*. Simulation and experimental verification of gain-modulated scannerless lidar range image[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0414001.
- 8 Carlsson T, Steinvall O, Letalick D. Signature Simulation and Signal Analysis for 3-D Laser Radar [R]. Sweden: Swedish Defence Research Agency, 2001. 7-8.
- 9 Steinvall O, Sjöqvist L, Henriksson M. Photon counting lidar work at FOI, Sweden[C]. SPIE, 2012, 8375: 83750C.
- 10 Zhao Shuang, Li Xuejun. Algorithm of efficient ray tracing of complex scenes[J]. Computer Engineering, 2006, 32(1): 224-225.
- 11 Jang Y, Ebert D S, Gaither K. Time-varying data visualization using functional representations[J]. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 2012, 18(3): 421-433.
- 12 Mewett D T, Graham M D, Davies A H. Testing flight paths for collecting 3D lidar imagery of inconspicuous targets[C]. Cairns: 18th World IMACS/MODSIM Congress, 2009. 1636-1642.
- 13 Shilane P, Min P, Kazhdan M, *et al.*. The princeton shape benchmark[C]. Proceeding of Shape Modeling Applications, 2004. 167-178.

栏目编辑:何卓铭