

# 激光与光电子学进展

## 基于 Bresenham 算法控制二维振镜的扫描轨迹

周国清<sup>1,2\*</sup>, 林港超<sup>1,2\*\*</sup>, 周祥<sup>1,2</sup>, 谭逸之<sup>1,2</sup>, 李伟豪<sup>1,2</sup>, 李先行<sup>1,2</sup>, 邓荣华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>桂林理工大学机械与控制工程学院, 广西 桂林 541006;

<sup>2</sup>桂林理工大学广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004

**摘要** 飞行高度 1000 m、飞行速度 200 km/h 的机载激光雷达(LiDAR)在测量海域的海底地形时,需要控制 LiDAR 中的二维振镜扫描系统,使激光脚点达到探测幅宽 350 m 以上、扫描网格点密度在 1 spots/m<sup>2</sup> 以上的圆锥扫描轨迹。根据二维振镜结构的特性,本文通过改进的 Bresenham 算法生成控制系统中步进电动机的触发信号,并对由二维振镜系统导致的光束横向偏移误差进行补偿,使扫描角误差降低至 0.24 mrad 以下。通过仿真实验验证了 Bresenham 算法可使机载 LiDAR 的二维振镜扫描系统达到水面激光脚点密度 1~5.59 spots/m<sup>2</sup> 和扫描角 10°~60° 的圆锥扫描,进一步证明了由算法导出的触发信号有效性。

**关键词** 图像处理; 激光雷达; 二维振镜; 圆锥扫描; Bresenham 算法

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2312001

### Controlling Scanning Trajectory of Two-dimensional Galvanometer Based on Bresenham Algorithm

Zhou Gouqing<sup>1,2\*</sup>, Lin Gangchao<sup>1,2\*\*</sup>, Zhou Xiang<sup>1,2</sup>, Tan Yizhi<sup>1,2</sup>, Li Weihao<sup>1,2</sup>,  
Li Xianxing<sup>1,2</sup>, Deng Ronghua<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology,  
Guilin, Guangxi 541006, China;

<sup>2</sup>Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology,  
Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** To control the two-dimensional galvanometer scanning system in light detection and ranging (LiDAR), the laser foot points can reach the detection width of 350 m or more, scanning grid point density in 1 spots/m<sup>2</sup> or more high pointing accuracy cone scan at a flight altitude of 1000 m and a flight speed of 200 km/h airborne LiDAR to sea bottom topography mapping. According to the characteristics of the two-dimensional galvanometer structure, this study uses the improved Bresenham algorithm to generate the trigger signal of the stepping motor in the control system and compensates for the beam lateral offset error caused by the two-dimensional galvanometer system, reducing the scan angle error to < 0.24 mrad. Simulation experiments demonstrate that the algorithm can cause the airborne LiDAR's two-dimensional galvanometer scanning system to achieve the conical scanning on the water surface with a laser foot point density of 1~5.59 spots/m<sup>2</sup> and scanning angle of 10°~60°, and the trigger signal derived by the algorithm is validated through experiments.

**Key words** image processing; LiDAR; two-dimensional galvanometer; cone scan; Bresenham algorithm

**OCIS codes** 100.2000; 100.4996; 010.3640; 280.1355

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-03-15; 录用日期: 2021-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(41431179,41961065)、广西创新驱动发展专项(AA18118038,AA18242048)

通信作者: \*gzhou@glut.cn; \*\*1173008408@qq.com

# 1 引言

机载激光雷达测深是一项新型海洋地形测绘技术,由于机载 LiDAR 在空中探测不会受到地形与海浪的影响,并且装载了快速的大范围扫描系统,其测量效率远远大于传统的船载声纳地形测绘系统<sup>[1]</sup>。机载 LiDAR 一般用于近海岸、岛礁或者船只无法进入的海域海底测绘地形,为后期近海岸开发提供地形数据。在机载 LiDAR 探测时,通过扫描系统使激光光束的方向发生偏转,并随着飞机的运动,来完成对海面 and 海底的扫描。但即使是在衰减程度较小的蓝绿色带,由于海水复杂的光学特性,在传播过程中激光的穿透性能会受到限制<sup>[2]</sup>,严重影响着机载测深系统的回波检测能力。如何提高机载 LiDAR 海洋测深系统的回波检测能力一直是机载激光测深技术的重点<sup>[3-4]</sup>,而激光入射水面的角度影响着接收光学系统接收到的回波能量大小<sup>[5]</sup>。因此在机载 LiDAR 探测海洋时,国内外大多采用圆锥扫描来减小水面对激光回波信号功率的影响,提高接收的海底回波信号强度,获得更多的激光脚点 3D 数据<sup>[6]</sup>。美国的 AOL (Airborne Oceanographic LiDAR)<sup>[7]</sup>采用扫描角为 15°的圆锥扫描,瑞士 Leica 公司的 HAWKEYE III<sup>[8]</sup>采用扫描角为 40°的圆锥扫描,加拿大 Optech 公司的 CZMIL (Coastal Zone Mapping and Imaging LiDAR)系统<sup>[9]</sup>采用扫描角为 40°的圆锥扫描,中国科学院上海光机所研制的 Mapper5000 系统<sup>[10]</sup>采用扫描角为 30°圆锥扫描。

常用的圆锥扫描方式有二维振镜扫描、旋转多面镜扫描、光楔扫描和双光楔扫描。二维振镜扫描

是属于摆镜反射式扫描<sup>[11]</sup>的一种,没有多面镜旋转棱边的损耗,扫描视场比光楔扫描大且不存在双光楔扫描的色散。二维振镜扫描定位精度可达到 10"以内<sup>[12]</sup>,具有转动惯量小、扫描速度快和扫描方式灵活的优点,既可以用光栅方式扫描,又可以用矢量方式扫描,且具有指向功能<sup>[13]</sup>。在国外,其控制技术比较成熟,广泛用于 LiDAR 系统中,如加拿大的激光雷达 LAPS (Autonomous Planetary landing System)<sup>[14]</sup>和美国的扫描型雷达 SSLS (Spaceborne Scanning Lidar System)<sup>[15]</sup>。国内的测绘雷达采用二维振镜扫描作为圆锥扫描的扫描系统较少,因此本文提出通过改进一种增量算法—Bresenham 算法<sup>[16]</sup>来控制二维振镜扫描系统,使二维振镜扫描系统可达到扫描视场 10°~60°、水面激光脚点密度 1 spots/m<sup>2</sup>以上和探测幅宽 350 m 以上的圆锥扫描轨迹,补偿了二维振镜扫描系统在扫描过程中产生的横向误差,并结合实验验证了触发信号的有效性。

# 2 轨迹控制原理

二维振镜扫描轨迹控制原理是将轨迹中的每个位置点转化为触发信号输入驱动器来控制步进电动机的转动角从而实现特定的激光光束扫描轨迹。如图 1 中二维振镜扫描系统总框图所示,圆锥扫描轨迹需要得到由圆弧上的位置点  $(x_i, y_j)$  转化成的触发信号,来生成相应的脉冲信号控制  $x$  轴和  $y$  轴的步进电动机,由此带动  $y$  轴的反射镜和  $x$  轴的反射镜向  $x$  轴方向和  $y$  轴方向摆动相应的角度,形成圆锥扫描轨迹。

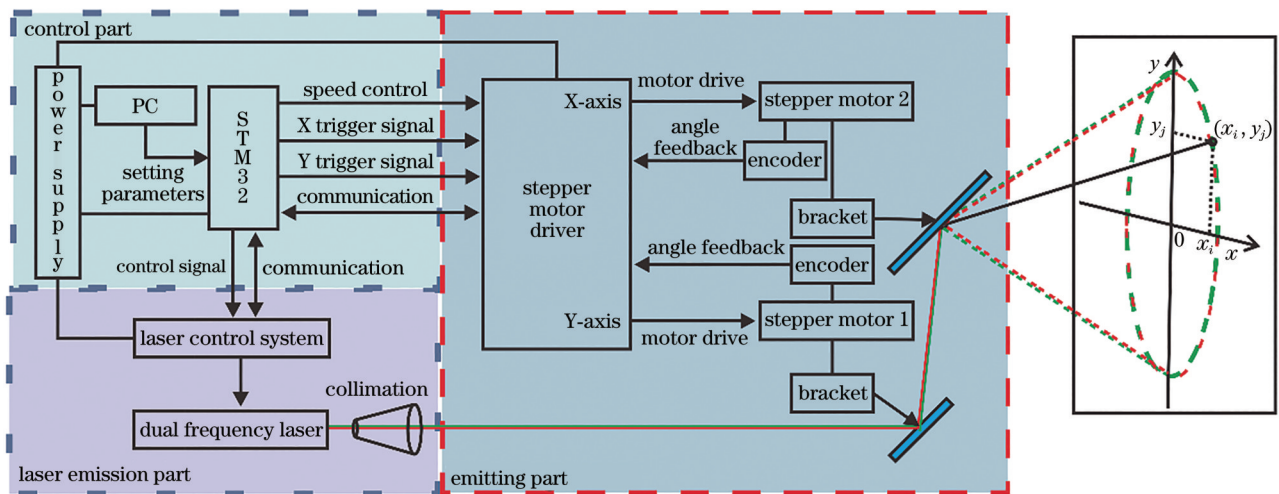


图 1 二维振镜扫描系统总框图

Fig. 1 General block diagram of two-dimensional galvanometer scanning system

二维振镜扫描系统的控制过程是向 STM32 (STMicroelectronics 32) 输入初始位置、转速和扫描角, 再将 STM32 运算改进的 Bresenham 算法得出相应位置点的触发控制信号输入步进电动机的驱动器, 由驱动器将脉冲信号输出到步进电动机来分别控制  $x$  轴和  $y$  轴的反射镜支架的摆动角度, 并使用角度传感器将角度补偿反馈给驱动器的角度控制模块, 实现对两个反射镜转速、转动方向和转动角度的高精度控制。通过  $x$  轴的步进电动机带动反射镜转动  $i$  角度,  $y$  轴步进电动机带动反射镜转动  $j$  角度, 此时的激光光束经过两种反射镜前表面反射后射出的激光光束在铅垂平面内偏转  $(2i, 2j)$  对应着位置点坐标  $(x_i, y_j)$ , 即激光脚点。

### 2.1 二维振镜系统

根据项目设计的二维振镜扫描系统是由扫描范围 500~1600 nm、反射效率大于 99%、前表面反射的成对的反射镜和步进电动机以及驱动器组成。步进电动机能将电脉冲信号转化成相应的角位移, 驱动器每对步进电动机输入一个脉冲信号, 步进电动机就会转动一个角度<sup>[17]</sup>。步进电动机带动  $y$  轴的反射镜摆动  $j$  角度后激光光束沿铅垂方向平移一段距离, 如图 2(a) 所示; 同理, 步进电动机带动  $x$  轴的反射镜摆动  $i$  角度后激光光束沿水平方向平移一段距离, 如图 2(b) 所示。

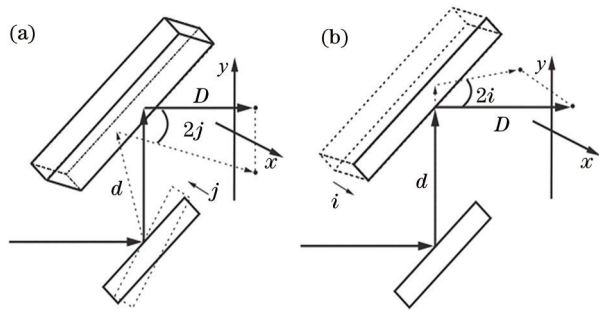


图 2 扫描示意图。(a)  $y$  轴摆动; (b)  $x$  轴摆动  
Fig. 2 Scanning diagram. (a)  $y$ -axis swing; (b)  $x$ -axis swing

二维振镜激光脚点的轨迹方程<sup>[18]</sup>为

$$\begin{cases} x_i = (d + D \sec 2j) \tan 2i \\ y_j = D \tan 2j \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $d$  为两个振镜之间的距离,  $D$  为激光射出的距离。

对二维振镜扫描系统中步进电动机的精准控制是控制扫描轨迹的关键, 因此引入在计算机图形学领域的增量算法—Bresenham 算法。通过改进 Bresenham 算法, 生成对二维振镜扫描系统中步进

电动机转动进行控制的触发信号, 以达到圆锥扫描轨迹的要求。

### 2.2 Bresenham 算法改进

Bresenham 算法原理<sup>[19]</sup>是: 设第  $i$  步  $(x_i, y_i)$  是圆弧上的位置点, 第  $i+1$  步位置点  $(x_i + 1, y_i + 1)$  是  $(x_i + 1, y_i)$  或者  $(x_i + 1, y_i - 1)$  中的一个, 分别记为  $A$  和  $B$ , 此时两点离圆心距离二次方的差为

$$d_A = (x_i + 1)^2 + y_i^2 - R^2, \quad (2)$$

$$d_B = R^2 - (x_i + 1)^2 - (y_i - 1)^2. \quad (3)$$

此时引入一个判别量  $p_i$ ,

$$p_i = d_A - d_B. \quad (4)$$

当  $p_i < 0$  时, 表示  $A$  点比  $B$  点离圆弧近, 选  $A$  点为第  $i+1$  步位置点; 当  $p_i > 0$  时, 表示  $B$  点比  $A$  点离圆弧近, 选  $B$  点为第  $i+1$  步位置点。以上原理给出的是八分之一圆弧位置点, 要得到整个圆的位置点需要利用八对称, 就可以得出全部圆弧的位置点。算法过程仅使用整数加减法、位移没有浮点数, 无法依次生成对应的激光脚点, 无法生成输出触发信号控制电动机, 因此本文通过改进 Bresenham 算法, 引入增量插补来触发控制信号对步进电动机进行控制, 用硬件移位或者转动角度实现。

首先对算法输出的位置点进行改进。为了让其按顺时针的顺序依次输出, 需要对输出点依次按顺时针先进行八等份分割, 再分别依次求出位置点, 将得出位置点的  $x$  轴坐标值和  $y$  轴坐标值分成两个  $X, Y$  矩阵。引入一个判别量  $Q$ :

$$Q = (x - x_0)^2 + (y - y_0 - 0.5)^2 - \left(\frac{\theta}{4e}\right)^2, \quad (5)$$

式中,  $x_0$  为设定初始圆心的  $x$  坐标轴值,  $y_0$  为设定初始圆心的  $y$  坐标轴值,  $\theta$  为设定扫描角,  $e$  为步距角。

首先根据象限顺时针分割为第一象限、第二象限、第三象限和第四象限, 再根据将每个象限分成两个部分, 将值导入每个部分, 然后将运算结果存入相应的矩阵中。

在第一象限中, 矩阵  $X_1 = [X_1, x]$ , 矩阵  $Y_1 = [Y_1, y]$ ,  $X_2 = [X_2, y - y_0 + x_0]$ , 矩阵  $Y_2 = [Y_2, x - x_0 + y_0]$ 。

在第二象限中, 矩阵  $X_3 = [X_3, y - y_0 + x_0]$ , 矩阵  $Y_3 = [Y_3, y_0 - x + x_0]$ , 矩阵  $X_4 = [X_4, x]$ , 矩阵  $Y_4 = [Y_4, 2y_0 - y]$ 。

在第三象限中, 矩阵  $X_5 = [X_5, 2x_0 - x]$ , 矩阵



$Y_5 = [Y_5, 2y_0 - y]$ , 矩阵  $X_6 = [X_6, x_0 - y + y_0]$ , 矩阵  $Y_6 = [Y_6, y_0 - x + x_0]$ 。

在第四象限中, 矩阵  $X_7 = [X_7, x_0 - y + y_0]$ , 矩阵  $Y_7 = [Y_7, x - x_0 + y_0]$ , 矩阵  $X_8 = [X_8, 2x_0 - x]$ , 矩阵  $Y_8 = [Y_8, y]$ 。

在算法中加入单位转动角和初始位置参数后, 计算判别量  $Q$ 。当  $x < y$  时, 用 while 循环, 当判别量  $Q < 0$  时, 让  $x = x + 1$ , 后将  $x, y$  的值存入矩阵后, 进行下次循环; 当判别量  $Q > 0$  时,  $y = y - 1$  后将  $x, y$  的值存入矩阵后, 进入下次循环; 当  $x > y$  时, 循环停止, 输出坐标位置点依次输入到八份  $X$  坐标矩阵和  $Y$  坐标矩阵。

改进算法在计算过程中有 8 个重叠点, 而且相邻矩阵的存储顺序有问题, 还需要对存储的矩阵进行处理。首先对  $X_2, X_4, X_6, X_8$  和  $Y_2, Y_4, Y_6, Y_8$  矩阵进行顺序逆转, 再对矩阵  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$  和矩阵  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7, Y_8$  的矩阵首行进行去除, 最后将得到的坐标点分成  $x$  轴坐标的值储存在  $X = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8]$  和得到的坐标点分成  $y$  轴坐标的值储存在  $Y = [Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7,$

$Y_8]$ , 这样得到了所有含有顺时针顺序的激光脚点位置点的全部  $x$  值和全部  $y$  值。输入步进电动机的脉冲和转动方向与  $\Delta x (\Delta x = x_{i+1} - x_i)$  和  $\Delta y (\Delta y = y_{i+1} - y_i)$  有关。设转向顺时针为+, 转向逆时针为-, 当  $\Delta x > 0$  时, 输入步进电动机  $x$  轴的触发脉冲为 1, 转动方向为顺时针, 即 +1; 当  $\Delta x = 0$  时, 步进电动机  $x$  轴无输入脉冲为 0; 当  $\Delta x < 0$  时, 输入步进电动机  $x$  轴的触发脉冲为 1, 转动方向为逆时针, 即 -1。同理当  $\Delta y > 0$  时, 输入步进电动机  $y$  轴的触发脉冲为 1, 转动方向为顺时针, 即 +1; 当  $\Delta y = 0$  时, 步进电动机无输入脉冲为 0, 当  $\Delta y < 0$  时, 输入步进电动机  $y$  轴的触发脉冲为 1, 转动方向为逆时针, 即 -1。因此将得到的矩阵  $X$  和矩阵  $Y$  相邻的数进行求差, 储存在差值矩阵  $\Delta X$  和  $\Delta Y$  中得到触发信号。

### 2.3 算法分析

输入  $\theta = 20^\circ, e = 1$  后, 运行 Bresenham 算法和改进后的 Bresenham 算法分别得到扫描角为  $20^\circ$  的数据, 将改进前后的输出的坐标点的  $x, y$  值分别进行对比, 再对改进前后的  $x, y$  值的差值进行对比, 如图 3 所示。

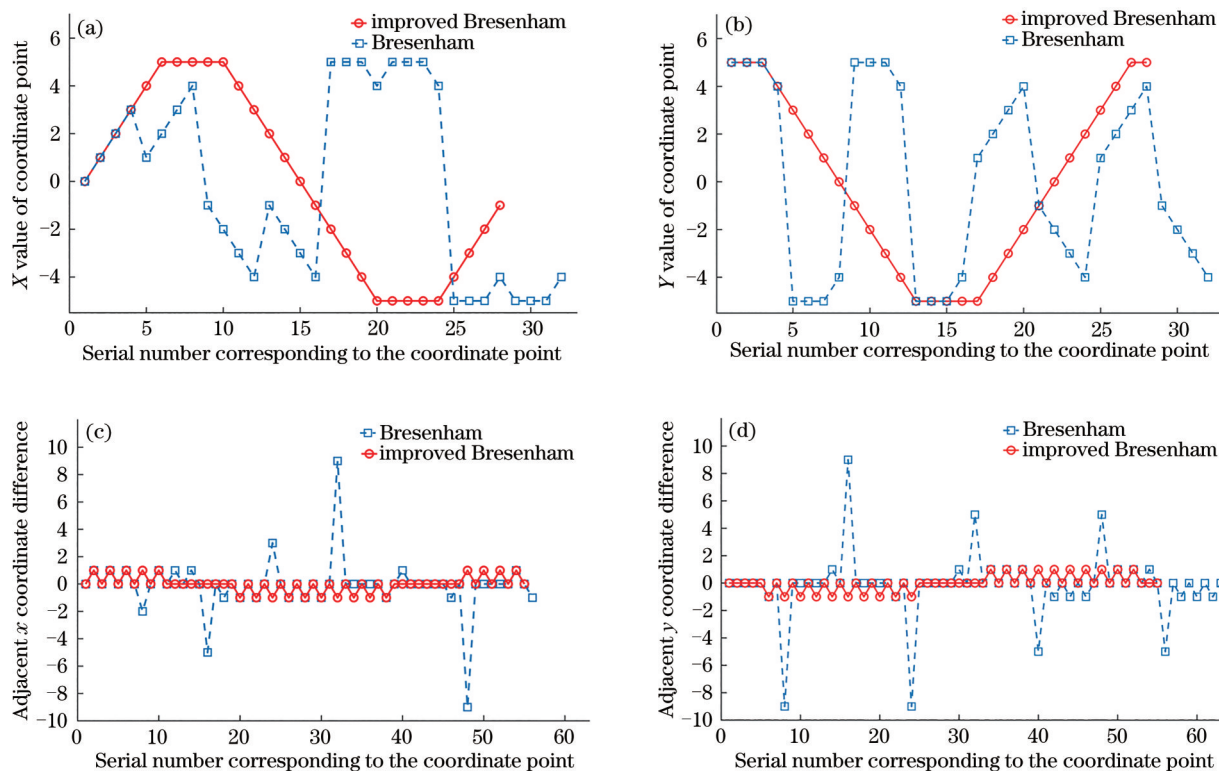


图 3 改进前后算法输出值对比。(a)  $x$  坐标值对比; (b)  $y$  坐标值对比; (c)  $\Delta x$  值对比; (d)  $\Delta y$  值对比

Fig. 3 Comparison of algorithm output values before and after improvement. (a)  $x$  coordinate values comparison; (b)  $y$  coordinate values comparison; (c)  $\Delta x$  coordinate values comparison; (d)  $\Delta y$  coordinate values comparison

由图 3(a)和(b)可见,Bresenham算法得出的位置点有重叠点,不能得到一个有序的位置点,导致了差值结果无规律波动。改进后的 Bresenham 算法得出的 28 个位置点的  $x$  和  $y$  值数据是分别计算八分位置点并对八分位置点进行排序后将重叠点进行了剔除得出的数据的结果,因此输出的  $x$  和  $y$  值呈现连续性,不会发生突然的波动,进行差值处理后可导出相应的触发信号。由图 3(c)和(d)可知 Bresenham 算法无法得出相应的控制信号,而改进后的 Bresenham 算法可得出触发信号为 1、0 和 -1 对应着触发电机的转动信号。

### 3 实验验证

#### 3.1 仿真实验

为了更好地展示算法,采用以上算法对比实例数据作为实验数据进行仿真实验。通过运算改进算法得到的轨迹位置点数据进行实验,将触发信号的数据导入信号发生器中,验证改进算法得到的触发信号能否输出控制步进电动机的脉冲信号,控制实验如图 4 所示。

光学仿真实验的初始条件为步距角  $e=1^\circ$ ,  $y$  轴反射镜初始位置的角度设置为  $50^\circ$ ,  $x$  轴反射镜初始位置的角度为  $45^\circ$ ,将得出的  $20^\circ$  圆锥扫描位置点数据输入光学仿真实验中。该实验是利用

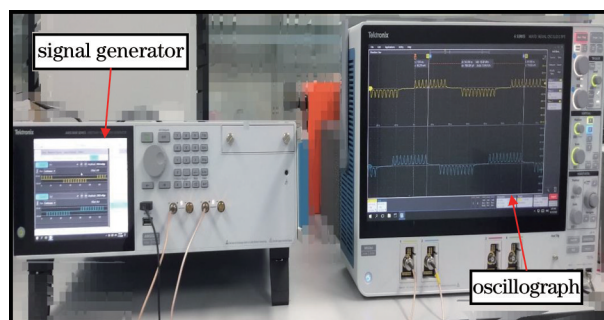


图 4 触发信号验证实验

Zemax 软件的扫描功能对二维振镜扫描系统的步电动机转动仿真模拟,其过程是运算改进算法得到触发信号数据,将其输入 Zemax 软件的扫描功能模块来模拟反射镜摆动的角度和激光光束偏转的角度,通过全视角点列图捕捉在像面上激光扫描的脚点。二维振镜扫描系统通过 Zemax 软件仿真时,由于激光光束是柱形结构,在光路中无法看清轨迹,用激光光束中心的一条直线替代了柱形激光光束来对激光光束进行简化。如图 5(a)所示,Zemax 软件仿真二维振镜偏转轨迹可知,二维振镜扫描系统在扫描时,仿真反射镜摆动结构跟步进电动机控制摆动结果一致。由图 5(b)可知,二维振镜扫描系统会产生横向偏移,从而带来扫描误差。

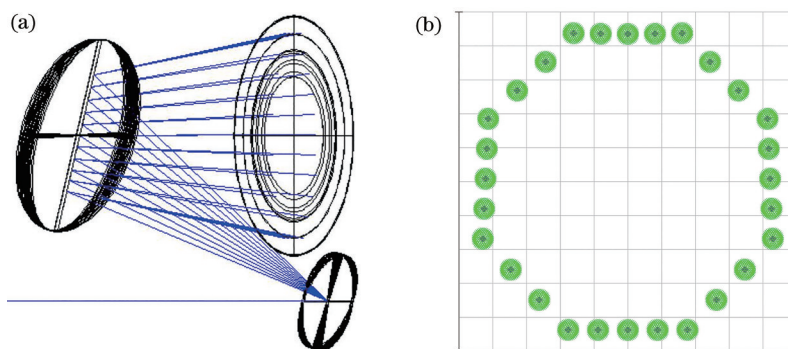


图 5 二维振镜扫描实验。(a)二维振镜扫描;(b)  $20^\circ$ 圆锥扫描轨迹

Fig. 5 Two-dimensional galvanometer scanning experiment. (a) Two-dimensional galvanometer scanning; (b)  $20^\circ$  cone scanning trajectory

通过 MATLAB 软件运行改进后的 Bresenham 算法,仿真飞行过程中二维振镜扫描系统的激光脚点,输入初始参数,分别得到扫描视场为  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  和  $60^\circ$  的探测幅值和水面激光脚点密度值,仿真可变扫描轨迹数据如表 1 所示。

机载 LiDAR 二维振镜扫描结果如图 6 所示,图 6(a)~(d)为对应的轨迹。从二维振镜扫描结果

可看出,通过算法控制二维振镜扫描系统可达到  $10^\circ\sim 60^\circ$  范围的扫描,探测幅值可从 175 m 的小幅度扫描到 1154.7 m 的大幅度扫描,如图 6(a)所示;  $20^\circ$  扫描轨迹的水面激光脚点密度可从  $1\text{ spots/m}^2$  到  $5.59\text{ spots/m}^2$ ,如图 6(b)和(c)所示;  $60^\circ$  扫描轨迹的水面激光脚点密度最高为  $1.33\text{ spots/m}^2$ ,如图 6(d)所示。

表 1 仿真可变扫描轨迹数据值  
Table 1 Values of simulate variable scanning trajectory

Icon	Scanning angle / (°)	Motor speed / rps	Flight speed / (km·h <sup>-1</sup> )	Scanning width / m	Laser feet density / (spots·m <sup>-2</sup> )
a	10	1.4	200	175.0	1.30
b	20	1.1	200	352.7	1.00
c	20	6.0	200	352.7	5.59
d	60	6.0	200	1154.7	1.33

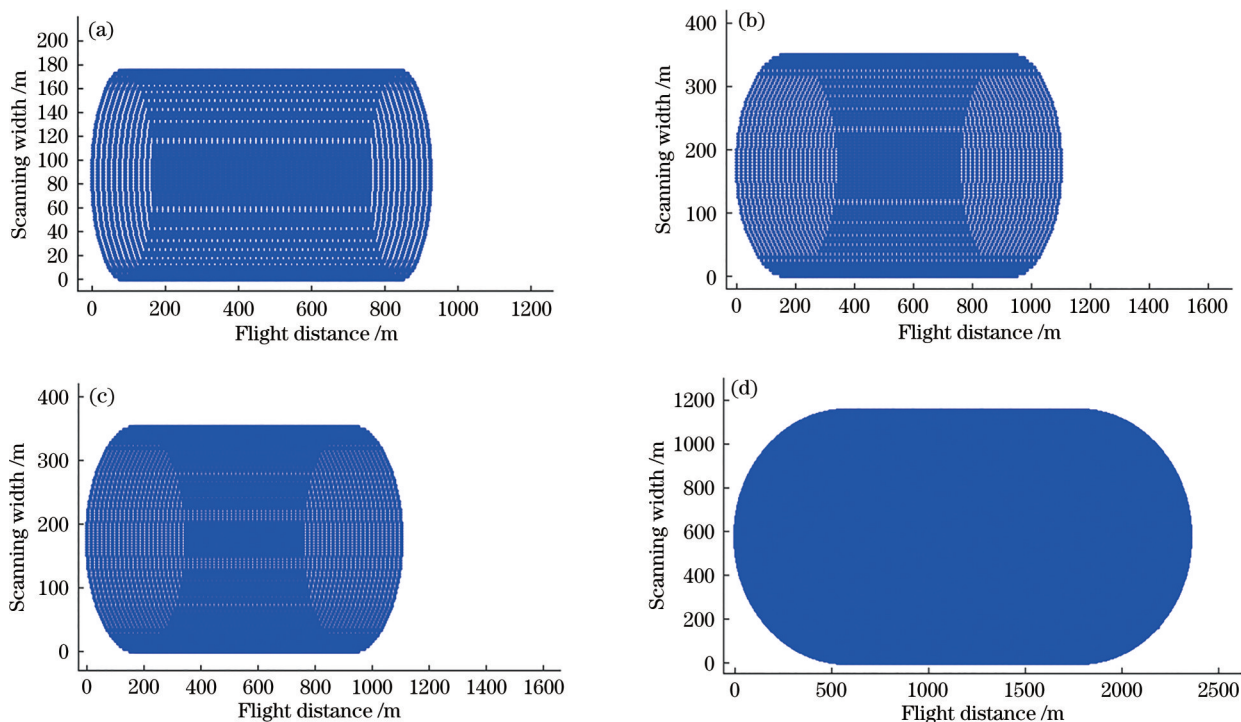


图 6 扫描轨迹的仿真。(a) 10°扫描轨迹；(b) 20°扫描轨迹；(c) 20°扫描轨迹；(d) 60°扫描轨迹

Fig. 6 Scanning trajectory's simulation. (a) 10° scanning trajectory; (b) 20° scanning trajectory; (c) 20° scanning trajectory; (d) 60° scanning trajectory

### 3.2 实验分析

通过实验可知触发信号能通过信号发生器生成一定频率的脉冲信号,并通过示波器可观察到由触发信号生成的脉冲信号。即改进算法得到的触发信号能转化为指令输入驱动器,通过驱动器生成相应的脉冲信号输出到步进电动机中控制其转动。在二维振镜扫描系统中,激光光束经过 y 轴的反射镜时,入射激光与 y 轴反射镜的转轴垂直,不会产生误差。然而由于 x 轴反射镜将激光光束偏转,导致 x 轴反射镜入射的激光与 y 轴反射镜的转轴不垂直,从而使激光偏转角度与步进电动机偏转角度出现了非线性变换,导致光斑出现横向偏移。入射激光偏离 x 轴反射镜转轴的角度越大,横向偏移量就越大<sup>[13]</sup>,从而引起扫描角误差,偏心带来的误差方程<sup>[12,20]</sup>为

$$C_x = (\sec 2j - 1) \tan 2i。 \quad (6)$$

为了减少由于旋转轴心与激光轴心不同导致的扫描角误差,用改进的算法对扫描角进行补偿来减少扫描角度误差。需要对 x 轴转动数据的进行补偿,即对 X 矩阵的数进行运算后求得 C<sub>x</sub>再加入 X 矩阵,补偿 x 轴反射镜的光斑横向偏移误差,如图 7(a)所示。由图 7(b)可知,20°圆锥扫描的扫描横向角度误差通过改进算法补偿后,激光脚点横向角度误差小于 0.19 mrad。二维扫描系统在 10°和 60°扫描轨迹的最大扫描角横向误差分别小于 0.19 mrad 和 0.24 mrad。

针对本课题组机载 LiDAR 的扫描系统的研制要求,需要在 1000 m 高空,飞行速度为 200 km/h,海面探测幅宽为 350 m,扫描系统的扫描视场为 20°。为得到垂直飞机航线,扫描网格点密度要达到



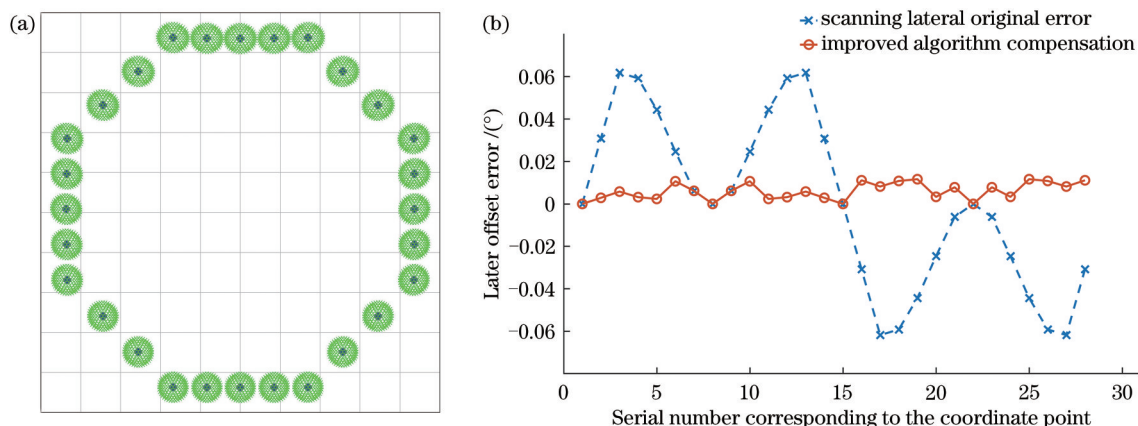


图 7 补偿后的  $20^\circ$  圆锥扫描轨迹和光学系统横向角度误差。(a) 补偿后  $20^\circ$  圆锥的扫描轨迹; (b) 补偿前后横向角度误差对比  
 Fig. 7  $20^\circ$  conical scanning trajectory and optical system transverse angle error after compensation. (a) Scanning trajectory of  $20^\circ$  cone after compensation; (b) comparison of lateral angle errors before and after compensation

1 spots/m<sup>2</sup>以上。已知纵向网格点密度由飞行速度决定,而飞行速度为 200 km/h,则需要保证激光圆锥扫描一圈所需时间与飞行 2 m 所需时间相同,即扫描一圈时间为 0.036 s 可保证纵向 2 m 的网格密度,即圆锥扫描的扫描转速为 28 rps。当二维振镜的扫描速度为 31 rps 时,扫描角为  $20^\circ$  圆锥轨迹的探测幅值为 350 m,水面激光脚点密度为 1 spots/m<sup>2</sup>,符合项目要求。

## 4 结 论

二维振镜相比其他扫描系统而言,由于其扫描轨迹可编辑,可通过控制二维振镜扫描系统的摆动方法得到不同角度和方向的扫描轨迹,因此二维振镜扫描系统可模块化来实现 LiDAR 系统对扫描的多种需求。本文提出了一种可对扫描电机进行控制实现不同扫描角、网格点密度的圆锥扫描轨迹的方法,即基于 Bresenham 算法生成控制二维振镜系统需要的触发信号,并通过改进算法对二维振镜扫描系统偏转光线时产生的横向误差进行补偿,使扫描角的误差小于 0.24 mrad。扫描轨迹仿真实验表明,改进后的 Bresenham 算法能生成对该扫描系统步进电动机的触发信号,使二维扫描系统实现扫描角范围  $10^\circ \sim 60^\circ$ 、水面激光脚点密度范围 1~5.59 spots/m<sup>2</sup> 的圆锥扫描。在扫描过程中,二维振镜转动的偏心误差通过算法补偿步距角修正后,通过光学仿真实验对比,在飞行高度 1000 m、飞行速度 200 km/h、扫描角为  $20^\circ$  的条件下,可实现水面激光脚点密度最高达 5.59 spots/m<sup>2</sup>、扫描角误差小于 0.24 mrad、扫描角为  $60^\circ$  的圆锥扫描。

## 参 考 文 献

- [1] Ren L P, Zhao J S. Analysis of sea point trajectory in airborne laser bathymetry ellipse scanning[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2001, 21(3): 31-37.  
任来平, 赵俊生. 机载激光测深椭圆扫描海面点轨迹分析[J]. 海洋测绘, 2001, 21(3): 31-37.
- [2] Zhou G Q, Huang J J, Zhang G Y. Evaluation of the wave energy conditions along the coastal waters of Beibu Gulf, China[J]. Energy, 2015, 85: 449-457.
- [3] Zhou G Q, Zhou X, Yang J Z, et al. Flash lidar sensor using fiber-coupled APDs[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 4758-4768.
- [4] Zhou G Q, Jiang L J, Huang J J, et al. FPGA-based on-board geometric calibration for linear CCD array sensors[J]. Sensors, 2018, 18(6): E1794.
- [5] Li T S, Yang R K, Gao X, et al. Impulse response modeling for underwater wireless laser transmission [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1101001.  
李天松, 阳荣凯, 高翔, 等. 水下无线激光传输脉冲响应建模[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1101001.
- [6] Zhou G Q, Yang J Z, Yu X C, et al. Power supply topology for lidar system onboard UAV platform[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8286: 828606.
- [7] Christensen N B, Lawrie K C. Resolution analyses for selecting an appropriate airborne electromagnetic (AEM) system[J]. Exploration Geophysics, 2012, 43 (4): 213-227.
- [8] Steinvall O K, Koppari K R, Karlsson U C M. Airborne laser depth sounding: system aspects and performance[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2258: 392-412.

- [9] Fuchs E, Tuell G. Conceptual design of the CZMIL data acquisition system (DAS): integrating a new bathymetric lidar with a commercial spectrometer and metric camera for coastal mapping applications[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7695: 76950U.
- [10] He Y, Hu S J, Chen W B, et al. Research progress of domestic airborne dual-frequency LiDAR detection technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082801.  
贺岩, 胡善江, 陈卫标, 等. 国产机载双频激光雷达探测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 082801.
- [11] Qin X Y, Su D, Jia X Y, et al. Dislocation correction algorithm for adaptive laser confocal high-speed scanning microscopic imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0118001.  
秦小云, 苏丹, 贾新月, 等. 自适应激光共焦高速扫描显微成像错位校正算法[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0118001.
- [12] Yang Z Q, Wu D X, Zheng Y C. Study of angular non-linearity in 2-D optical scanning[J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 262-265.  
杨志卿, 吴登喜, 郑永超. 二维光学扫描中扫描角度非线性研究[J]. 激光技术, 2004, 28(3): 262-265.
- [13] PrecisionPelsue K., post-objective, two-axis, scanninggalvanometer[J]. Proceedings of SPIE, 1982, 0390: 70-78.
- [14] Pierrottet D F, Amzajerjian F, Meadows B L, et al. Characterization of 3-D imaging lidar for hazard avoidance and autonomous landing on the Moon[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6550: 655008.
- [15] Nimelman M, Tripp J, Allen A, et al. Spaceborne scanning lidar system (SSLS) upgrade path[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6201: 62011V.
- [16] Kuzmin Y P. An efficient circle-drawing algorithm [J]. Computer Graphics Forum, 1990, 9(4): 333-336.
- [17] Szamel L, Vajsz T. The special characteristics of stepping motor drives and a new type of classification [J]. Acta Polytechnica Hungarica, 2016, 13(7): 83-102.
- [18] Li G C, Fang Y H, Ji R Y, et al. High-precision laser tracking system based on two-dimensional galvanometers and position sensitive detectors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704007.  
李桂存, 方亚秒, 纪荣祎, 等. 基于二维振镜与位置灵敏探测器的高精度激光跟踪系统[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704007.
- [19] Barrera T, Hast A, Bengtsson E. A chronological and mathematical overview of digital circle generation algorithms-introducing efficient 4- and 8-connected circles[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2016, 93(8): 1241-1253.
- [20] Li Y X, Cui T X, Li Q Y, et al. A study of correction method to the pincushion distortion based on dual galvanometer LiDAR scanning system[J]. Optik, 2019, 181: 555-561.