

激光成像目标模拟器建模方法

张秋晨, 施蕊, 李卓

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 激光成像目标模拟装置是激光雷达半实物仿真系统中的关键部件, 其关键技术之一是目标建模。研究了激光成像目标的建模方法, 以坐标变换理论为基础建立了目标模型, 并搭建实验装置对模型进行验证。通过对不同视角下扫描的部分目标信息进行数据配准, 得到目标的整体信息, 然后根据视点坐标变换关系, 可以在空间中任意视点获得目标的信息, 以供图像生成系统生成图像。实验结果与理论值相似度高, 验证了建模的正确性, 为激光雷达回波目标模拟器获取目标信息提供了一条可行的途径。

关键词: 激光成像雷达; 数据配准; 建模方法; 半实物仿真; 目标模拟器

中图分类号: TN955 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0112-06

Modeling method of laser imaging target simulator

Zhang Qiuchen, Shi Rui, Li Zhuo

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: LADAR target simulator is the key component of the HWIL system for LADAR, which is designed to simulate the LADAR return projection. One of the key technologies of target simulator is object modeling. The method of object modeling was performed and mathematic models were given based on coordinate transformation. The overall information of target was obtained through data registration on the part of the target information from different angles of scanning. Then according to the viewpoint of coordinate transformation, the target information was obtained by arbitrary viewpoint in the space, which was provided for image generation system to generate an image. Theoretical results agree well with the values measured experimentally. Therefore, the accuracy of modeling was verified by experiment. This method can provide a feasible way for LADAR target simulator to acquire the information of the target.

Key words: laser imaging radar; data registration; modeling method; hardware-in-the-loop simulation; target simulator

收稿日期: 2014-05-07; 修订日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61205116)

作者简介: 张秋晨(1987-), 女, 硕士生, 主要从事激光成像目标模拟器方面的研究。Email: allenqiuchen@163.com

导师简介: 李卓(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光成像目标模拟器等方面的研究。Email: lizhuo@bit.edu.cn

0 引言

激光成像雷达的应用,推动了激光雷达半实物仿真技术的发展。而激光成像目标模拟装置是激光雷达半实物仿真系统中的关键部件,是在实验室条件下模拟激光雷达的回波信号,为被测试的激光雷达成像系统提供目标和背景的反馈信号的装置^[1-3]。

激光成像目标模拟器的关键技术之一是目标建模。为了进行激光雷达回波信号的模拟显示,需要给此回波信号模拟显示器输入一个包含目标距离和位置信息的信号。因此首先利用计算机生成一个目标的距离“像”^[4],即产生激光回波的场景信息(包括目标的距离信息和视场内的角度位置信息),然后将距离和角度信息折算成激光从发射点经过目标反射所走过的时间,即把距离信号变成时间的延时,再经过激光脉冲发生装置来模拟从复杂的目标和背景反射回来的激光辐射脉冲的形状和返回的时间^[5]。

论文以坐标变换理论为基础讨论激光三维成像目标建模的方法,推导了目标信息建模以及信息再现公式。并采用扫描方式获取目标距离信息,从不同视点获取多幅距离像,经过数据处理得到目标完整的三维距离像,然后由理论模型得到不同视点的距离信息。实验验证了所建模型的正确性。

1 理论分析

建模包括两部分,第一部分是目标信息的还原及再现,为了获得目标的距离像,选择空间中两个视点目标进行扫描,获取目标在两个分视点下的坐标数据,然后通过空间坐标变换关系将各视点数据变换到统一的参考坐标系 O 坐标系中^[6-7],因此,物体表面的所有三维坐标信息在 O 坐标系中给出。第二部分是目标信息的建模,首先以 O 为原点建立参考坐标系,取空间任意视点 C 建立 C 视点坐标系。已知目标在 O 坐标系中的坐标,根据 C 视点坐标系与参考坐标系的转换关系将 O 坐标系下的数据,投影到 C 坐标系中,可以得到 C 视点下的目标信息。

1.1 目标信息再现

通常情况下,由于一个视角只有有限的视野以

及物体表面的自遮挡等原因,一个给定视点可见的目标表面的数据点有限,很难同时获得目标的整个表面数据,因此需要综合多个视点考虑。由于在不同视点时相对原点的坐标不同,必须将多视点下的不同三维数据进行配准,将其转换到同一坐标系下。因此信息再现时,设 A 、 B 两个(可以更多)视点,为的是恢复更多的目标距离信息。信息再现时的完整性和 A 、 B 两个视点的相对位置有关。

目标信息再现示意图如图 1 所示, A 、 B 视点扫描后,通过坐标变换关系对数据进行转换计算,使其都在 O 坐标系中显示,因而能够获得目标更多的表面信息。坐标变换方法如图 2 所示。

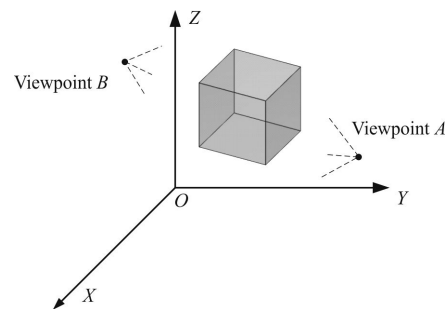


图 1 目标信息再现示意图

Fig.1 Diagram of target information reproduction

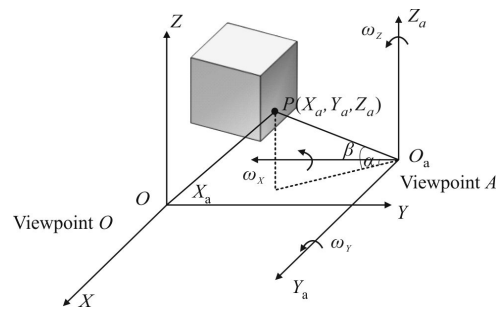


图 2 坐标变换示意图

Fig.2 Diagram of coordinate transformation

以 O 视点和 A 视点作为坐标原点,分别建立空间直角坐标系 $OXYZ$ 和 $O_aX_aY_aZ_a$ 。 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 是由坐标系 A 到 O 的平移参数; $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 是旋转参数, λ 是尺度因子。 $(x_a, y_a, z_a)^T$ 是目标上某点在空间直角坐标系 A 的坐标; $(x, y, z)^T$ 是该点在空间直角坐标系 O 的坐标。

则根据 Bursa 转换公式由空间直角坐标系 A 到空间直角坐标系 O 的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \lambda R(\omega) \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

在 A 视点测得点 P 的极坐标是 $P(\alpha, \beta, R)$, 所以获得目标点 P 在 A 坐标系中的直角坐标为:

$$\begin{cases} x_a = R \cos \beta \cos \alpha \\ y_a = R \cos \beta \sin \alpha \\ z_a = R \sin \beta \end{cases} \quad (2)$$

因此, 得到目标点 P 在空间直角坐标系 O 的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \lambda R(\omega) \begin{bmatrix} R \cos \beta \cos \alpha \\ R \cos \beta \sin \alpha \\ R \sin \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

将在 A 视点测得的点云数据带入公式(3), 可以得到 O 坐标系下的目标信息。同理可将 B 视点测得的坐标数据转换到 O 坐标系中, 实现数据配准。因此, 物体表面的位置信息全部转换为 O 坐标系中的三维坐标信息。

1.2 目标信息建模

已知目标在 O 坐标系的坐标数据以及 O 视点转换到 C 视点的运动参数, 如图 3 所示建立理论模型。

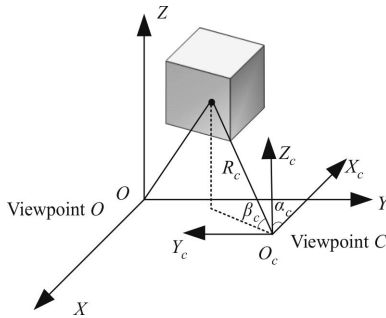


图 3 理论模型

Fig.3 Theoretical model

以 O 视点和 C 视点作为坐标原点, 分别建立空间直角坐标系 $OXYZ$ 和 $O_cX_cY_cZ_c$ 。 $(\Delta x_c, \Delta y_c, \Delta z_c)^T$ 是由坐标系 O 转换到坐标系 C 的平移参数; $R_c(\omega)$ 是坐标系 O 转换到坐标系 C 的旋转矩阵; λ_c 是尺度因子。 $(x, y, z)^T$ 是目标上某点在坐标系 O 的坐标; $(x_c, y_c, z_c)^T$ 是该点在坐标系 C 的坐标。

则由空间直角坐标系 O 到空间直角坐标系 C 的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_c \\ \Delta y_c \\ \Delta z_c \end{bmatrix} + \lambda_c R_c(\omega) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $R_c(\omega) = R(\omega_x)R(\omega_y)R(\omega_z)$

$$R(\omega_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_x & \sin \omega_x \\ 0 & -\sin \omega_x & \cos \omega_x \end{bmatrix}$$

$$R(\omega_y) = \begin{bmatrix} \cos \omega_y & 0 & -\sin \omega_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \omega_y & 0 & \cos \omega_y \end{bmatrix}$$

$$R(\omega_z) = \begin{bmatrix} \cos \omega_z & \sin \omega_z & 0 \\ -\sin \omega_z & \cos \omega_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据公式(4), 将 O 视点坐标数据代入得到目标轮廓在 C 视点下的坐标值。由于遮挡原因, 模拟的某个视点下的目标应只包含部分轮廓信息, 所以应当把视点内看不到的点去掉。根据公式(5)将 C 坐标系下的直角坐标转换为球坐标。

$$\begin{cases} \alpha_c = \arctan(y_c/x_c) \\ \beta_c = \arctan(z_c/\sqrt{x_c^2 + y_c^2}) \\ R_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2} \end{cases} \quad (5)$$

由于 O 坐标系中的目标信息包括所有的轮廓信息, 因此经过视点转换并用球坐标表示后, 由 C 视点观察时, 同一视线中可能存在多个 R 值, 即在相同或差别微小的视线角度下, 存在多个坐标点。而实际情况是在视点处只能观察到最近轮廓上的数据, 所以在相同或差别微小的视线角度的情况下取 R 最小的那一组三维坐标数据, 其余比较大的值删掉。由此可以得到所观察的 C 视点下的目标轮廓。

2 实验验证

2.1 实验装置

实验装置是将激光测距机固定在二轴转台上, 通过激光测距机测量目标表面各点相对视点的距离信息。控制转台改变激光束的角度, 对目标进行逐点扫描, 获得目标上各个点相对视点的距离和角度信息。选择两个不同的视点分别进行测量。激光扫描成像装置的结构框图和装置图如图 4 所示。

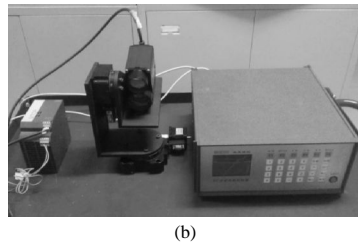
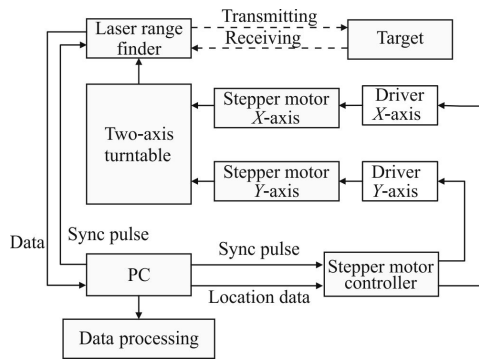


图 4 激光扫描成像结构框图和装置图

Fig.4 Structure diagram of laser scanning imaging system

2.2 数据配准

对采集的实验数据进行处理,首先需要对实验数据进行配准,即将 A 、 B 视点得到的坐标数据配准到 O 坐标系中,得到目标完整的距离信息。为了将从不同视点获得的距离数据配准起来,必须首先知道视点之间的旋转和平移变换关系。视点之间的旋转和平移变换参数称之为视点或距离像的运动参数。可以利用图像数据之间的关系获取运动参数,如公共点在不同坐标系中的坐标数据的关系。选取参照物上 3 个公共点,获得其不同坐标系中的坐标数据,确定坐标系之间的运动参数。

2.2.1 尺度因子

尺度因子是两个坐标系中对应距离的比,设 d_{ij} 是 M_i 、 M_j 两点在 $O_a X_a Y_a Z_a$ 坐标系下的距离, D_{ij} 是相应点在 $O_b X_b Y_b Z_b$ 坐标系下的距离,其计算公式为:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_{ai} - x_{aj})^2 + (y_{ai} - y_{aj})^2 + (z_{ai} - z_{aj})^2}$$

$$D_{ij} = \sqrt{(x_{bi} - x_{bj})^2 + (y_{bi} - y_{bj})^2 + (z_{bi} - z_{bj})^2} \quad (6)$$

可以得到尺度因子为 $\lambda = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{D_{ij}}{d_{ij}}$, n

为点的个数。

2.2.2 旋转矩阵

空间直角坐标系变换中的旋转矩阵满足 $R^T = R^{-1}$,

旋转矩阵中含有 3 个独立的参数,这 3 个参数可以是公式(1)中的 3 个角度,也可以任意取 3 个独立的参数,可由罗德里格矩阵 3 个独立参数 a 、 b 、 c 表示。

反对称矩阵 S 由 a 、 b 、 c 构成的表达式为:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -c/2 & -b/2 \\ c/2 & 0 & -a/2 \\ b/2 & a/2 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, a 、 b 、 c 相互独立。

R 可由 S 构成罗德里格矩阵 $R(\omega) = (I+S)(I-S)^{-1}$ 。

$$R = (I+S)(I-S)^{-1} = \frac{1}{\Delta} *$$

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{(a^2 + b^2 + c^2)}{4} & -c \frac{ab}{2} & -b + \frac{ac}{2} \\ c - \frac{ab}{2} & 1 + \frac{(-a^2 + b^2 - c^2)}{4} & -a - \frac{bc}{2} \\ b + \frac{ac}{2} & a - \frac{bc}{2} & 1 + \frac{(-a^2 - b^2 + c^2)}{4} \end{bmatrix}$$

$$\text{其中: } \Delta = \begin{bmatrix} 1 & c/2 & b/2 \\ -c/2 & 1 & a/2 \\ -b/2 & -a/2 & 1 \end{bmatrix} = 1 + (a^2 + b^2 + c^2)/4。$$

将公共点 1、2 带入公式,构建两组方程并相减,消去平移参数得:

$$\begin{bmatrix} x_{a2} - x_{a1} \\ y_{a2} - y_{a1} \\ z_{a2} - z_{a1} \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} x_{b2} - x_{b1} \\ y_{b2} - y_{b1} \\ z_{b2} - z_{b1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据罗德里格矩阵性质得到:

$$(I-S) \begin{bmatrix} x_{a21} \\ y_{a21} \\ z_{a21} \end{bmatrix} = \lambda (I+S) \begin{bmatrix} x_{b21} \\ y_{b21} \\ z_{b21} \end{bmatrix} \quad (8)$$

将方程组展开,把 a 、 b 、 c 写成向量的形式,整理得到:

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{(z_{a21} + \lambda z_{b21})}{2} & \frac{(y_{a21} + \lambda y_{b21})}{2} \\ \frac{(z_{a21} + \lambda z_{b21})}{2} & 0 & \frac{-(x_{a21} + \lambda x_{b21})}{2} \\ \frac{-(y_{a31} + \lambda y_{b31})}{2} & \frac{-(x_{a31} + \lambda x_{b31})}{2} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda x_{b21} - \lambda x_{a21} \\ \lambda y_{b21} - \lambda y_{a21} \\ \lambda z_{b31} - \lambda z_{a31} \end{bmatrix} \quad (9)$$

上式只有两个独立方程,不能解出 3 个未知数,利用点 1、3 可以得到一组方程,和上式联合,取其中 3 个方程式。

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{(z_{a21} + \lambda z_{b21})}{2} & \frac{(y_{a21} + \lambda y_{b21})}{2} \\ \frac{(z_{a21} + \lambda z_{b21})}{2} & 0 & \frac{-(x_{a21} + \lambda x_{b21})}{2} \\ \frac{-(y_{a31} + \lambda y_{b31})}{2} & \frac{-(x_{a31} + \lambda x_{b31})}{2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda x_{b21} - \lambda x_{a21} \\ \lambda y_{b21} - \lambda y_{a21} \\ \lambda z_{b31} - \lambda z_{a31} \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式可以写成 $PA=Q$, 得到 $A=P^{-1}Q$, 由此可以求出反对称矩阵 S 。根据 $R=(I+S)(I-S)^{-1}$ 可以得到旋转矩阵 R 。

2.2.3 平移参数

得到旋转矩阵后,将第一个坐标对带入公式(11),可以得到平移参数。

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{a1} \\ y_{a1} \\ z_{a1} \end{bmatrix} + \lambda R \begin{bmatrix} x_{b1} \\ y_{b1} \\ z_{b1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

计算出运动参数后,可以根据公式(3)对不同视点的坐标值进行数据配准,得到参考坐标系下的目标信息。

2.3 实验及结果

2.3.1 数据处理

目标是一辆汽车。建立空间参考坐标系 O, XOY 平面与地面平行, z 轴垂直地面向上。 y 轴与车身平行。图 5 是 A, B 视点与汽车位置关系的示意图(俯视图)。为了得到汽车尽可能多的坐标信息,选择 A 视点在 O 坐标系中的坐标是(5 m, 5.2 m, 0.5 m), 视场角约为 60° , B 视点在 O 坐标系中的坐标是 (-2 m, -1 m, -0.1 m), 视场角约为 45° 。激光测距精度 5 mm。以 A, B 为原点分别建立 A, B 视点空间直角坐标系, x 轴正向是激光测距装置在零点位置激光出射的方向。扫描后得到极坐标形式两组三维数据,经过数据处理分别得到目标相对 A, B 视点的距离图像,如图 6 所示(图(a)为 A 视点,图(b)为 B 视点)。

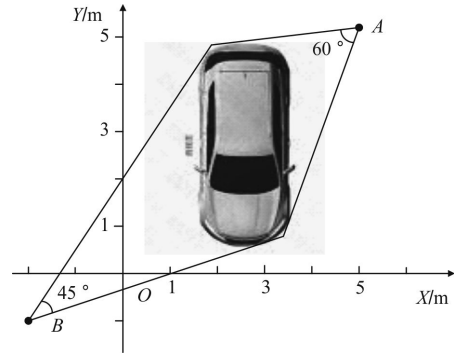


图 5 A、B 视点位置示意图

Fig.5 Location map of A and B

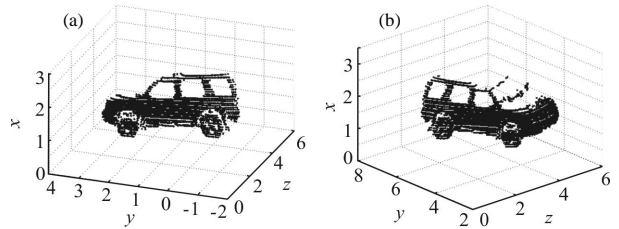


图 6 A 视点和 B 视点三维轮廓图

Fig.6 Target contour in the perspective of A and B

2.3.2 模型验证

首先进行 A, B 视点到 O 视点的坐标转换,实现目标信息的再现。以 A 为例,由于利用标尺测量的平移参数是不够精确的,所以选择一个参照物上的 3 个公共点,根据公式(6)~(11),计算出 A 与 O 坐标系之间的运动参数。 A 坐标系到 O 坐标系的旋转矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} -0.9238 & -0.3828 & 0.0068 \\ 0.3829 & -0.9236 & 0.0203 \\ -0.0015 & 0.0214 & 0.9998 \end{bmatrix}$$

平移矩阵为 $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]=[4.9973, 5.3423, 0.5015]$ 。利用运动参数进行数据配准,根据公式(3)分别将 A, B 视点的所有坐标配准到 O 坐标系下,得到汽车的三维轮廓,如图 7 所示。

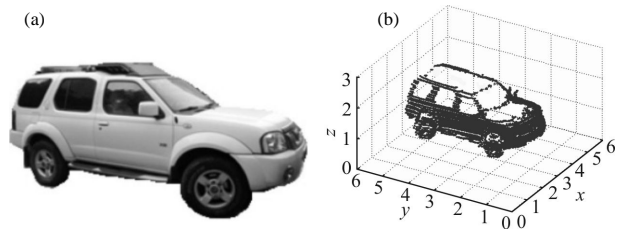


图 7 O 坐标系下的三维轮廓图

Fig.7 Target contour in the perspective of O

然后已知 O 坐标系中任意一视点 $C(5.5\text{ m}, 5.5\text{ m}, 0\text{ m})$, 取 O 坐标系到 C 坐标系的转换参数为 $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]=[0, 0, Pi]$, $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]=[5.5, 5.5, 0]$, $\lambda=1$ 。根据坐标转换公式(4), 并去掉遮挡得到 C 视点下的目标, 如图 8 所示。

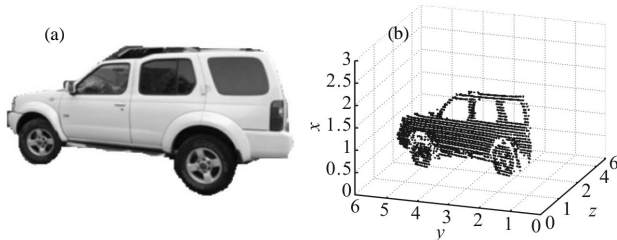


图 8 C 视点三维轮廓图

Fig.8 Target contour in the perspective of C

实际测量 C 点与汽车上 20 个标记点的距离, C 点到 20 个标记点的距离由 300 cm 逐渐增大到 500 cm, 然后与由理论计算得到的距离值对比。

测量结果如图 9 所示, 20 个标记点用表示, 小方块横坐标为测量的实际距离, 纵坐标为由模型得到的理论距离, 黑色直线作为参考线, 方程是 $y=x$ 。经过计算线性相关系数为 0.996 6, 说明计算结果与实验结果的相似度较高, 验证了建模方法的正确性。

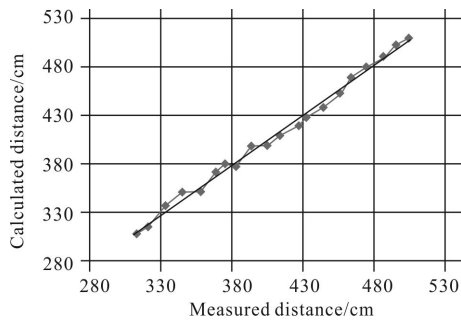


图 9 测量结果

Fig.9 Measurement result

3 结论

文中研究了激光三维成像目标建模的方法, 并用实验验证了建模的正确性。推导了从不同视点获得的距离信息恢复目标的三维信息的公式, 建立了从完整的目标经过坐标变换得到不同视点的距离信息的模型。实验采用激光测距装置对目标进行扫描采样, 获得目标相对视点的距离信息, 实现了不同视

点扫描下坐标系的数据配准, 还原了目标的三维信息。利用理论模型获得不同视点下的目标距离像, 理论与实验数据的相似度为 0.996 6。证明了所建模型的正确性。

参考文献:

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

[2] Yu Hong. Optical characteristic simulation approach of targets/stars background[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 468-472. (in Chinese)
虞红. 目标/星空背景光学特性仿真方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(4): 468-472.

[3] Ma Pengge, Jin Qiuchun, Liu Yi, et al. New airborne multi-pulse LADAR target signal simulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2068-2072. (in Chinese)
马鹏阁, 金春秋, 柳毅, 等. 新型机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2068-2072.

[4] Lu Wei, Fu Qiang, Li Lianjiang, et al. Development of a signal simulator for the pulsed laser scan-imaging radar[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2006, 35(S): 511-515. (in Chinese)
陆威, 付强, 李连江, 等. 脉冲扫描成像激光雷达信号模拟器的研制[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 511-515.

[5] Xue Guogang, Sun Dongsong, Yang Zhao. Modeling and performance simulation of direct detection laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32 (3): 244-247. (in Chinese)
薛国刚, 孙东松, 杨昭. 直接探测激光雷达模型及其性能模拟[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 244-247.

[6] Lu Xingchang, Gong Huili, Zhao Wenji, et al. 3D visualization modelling based on laser scanning data [J]. *Journal of System Simulation* 2007, 19(7): 1624-1629. (in Chinese)
路兴昌, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于激光扫描数据的三维可视化建模[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1624-1629.

[7] Tomas R Chevalier, Ove K Steinvall. Laser radar modeling for simulation and performance evaluation [C]//Electro - Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications III, Proceedings of SPIE, 2009, 7482: 748206.