

7-3-2020

3D Dynamic Simulation of Dual Wedge Scanning Imaging System

Ma Jie

1. National Key Laboratory of Science and Technology on Multi-Spectral Information Processing, School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;;

Yu Wei

1. National Key Laboratory of Science and Technology on Multi-Spectral Information Processing, School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;;

Zhiwei Zhou

2. Tianjin Institute of Technical Physics, Tianjin 300384, China;

Wenxiu Yang

1. National Key Laboratory of Science and Technology on Multi-Spectral Information Processing, School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

3D Dynamic Simulation of Dual Wedge Scanning Imaging System

Abstract

Abstract: Dual wedge scanning is a broad prospect method of next generation Laser imaging system. Due to the unique scanning mode and imaging characteristics, data of dual wedge Laser imaging system is sensitive to parameters and environment, and it is significant in both theory and application to research its feature of time and space. Based on the imaging principle of dual wedge scanning, the dynamic imaging process was modeled and a simulation system in three-dimensional environment was designed. Based on the imaging principle of dual wedge scanning, *the dynamic imaging process was modeled and a simulation system in three-dimensional environment was designed. Then the point cloud data simulated in different scenes of distinct parameters was analyzed in several aspects. The research result can be used to verify the performance of the three-dimensional object detection and recognition algorithms*, in addition, it has reference value for design and development of the dual wedge scanning Laser imaging system.

Keywords

dual wedge, Laser Imaging System, three-dimensional point cloud, dynamic simulation

Authors

Ma Jie, Yu Wei, Zhiwei Zhou, Wenxiu Yang, and Xuegang Wu

Recommended Citation

Ma Jie, Yu Wei, Zhou Zhiwei, Yang Wenxiu, Wu Xuegang. 3D Dynamic Simulation of Dual Wedge Scanning Imaging System[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 1218-1224.

双光楔扫描激光成像系统三维动态仿真

马杰¹, 余巍¹, 周志伟², 杨文秀¹, 吴学刚¹

(1. 华中科技大学自动化学院多谱信息处理技术国家级重点实验室, 武汉 430074; 2. 天津航技术物理研究所, 天津 300384)

摘要: 双光楔扫描是具有广泛应用前景的下一代激光扫描工作体制, 由于双光楔扫描具有独特的工作模式和成像特性, 其成像数据受参数、环境影响较大, 因而对该扫描体制激光成像系统数据的时间、空间特性进行研究具有重要的理论和实际应用价值。针对双光楔扫描机制的成像原理, 对双光楔扫描激光成像过程进行三维、动态的建模并设计仿真平台变得十分关键。同时, 对不同成像参数及环境条件下的成像数据进行仿真生成点云数据, 分析不同场景下扫描数据的成像特性也具有特殊意义。运用仿真结果来验证三维目标检测和识别算法的性能, 对双光楔扫描激光成像系统的设计和研制具有参考价值。

关键词: 双光楔; 激光成像系统; 三维点云; 动态仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2016)05-1218-07

3D Dynamic Simulation of Dual Wedge Scanning Imaging System

Ma Jie¹, Yu Wei¹, Zhou Zhiwei², Yang Wenxiu¹, Wu Xuegang¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Multi-Spectral Information Processing, School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Tianjin Institute of Technical Physics, Tianjin 300384, China)

Abstract: Dual wedge scanning is a broad prospect method of next generation Laser imaging system. Due to the unique scanning mode and imaging characteristics, data of dual wedge Laser imaging system is sensitive to parameters and environment, and it is significant in both theory and application to research its feature of time and space. Based on the imaging principle of dual wedge scanning, the dynamic imaging process was modeled and a simulation system in three-dimensional environment was designed. Based on the imaging principle of dual wedge scanning, the dynamic imaging process was modeled and a simulation system in three-dimensional environment was designed. Then the point cloud data simulated in different scenes of distinct parameters was analyzed in several aspects. The research result can be used to verify the performance of the three-dimensional object detection and recognition algorithms, in addition, it has reference value for design and development of the dual wedge scanning Laser imaging system.

Keywords: dual wedge; Laser Imaging System; three-dimensional point cloud; dynamic simulation

引言

激光成像系统是复杂场景下目标检测和识别的有效技术手段, 因而受到广泛的关注, 但是和焦

平面瞬时成像模式完全不同, 扫描激光成像系统的数据具有空间、时间上的离散分布特性, 被称为“点云”数据, 并且数据获取受成像参数、环境影响较大, 因此对激光扫描成像过程进行数学建模和动态仿真, 对研究激光成像的数据获取和分布特性具有重要的理论和实际意义。

激光成像系统发射激光脉冲, 根据反射回波的时延, 可以精确获取距离信息, 通过扫描装置偏转激光束进行连续测量, 便获取了空间的三维信



收稿日期: 2014-12-17 修回日期: 2015-01-15;
基金项目: 航天科技创新基金(CASC04); 中央高校
基本科研资助(2014GF); 装备预研基金支持(9140A010);
作者简介: 马杰(1973-), 男, 湖北武汉, 博士, 教授,
研究方向为导航制导、模式识别、三维仿真等; 余巍
(1989-), 男, 湖北襄阳, 硕士, 研究方向为三维仿真、
目标检测。

<http://www.china-simulation.com>

• 1218 •

息^[1]。传统的机载激光成像系统一般采取飞行方向推扫加垂直方向摆镜扫描的体制, 存在振动大, 扫描速度慢、姿态精度低的缺点^[2]。下一代激光成像系统的关键技术突破点是激光器和扫描系统, 其中双光楔扫描体制是一种极具前途的新型扫描系统。双光楔激光成像^[2]采用 2 个光楔绕光轴转动的方式来改变光线的射出角度和方向, 由于将摆镜的往复加速运动变成了光楔的匀速旋转运动, 因此该扫描方式具有结构紧凑, 机械振动小, 扫描速度快, 姿态精度高的突出优点。

国内外都针对激光成像系统的建模及仿真研究展开了一系列工作, 但相较于红外、可见光等被动式成像研究要落后许多。

2004 年, 波音公司基于 Matlab 开发了一款距离分辨多普勒激光成像仿真系统^[3], 该系统可以生成距离分辨率多普勒图像, 并包含模拟激光发射特性、传播特性、图像处理算法等内容。但该系统针对已有的距离图像等数据进行仿真, 并不能生成激光的原始数据。2005 年, 美国空军实验室发布了基于 C++编写的 Irma5.1^[3], 该系统能够很好的生成激光成像系统的原始图像数据, 并针对激光成像系统的偏振效应、散斑效应等内容做了深入研究。可是该系统只能针对静态图像进行仿真, 不能很好的突出激光成像的工作过程。2008 年, 英国赫瑞瓦特大学开发了激光成像系统仿真软件 SimBIL^[3], 该软件能够根据 3D 模型和材质波形反射样本生成给定姿态和方位的图像序列, 但是并不能针对动态变换场景进行模拟。

而国内在这方面的研究相对比较晚, 虽然已经取得了一些成果, 但与国外先进水平还存在一些差距, 依然缺少成熟的工程化产品^[3]。

综上, 可以看出目前的大多数激光成像系统仿真工具是基于图像的静态仿真, 并且无法针对特定的扫描体制。因此, 本文提出了一种双光楔激光成像系统的三维动态成像仿真平台, 该平台具有如下特点:

1) 针对双光楔扫描机制进行仿真, 实现多参数可调可控, 其最终数据具有双光楔扫描激光成像

系统的数据特点;

2) 使用三维引擎来构造仿真空间, 可以直接输出三维点云数据及距离图像, 也可以载入多种地形环境及目标模型, 能够做到多种工作场景的变换;

3) 实时动态地对成像系统的运行过程进行仿真, 可以在三维场景中观察双光楔激光成像系统的整体工作流程及模式转换的过程。

此平台不仅可以帮助研究人员直观的表现成像系统的工作状态、降低技术的开发和维护成本, 也可以为不同环境的工程实践提供理论依据, 还能对后期的数据处理、目标检测识别算法的实现提供必要的数据来源^[4]。

1 仿真系统总体设计

双光楔激光成像系统仿真平台主要通过加载虚拟的地形及目标文件, 规划航迹, 并演示激光扫描过程及输出仿真点云数据, 平台可以通过参数设置、模型载入等功能定制不同的仿真环境, 从而通过较小成本获取结果数据。

其工作步骤主要可以分为如下 3 步: 航轨规划、数据采集、数据处理^[2]。在数据采集阶段, 由于两个光楔的转速在工作过程中可调, 并且不同速度扫描线的形状不一样, 因此在数据采集阶段又分成了两种模式: 搜索模式和跟踪模式。在系统开始工作的时候, 一般是搜索模式, 搜索的过程中如果遇到疑似目标, 会切换为跟踪模式。跟踪模式下系统会凝视目标一段时间, 输出帧图像供检测识别算法分析, 然后再切换回搜索模式继续搜索。

仿真平台仿真过程如图 1, 首先是前期数据的准备工作, 包括准备地形文件; 在地形上进行航迹规划, 生成航迹; 之后还需要生成目标模型的位置信息文件。其次是设定系统参数(扫描方式、脉冲频率、最大测距距离等)、扫描模式和误差参数。最后是载入航迹文件进行三维动态仿真过程。在这个过程中, 三维动态仿真平台会在三维显示界面中模拟飞行状态以及实时扫描过程中的各种数据信息, 并按照点云数量分别将仿真结果存储到不同的文件夹中。

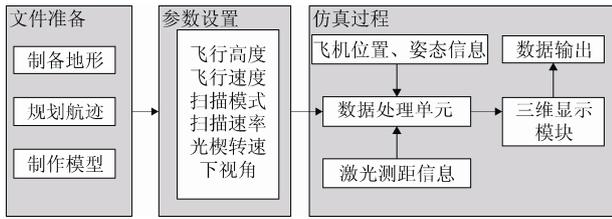


图 1 仿真过程

2 激光束双光楔扫描模型

双光楔激光成像系统前下视成像^[6]示意图如图 2，当 O 为机载激光成像系统原点，飞行方向为 x 轴方向，视场方向为 \overline{OA} ，扫描线为 \overline{OB} 。

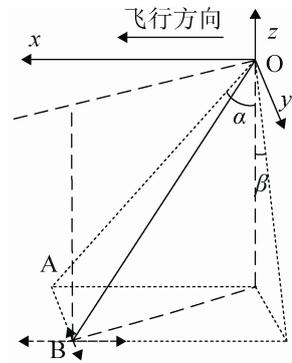


图 2 前下视成像示意图

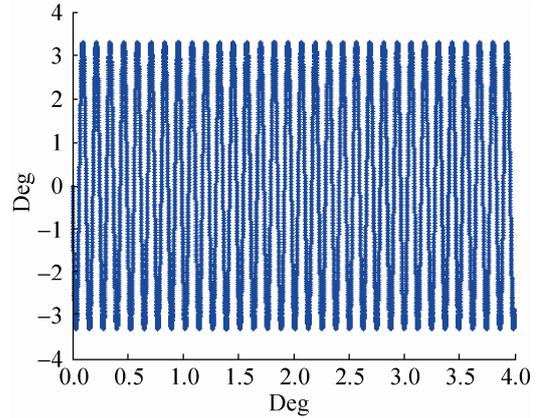
我们定义光楔的折射角为 A ，折射率分别为 n ，旋转角速度分别为 ω_1 和 ω_2 ；初始相位差为 $anf = \pi$ ，我们可以推算出在时间 t 时，两个光楔的旋转角度分别为 $a_1 = \omega_1 \times t - anf$ ， $a_2 = \omega_2 \times t$ 。

设 $q = A \times (n - 1)$ ，横向偏移量为 vx ，我们可以根据式(1)，得到双光楔激光成像系统的的光楔扫描线在横向和纵向的偏角 x 、 y (单位: rad)。

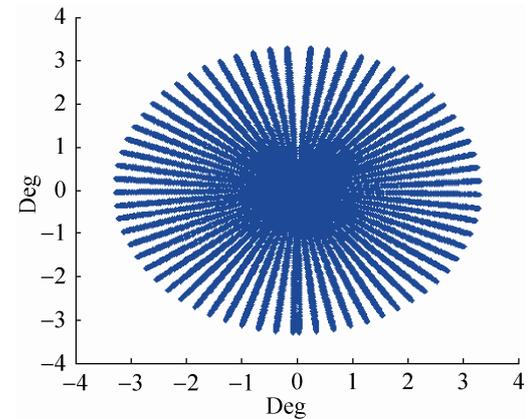
$$\begin{cases} x = (q \times \cos(a_1 - a_2) + q) \times \cos a_1 + \\ \quad q \times \sin(a_1 - a_2) \times \sin a_1 + vx \\ y = (q \times \sin(a_1 - a_2)) \times \cos a_1 - \\ \quad (q \times \cos(a_1 - a_2) + q) \times \sin a_1 \end{cases} \quad (1)$$

因此，在 ω 和 vx 不同其余参数固定的情况下，我们可以得到不一样的扫描轨迹，从而应对系统不同的模式，如图 3。在搜索模式中，激光成像系统的扫描轨迹为 Z 字形扫描，整体呈现矩形条状，该模式扫描密度相对较低，但扫描速度较快，且范

围较大，这种模式可以很好的搜寻目标，当发现疑似目标后，会通过对光楔转速的控制，切换为跟踪模式。在跟踪模式中，激光成像系统会以目标为中心位置持续的以旋转方式扫描目标位置，形成一幅点云像，一帧即为扫描一圈的点云数据，这种模式下，点云中心位置较为密集，可以很好的为后续的目标识别算法提供数据支持。



(a) $\omega_1 \neq \omega_2$, $vx \neq 0$, 搜索模式



(b) $\omega_1 = \omega_2$, $vx = 0$, 跟踪模式

图 3 双光楔扫描轨迹

3 三维动态仿真

3.1 三维空间及数据生成

本文所获取的原始地形数据是基于大地经度、大地纬度以及高程信息的空间大地坐标，定义为 (B, L, H) 。在制备地形文件的时候，通过椭球参数和高斯投影，最终将其转换为平面直角坐标系 (X, Y, Z) ，并将其写入地形文件中。

目标模型和飞机模型, 可以通过制备位置信息文件来进行整合。位置信息文件需要描述所加载模型的位置坐标(世界坐标系下)、模型的缩放比例、以及相对于三维空间世界坐标系的三轴旋转角度: 俯仰角、滚动角和偏航角。在加载这些目标模型时, 只用根据位置信息文件进行相应的旋转、平移和缩放, 即可把其按要求放置在相应位置。

在三维动态仿真平台内, 加载地形文件和航迹信息后, 平台就可以获取飞行器扫描过程中每一时刻所在坐标、姿态、光楔转角等信息, 然后, 运用文献[8]中 2.3.2 节内容求取射线与模型交点, 获得距离信息 R , 从而得到原始的角度-角度-距离扫描信息。但需要生成点云数据, 还需要对原始扫描信息进行转换。

在载体的坐标系中, 如图 2, O 为飞行器坐标系原点, 原始扫描数据中的 2 个角度信息分别为扫描线 \overline{OB} 在 xoz 平面上的投影与 z 轴夹角 α 和 \overline{OB} 在 yoz 平面上的投影与 z 轴夹角 β , 而距离信息则为扫描线 \overline{OB} 的长度 R 。因此, 我们根据空间关系, 得到公式(2)。

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}} \\ \cos \beta = \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}} \\ x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \end{cases} \quad (2)$$

解出该方程, 可以获得根据原始扫描数据转换为飞行器坐标系三维坐标的转换方程(3)。

$$\begin{cases} x = \frac{R \tan \alpha}{\sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta + 1}} \\ y = \frac{R \tan \beta}{\sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta + 1}} \\ z = \frac{-R}{\sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta + 1}} \end{cases} \quad (3)$$

在得到扫描点位于飞行器坐标系的坐标 (x, y, z) 后, 又已知飞行器在世界坐标系的位置 (tx, ty, tz) 和飞行器的姿态信息航向、俯仰、横滚

角分别为 φ, θ, γ , 其中 φ 为相对于世界坐标系 x 轴的转角, θ 为与 y 轴夹角, γ 为与 z 轴夹角, 于是可以根据变换矩阵式(4)来求出扫描点在三维空间世界坐标系下的坐标 (x_g, y_g, z_g) 。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} tx \\ ty \\ tz \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2 动态仿真的实现

动态仿真, 即载体、目标以及成像系统扫描轨迹都是可以运动的。在动态仿真的环境中, 我们可以观察到不同姿态、速度、运动方向的目标在成像扫描过程中的不同状态, 也能够观测到激光每一个扫描点的产生和模式切换时光楔转速变化的过程。

动态仿真的实现, 在于在仿真过程中引入了时间变量。由于已知激光成像系统的扫描频率 f , 可以得到每个扫描点的生成时间间隔 $\Delta t = 1/f$ 。根据这个时间, 可以在平台里设计出一个时间轴, 由航迹开始的时刻设即第一个扫描点生成时刻作为时间原点 t_0 , 根据扫描点之间的生成间隔可以推算出三维仿真时的时间坐标 $T = t_0 + n \times \Delta t$ 。

在模式转换时, 设函数 $f(t)$ 为光楔在 t 时刻的转速变化量, 可以得到光楔的转速 ω 公式(5)。

$$\omega = \omega_0 + f(t) \quad (5)$$

由于光楔转速的变化函数 $f(t)$ 是一个复杂的物理特性, 因此在实验仿真的过程, 我们使用线性方程 $f'(t)$ 来模拟这个过程, 在已知转换时间 T 和所需变化的角度 $\Delta \omega$ 的情况下, 可以得到变化函数方程式(6)。

$$f'(t) = \frac{\Delta \omega}{T} \times t \quad (6)$$

模式转换过程如图 4。同理, 可以根据时间轴得到模型在运动过程运动状态。设目标运动速度为 s , 则单位时间内运动距离 $D = s \times \Delta t$, 根据目标的

位置坐标 (x, y, z) 和姿态信息俯仰角 φ 、偏航角 θ ，可以求出目标单位时间运动后的坐标 (x_m, y_m, z_m) ，如式(7)。

$$\begin{cases} x_m = x + D \cos \varphi \cos \theta \\ y_m = y + D \cos \varphi \sin \theta \\ z_m = z + D \sin \varphi \end{cases} \quad (7)$$

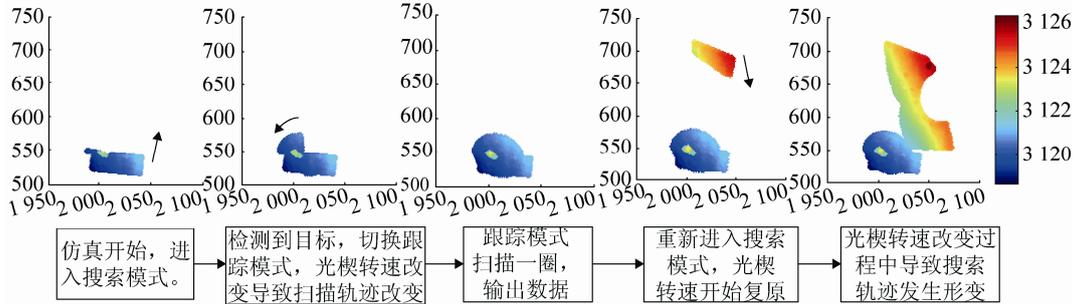


图 4 模式切换过程示意图

4 仿真结果与数据分析

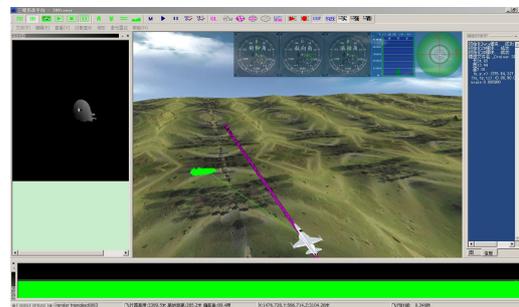
4.1 仿真及其结果

我们在表 1 的参数设置值的情况下做几组三维动态仿真实验，并对所得数据进行分析。仿真平台环境如图 5，仿真的步骤可以根据本文第一部分的介绍，可以归纳为如下几个步骤：载入地形、规划航迹、载入目标、设置参数并开始仿真，在仿真开始后，平台会显示实时的 3D 场景、地形剖面、激光成像距离实时图、飞行参数面板等多种信息，如图 5(a)，我们可以根据动态信息，完整的观测双光楔激光成像系统工作过程和数据生成的情况。

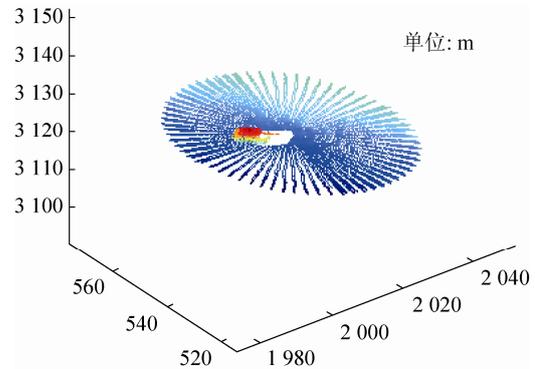
在仿真过程中，平台还会分段输出的仿真结果的点云数据如图 5(b)。图 5(c)为采用光纤扫描方式所仿真的点云数据，通过对比，可以看出两者帧图像的明显不同：其中双光楔扫描的数据没有光纤扫描的均匀，但双光楔扫描的数据的中心密度要更高，更适合后续处理。

表 1 激光成像系统仿真参数

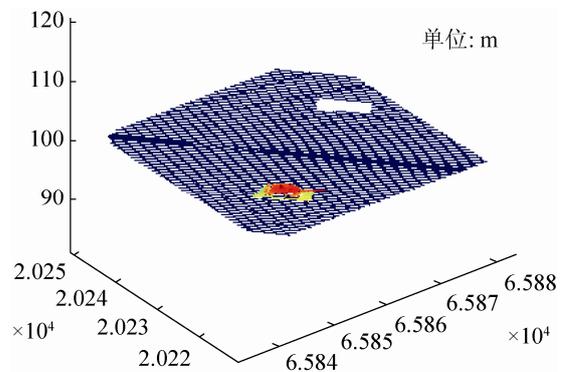
参数名称	值	参数名称	值
频率	40 000 Hz	飞行速度	100 m/s
下视角	25°	飞行高度	400 m
横向视场角	25°	模型运动速度	0 m/s
行扫描时间	0.44 s	初始相位	PI rad



(a) 三维仿真平台



(b) 双光楔扫描的点云数据



(c) 光纤扫描的点云数据

图 5 不同扫描方式仿真的数据

4.2 运动目标数据分析

在上节同样的环境条件下, 针对不同的目标运动速度, 以跟踪模式进行扫描 20 000 个点, 并运用 DEM 算法将地面数据点去除, 把目标数据提取出来, 得到图 6, 坐标及高度单位为 m, 其中高度是指当前点的海拔高度。

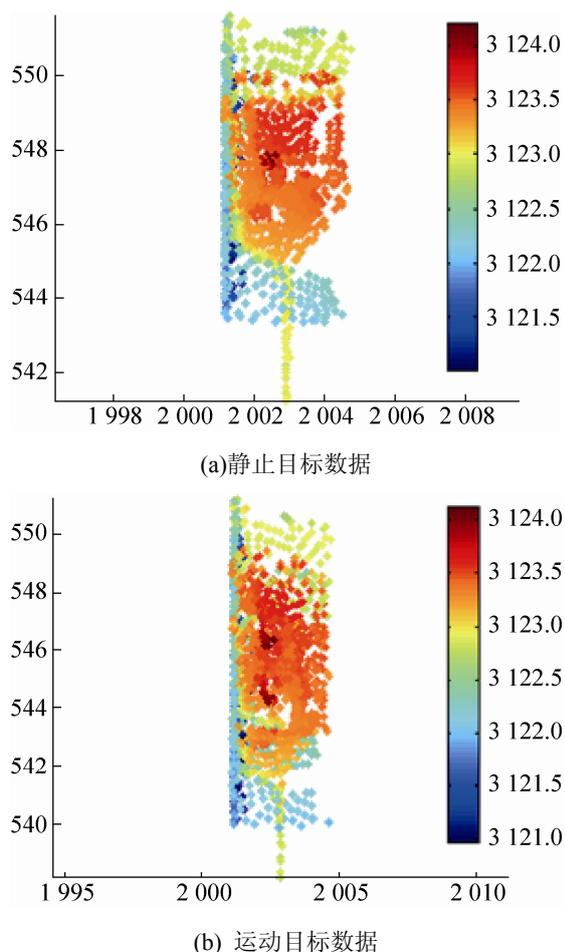


图 6 目标不同状态下仿真的数据

将这两组点云投影到 XOY 平面后计算最小外接矩, 再分别对两组数据进行 Delaunay 三角格网化^[9], 并计算平均三角形边长用以衡量点点之间的平均距离, 可以得到表 2 数据。在静止情况下的外接矩数据与实际已知 Abrams 坦克尺寸相吻合, 运动状态下的数据由于模型正向运动会在成像后造成拖影, 造成点云外接矩长度增加也与真实情况吻合。

表 2 运动形变分析

目标参数	仿真(a)	仿真(b)	模型数据
运动速度	0 m/s	10 m/s	
运动时间	0 s	0.4 s	
平均点距	0.47 m	0.56 m	
目标点数	1 794	1 712	
尺寸/m	10.3×3.6	13.7×3.6	10.5×3.7

4.3 成像质量的影响条件

本文运用三维动态仿真平台, 根据目标姿态 (相对于机载成像系统飞行方向)、激光成像系统下视角和目标运动速度等不同实验参数, 对点云的分布情况做了实验研究。

表 3 参数对数据的影响

目标模型 Abrams				
目标姿态/°	0	45	90	135
目标点数	567	774	836	792
平均点距/m	0.402	0.506	0.519	0.504
下视角/°	-20	-30	-45	-60
目标点数	243	472	1088	1688
平均点距/m	0.731	0.518	0.380	0.303
目标速度/(m/s)	0	5	10	15
目标点数	3 169	3 173	3 284	3 287
平均点距/m	0.393	0.431	0.441	0.473

通过分析数据可以得出如下结论:

1) 目标姿态对成像质量的影响: 对目标与飞行方向的夹角从 0°~180°变化范围进行研究, 实验表明, 目标点云数目和点云平距离均随着姿态角的增大成开口向下的抛物线型变化, 在相对姿态角为 90°是达到峰值。

2) 扫描角大小与目标成像质量的关系: 扫描角在 10°~20°之间点云数目急剧下降, 20°~35°之间线性下降较平缓, 成分段线性关系。10°~35°间点云平均距离线性变化。

3) 目标运动速度对成像质量的影响: 由于目标所处环境的多样性, 目标点云数目与目标运动速度的变化无特别规律。点云平距离均随着运动速度的增大平缓增大。

5 结论

本文分析并研究了双光楔扫描激光成像系统的工作过程,完成了双光楔成像方式的建模工作。设计并实现了三维动态仿真平台,对平台建设中的空间构建、动态模拟以及数据生成等问题进行了研究,随后展示了平台的仿真过程以及仿真结果。其仿真结果很好的表现了双光楔激光成像系统的扫描特性和数据特点,真实、可靠,可以为后续的检测识别算法提供数据支持,也能为科研人员直观的表现双光楔激光成像系统的参数对成像特性的影响和双光楔激光成像系统模式切换的运行过程。

三维动态仿真平台的后续改进,可以通过研究大气散射及吸收效应模型、气象状况对激光成像系统的影响模型,并将这些模型加入到数据生成的算法中去,以便更好的生成最终数据。还可以增加针对检测算法实现的接口,为目标检测算法的研究提供平台支持。

参考文献:

-
- (上接第 1217 页)
- [5] 杨文芬, 陈倬为, 罗穆夏, 等. 采用冲击加速度指标评价安全帽抗侧向冲击性能的研究 [J]. 中国个体防护装备, 2010, 17(1): 11-15.
 - [6] Firoz A, Harun C, Zakaria E. An Experimental Study of Thermal Comfort and Aerodynamic Efficiency of Recreational and Racing Bicycle Helmets [C]// 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA). Melbourne, Australia: School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University, 2010: 2414-2417.
 - [7] Taher H M, Ben H M, Sakli F. Subjective Evaluation of Novel Comfort Liners for Motorcycle Helmet [J]. Ergonomics (S2165-7556), 2012, 2(1): 11-13.
 - [8] 张振伟. 安全帽的舒适性设计研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011.
 - [9] 国家质量技术监督局. GB/T2428-1998 成年人头面部尺寸 [S].
 - [10] 包永涛. 第95百分位国人头部有限元模型的构建及应用研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2010.
 - [11] 中华人民共和国公安部. GA294-2012防暴头盔 [S].
 - [12] Pennes H H. Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperature in the Resting Human Forearm [J]. J Appl Physiol (S8750-7587), 1948, 1(2): 93-122.
 - [13] 冯晴乐, 乐恺, 张欣欣. 发热时人体面温变化及影响因素研究 [J]. 工程热物理学, 2012, 33(11): 1976-1979.
 - [14] Smith C. A Transient Three-dimensional Model of the Human Thermal System [D]. Manhattan, USA: Kansas State University, 1991.
 - [15] Davis G A, Edmisten E D. Effects of Ventilated Safety Helmet in a Hot Environment [J]. International Journal of Industry Ergonomics (S0169-8141), 2011, 27(3): 321-329.
 - [16] 马芳, 李晓英, 牛宏颐. 夏季人体头部着装舒适性评价 [J]. 针织工业, 2013, 17(11): 59-62.
 - [17] 石安福, 龚云表. 工程塑料手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.
 - [18] 李丽. 聚碳酸酯、ABS、聚丙烯材料的导热与阻燃性能的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
 - [1] 梁欣廉, 张继贤, 李海涛, 等. 激光雷达数据特点 [J]. 遥感信息, 2005(3): 71-75.
 - [2] 高建双. 激光成像雷达扫描技术的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
 - [3] 韩意, 孙华燕, 李迎春, 等. 国外成像激光雷达系统仿真软件研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2013(1): 46-54.
 - [4] 易翔, 王蔚然. 激光雷达系统仿真软件设计与实现 [J]. 激光与红外, 2003, 33(3): 178-180.
 - [5] 陈松尧, 程新文. 机载 LIDAR 系统原理及应用综述 [J]. 测绘工程, 2007, 16(1): 27-31.
 - [6] 殷蔚明, 柳健, 田金文. 机载前下视激光雷达成像仿真 [J]. 计算机仿真, 2002, 19(4): 14-18.
 - [7] 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(增 4): 160-166.
 - [8] 刘瑶. 基于激光雷达的三维典型地面目标识别技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
 - [9] Green P J, Sibson R. Computing Dirichlet Tessellations in the Plane [J]. The Computer Journal(S0010-4620), 1978, 21(2): 168-173.