文章编号: 2095-4980(2016)05-0717-06

# 基于 InSAR 的三维地形匹配导航技术的研究与实现

尹智龙<sup>1</sup>,王可东<sup>1</sup>,高意峰<sup>2</sup>

(1.北京航空航天大学 宇航学院,北京 100191; 2.中国电子科技集团 第 10 研究所,四川 成都 610036)

摘 要:研究了一种以干涉合成孔径雷达(InSAR)信息为基础的三维地形匹配导航系统,该系统采用基于 3-D Zernike 矩的三维地形匹配算法,同时针对 3-D Zernike 矩在地形匹配中计算实时性差的问题进行了改进。为验证系统的有效性和算法性能,搭建了基于 VC++和 OpenSceneGraph 的三维可视化软件仿真平台。仿真结果表明,基于 3-D Zernike 矩的三维地形匹配算法定位精确度高,对地形的适应能力强,算法的实时性问题得到了良好解决,系统具有较高的工程实用价值。 关键词:干涉合成孔径雷达;三维地形匹配;地形辅助导航系统;3-D Zernike 矩;可视化仿真

中图分类号:TN966 文献标识码:A doi:10.11805/TKYDA201605.0717

# Implementation of 3-D terrain matching navigation technology based on InSAR data

YIN Zhilong<sup>1</sup>, WANG Kedong<sup>1</sup>, GAO Yifeng<sup>2</sup> (1.School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China; 2.The 10th Research Institute of CETC, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract:** A 3-D terrain matching navigation system based on Interferometric Synthetic Aperture Radar(InSAR) information is proposed, wherein the system employs a 3-D terrain matching algorithm based on 3-D Zernike moments. A new method for solving the problem of huge computation of 3-D Zernike moments in use of terrain matching and the problem of rotation adaptability is provided. In order to verify the effectiveness and the performances of the algorithm, a 3-D visual software simulation platform based on C++ and OpenSceneGraph(OSG) is constructed. Simulation results show that the 3-D terrain matching algorithm based on 3-D Zernike moments is high in positioning precision and strong in terrain adaptability, problems of real-time performance are well solved, and high practical value in engineering is obtained by the system.

**Key words:** Interferometric Synthetic Aperture Radar; 3-D terrain matching; terrain-aided navigation system; 3-D Zernike moments; visual simulation

地形辅助导航是飞行器自主导航中修正惯性导航系统的一种常用手段,其核心技术是地形匹配技术。根据飞行器获取下方地形高程数据的维数,地形匹配技术可分为2大类<sup>[1]</sup>:基于地形一维高度信息的地形匹配技术与基于地形二维高度信息的三维地形匹配技术。传统利用一维信息的地形匹配技术,对地形的依赖性强,对丰富的地形信息利用率低,对航迹规划要求高,容易受噪声影响,从而影响地形导航系统的性能。

干涉合成孔径雷达(InSAR)能获取高分辨力、高精确度的地形高程信息。在此基础上发展起来的三维地形匹 配技术较传统的地形匹配技术有着明显的优势<sup>[2]</sup>。三维地形匹配技术利用地形表面特征与地理位置的对应关系, 以预先存储的二维高程数据作为基准图,以机载雷达设备实时获取的地形高程数据作为实时图,进行匹配,从而 确定飞行器的位置。不仅具有较高的导航定位精确度,而且导航自主性、适应性强,受地形环境、噪声的影响小。

基于 3-D Zernike 矩的三维地形匹配方法属于一种基于面特征的匹配方法。用 3-D Zernike 矩表示三维地形曲面,这样三维地形匹配问题就转化为地形矩特征的匹配问题。基于 3-D Zernike 矩的匹配算法能够较好地处理角度旋转问题,具有较好的鲁棒性,对噪声不敏感。文献[3]采用基于灰度的匹配方法,利用相关系数最大的技术进行匹配,但算法实时性差,且无法处理大角度旋转的问题。文献[4]提出一种基于 3-D Zernike 矩的匹配方法。

收稿日期: 2015-05-28; 修回日期: 2015-07-30

该方法利用具有旋转、尺度、平移变换不变性质的 3-D Zernike 矩构成的特征向量,使用 Canberra 距离作为相似 性度量,取得了良好效果。但计算量随着地形点数增加线性上升,且在初始位置误差大的条件下,由于需要计算 的采点数较多,会导致计算时间较长,难以实时运行。

本文针对三维地形匹配技术的优点,研究了一种基于 3-D Zernike 矩的三维地形匹配导航系统,对基于 3-D Zernike 矩的匹配方法做了改进,在保证匹配精确度的前提下,使实时性有较大提升。设计并搭建基于 VC++的 综合仿真平台对系统进行验证。

### 1 三维地形匹配导航系统设计

地形匹配导航系统的设计包括以下内容: a) 将导航系统划分为若干功能模块;b) 建立 各个模块的数学模型和误差模型;c) 实现各 个模块之间的通信;d) 仿真结果的显示和性 能分析。根据设计内容,系统将按照地图加载、 航迹规划、惯导仿真、算法匹配、结果显示的 流程实现,其系统原理框图如图1所示。

#### 2 模块设计和软件仿真

三维地形匹配导航系统主要完成以下功 能模块的设计:地图加载模块、飞行轨迹仿真 模块、惯导解算模块、三维匹配算法模块、结 果显示与分析模块。在此基础上进行基于 VC++和 OSG 的软件仿真。软件平台结构图如 图 2 所示。

#### 2.1 地图加载、轨迹仿真和惯导解算模块

#### 2.1.1 地图加载模块

地图加载模块主要功能是为系统提供基 准图和实时图数据的生成以及显示。InSAR 能快速获取高精确度的地形高程信息,进而可 以提供高精确度的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据。这些高精确度 的 DEM 数据是匹配所需的基础数据。InSAR 获取 DEM 的基本原理是利用合成孔径雷达



(SAR)系统的2部天线(或一部天线重复观测),来获取同一地区具有一定视角差的2幅具有相干单视复数SAR图像,并根据其干涉相位信息来提取地表的高程信息,进而重建 DEM<sup>[5]</sup>。

本平台基准图 DEM 数据采用由中国科学院地理空间云数据平台提供的 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 90 m 精确度的数字高程数据。SRTM 由美国太空总署和国防部国家测绘局联合测量。其数据经过处理制成了地形的 DEM。实时图 DEM 数据采用飞行位置对应区域的 DEM 数据并加上一定的旋转、误差等,以模拟机载成像雷达获取的实时图数据。

在显示方面,平台以 Google 卫星图片数据作为显示。地图加载模块将 DEM 数据和卫星图片数据通过地理 位置相对应,利用数据库组织在一起,兼顾了三维匹配算法要求和平台视觉效果需要。平台启动后首先调用地图 加载模块,将数据通过数据库加载显示,为飞行轨迹规划做准备。

2.1.2 飞行轨迹仿真模块

仿真飞行轨迹的目的:一是模拟出一条运动轨迹,得到航迹点的姿态、速度和位置等参数;二是为惯导定位 模块提供比力、角速度等信息源。比力和角速度信息用作捷联惯导算法的输入,经过解算后得到惯导定位轨迹。 轨迹规划与仿真采用运动学模型。飞机运动状态的改变可以看作是由载体姿态角的变化以及轨迹坐标系下加 速度发生改变引起的<sup>[6]</sup>。仿真飞行过程 均由基本运动状态组成。其基本运动 状态包括:匀速直线运动、匀加速直 线运动、等速率转弯、爬升(俯冲)。

在轨迹仿真的过程中,实时采集 飞行器的位置、姿态、速度等信息, 并输出比力和角速率信息,提供给惯 导解算模块,用以解算惯导定位轨迹。 2.1.3 惯导解算模块

惯导解算模块的主要作用是将接 收到的比力和角速率信息,叠加上加 速度计误差模型和陀螺仪误差模型的 输出,作为捷联惯导模型的输入,并



实时解算得到导航定位轨迹,同时输出显示导航定位误差。惯导模块研究较多,这里不再赘述,具体解算方法可参考文献[7-9]。惯导模块原理框图如图 3 所示。

## 2.2 三维匹配算法模块

三维匹配算法模块的核心是基于 3-D Zernike 矩的三维地形匹配算法。 2.2.1 3-D Zernike 矩的描述

一个物体的 3-D Zernike 矩 **见**<sup>m</sup> 定义为<sup>[10]</sup>:

$$\boldsymbol{\Omega}_{nl}^{m} \triangleq \frac{3}{4\pi} \int_{|\boldsymbol{x}| \le 1} f(\boldsymbol{x}) \overline{Z_{nl}^{m}(\boldsymbol{x})} \, \mathrm{d}\boldsymbol{x}$$
(1)

式中:  $f(\mathbf{x})$ 为三维物体函数;  $Z_{nl}^{m}(\mathbf{x})$ 为 3-D Zernike 函数; n为 3-D Zernike 矩的阶,且满足  $n \ge 1$ ; l为重复度; (n-l)为偶数,  $m \in [-l, l]$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{3}$ 表示向量  $\mathbf{x} = (x, y, z)$ 。

将 3-D Zernike 函数定义为:

$$Z_{nl}^{m}\left(\boldsymbol{x}\right) = \sum_{r+s+t \leq n} \chi_{nlm}^{rst} \boldsymbol{x}^{r} \boldsymbol{y}^{s} \boldsymbol{z}^{t}$$
<sup>(2)</sup>

则  $\Omega_{nl}^{m}$  可以表示为:

$$\boldsymbol{\Omega}_{nl}^{m} = \frac{3}{4\pi} \sum_{r+s+t \leq n} \overline{\boldsymbol{\chi}_{nlm}^{rst}} \boldsymbol{M}_{rst}$$
(3)

式中: $\chi_{nlm}^{rst}$ 为组合参数; $r,s,t \in [0,n]$ 且为整数; $M_{rst}$ 为几何矩,定义为:

$$\boldsymbol{M}_{rst} \triangleq \int_{|\boldsymbol{x}| \le 1} f(\boldsymbol{x}) \boldsymbol{x}^r \boldsymbol{y}^s \boldsymbol{z}^t d\boldsymbol{x}$$
(4)

3-D Zernike 矩  $\boldsymbol{\Omega}_{nl}^{m}$  并没有旋转不变性。为了实现旋转不变性,需构造(2*l*+1)维的向量  $\boldsymbol{\Omega}_{nl} = \left(\Omega_{nl}^{l}, \Omega_{nl}^{l-1}, \Omega_{nl}^{l-2}, \dots, \Omega_{nl}^{-l}\right)^{\mathrm{T}}$ 。 $\boldsymbol{\Omega}_{nl}$ 的模即 3-D Zernike 描述子  $F_{nl}$ 具有旋转不变性<sup>[10]</sup>,见式(5)。

$$F_{nl} \triangleq \left\| \left( \Omega_{nl}^{l}, \Omega_{nl}^{l-1}, \Omega_{nl}^{l-2}, \cdots, \Omega_{nl}^{-l} \right)^{\mathrm{T}} \right\|_{2}$$

$$(5)$$

3-D Zernike 描述子除了具有旋转不变性外,还具有信息多层次表达,信息冗余量小,能描述具有复杂特征的地形等特点。对于一个三维物体,单个  $F_{nl}$ 不足以描述其所有不变特征。将所有满足要求的  $F_{nl}$ 计算出来,组成一个描述子向量,用这组向量作为三维物体不变特征的描述向量,即 n 阶描述子向量表示为:  $\begin{bmatrix}F_{20} & F_{22} & \cdots & F_{rk} & \cdots & F_{nl}\end{bmatrix}$ 。

3-D Zernike 矩的阶次对匹配概率和定位精确度具有重大影响。矩的阶次越高,匹配概率和定位精确度越高, 但其计算时间随着阶次呈指数上升。另一个影响匹配效率的因素是三维地形数据,数据越大,耗时呈线性增长<sup>[1]</sup>。

719

第5期

2.2.2 三维匹配算法的改进

文献[4]给出了设计的 3-D Zernike 矩的匹配算法流程。通过设定 3-D Zernike 矩的不同阶次,并设定窗口滑动的大小步长,得到粗匹配结果后进行精匹配,得到更精确的位置。但计算时间与三维地形数据量大小和 3-D Zernike 矩的阶有较大关系。而且在惯导误差较大的情况下,需要增大搜索范围, 3-D Zernike 矩计算次数将会增多,必然导致计算时间变长,进而影响算法实时性。为此,本文对算法进行以下 4 方面的改进。

1)采用"先粗后精"的匹配策略。粗匹配过程首先利用高斯金字塔,对实时图进行处理,在此基础上进行 基准图与高斯金字塔处理后的实时图的匹配,由于实时图进行了高斯金字塔处理,参与匹配的描述子向量可以排 除掉表征细节特征的元素,从而提高匹配效率。在计算出相应的距离测度后,以最小测度作为粗匹配位置,然后 在粗匹配位置设定匹配阶次,进行精匹配。

设高斯金字塔的等级为 $\mu(\mu \ge 0)$ ,相当于在地形基本起伏形状不变的情况下,对 $\mu \times \mu$ 范围的地形表面进行 平滑。当 $\mu=0$ 时,相当于未引入该参数。同样在基准图上滑动时,匹配窗口也用 $\mu$ 控制,这样滑动次数也会缩小。 由于只在 $\mu \times \mu$ 区域内进行平滑,而整体地形形状和起伏不变,算法的运算量降低了,但对精确度的影响很小。

2) 使用旋转地图的匹配方式。当航向不沿网格线方向时,如果直接利用航向角插值计算每个匹配点对应的 截取 DEM 与实时图匹配,计算量非常大,且定位不准。为减小计算量,采用旋转地图的方式,使所选用的点均 成为网格点,避免插值运算,可较快完成匹配。

3) 在三维地形匹配中,既要计算实时图的 3-D Zernike 矩,又要计算基准图中待匹配区域的 3-D Zernike 矩。 如果事先按照实时图的大小,把基准图每一块待匹配区的 3-D Zernike 矩都计算并存储,则在飞行过程中,只需 计算实时图的部分,计算量将大大降低。然而,在匹配时,基准图与实时图通常采用的都是矩形图,飞行器若不 沿地图的网格线方向飞行,离线计算方法将无法使用。为实现离线矩计算,这里采用最大圆模板来计算基准图的 离线 3-D Zernike 矩。一般匹配实时图是以测量点为中心的矩形区域,采用最大圆模板相当于采用实时图矩形的 最大内切圆作为匹配模板,这样做的好处是,即使获取实时图时航向与基准图存在很大夹角,其匹配区域也是完 全重合的,而采用矩形模板,匹配区域会受旋转影响,不能完全重合。同时采用圆模板也能降低一定的矩计算量。

4) 当 3-D Zernike 矩的最高匹配阶次确定后,组合参数 χ<sup>rst</sup> 不再变化,与实时地形数据无关。所以匹配前可 以根据算法所用 3-D Zernike 矩的最高阶次,提前计算组合参数并存储,这样不必在每次计算矩的流程中重复计 算 χ<sup>rst</sup><sub>nm</sub>,减少了大量的阶乘运算,从而提高了地形高阶矩的计算速度。

将本平台基于 3-D Zernike 矩的三维地形匹配算法流程归结如下:

1) 根据飞行轨迹生成实时图 DEM 数据;

2) 由惯导定位轨迹和误差范围,确定一定范围的搜索区域,并对区域中的点计算以其为中心获取待配准的 DEM 数据;

3) 根据设定的匹配阶次 *N*,对待配准 DEM 图和高斯金字塔处理后实时图序列计算对应的阶次的 3-D Zernike 矩,并分别形成描述子向量,  $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$  和  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$  (*X*,*Y* 在计算过程排除表征细节特征的元素, 以减少不必要的计算);

4) 用 Canberra 距离作为特征向量之间的距离 测度,获得粗匹配结果;

5) 对粗匹配结果进行评估,如果精确度较低,则重新设定精匹配阶次 N<sub>1</sub>(N<sub>1</sub> > N),进行进一步精匹配。

实验结果表明,改进后的算法匹配速度快,而 且精确度能达到亚网格级别。当传感器能获得更精 细网格的 DEM 数据时,其优势更加明显。

### 2.3 显示模块

显示模块主要实现匹配轨迹显示、误差分析以 及三维场景仿真。三维可视化场景仿真是基于 OpenSceneGraph 实现的。OpenSceneGraph 是一款



Fig.4 Diagram of platform operation effect 图 4 平台运行效果图

开源的仿真渲染引擎系统,通过跨平台、可扩展的开发环境,可以创建高效的可视化应用[11]。这部分仿真主要

## 尹智龙等:基于InSAR 的三维地形匹配导航技术的研究与实现

#### 3 仿真结果

利用以上建立的综合仿真平台进行仿真 分析,验证仿真结果。平台在 Visual Studio 2012 环境下仿真运行成功,运行效果如图 4 所示。

1) 仿真实验一: 该仿真实验的目的在于 验证本文所研究算法的匹配精确度。

仿真条件: 地图为 90 m 网格精确度的 DEM 数据, 飞行器飞行速度为 100 m/s, 飞行 高度为 40 km, 惯导初始误差为 500 m, 采样 点数为 300, 匹配点数为 30(每隔 10 个点匹配 1 次), 匹配结果如图 5 所示。

从匹配结果来看,对于 90 m 精确度的地

形数据,在结果可靠(匹配可靠性标志 1 表示可靠,0 表示不可靠)的情况下,算法的经度和纬度误差都低于网格 精确度,误差最小的位置,低于网格精确度的 1/3。而传统基于一维地形高度信息的匹配技术,匹配精确度通常 都高于 1 个网格精确度。

仿真实验说明平台算法的匹配精确度高,且地形网格精确度越高,匹配误差越小,经多次仿真,显示算法性 能较稳定。

2) 仿真实验二:三维地形匹配算法的数据量大,计算复杂,匹配实时性是一个重要的研究问题。设计该仿 真实验的目的在于对本文所提的改进算法的匹配实时性与文献[4]算法进行对比验证。

仿真条件:分别在 90 m 和 25 m 网格精确度下(飞行条件同仿真实验一,25 m 数据是通过 90 m 数据插值得 到),对平台改进后的算法与文献[4]提出的算法的匹配时间进行比较。其中模板半径是实时图的半径,搜索半径 描述的是以测量点为中心的搜索范围半径,平均匹配误差是在匹配结果可靠后计算连续 10 个点的平均匹配误差。 这里 μ=0是文献[4]的算法,μ=1是改进后的

算法,比较结果见表1。

结果显示,改进后的算法较改进前的算法,匹配速度加快,实时性明显提高,匹配 误差没有明显差别,精确度仍在可以接受的 范围内,这反映出改进算法的优越性能。

表1 算法改进前后匹配时间和匹配误差的比较

Table1 Comparison of matching time and matching error					
μ	mesh precision/m	template radius/m	search radius/m	mean matching error/m	single point matching time/s
0	90	540	1 080	62.7	0.77
1	90	540	1 080	79.4	0.08
0	25	500	500	18.3	9.16
1	25	500	500	22.8	0.98

#### 4 结论

本文研究了一种基于 3-D Zernike 矩的三维地形匹配技术,在此基础上基于 VC++实现了三维地形匹配导航 系统并进行了仿真验证。仿真结果真实有效地反映了系统的性能和精确度,结果显示出系统运行稳定,三维地形 匹配算法匹配精确度高,受地形的粗糙程度影响小,运行速度快,为基于三维地形匹配技术的导航系统的进一步 研究提供了有价值的参考。

#### 参考文献:

- [1] 胡修林,车龙,叶斌. 3-D Zernike 矩在三维地形匹配中应用[J]. 测绘科学, 2007,32(1):107-108. (HU Xiulin,CHE Long, YE Bin. Application of 3-D Zernike moments in 3-D terrain matching[J]. Science Surveying and Mapping, 2007,32(1): 107-108.)
- [2] 崔平远,冯军华,朱圣英,等. 基于三维地形匹配的月球软着陆导航方法研究[J]. 宇航学报, 2011,32(3):470-476. (CUI Pingyuan,FENG Junhua,ZHU Shengying, et al. 3-D terrain feature matching based navigation for lunar soft landing[J]. Journal of Astronautics, 2011,32(3):470-476.)



Fig.5 Simulation results of 90 m terrain data

图 5 90 m 精确度地形数据仿真结果图

第5期

- [3] 王广军. 激光成像雷达在飞行器导航应用中的关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2001. (WANG Guangjun. Research on the key technology of laser imaging radar in aircraft navigation application[D]. Wuhan, China: Huazhong
- University of Science and Technology, 2001.)
  [4] 叶斌,胡修林,张蕴玉,等. 基于 3-D Zernike 矩的三维地形匹配算法及性能分析[J]. 宇航学报, 2007,28(5):1241-1245. (YE Bin,HU Xiulin,ZHANG Yunyu, et al. 3-D terrain matching algorithm and performance analysis based on 3-D Zernike moments[J]. Journal of Astronautics, 2007,28(5):1241-1245.)
- [5] 靳国旺. InSAR 获取高精度 DEM 关键处理技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2007. (JIN Guowang. Research on key processing techniques for deriving accurate DEM from InSAR[D]. Zhengzhou, China: Information Engineering University, 2007.)
- [6] 徐景硕,秦浩,高扬,等. 仿真飞行轨迹的设计及应用[J]. 航空电子技术, 2012,43(1):25-29. (XU Jingshuo,QIN Hao,GAO Yang, et al. Design and application of simulation flight trajectory[J]. Avionics Technology, 2012,43(1):25-29.)
- [7] 赵鸿,赵忠,龙国庆. 捷联惯性导航系统飞行轨迹数据生成与惯性器件建模[J]. 系统仿真学报, 2005,17(5):1026-1029.
   (ZHAO Hong,ZHAO Zhong,LONG Guoqing. Flight track data creation and inertial component simulation the strap-down INS[J]. Journal of System Simulation, 2005,17(5):1026-1029.)
- [8] 高钟毓. 惯性导航系统技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2012. (GAO Zhongyu. Inertial navigation System Technology[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2012.)
- [9] 孙丽,秦永元. 捷联惯导系统姿态算法比较[J]. 中国惯性技术学报, 2006,14(3):6-10. (SUN Li,QIN Yongyuan. Comparison of attitude algorithms of SINS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006,14(3):6-10.)
- [10] CANTERAKIS N. 3-D zernike moments and zernike affine invariants for 3-D image analysis and recognition[C]// 11th Scandinavian Conf. on Image Analysis. 1999:85-93.
- [11] 陈宁,聂垒鑫,刘炜,等. 基于 OSG 的海洋漫游场景开发[J]. 江苏科技大学学报, 2013,27(4):386-390. (CHEN Ning, NIE Leixin,LIU Wei, et al. Development of the ocean scene ramble system based on OSG[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2013,27(4):386-390.)

## 作者简介:



**尹智龙**(1988-),男,石家庄市人,在读硕 士研究生,主要研究方向为地形匹配导航、卫 星相对导航技术、三维虚拟现实仿真等. email:yzltianyi@126.com. **王可东**(1975-),男,安徽省庐江县人,副 教授,主要从事惯性导航、卫星导航、组合导航 和最优估计算法等方面的研究.

高意峰(1988-),男,兰州市人,在读硕士研 究生,主要从事导航滤波算法、SAR 信号处理、 地形匹配导航等研究.