西 北 工 业 大 学

硕 士 学 位 论 文

（专业学位研究生）

题目： 体系对抗仿真场景数据重建

与实体关联技术研究

作 者：

学科专业： 网络与信息安全

指导教师： 刘志强

2022年12月

**Title: Research on 3D-data Reconstruction and Entity Association Technology of System Confrontation Simulation Scene**

**By**

**Under the Supervision of Professor**

**Zhiqiang Liu**

A Dissertation Submitted to

Northwestern Polytechnical University

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Master of

Xi’an P. R. China

December 2022

# 摘 要

随着信息技术的发展，对抗的主要模式已经不是单一兵种的对抗，而是多兵种协同的体系对抗。在现代对抗中，对抗体系成为了决定对抗胜负的关键因素，加快对抗体系能力建设也成为了当前军队建设的一个核心任务。体系对抗仿真是以对抗需求为导向，以仿真技术为手段的体系对抗研究方法，是研究体系对抗的重要手段，通过体系对抗仿真技术，对抗相关人员可以在实验室研究和分息体系对抗。体系对抗仿真是网络化时代下一种基于信息的对抗领域新型技术，在新概念验证、战术规则研究和效能评估等领域具有重要的对抗价值。

随着国防工业与现代对抗的快速发展，体系对抗仿真需求也更趋于复杂化与多样化，对于体系对抗仿真数据的要求也越来越高。与一般的系统仿真相比，体系对抗仿真具有研究范围广、研究对象大、研究层次多、组成结构复杂、交互关系易变等特点，是目前公认的最复杂的仿真系统之一。黄晓冬等人提出目前体系对抗仿真主要面对问题的复杂性、结果的可信性、精度与性能矛盾性三大挑战。在精度和性能上，对抗仿真需要获取任一仿真场景处的坐标、坡度等与地形相关的信息，并根据坐标信息将地形信息关联为实体的姿态信息，这就需要对体系对抗仿真中的数据精度提出更高的要求。针对用于仿真场景构建的DEM地形数据分辨率低的问题，如何方便快速地使用DEM插值算法提高DEM数据的精度，并对插值后的DEM数据质量进行评估成为体系仿真对抗的重要课题。

主要研究内容如下：

1. 体系对抗仿真数据重建技术研究。从体系对抗仿真场景的特点和需求出发，提出基于DEM插值的数据重建方法，经过数据预处理，坐标变换，DEM插值等过程提高数据的质量。对常用的DEM插值算法反距离加权插值算法，从幂指数基于距插值点的距离来控制已知点对插值点的特点，针对随着距离的增加点的影响极具下降的问题，提出新的反距离加权插值核函数，增加距离远出的点对插值点的影响，提高DEM插值的精度。

2. 体系对抗仿真数据重建质量评估。对插值参数和地貌类型对插值结果的影响，运用基于交叉验证、相关分析、方差分析的体系对抗仿真数据重建质量评估方法对搜索方向、搜索点数、权指数等插值参数影响因素和平原、丘陵、低山等地貌类型影响因素进行质量评估分析。

3. 体系对抗仿真实体关联技术研究。对数据重建后的数据，通过坐标信息将地形信息关联为实体的姿态信息，方便抗仿真场景的构建和运算及体系对抗仿真系统其它模块的使用。

基于上述研究，本文从体系对抗的精度与性能出发，针对仿真场景高精度高性能的需求，在体系对抗仿真数据重建和质量评估等关键问题上深入探索，提出了有效方法。同时，该方法能够充分发挥DEM插值在体系对抗仿真建模及推演中的积极作用，对体系对抗仿真数据的质量提升提供重要作用。并对基于DEM插值的体系对抗仿真数据重建方法进行对比实验，实验表明了体系对抗仿真数据重建和实体关联功能健全，符合预期实验结果。在此基础上，对场景地形信息与实体关联过程进行研究，提出在任意给定方向情况下坡度的计算方法。

关键词：体系对抗仿真；数字高程模型；DEM插值；数据重建

# Abstract

System confrontation simulation technology plays a very important role in the field of national defense construction and development, and can promote the innovation and development of national defense technology and military combat theory. With the rapid development of the national defense industry and modern warfare, the requirements for system confrontation simulation are becoming more complex and diversified, and the requirements for system confrontation simulation data are also getting higher and higher. Combat simulation needs to obtain the coordinates of any simulation scene, Slope and other terrain-related information, and associate the terrain information with the attitude information of the entity according to the coordinate information, which requires higher requirements for the data accuracy in the system confrontation simulation. Aiming at the low resolution of DEM terrain data used for simulation scene construction, how to conveniently and quickly use DEM interpolation algorithm to improve the accuracy of DEM data and evaluate the quality of interpolated DEM data has become an important topic of system simulation confrontation. The main research contents are as follows:d

1. Research on system countermeasure simulation data reconstruction technology. Starting from the characteristics and requirements of system combat simulation data, a data reconstruction method based on DEM interpolation is proposed, and the data quality is improved through data preprocessing, coordinate transformation, DEM interpolation and other processes. For the commonly used DEM interpolation algorithm inverse distance weighted interpolation algorithm, the power index is based on the distance from the interpolation point to control the characteristics of the known point to the interpolation point. Aiming at the problem that the influence of the point decreases with the increase of the distance, a new method is proposed. The inverse distance weighted interpolation kernel function increases the influence of points farther away on interpolation points and improves the accuracy of DEM interpolation.

2. Quality assessment of system against simulation data reconstruction. For the influence of interpolation parameters and landform types on the interpolation results, the quality evaluation method of system confrontation simulation data reconstruction based on cross-validation, correlation analysis and variance analysis is used to analyze the influence factors of interpolation parameters such as search direction, search points, weight index and plains, hills, Low mountains and other landform types of influencing factors for quality assessment and analysis.

3. System confrontation simulation entity association technology research. For the reconstructed data, the terrain information is associated with the attitude information of the entity through the coordinate information, which facilitates the construction and operation of the anti-simulation scene and the use of other modules of the system anti-simulation system.

Based on the above research, the thesis is guided by domestic system confrontation simulation and the actual needs of a research institute, and carries out research work based on public DEM data. Aiming at the problems of low resolution and quality assessment of DEM data, in-depth exploration is made on key issues such as system confrontation simulation data reconstruction and quality assessment, and an effective method is proposed.At the same time, this method can give full play to the positive role of DEM interpolation in system combat simulation modeling and deduction, and play an important role in improving the quality of system combat simulation data. A comparative experiment is carried out on the system countermeasure simulation data reconstruction method based on DEM interpolation. The experiment shows that the system countermeasure simulation data reconstruction and entity association functions are sound, which is in line with the expected experimental results. After the above analysis, the data reconstruction and entity association scheme proposed in this paper is feasible and can meet the needs of the current system confrontation simulation system.

Keywords: system confrontation simulation; digital elevation model; interpolation; data reconstruction

# 目 录

[摘 要 I](#_Toc136913293)

[Abstract III](#_Toc136913294)

[目 录 V](#_Toc136913295)

[1 绪 论 1](#_Toc136913296)

[1.1 研究背景及意义 1](#_Toc136913297)

[1.2 国内外研究现状 1](#_Toc136913298)

[1.3 论文结构 3](#_Toc136913299)

[2 体系对抗仿真场景三维数据重建与实体关联相关技术 4](#_Toc136913300)

[2.1 地形表达 4](#_Toc136913301)

[2.1.1 地形表达 4](#_Toc136913302)

[2.1.2 遥感技术 4](#_Toc136913303)

[2.1.3计算机技术 5](#_Toc136913304)

[2.2 数字高程模型 5](#_Toc136913305)

[2.2.1 DEM 数学描述 6](#_Toc136913306)

[2.2.2 DEM 图形描述 7](#_Toc136913307)

[2.3 DEM插值 10](#_Toc136913308)

[2.3.1空间插值 10](#_Toc136913309)

[2.3.2 DEM插值原理 11](#_Toc136913310)

[2.3.3 DEM插值特性 12](#_Toc136913311)

[2.3.4 DEM插值分类 12](#_Toc136913312)

[2.4 DEM 统一插值模型 14](#_Toc136913313)

[2.4.1 DEM 插值核函数的统一表达 14](#_Toc136913314)

[2.4.2 DEM 插值基函数的统一表达 17](#_Toc136913315)

[2.4.3 DEM插值机理分析 17](#_Toc136913316)

[2.4.4 DEM 统一插值模型构建 19](#_Toc136913317)

[2.5常见 DEM 插值算法 20](#_Toc136913318)

[2.5.1最近邻插值法 20](#_Toc136913319)

[2.5.2双线性插值法 21](#_Toc136913320)

[2.5.3反距离加权法 21](#_Toc136913321)

[2.5.4样条函数法 22](#_Toc136913322)

[2.5.5克里格插值法 22](#_Toc136913323)

[3 基于DEM插值的体系对抗仿真三维数据重建 23](#_Toc136913324)

[3.1体系对抗仿真技术 23](#_Toc136913325)

[3.1.1 体系对抗仿真技术概述 23](#_Toc136913326)

[3.1.2 体系对抗仿真技术需求 23](#_Toc136913327)

[3.1.3 体系对抗仿真建模技术 24](#_Toc136913328)

[3.1.4体系对抗仿真系统 25](#_Toc136913329)

[3.2体系对抗仿真坐标变换 27](#_Toc136913330)

[3.2.1体系对抗仿真数据交互需求 27](#_Toc136913331)

[3.2.2坐标系定义及变换关系 27](#_Toc136913332)

[3.2.3体系对抗仿真坐标变换方法及实现 30](#_Toc136913333)

[3.3 体系对抗仿真数据预处理 31](#_Toc136913334)

[3.3.1NSDTF格式处理 32](#_Toc136913335)

[3.3.2生成DEM数据 32](#_Toc136913336)

[3.4 基于GPU加速和快速KNN搜索的自适应IDW插值算法原理 33](#_Toc136913337)

[3.4.1AIDW插值算法 33](#_Toc136913338)

[3.4.2 并行化AIDW算法 34](#_Toc136913339)

[3.4.3基于KNN的GPU加速AIDW算法原理 35](#_Toc136913340)

[3.4.4基于GPU加速和快速KNN搜索的自适应IDW插值算法实现 39](#_Toc136913341)

[4 体系对抗仿真三维数据重建效率评估 43](#_Toc136913342)

[4.1 GPU加速的AIDW 实验分析 43](#_Toc136913343)

[4.1.1实验环境和测试数据 43](#_Toc136913344)

[4.1.2单精度 43](#_Toc136913345)

[4.1.3双精度 44](#_Toc136913346)

[4.1.4 实验结果分析 45](#_Toc136913347)

[4.2基于快速KNN搜索的GPU加速AIDW实验分析 47](#_Toc136913348)

[4.2.1实验环境和测试数据 47](#_Toc136913349)

[4.2.2基于快速kNN的GPU加速AIDW算法性能 48](#_Toc136913350)

[5 体系对抗仿真实体关联技术 54](#_Toc136913351)

[5.1坡度坡向 54](#_Toc136913352)

[5.2坡度计算模型 54](#_Toc136913353)

[5.2.1坡度坡向定义 54](#_Toc136913354)

[5.2.2任意方向坡度计算模型 55](#_Toc136913355)

[5.3基于DEM任意坡度计算 56](#_Toc136913356)

[5.4计算流程与实例 57](#_Toc136913357)

[5.4.1计算流程 57](#_Toc136913358)

[5.4.2算例 57](#_Toc136913359)

[5.5总结 59](#_Toc136913360)

[6 论文总结与工作展望 60](#_Toc136913361)

[6.1 论文总结 60](#_Toc136913362)

[6.2 未来工作展望 60](#_Toc136913363)

[参考文献 61](#_Toc136913364)

[致 谢 63](#_Toc136913365)

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

体系对抗仿真在国防建设发展领域中具有很重要的作用，能够促进国防科技和对抗对抗理论的创新发展。体系对抗仿真是一个复杂的系统，可以供对抗相关人员在实验室研究和分析对抗。在体系对抗仿真过程中，首先要根据实际对抗需求设计对抗双方的对抗方案，然后根据对抗方案借助计算机进行对抗过程的模拟，接下来对双方的胜率进行分析评估，从而改进对抗方案，并进一步利用新的方案进行对抗仿真，不断迭代更新，最终得出比较好的对抗方案。随着国防工业与现代对抗的快速发展，体系对抗需求也更趋于复杂化与多样化，对抗仿真人员如何正确地利用计算机去描述自己的对抗方案至关重要。同时，如何开发一种简单易用的体系对抗仿真需求建模技术也成为对抗仿真的重要课题。对于相当复杂的对抗过程，仿真人员可以借助可视化建模技术更加准确的表达自己的仿真需求。依托计算机技术的体系对抗仿真不需要真实对抗实体的参与，降低了仿真的成本，缩短了仿真周期且提高了仿真的逼真程度。目前，在武器装备体系顶层设计、重大装备战技指标验证与优化、对抗方案推演和决策指挥训练等应用方向，体系仿真试验与评估方法及技术已成为研究问题和提升能力的主要手段。

体系对抗仿真作为一种重要的评估和预测手段，不可忽视地与地理信息环境密切相关。地理要素与实体之间存在紧密关联，包括地形、地貌、水文和气象等因素。地理信息环境为仿真提供真实的背景和约束条件，直接影响体系性能和行为的模拟结果。实体的位置、运动和通信等行为往往与地理信息环境密切相关，这对体系对抗仿真的准确性和可信性具有重要意义。

特别地，数字高程模型（DEM）插值方法在体系对抗仿真中扮演着关键角色。DEM插值方法用于从离散的地形高程数据中生成连续的高程表面模型，以准确模拟地理环境。它为仿真提供精细的地形模型，包括山地、河流和森林等特征，从而增强仿真的真实性和可信性。DEM插值方法的选择和精度对仿真结果的准确性产生深远影响，对仿真过程的效率和质量起到至关重要的作用。地理信息环境与体系对抗仿真密切相关，地理要素是实体之间的重要关联。准确地模拟地理信息环境，特别是通过DEM插值方法实现精细地形模拟，对提高仿真的真实性和可信性至关重要，为决策者提供更可靠的性能评估和决策支持。

与一般的系统仿真相比，体系对抗仿真具有研究范围广、研究对象大、研究层次多、组成结构复杂、交互关系易变等特点，是目前公认的最复杂的仿真系统之一。黄晓冬等人提出目前体系对抗仿真主要面对问题的复杂性、结果的可信性、精度与性能矛盾性三大挑战。首先，体系对抗仿真复杂性涉及多个层面和要素之间的复杂相互作用，需要准确模拟不同系统组件的高度集成和实际系统中的多样性与不确定性。其次，结果可信性挑战需要确保仿真模型和参数的准确性，以提供可信的评估和预测结果，避免因不准确导致的错误决策。最后，精度与性能矛盾挑战要求在保持高精度的同时，平衡计算资源与时间的需求，寻找合适的仿真策略以满足不同应用场景的要求。

本文从体系对抗的精度与性能出发，针对仿真场景高精度高性能的需求，在体系对抗仿真数据重建和质量评估等关键问题上深入探索，提出了有效方法。同时，该方法能够充分发挥DEM插值在体系对抗仿真建模及推演中的积极作用，对体系对抗仿真数据的质量提升提供重要作用。并对基于DEM插值的体系对抗仿真数据重建方法进行对比实验，实验表明了体系对抗仿真数据重建和实体关联功能健全，符合预期实验结果。在此基础上，对场景地形信息与实体关联过程进行研究，提出在任意给定方向情况下坡度的计算方法。

## 1.2 国内外研究现状

随着仿真技术的发展，用仿真模拟实验研究对抗对抗、模拟各武器装备在对抗环境中的表现成为可能。借助仿真技术，可以对各对抗方案进行评估与权衡，方便做出胜率最高的决策。自1990年以来，美国国防部一直将体系对抗仿真技术列为国防领域中的核心技术。在对抗仿真领域，美国国防建模与仿真办公室(Defense Modeling and Simulation Office, DMSO)通过提出高层体系架构(High Level Architecture, HLA)和测试训练使能体系架构(Test and Training Enabling Architecture, TENA)两个重要的体系对抗仿真架构，促进了体系对抗仿真技术的发展。美军在体系对抗仿真系统的建设方面较为领先，典型的系统包括扩展的防空仿真系统，联合对抗仿真系统，以及联合战区级模拟系统等。

仿真需求是体系对抗仿真的重要组成部分，对体系对抗仿真起着指引作用，因此，对于仿真需求的分析和建模方法的研究尤为重要。许瑞明等人提出了一种仿真需求分析方法，该方法基于实体的关键对抗能力去分析对抗仿真的分辨率需求。翟禹尧等人提出了一种基于广义随机Petri网的仿真需求建模方法，并实现了相应的模型仿真虚拟机用来执行需求模型。Wayne Power等人提出了一种基于模型的系统工程的方法，为分析武器装备以及对抗仿真的需求建模提供结构性、严谨性和可追溯性提供了保障。朱杰等人利用形式化的方法建立了仿真过程的逻辑模型，并定义了仿真过程对象的数据结构，最后通过对真实战场环境的模拟验证了模型的正确性。初阳等人针对海上对抗仿真建模方法单一、不成熟的问题，提出了一种多分辨率建模方案，具有一定的创新性。

在仿真模型建模技术研究方面，为了提高仿真模型重用性，美军提出了基于单元的仿真模型建模技术和基于组件的仿真模型建模技术，目前广泛用于军用仿真模型开发。两种仿真模型建模技术的具体细节如下：

基于单元的仿真模型建模技术从基础对抗行为角度描述仿真对象的属性和功能，如指挥、维修和保障等，相关的仿真研究平台有联合对抗仿真系统和对抗人员仿真系统等[22]。基于组件的仿真模型建模技术从对抗装备实体角度描述仿真对象的属性和功能，如预警机、无人艇和导弹等，相关的仿真研究平台有扩展仿真仿真系统和柔性分析建模与训练系统[23]等。

基于单元的仿真模型建模技术将仿真模型抽象拆解成独立个体。基于组件的仿真模型建模技术通过隐藏建模过程中多余的细节来降低体系对抗仿真系统的冗余性，并通过重用已经构建的组件模型来降低仿真建模所耗费的时间和成本，从而保证系统研发和运维的便捷性。

## 1.3 论文结构

第一章 绪论。

简要介绍论文的相关研究背景及意义和国内外发展现状，阐述论文的研究目的、研究意义和研究内容。

第二章 体系对抗仿真场景数据重建与实体关联相关技术。

第三章 体系对抗仿真场景数据重建技术研究。

第四章 体系对抗仿真三维数据重建效率评估。

针对插值参数和地貌类型对插值结果的影响，研究其如何影响插值算法的结果，采用交叉验证、相关分析、方差分析的方法对实验数据进行分析验证。

第五章 体系对抗仿真实体关联技术

对插值后的 DEM 数据，对任意一个二维坐标，提取其相关的地形因子并供体系对抗仿真场景使用。

第六章 总结与展望

主要对论文中关于体系对抗仿真场景数据重建与实体关联的一些问题进行总结和讨论，分析本文研究的主要创新点，得出结论。最后对论文没有完成的工作进行一些探讨，明确今后的研究内容和重点。

# 2 体系对抗仿真场景三维数据重建与实体关联相关技术

地理空间数据的质量直接影响着体系对抗仿真系统应用、分析、决策的正确性和可靠性。随着体系对抗仿真系统应用的日趋广泛和快速发展，地理空间数据质量及其不确定性的重要性日渐突显，已成为体系对抗仿真存在和发展不可缺少的条件。作为地理空间数据的核心成员之一，数字高程模型(Digital Elevation Model，DEM)自1958 年首次提出以来，其质量问题就受到广泛的关注和研究。体系对抗仿真与地学分析模型的结合以及日益复杂的地学模型对多重地理要素数据精度的计算要求，使得 DEM 的重要性和应用范围日益扩大，同时也对 DEM 质量的分析和评估提出了更高的要求。

## 2.1 地形表达

### 2.1.1 地形表达

地球表面是人类生活和活动的场所。地表是地球在其长期的内外营力作用下形成的特定的几何表面，人类的活动加剧了地的变化。地形(topography)是地表的特定的形态，包括地表的结构特征、几何特征和统计特征，地形因素是影响地表物质和能量循环和分配的重要因素，如环境变迁、水文过程、生物分布、气候特征等等。为了认识和改造自然，人们不断地尝试着用各种方法来描述、表达周围的环境信息利用地形图进行地形表面形态的表达便是其中之一。

早期由于测量知识的缺乏，对地形表面形态的描述主要采用象形绘图方法进行，如先后出现的象形符号法、透视写景图、晕潇法、斜视区域图、地貌写景图、地貌形态图、地貌单元图等等，实现了在二维介质上对三维地形表面的表示和描述，在人类对自身环境认识过程中发挥了重要作用，但由于写景方式不具备可量测性，并不是进行地表形态描述的理想方式。

随着测绘技术的发展，使得高程数据和平面位置数据的获取成为可能，对地形的表达也由写景式的定性表达逐步过渡到以等高线为主的量化表达。用等高线进行地表形态描述具有直观、方便、可量测等特性，是制图学历史上的一项最重要的发明。在等高线地形图上，对地形起伏、地物等的描述不再是象形符号、色彩或明暗的变化，而是正交地投影在水平面上，相邻高程相等的点连接而成的闭合曲线表示地形起伏特征和形态结构，线划符号表示按比例缩小的地物。

### 2.1.2 遥感技术

20 世纪 60 年代以后，随着空间技术、通信技术等的迅速发展，在航空摄影测量、航空地质探矿、航空像片判读应用发展的基础上诞生了遥感科学技术。伴随着 70年代美国地球资源卫星(LandSat)的升空，地形观测从航空发展到航天，遥感技术获得极为广泛的应用。

现代遥感技术的基本过程是: 在距目标物几米至几千公里的距离以外，以汽车、飞机和卫星等为观测平台，使用光学、电子学或电子光学等探测仪器，接收目标物反射、散射和发射来的电磁辐射能量，以图像胶片或数字磁带形式进行记录:然后把这些信息传送到地面接收站，接收站把这些遥感数据和胶片进一步加工成遥感资料产品:最后结合已知物体的波谱特征，从中提取有用信息，识别目标和确定目标物间的相互关系。因此说遥感是一个接收、传送、处理和分析遥感信息，并最后识别目标的复杂技术过程。如图 2-1 所示。



图2-1遥感过程与技术系统

在遥感技术中，除使用对可见光摄影的框幅式黑白摄影机外，还使用了彩色或彩红外摄影机、全景摄影机、红外扫描仪、多波段扫描仪、雷达扫描仪、微波扫描仪、成像光谱仪、CCD推扫式逐行扫描仪、矩阵数字摄影机等，比常规黑白像片能提供更为丰富的几何、物理等影像信息。

### 2.1.3计算机技术

20 世纪 40年代计算机技术的出现和随后的蓬勃发展，以及相关技术，如计算机图形学、计算机辅助制图、现代数学理论等的完善和实用，各种数字地形的表达方式得到迅速发展。计算机技术在制图、测绘领域中的应用，不但推动着制图、测绘逐步向自动化与数字化、实时处理与多用途的方向发展，改变着地图制图的生产方式，也改变着地图产品的样式和地图应用的概念。借助于地形的数字化表达，现实世界的三维特征以及可量测性能够得到充分而真实地再现。1958 年，美国麻省理工学院摄影测量实验室主任 Miller 教授对计算机和摄影测量技术的结合在计算机辅助道路设计方面进行了实验。他在用立体测图仪所建立的光学立体模型上，量取了设计道路两侧大量的地形点三维空间坐标，并将其输入计算机，由计算机取代人工进行土方计算、方案比选等繁重的手工作业。随后 Miller 和 LaFamme 在Photogrammetric Engineering 杂志上发表了题为“The digital terrain model: theory andapplication”的论文，首次提出了数字地形表达的概念:数字地面模型，英文名为 Digital TerrainModel，简写为 DTM。在随后的几十余年间，数字地面模型在测绘利遥感、农林规划、土木工程、对抗、地学分析等领域得到广泛深入地研究。地形表达从模拟表达时代走向数字表达时代。

## 2.2 数字高程模型

在数字地面模型 DTM中，一般包含四类信息，即地貌信息、地物信息、自然资源与环境信息以及社会经济信息等，当信息仅为高程时，DTM 称为数字高程模型(Digital Elevation Model，DEM)。DEM通过离散分布的高程数据来模拟连续分布的地形表面，定义为区域地形起伏的数字化表达。随着人们对 DEM 理解的不断提升，DEM 的技术特征也在变化，已由早期单一的数据产品的念发展到集数据和数据处理方式为一体的技术体系。DEM 所表达的对象不再局限于地形，也可用于模拟其他二维表面上连续变化的非地形特征。

DEM 对地形的表达，按其原理可分为数学描述和图形表达两类(图2-2)。数学描述是根据地形起伏情况，选用不同的数学函数来近似地形曲面，常用的数学函数有傅立叶级数、多项式等。依据数学函数的定义域，数学描述有全局和局部之分。前者是在整个研究区域内，用一个数学函数进行地形描述，而后者则将地表按照起伏划分成结构单一的区域，每一区域采用最接近的数学函数表述



图2-2数字地形表达方式

### 2.2.1 DEM 数学描述

从数学意义上来说，数字高程模型指定义在二维空间上的连续函数。由于连续函数的无限性，DEM 表现为将有限的采样点用某种规则连接成一系列的曲面或平面片来逼近原始曲面。因此DEM 的数学定义为区域D内的采样点按某种规则连接成的面片M 的集合:

连接规则点构成 DEM 的数据结构，可以是呈规则分布的格网或不规则分布的格网。

#### 2.2.1.1规则格网

当为正方形格网时，DEM 称为基于规则格网的 DEM。由于正方形格网的规则性，格网点的平面位置隐含在格网的行列号中而不记录，DEM 相当于一个n行m列的高程矩阵：

#### 2.2.1.2不规则三角网

当点为三角形时，DEM 表现为用互不交叉、互不重叠的连接在一起的三角形网络逼近的表面，称为基于不规则三角网的 DEM(即TIN)，基于不规则三角网的 DEM表示为三角形T的集合：

式中:是三角剖分准则； 是空间离散点。

一般将地形表面看作是一个单值曲面，即模型中的任意一点都是唯一的，且相同的x，y仅对应一个z值。数字地形模型中的“数字”主要用来强调与其他非数字表达形式的地形模型之间的区别(如纸质地图表示的晕渲图、等高线图等)。随着计算机的广泛应用和数字地形模型研究的发展，更应强调数字地形模型是一个三维的模型，而不是强调它是以属性形式表达的。因此，称之为“三维地形模型”更为合理[9]。

### 2.2.2 DEM 图形描述

数学描述虽具有较强的理论意义，但实际应用的可操作性不强。图形表达方式试图通过地形测量过程的模拟实现区域地形描述，即通过对有限的离散采样点、线的合理组织实现区域地形的表达，因此DEM 是一种结构化的地形数据。目前工程和研究领域常用的结构形式为规则网络、不规则网络和等高线三种。

#### 2.2.2.1规则网络模型

规则网络模型由规则的采样点数据组成，或把不规则采样点数据内插成规则点数据而后，以矩阵形式来表示地面形状。在规则格网模型中，将空间区域分成规则的等距离单元，每个单元对应一个数值。在数学上，将这些数据表示为一个矩阵，矩阵中每个元素的值为该采样点的高程值。在计算机中这些数据表示为一个二维数组，每个数组元素对应一个高程值，其数据结构组织类似于图像栅格数据，只是每个像元的值是高程值。如图2-3所示，规则格网表示方法是把DEM表示成高程矩阵：



图2-3规则格网DEM

规则网络模型将地形曲面划分成一系列的相互连接的规则单元，每个单元对应一个地形特征值(如地面高程值)。规则单元有多种布置形式如矩形、正三角形、正六边形等，但以正方形格网单元最为简单，同时也比较适合于计算机处理和存储，例如常常采用矩阵形式存储格网数据。规则格网的另一特点是容易与航空、遥感等影像数据结合。事实上，规则格网模型(Grid based DEM)已成为一种通用的DEM 数据组织标准，许多国家的DEM 数据如美国USGS DEM、我国1:5万比例尺以下的 DEM 都是以规则格网高程矩阵形式提供的。

规则格网 DEM 的优点在于结构简单、适合于计算机处理和存储，以及易与影像数据结合；这主要得益于它的规则结构。它还可以很容易地计算等高线、坡度、坡向、山坡阴影和自动提取流域地形，使得它成为DEM最广泛使用的格式。格网DEM的缺点是不能准确表示地形的结构和细部，如固定的分辨率在应用中往往造成简单地形上的数据冗余，而对起伏程度变化大的区域则描述不够精细；不能准确反映地形地貌特征（如山峰、注坑、山脊、山谷等)，以及在某些计算中造成方向性偏差等等。为此，有时需要采用附加地形特征数据，如地形特征点、山脊线、谷底线、断裂线，以描述地形结构。

#### 2.2.2.2不规则网络模型

不规则网络则是将采样数据连接成互不交叉和重叠的多边形网络，网络单元有三角形四边形、五边形等，但以三角形单元最为常用(图2-3)，称之为不规则三角网(Triangulated InegulalNetwork，TIN)，其数学特征可以表述为三维空间的分段线性模型，在整个区域内连续但不可微。与规则格网的 DEM 相比，TIN 在模型中保持了原始采样点，可以很好的顾及各种地形特征点和特征线如山脊、山谷、地形断裂线等，同时又能随地形的变化而改变采样点的密度和分布，具有可变分辨率的特征，因而能够避免地形平坦地区的数据冗余。



图2-3不规则三角网

TIN模型根据区域有限个点集将区域划分为相连的三角面网络，区域中任意点落在三角面的顶点、边上或三角形内。如果点不在顶点上，该点的高程值通常通过线性插值的方法得到（在边上用边的两个顶点的高程，在三角形内则用三个顶点的高程）。所以TIN是一个三维空间的分段线性模型，在整个区域内连续但不可微。

TIN的数据存储方式比格网DEM复杂，它不仅要存储每个点的高程，还要存储其平面坐标、节点连接的拓扑关系，三角形及邻接三角形等关系。TIN模型在概念上类似于多边形网络的矢量拓扑结构，只是TIN模型不需要定义“岛”和“洞”的拓扑关系。

不规则三角网模型由连续的三角面组成，三角面的形状和大小取决于不规则分布的测点或节点的位置和密度。不规则三角网与高程矩阵方法不同之处是随地形起伏变化的复杂性而 改变采样点的密度和决定采样点的位置，因而它能够避免地形平坦时的数据冗余，又能按地形特征点如山脊、山谷线、地形变化线等表示数字高程特征。

#### 2.2.2.3等高线模型

等高线(Contour based DEM)模型是一系列等高线集合，即采用类似于线状要素的矢量数据来表达 DEM，但一般需要描述等高线间的拓扑关系。等高线通常是存储等高线的标识符线上特征点的有序坐标对序列以及等高线的高程属性。等高线模型的数据一般直接来源于对地形图的数字化或者摄影测量的副产品，它的特点是直观，易于理解地表特性的变化规律但不利于完成空间三维特性的分析。



图2-4等高线

等高线以符号化模型来表示空间立体的形态，即用高程相等的相邻地面点连结成封闭曲线来表示连续递变的面状地形分布特征。等高线模型表示高程，高程值的集合是已知的，每一条等高线对应一个已知的高程值，这样一系列等高线集合和它们的高程值一起就构成了一种地面高程模型。

等高线通常被存成一个有序的坐标点对序列，可以认为是一条带有高程值属性的简单多边形或多边形弧段。由于等高线模型只表达了区域的部分高程值，往往需要一种插值方法来计算落在等高线外的其他点的高程，又因为这些点是落在两条等髙线包围的区域内，所以，通常只使用外包的两条等高线的高程进行插值。

等高线通常可以用二维的链表来存储。另外的一种方法是用图来表示等高线的拓扑关系，将等高线之间的区域表示成图的节点，用边表示等高线本身。此方法满足等高线闭合或与边界闭合、等高线互不相交两条拓扑约束。

## 2.3 DEM插值

### 2.3.1空间插值

位置分布不规则的数据被称为是离散数据，在平面二维地理空间的定位中，离散数据的坐标是由不规则分布的离散样点的平面坐标来实现，高程和属性值一般作为第三维数据。在包含抽样调查获取数据的领域中，例如气象气候、地质勘探等，由于受观测手段的限制，只能在有限的地理位置上获取离散的数据。为了获得更多未知的数据，需要对其进行空间插值。

空间插值是一种通过已知空间数据推求未知空间数据的方法。它是基于“地理学第一定律”的基本假设：空间位置上越靠近的点，具有相似特征值的可能性越大；而距离越远的点，其具有相似特征值的可能性越小。也就是说，根据一组已知的空间数据，不管是离散点的形式，还是分区数据的形式，可以从这些数据中找到一个函数关系式，使得该关系式能够最好的逼近已知数据，并根据该关系函数式推求出范围内其它任意点或任意分区的值，当然也包括未知点或分区的值。

空间插值的主要目标：

(1)通过对已知数据的分析，估计某一缺失的观测数据，以提高数据的精密度，即估计缺失值；

(2)对数据进行格网化，把非规则分布的空间数据内插为规则分布的空间数据，以便更好的反映连续分布的空间现象，并对其变化作出模拟，其最终目的就是构造空间规则体数据场，建立所研究对象体的模型，实现数据体的绘制，为后续储量计算提供基础。例如，对分布离散的、稀少的、不规则且不合理的观测站点的观测数据进行空间插值，可以得到格网化的数据；

(3)内插等高线（面），以等高线（面）的形式直观的显示数据的空间分布。

### 2.3.2 DEM插值原理

DEM插值是根据已知采样点的高程值去估计未知插值点的高程值的过程。其主要目的是缺值估计、等值线内插和离散点数据的格网化。空间插值可以根据已知采样点估计未知插值点的主要原因在于研究对象——“地形”的特殊性: 地形具有空间异质性和空间相关性等基本特征，使得利用一些空间位置合理的采样点获得对地形表面相对精确的描述成为可能。

#### 2.3.2.1 空间异质性

地形是地球表面各种起伏形态（即地貌）和所有固定性物体（即地物）的总称。如果不考虑地物对地球表面形态的影响，地球表面表现出令人难以置信的多样性：从华北平原到黄土高原，从江南丘陵到青藏高原，没有任何一个地方可以合理地描述为一个均匀区域。因此在这种情况下，试图将地球表面任意一个子集作为整体的代表性样本是不现实的，任何一个在有限区域上的分析结果都可能因为这个有限区域的位置变化而发生变化。

空间异质性指空间随机过程非平稳的特性，即地理空间存在多样性，被认为是地理学第二定律。Li 等[10]将空间异质性定义为系统或系统属性在空间上的复杂性(Complexity)和变异性(Variability)。

空间异质性决定了DEM插值范围的有限性，即DEM插值在局部范围才有意义，超出一定有限范围之后，DEM插值将变得没有任何意义。

#### 2.2.2.2 空间相关性

空间异质性决定了地形表面的多样性，但并不表示地形表面任一尺度、任一微小范围的地形特征都是异质的，反而恰好相反。从微观尺度看，任何区域都可以划分为一系列内部具有极大相似性的更微小区域，在每一微小区域内部总是存在某一属性的相似性。从宏观尺度看，地形表面上的相邻点之间的属性并不是独立和随机的，而是表现出显著的相互依赖性。当然也存在例外，高程可能在短距离上发生快速变化，如在平原和山脉之间或者沿海悬崖与相邻海洋之间，高程都发生了显著变化。但是从总体上来说，地形表面表现出显著的空间依赖性。地理学中，描述空间依赖性现象的术语就是空间相关性。

1970年美国地理学家 Tobler 提出了“地理学第一定律”，即Everything is related toeverything else， but near things are more related than distant things (所有的事情都是相关的距离近的事物比距离远的事物相关性更强)。地理学第一定律为空间相关的普遍性提供原理性基础。在经典统计学中，空间相关性的影响程度可以用一系列空间自相关的统计量来度量，如 Morans I、Gearys C Getis、Join count 等[11]。更重要体现在地统计学(Geo-Statistics)学科中，其从表达空间自相关如何随距离的增加而降低的函数角度来描述空间变异的特性。

地理学第一定律的意义极其重大: 如果它不成立，那么从理论上讲，地形表面的任何地方的所有情况都可能在任何一个小区域中被发现，显然就不存在对事物的近似均匀描述的现象，进而地形表面将变得非常混乱无序，任何地方的坡度都是无限大，等高线也变得无限稠密和弯曲，在这种情况下，进行空间插值和空间分析本身就变得没有任何意义空间异质性从空间范围的角度，空间相关性从属性相关的角度为 DEM 插值提供了理论基础，使得利用一些位置合理的采样点获得对地形表面相对精确地描述，并根据这些位置合理的采样点进行未知点的估计成为可能。

### 2.3.3 DEM插值特性

DEM 插值算法具有许多重要的特征，例如全局性和局部性、精确性和非精确性、确定性与随机性、光滑性和突变性、单因素与多因素、规则分布和不规则分布等。

1. 全局性与局部性

全局性指使用插值区域内的所有采样点进行地形趋势面的计算，并估计未知插值点的高程值。局部性指使用未知插值点周围小范围内的采样点进行地形趋势面计算，并估计未知插值的高程值。

1. 精确性与非精确性

精确性指 DEM 插值算法在已知采样点处计算得到的估计值和观察值一致；非精确性指DEM 插值算法在已知采样点处计算得到的估计值和观察值不一致。

1. 确定性与随机性

确定性指在 DEM 插值过程中仅仅提供估计值的计算而不提供该估计值的误差统计；随机性指在 DEM 插值过程中不仅提供估计值计算，而且提供该估计值的误差统计。

1. 光滑性与突变性

光滑性指生成的 DEM 曲面具有连续光滑的特性；突变性指生成的曲面是离散或者连续但不光滑的。

1. 单因素与多因素

在插值过程中仅仅使用主要变量完成未知插值点估计的 DEM 插值模型称为单因素插值算法；如果在插值过程中使用其他次要变量的辅助才能完成未知插值估计的称为多因素插值算法。在地统计学中，简单克里格法、普通克里格法都是单因素插值算法，而简单协克里格法、普通协克里格法都是多因素插值算法。

1. 规则分布和不规则分布

根据采样点的分布情况可以将 DEM 插值算法划分为基于规则分布和基于不规则分布(这里仅仅考虑离散采样点的情况，所以不包含等高线等分布)的插值算法。规则分布是指离散采样点在 x 和 y 均以各自等间距的形式分布；不规则分布是指离散采样点以杂乱无章的形式存在。

### 2.3.4 DEM插值分类

DEM插值算法的任一特征都可以成为 DEM 插值算法划分的依据，根据已知点的搜索范围可以将插值算法分为全局插值、局部插值和逐点插值。

1. 全局插值

全局插值主要是通过多项式函数来实现的。它的拟合模型是由研究区域内所有采样点的观测值建立的。这种方法的优点是：易于理解；简单地形特征因为参考点比较少选择低次多项式来描述就可以。但是这种方法的函数极不稳定，还有它使高次多项式很难得到稳定解，所以实际工作中很少用于直接插值。它的主要用途是在使用某种局部插值方法对区域进行插值前，从数据中去除一些不符合总体趋势的宏观地貌特征。

(2) 局部插值

由于实际的地形是很复杂的，整个地形不可能用一个多项式来拟合，因此DEM插值中一般不用整体函数插值，而采用局部函数插值即分块插值较适宜。

分块插值是把需要建立数字高程模型的地区切割成一定尺寸的规则分块（通常为正方形）。它的尺寸大小则根据地貌复杂程度和数据源的比例尺选定的在每一分块上展铺一张数学面，相邻分块之间要求有适当宽度的重叠带，以保证数学面能够比较平滑地与它相邻分块的数学面的拼接。典型的局部插值有线性插值、局部多项式插值、双线性多项式插值或样条函数插值等。

(3) 逐点插值

逐点插值法是以待插点为中心，定义一个局部函数法去拟合周围的数据点数据点的范围随待插点的位置的变化而变化，因此又称为移动曲面法。主要有以下几种方法：移动拟合法、加权平均法、Voronoi图法、考虑地貌特征的逐点内插。逐点插值应用简便，其关键问题在于内插窗口域的确定。这不仅影响到内插的精度，还关系到插值的速度。基于这一原因，Voronoi图的点插值算法被认为是目前较好的一类逐点插值法。

考虑 DEM 插值算法的各种基本特征以及现有各种 DEM 插值算法的分类方法，可以发现各种 DEM插值算法的分类方法本质上是相互隐含的。以插值范围分类标准为例，可以将插值算法分为整体插值、局部插值和逐点插值。对于每一类分类标准下的插值算法，在选择具体的插值函数时，又可以使用诸如多项式插值、样条函数插值、克里金插值、多层曲面叠加插值等算法。对于纯二维内插和曲面拟合插值来说，两者不同之处在于根据参与插值的采样点个数的不同而采取不同的计算策略而已。如果采样点的个数多于未知参数个数，则使用最小二乘方法，使得采样点和曲面拟合值之差的平方和最小，即曲面拟合插值；如果采样点个数和未知参数个数相等，在保证存在唯一有解的情况下，即可实现纯二维插值，即拟合的曲面准确的通过每一个采样点。因此，通过比较各种插值算法的基本特征更有利于对 DEM 插值算法理解 (见表 2-2)。

表2-2常用DEM插值算法及其特征

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 插值算法 | | 单因素/多因素 | | 确定性/随机性 | | 全局性/局部性 | | 精确性/非精确性 | | 光滑性/突变性 | | 规则分布/不规则分布 | |
| 单因素 | 多因素 | 确定性 | 随机性 | 全局性 | 局部性 | 精确性 | 非精确 | 光滑性 | 突变性 | 规则 | 不规则 |
| 加权平均插值 | 最近邻法 | 🗸 |  | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 | 🗸 |
| 反距离加权 | 🗸 |  | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |
| 改进谢别德 | 🗸 |  | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |
| 多项式插值 | 线性函数 | 🗸 |  | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 | 🗸 |
| 双线性函数 | 🗸 |  | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 | 🗸 |
| 高次多项式函数 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |
| 径向基插值 | 多重二次曲面函数 | 🗸 |  | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |
| 多重对数函数 | 🗸 |  | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |
| 薄板样条函数 | 🗸 |  | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |
| 自然三次样条函数 | 🗸 |  | 🗸 |  |  | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |
| 克里格插值 | 球形函数 | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |
| 指数函数 | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |
| 线性函数 | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |  | 🗸 |  | 🗸 | 🗸 |

## 2.4 DEM 统一插值模型

### 2.4.1 DEM 插值核函数的统一表达

影响 DEM 插值结果的一个重要因素是插值核函数，插值核函数在整个插值过程中起着调节已知点权重分配的作用，其地理意义间接或直接地表达了相邻两个空间对象的空间相关关系。插值核函数的显著特点是显式的和先验的，并且在整个插值过程保持不变。

对于加权平均插值如反距离加权插值 (IDW)，其权函数 (Power Function，PF)是距离的显式函数，直接表达了空间上两对象的相关关系，并且权指数越小，其权函数下降越快，即离待插点越远的已知点被分配的权重越低，使得插值表面的局部变化较平缓；对于移动曲面拟合，其拟合曲面函数间接地表达了空间上的相关关系；对多面叠加法插值，如径向基函数插值 (RBF)的插值基函数 (Base Function，BF)、样条插值的样条函数(Spline)，克立金插值的半变异函数 (Semivariance)，多面函数法插值的插值核函数(Kernels)，同样是距离的函数，表达了空相关关系，具有相同的地理意义。因此 DEM插值都间接或直接地刻画了空间两对象之间的相关关系，而决定这种关系的是插值核函数。

为了统一描述，把径向基函数插值的基函数(BF)、加权平均法的权函数(PF)、克立金插值的半变异函数(Semivariance)、样条插值的样条函数 (Spline)、移动拟合插值的拟合曲面函数、多面函数法插值的核函数统称为插值核函数(KF)，按照该插值分类，对常用的插值核函数进行归纳总结(表2-3~2-8)。

1. 加权平均法插值

表2-3加权平均法插值核函数

|  |  |
| --- | --- |
| 核函数 | 表达式(d为距离，其余为参数常量) |
| 幂函数 | ，u为权指数 |
| 调和函数 | ，R为搜索点最大距离 |
| 高斯函数 | ，m为常数 |

1. 移动拟合法插值

表2-4移动拟合法插值核函数

|  |  |
| --- | --- |
| 核函数 | 表达式 |
| 线性平面 |  |
| 二次曲面 |  |
| 三次曲面 |  |
| 不完全四次曲面 |  |

1. 多面叠加法插值

径向基函数插值(RBF)

表2-5径向基函数插值核函数

|  |  |
| --- | --- |
| 核函数 | 表达式(d为距离，其余为参数常量) |
| 薄板样条函数 |  |
| 张力样条函数 |  |
| 完全规则样条函数 |  |
| 二次曲面函数 |  |
| 反二次曲面样条函数 |  |

克立金插值 (Kriging)

表2-6克里金插值核函数

|  |  |
| --- | --- |
| 核函数 | 表达式(d为距离，其余为参数常量) |
| 球状函数 |  |
| 指数函数 |  |
| 线性函数 |  |
| 高斯函数 |  |

样条插值(Spline)

表2-7样条插值核函数

|  |  |
| --- | --- |
| 核函数 | 表达式(d为距离，其余为参数常量) |
| 基本样条函数 |  |
| 双调和格林函数 |  |
| 薄板张力样条函数 |  |
| 规则样条函数 |  |

多面函数法插值(Multisurface)

表2-8多面函数法插值核函数

|  |  |
| --- | --- |
| 核函数 | 表达式(d为距离，其余为参数常量) |
| 旋转双曲面 |  |
| 旋转三次曲面 |  |
| 高斯曲面 |  |
| Hirvonen曲面 |  |
| Launer曲面 |  |
| 吕言曲面 |  |

### 2.4.2 DEM 插值基函数的统一表达

最早提出插值基函数的是拉格朗日，其目的是避免在线性插值时拟合曲线过程中的繁杂系数解算。其方法是对每一个已知点引入一个基函数，使得曲线方程可以表示成n个插值基函数的线性组合:

基函数可以如此构建：

不难知道拉氏插值基函数有如下性质：

* + 当时
  + 当时

DEM插值都具有特定的基函数和核函数，需要指出的是 DEM 插值基函数与插值核函数有本质区别的：

* 每一次插值过程的基函数有多个，即每一个已知点都有自己的插值基函数，而插值核函数在整个插值过程中仅有一个，且在整个插值过程中不变；
* 已知点上的插值基函数在已知点的值为 1，在其它点上都为 0，而插值核函数往往不为0
* 插值基函数是隐式的，需要推导得到，插值核函数作为插值参数，是显式的。

### 2.4.3 DEM插值机理分析

表面上，DEM插值是 DEM待插点高程的一种估算过程，估算的方法依据于 DEM 的各种插值算法；实际上，DEM 插值蕴含了深层次的地理意义，即每种 DEM 插值模型都依照地理学第一定理定律，直接或者间接地表达了地理目标之间的在空间上的相关关系。

对于加权平均法插值，反距离权插值 (IDW)的权函数 (d为距离)是距离的函数，表达了待插点与已知点之间的一种空间相关关系，当距离逐渐增加，其相关性逐渐降低，使得已知点分配到的权重也逐渐降低(如图2-5所示)。

图2-5反距离加权插值权函数

对于局部曲面拟合插值，虽然其核函数不是明确的距离的函数，但其相关关系还是能够推导得到，以一维线性插值为例，A、B 是已知点，其高程为，，待插点P到A，B的距离分别为，，A、B之间的差为s，由线性插值原理，可知P的高程为：

由此可知已知点与待插点之间也存在线性的空间相关关系：

随着距离增加呈现线性减少，与 IDW 插值类似，起着调节插值点上权重的作用。类似地，对于高阶的局部曲面拟合插值如局部二次多项式或三次多项式插值，其已知点与待插点同样存在特定的空间相关关系，所不同的是，其空间相关关系是非线性的。

对于多面函数法插值，各种插值算法的插值核函数都是距离的函数，直接表达了已知点与待插点之间的一种空间相关关系，如 RBF 插值的基函数、多面函数法的核函数、克立金插值的半变异函数等等。

从插值基函数角度分析，每个点的插值基函数是待插点坐标的函数，通过对插值基函数的变换，插值基函数最终都可以化归为已知点与待插点距离的函数，因此已知点与待插点之间同样蕴含了特定的空间相关关系。

概言之，每种 DEM插值模型其实都直接或间接地表达了待插点与已知点之间的一种空间相关关系，而决定相关关系的唯一因素是插值核函数。

### 2.4.4 DEM 统一插值模型构建

决定 DEM 插值结果主要有两方面的因素，第一是原始数据本身，包括原始数据高程特征数据分布；第二是插值模型，包括插值参数和插值基函数。当原始数据一定，DEM 插值结果仅与插值模型有关。因此DEM 插值可以从 DEM 插值参数和DEM 插值基函数两个方面进行描述。

从DEM 插值算法来看，DEM 插值过程其实是已知点权重分配的过程，有的插值模型直接分配权重，如 IDW 插值、NN 插值，有的间接分配权重，如 RBP 和SK插值。撇开插值过程不管，DEM 插值的最终结果是已知点高程向量的一种线性组合，其系数向量即为已知点的权重向量。设已知点高程向量(n 为已知点个数)，考虑插值基函数，可知 DEM待插点的高程为：

其中 m为常量，在克立金插值过程中，若已知已知数据高程的期望，m可以不为 0。

当待插点的坐标已知时，每个已知点上的插值基函数的值就被唯一确定下米，因此式又可成：

其中表示已知点的权重向量，不同的插值模型分配权的方式不同。在特定的 DEM 插值过程中，决定权重向量K的是DEM插值参数 (包括搜索方式QS、搜索点数QN、核函数KF)，于是权重向量K可以写成：

表示插值参数的概念模型，一起称之为DEM统一插值模型(Unified Interpolation Model，UIM)。

为了进一步验证 DEM 统一插值模型，在 DEM 统一插值模型框架下，对常用的7种DEM 插值算法进行归纳，分析 DEM 插值算法的权向K和常数m的表达式(如表2-10所示)。

表2-10 DEM常用插值模型的统一表达

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| DEM插值 | 插值表达式 | 权向量(K) | 常量(m) |
| L-TIN |  |  | 0 |
| B-TIN |  |  | 0 |
| IDW |  |  | 0 |
| Polynomial |  |  | 0 |
| SK |  |  |  |
| RBF |  |  | 0 |
| NN |  |  | 0 |

## 2.5常见 DEM 插值算法

最邻近插值、双线性内插和双三次插值均属于多项式插值方法，三者的算法由易到难，精度由低到高，因此在应用时应进行优化选择，优化考虑的因素有精度表达要求、地形特点和已有数据的高程点密度等。

### 2.5.1最近邻插值法

最近邻插值法（Nearest Neighbor）又称为泰森（Thiessen）多边形法，是一种非常简单的插值方法核心思想是用与插值点距离最近的已知点的变量值来表示该插值点的变量值。实现时，只需要将区域按照数据点的位置划分成若干个子区域，划分时必须满足每个子区域中仅包含一个数据点，而各子区域中的任一点到这个数据点的距离小于到任何其它数据点的距离，那么该数据点的值就是这个子区域的值。这时，区域内是均值的、无变化的，所有的变化都发生在子区域的边界上。如果在 与之间进行插值，假定插求点的待定高程为 ，则 DEM 最邻近插值法可供选的高程值有8个，亦即，也就是待插点附近3X3范围内的其余8个点。因此，最邻近插值法也称为自然邻近插值法，由于 的选择余地大，因此在地貌变化较小的地区应用。

这种方法实现简单，效率高，但是，它对空间因素考虑太少，受样本点的影响比较大，对于样本点不均匀分布的区域来说，容易造成变量值的不准确。因此只适宜于在地形变化不明显、地貌变化较小的地区应用。

### 2.5.2双线性插值法

双线性插值方法（Bilinear Interpolation）是较为经济的格网 DEM 插值方法，它兼顾考虑了插值精度和计算机开销问题，在二者之间做到了较为合理的平衡。如果 P 点的临近 4 个格网点为那么在图2-6中， 的过程中，P0处的高程值为 ，同理在过程中，，在横向方向上，可得 P 的高程值为:



图2-6双线性插值

### 2.5.3反距离加权法

反距离加权法（IDW，Inverse Distance Weighted）是最常用的空间插值方法之一，是最早使用的计算机内插方法，基于相近相似的原则：两个物体离得越近，它们的性质相似度就越大；反之，两个物体离得越远，则相似度就越小。也就是说，未知点的数值受到近距离的样本点的影响比较大，而受距离远的样本点的影响比较小。这时，距离这个因素作为权重就决定了插值点的数据值。插值点与样本点间的距离越小，则权重越大；距离越大，则权重越小，即两者成反比关系。实现时，区域内某插值点的值受区域内样本点的数值及其权重共同影响。算法中权重的选择就很重要。这种方法较为简单，易于实现，至今仍被广泛应用。但是，这种方法对权重函数的选择十分敏感，受非均匀分布的数据点的影响比较大，所得数值与实测数值易产生偏差。

### 2.5.4样条函数法

样条函数法（Spline Function）属于使用函数进行插值的一种常用方法。它使用一种数学函数，常采用一阶导数和二阶导数都连续的分段多项式，逼近已知数据点，产生平滑的插值曲线。这种方法很适合根据密集的点内插等值线，可用于逐渐变化的表面。方法易操作，计算量不大，运算速度较快，可以带来较好的视觉效果。但是，难以估计内插时的误差，点稀的时候效果不好。

### 2.5.5克里格插值法

南非地质学家克里格（D.G.Krige）于 1951 年最早提出克里格插值法（Kriging），法国学者马特隆（G.Matheron）于 1962 年引入区域化变量概念，使其得到进一步推广和完善。它是一种最优内插法，以变异函数理论及结构分析为基础，在有限区域内对区域化变量进行无偏最优的估计取值。不仅仅考虑了已知点与插值点的相对位置，更考虑了各已知点之间的相对位置关系。在插值过程中根据某种优化准则函数动态决定变量的数值，着重权重系数的确定，从而使得内插函数处于最佳状态，在插值点上获得最好的线性无偏估计变量值。在采矿、林业、农业、环境保护、地质、石油勘探等领域，克里格方法已经被成功的应用。它的理论基础坚实，能够计算出每个插值点的误差大小，得到估计值的可靠性程度，能够得到更接近实际情况的效果。但是，这种方法计算速度慢，耗费计算机资源，数据量大的时候计算也比较复杂。

克里格插值法的种类较多，包括简单克里格法、普通克里格法、泛克里格法、指示克里格法、析取克里格法、协同克里格法以及贝叶斯克里格法等，随着克里格法和一些学科的结合，结合学科的特点，又能发展了一些新的克里格方法。

# 3 基于DEM插值的体系对抗仿真数据重建

着现代对抗要素的不断扩展、战场环境各要素数据获取手段的不断丰富以及计算机软硬件的不断革新，指挥员对战场环境的认知需求也在不断深入，如需要了解陆地环境内任意位置处的地貌，需要针对山地环境来对坦克的路线进行规划等，从而为战场环境的建模与表达带来了新的挑战。在战役级战场中，比例尺通常为中小比例尺，指挥员主要关心的整个战场的发展态势，而并不会只专注与某一个细小的区域的地形变化，例如对于微地貌的描述，通常是通过点符号来表达，此时利用二维的等高线描述就能清晰明了的描述地貌的类型和起伏。而对于战术级或分队特种对抗，比例尺通常为大比例尺或目视比例尺，往往需要对局部地区的地形精细的描述和刻画，如对悬崖、山洞等地形环境的建模，这就需要对仿真场景进行数据重建，达到更高的分辨率。

## 3.1体系对抗仿真技术

### 3.1.1 体系对抗仿真技术概述

以信息技术为核心的新对抗变革推动着现代对抗形态转变，现代对抗主要模式不再是以往单一军兵种的对抗，而是多军兵种协同的体系对抗。现代对抗体系将信息系统与武器系统高度融合，不断提升基于信息化的体系对抗能力，形成陆、海、空、天、电、网和心理、认知一体化的体系对抗模式。一般认为武器装备体系是针对体系对抗任务，由相辅相成、相制约的各种武器装备构成的一个有机对抗整体。武器装备体系是一种复杂的系统，体系与组成系统及对抗环境之间交互关系复杂，具有非线性、涌现性、博弈性等特点。

武器装备体系研究主要有 3 种手段:理论研究、实验研究和仿真研究。其中，体系仿真由于其具有低成本、可重复、可考核边界、极限、复杂条件下对抗指标等无可比拟的优势，已成为武器装备体系研究的重要技术手段。体系仿真技术是以系统科学、对抗科学、信息科学，以及相关应用领域的专业技术为基础，以计算机系统、与应用相关的仿真器等为工具，对敌我双方对抗过程中的武器装备系统的功能性能、交互关系、行为模式、战场环境及其效应等进行模拟，以获取武器装备体系对抗结果的一项综合性、交叉性技术。体系仿真技术是武器装备体系化论证、设计、试验、分析、训练、运用等应用领域的重要技术。

体系对抗仿真要点可概括为以下四方面:生成战场环境、模拟对抗行动、评估对抗效能、演示模拟进程。为了实现体系对抗仿真，需要建立不同模型:仿真对象模型，装备实体模型 ，效能评价模型，环境表述模型，综合评价模型，可视化模型。

### 3.1.2 体系对抗仿真技术需求

模型是对抗实体在仿真系统中的数字化映射是武器装备体系仿真的重要基础。当前，建模方法已实现从封闭的简单系统建模发展到开放的复杂系统建模、从自适应性低的静态建模发展到基于多领域、多视图、多粒度的动态建模。武器装备体系是一种动态变化的开放系统，在体系对抗仿真过程中要体现体系的非线性、涌现性、自适应、对抗双方博弈等特点，随着人工智能技术在装备中的应用，还应反映体系的智能性，这对武器装备体系建模提出了更多的方法与技术需求， 主要包括: 1)自适应智能指控、智能规划决策建模技术；2)对抗体系组织行为建模技术；3)新型对抗空间建模技术等。上述需求都离不开体系对抗仿真三维数据及相关的地形数据，而基于遥感技术获取的位置分布不规则的二维平米按坐标离散数据和第三维的高程值数据在包含抽样调查获取数据的领域中，由于受观测手段的限制，只能在有限的地理位置上获取离散的数据。为了获得更多未知的数据，需要对其进行DEM插值。

体系对抗仿真过程涉及对抗实体不断增多，信息流程关系错综复杂，使得建模仿真、仿真运行模型调度更为复杂，且评估分析运行样本数量庞大，对高效能/智能化的体系仿真技术需求尤为迫切。该技术具体有以下特点:1)能以不同加速比进行大规模/大样本仿真试验；2)可针对不同资源的任务调度，实现仿真任务的动态迁移；3)可针对不同的评估任务，实现自动指标体系生成以及在线自动评估。

### 3.1.3 体系对抗仿真建模技术

#### 3.1.3.1武器装备体系建模技术

武器装备体系是一种复杂系统，存在大量非线性、不可控、不确定、难以预知等难以量化的因素，不再是简单的线性关系，导致武器装备体系高置信度建模越来越困难，甚至不可能。此外，武器装备在全生命周期内产生了反映其各方面特性的大量数据但相关数据利用率很低，数据价值未能充分控掘由于基于大数据的建模是一种数据关联性建模，为“黑盒”建模方法，而非事件的因果性建模，因此，利用大数据技术手段，对于提高存在大量非线性、不确定性特征的武器装备体系的建模效率、置信度等具有较好的理论与应用价值。基于大数据的建模首先以大数据技术为手段进行数据仓储化存储、降维融合等建模仿真预处理；然后采用因素间关联分析聚类分析等数据挖掘手段，建立研究对象与数据属性项之间的关系，并筛选识别敏感指标，构建针对系统、子系统的分层指标体系；最后采用基于大数据的建模仿真和传统的基于模型的仿真相结合的方法开展复杂系统中各分系统的建模仿真，采用基于妥协决策的方法对体系进行多领域综合建模，最终实现武器装备体系建模。

#### 3.1.3.2 战场环境建模技术

环境建模主要研究环境与武器装备间的相互影响。战场环境建模研究内容繁多，针对海、陆、空等环境，研究环境因素对装备在识别、跟踪、引导等链路中重要环节的影响。战场环境与武器装备相互对抗的物理机理十分复杂，特别是装备在跨空域/介质飞行过程中涉及多种物理场耦合，实现环境影响效应模拟的无缝衔接较为困难，是复杂战场环境建模当前研究难点。例如太空环境模型反映了临近空间及太空光学环境对武器装备主/被传感器探测概率的影响建模过程中考虑临空环境/临边大气、太阳和深空背景等几类背景环境，结合探测时间观测几何关系、探测器属性(位置、方向、姿态等)太阳辐射模型、临近空间大气模型、临边大气模型、深空背景模型等计算获取其辐射特性；然后，结合目标的辐射特性，并考虑大气透过率的影响，得到目标和背景环境耦合的辐射场景；最后，结合考虑探测器相关参数，利用探测系统的信杂比与探测概率关系获得特定环境下装备的探测概率。

### 3.1.4体系对抗仿真系统

依据分层建模的设计思想，可以将武器装备体系对抗仿真系统划分为战役层、战术层和交战层三个层次，不同层次的问题由不同层次的仿真系统来完成。1)战役层次上需要重点解决的问题包括两个方面:一是检验现有武器装备体系对不同战役样式的适应能力；二是为了达成对抗目的，需要什么样的武器装备体系。考虑到战役周期通常比较长，因此必须设法实现高效的实时仿真，并且需要回避战术层次的细节问题。2)战术层次上需要重点解决的问题包括两个方面:一是武器装备的对抗效能评估；二是武器装备的对抗使用研究由于对抗样式、对抗原则存在多样性以及满足新装备对抗使用研究的需要。3)交战层次需要重点解决的问题是能够提供高层次仿真模型所需要的各类基础数据。为此，交战层次的仿真模型要具有完备性，即交战层次的仿真模型应能基本覆盖装备的主要交战和任务形式。

针对以上的系统建设思路，武器装备体系对抗仿真系统(以下简称“体系对抗仿真系统”)由模型管理分系统、战术推演分系统、战役仿真分系统、综合评估分系统、演示汇报分系统和数据管理分系统六个分系统组成。每个分系统在研究重点上各有侧重。

#### 3.4.1.1模型管理分系统

模型管理分系统的研究重点是突出“完备性”，主要包含以下两个方面:

(1) 模型管理分系统既具有管理功能，又具有应用功能。管理功能包括完成各类基础交战模型的模型存储管理、模型分组管理和模型运行管理: 应用功能就是直接为对抗装备的对抗效能评估提供支持。

(2) 模型管理分系统包含的基础模型应能基本涵盖对抗装备的主要交战和任务形式，以满足战术推演分系统和战役仿真分系统对基础数据的需求。同时，每一个基础模型具有一定的独立应用功能。

#### 3.4.1.2战术推演分系统

战术推演分系统通过对战场环境、对抗指挥和对抗行动过程的描述以及兵力管理、信息查询等功能的实现，完成从战役过程中抽象出来的典型战术行动的图上推演。战术推演分系统在整个体系对抗仿真系统中起到了承上启下的作用，一方面为模型管理分系统中的基础交战模型提供战术背景，并通过采集基础模型提供的数据，为武器装备的对抗效能评估、对抗使用研究以及重点型号装备的对抗需求研究提供支持；另一方面，战术推演分系统产生的数据又是战役仿真分系统所必需的。

战术推演分系统的研究重点是突出“灵活性”。为此系统采用时间步推进的离散事件仿真机制，并采用分布式的实时或超实时运行模式。为用户提供灵活的战术想定生成功能以及推演进程的断点保存、回放功能，能够保证论证研究人员对不同战场环境下的不同战术行动进行图上推演或对拟制的战术行动方案进行检验。

#### 3.4.1.3战役仿真分系统

战役仿真分系统是在模型管理分系统和战术推演分系统的支持下，通过兵力需求分析和对抗效能分析为武器装备宏观论证提供支持。该系统包括两个子系统:一是兵力需求分析子系统，其主要功能是在满足战役指标的前提下确定武器装备的体系结构:二是对抗效能分析子系统其主要功能是对现有武器装备体系完成战役任务的能力进行检验。

战役仿真分系统的研究重点是突出“高效性”。为此，系统采用事件步推进的离散事件仿真机制，并采用单机闭环超实时仿真的运行模式。同时该系统中还包含一些数据处理和统计分析模型，以提高系统对战役仿真结果的分析与综合能力。

#### 3.4.1.4综合评估分系统

根据装备宏观论证的特点，对武器装备体系的评估应包含以下三个层次: 第一层的任务是在指定的战役样式下，针对战役仿真分系统一次仿真过程中使用的武器装备体系的可行性进行评估。该层次的评估以统计分析为基础、以满足战役要求为目的，最终生成满足该战役样式的备选方案。第二层的任务是在指定的战役样式下，在第一层次评估产生多个备选方案的基础上，增加经济可行性、技术可行性等指标，然后对备选方案的评估和优化。其结果是辅助生成针对该战役样式的武器装备体系方案。第三层的任务是在第二层次评估的基础上，针对不同战役样式的武器装备体系方案进行评估和优化，从而能够辅助生成在不同程度上适应不同战役样式的武器装备体系方案。

第一层次评估由战役仿真分系统来完成，综合评估分系统重点完成第二、第三层次的评估。在评估方法上，第二层次评估采用数据包络分析方法对各备选方案的相对有效性进行评价:第三层次评估则采用决策分析方法来最终确定武器装备体系方案。

#### 3.4.1.5演示汇报分系统

演示汇报分系统是根据体系对抗仿真系统的原型系统在实际应用过程中的需求而提出的。其主要任务是将体系对抗、评估的过程以形象、直观的形式展现出来。目前，演示汇报分系统的主要功能包括:1) 支持战术推演过程的记录和回放，并采用三维地理信息模型代替专用地理信息模型，采用象形军标代替标准的军用标号:2) 能够将战术推演分系统和战役仿真分系统的实时推演和仿真过程转换为多媒体影像文件，使得体系对抗仿真系统的整个仿真过程能够嵌入到商用多媒体制作系统生成的多媒体文件中，从而使演示汇报过程更加紧凑、流畅。

#### 3.4.1.6数据管理分系统

体系对抗仿真系统中的数据类型一分复杂，不但包括与对抗直接相关的数据类型，同时还包括用于辅助战略威胁判断的对抗、政治、经济、技术、文化、外交、地缘环境等方面的资料，并且数据的需求量也很大，因此开发相对独立的数据管理分系统是十分必要的。各分系统与数据库之间复杂的接口关系以及应用过程中频繁的数据交互，需要我们采用简洁、高效的数据接口方式。为此，需要将所有模型的数据接口方式由 ODBC 方式转换为 ADO 方式，其优点是界面简洁、移植方便、开发效率高。

## 3.2体系对抗仿真场景需求分析

### 3.2.1从对抗角度的对抗需求分析

体系对抗仿真场景从对抗角度的对抗需求是为完成或支持对抗功能所需要的任务、对抗要素和信息流的描述、强调对抗要素、任务和信息流的表达。这就要求体系对抗仿真场景应模拟各对抗要素、建立对抗任务模型和各类信息的表达等。

#### 3.2.1.1虚拟战场环境所模拟的各对抗要素

现代战场由陆、海、空、天多维战场构成，因此虚拟战场环境系统的各对抗要素包括:各对抗实体模型，如飞机、舰船、导弹、卫星、坦克、汽车、炮车、枪支、炮弹、子弹和士兵等;自然地理环境，如地貌、水文、气象海洋构成、电磁辐射等;人文环境，以人为主体的社会文化环境，包括人口构成、政治组织及科教卫生，这里主要是人口构成的模拟;经济条件，指可供对抗利用的自然资源、工农业生产能力和各种物资储备，战场经济条件的好坏，与对抗胜负关系密切;交通运输和通信，交通运输包括交通运输工具、线路、各种设施，以及由此构成的交通运输网，战场通信主要包括各通信枢纽、通信台站、主要通信设备布局、数量、质量状况等。

#### 3.2.1.2 虚拟战场环境的对抗任务模型

对抗任务模型是对抗过程的抽象，是对抗过程的一种物理、数学或其它方式的逻辑表达。它模拟的结果要能反映 3个方面的因素:武器系统的战斗效能;战场环境对对抗行动的影响;组织指挥在对抗行动中的作用。在虚拟战场环境中，对对抗模型的模拟应包括以下几个内容: 对抗实体、对抗实体的属性、实体的活动、在某一时间点上系统的状态、引起状态变化的事件、事件出现的事件点、并发事件等具体应包括:兵力种类的组成:对抗单元的对抗任务、对抗目标的指定;对抗单元的兵力个数武器配置、飞行路线的预先规划、指挥与被指挥关系的确定.单元队形数据、初始状态数据实体启动时刻、战术规划等。而对于由计算机生成兵力技术构成的对抗单元及个体兵力，其具体的对抗任务是由实体模型中的决策模型来实现的。通过计算机生成兵力系统的操作员接口，在仿真过程还可随时调整对抗模型，以取得更好的对抗效果。

#### 3.2.1.3 虚拟战场环境中各类信息的表达

虚拟战场环境应以直观自然的方式表达战场上的各类信息使指挥员或其它用户对训练效果、武器性能或战场态势做出高效快速的评估和分析。战场上的各类信息包括:自然环境变化信息、实体状态变化及实体间的交互信息、听觉信息等。

自然环境变化信息就是大气一海洋一沿海一太空自然环境的联合动态描述，包括山川、河流、森林、湖泊等自然景观，交通路线、通讯电力设施、工业设施、城市建筑等人文景观以及行政区划等静态信息，还应包括大气能见度、气压、温度、湿度、风力、气流、云的类型及云层底部和顶部高度、降雨等大气和气象信息，海浪、水温、洋流、潮级等海洋信息，以及白天、黑夜的时间变化和电磁环境等。

对飞机、坦克、舰船等所有对抗实体建立标准化的完备的3D 模型库，并对红蓝白各方加以区分，当实体运动或不同实体之间发生交互时，能将实体的运动轨迹或实体的交互信息以图形的形式显示出来。例如，以线段表示实体的运动轨迹，用半透明的圆锥体表示雷达探测范围或导弹的攻击范围等。为了直观了解实体的毁伤情况，实体爆炸，燃烧，冒烟等特殊效果也以一定的简化形式显示出来。

### 3.2.2从用户角度的对抗需求分析

从用户角度来说，对抗需求就是支持用户遂行对抗活动所需要的系统特点、功能及属性等强调系统良好的交互性。实时性是虚拟战场环境获得良好的交互性的关键和基础。当前虚拟战场环境实时性的研究是最近几年的热点与难点，其中包括虚拟战场环境系统初始启动的快速性、场景漫游的实时性和系统响应指令的实时性。这三项实时性要求是为了让系统使指挥员专注于自己的任务而不是和系统的交流。

#### 3.2.2.1 虚拟战场环境系统初始启动的快速性

系统快速启动已经引起大家的注意，比如计算机启动或引导所需的几分钟延时对计算机用户是一种困扰，还有现在一些软件版本越高，启动时初始化的时间越长，这些系统的设计和实现根本没有优先考虑系统应以用户为中心。

#### 3.2.2.2场景漫游的实时性

在高度真实感的虚拟战场环境中进行实时漫游一直是图形界的研究热点。战场环境的日益复杂，二维的战场表示已满足不了用户的需求，人们已经将主要的研究放在三维的战场显示上，并且要求高度真实感，这就产生了海量的信息数据。随着计算机硬件、网络和软件技术不断发展使得在高度真实感场景中实时漫游成为可能。在场景漫游过程中，为保证显示图像的连续性!至少要求图像的刷新频率不低于24 帧/s 最好是 30 帧/s。

在场景漫游过程中有两种方式，一种是以地图为中心漫游方式，这种漫游方式地图移动而用户静止，适合于指挥员在大区域范围内布置场景以完成自己的对抗想定;另一种是以用户为中心的漫游方式，用户的视向发生变化而地图本身不动，适合于高分辨率、沉浸式的漫游，以使指挥员很好地察看地形地貌等战场环境特征。

#### 3.2.2.3 系统响应指令的实时性

系统必须对键盘、鼠标或其它外围设备的输入操作以及某些被测量目标的变化做出实时正确的响应。在伊拉克对抗中，美军攻击目标从信息获取一传输一处理一反馈对抗平台一完成火力攻击，整个过程只需 10 s，可以说，发现即摧毁。而海湾对抗中这一过程为 48 h到科索沃对抗缩短为 101 mi到阿富汗对抗进一步缩短为 19 mn因此系统响应指令的实时性是系统的关键属性。

## 3.2体系对抗仿真坐标变换

在体系对抗仿真系统中，各分系统通常有自定义的局部坐标系。因而在数据交互过程中必须首先进行正确的坐标系变换，以保证数据的一致性。如果不能很好地解决坐标变换问题。将直接影响仿真系统的运行效率和试验结果的准确性。

### 3.2.1体系对抗仿真数据交互需求

在仿真试验过程中， 需要交互的数据量很大、交互关系复杂，此处只针对导弹位置、姿态信息以及目标的位置信息等与坐标系相关的数据交互进行简要阐述。首先，由指挥控制系统设置并产生包含时间和空间位置信息的试验态势，以及各分系统的初始工作参数并完成参数下发；试验过程中，由仿真主机依据初始参数及导引头输出的目标位置信息等参数，实时解算弹道仿真模型，产生导弹质心位置、弹体姿态、目标质心位置等信息，并控制系统同步运行；仿真引擎接收仿真主机产生的弹体姿态信息，模拟导弹姿态变化；环境模拟器依据目标及导弹质心位置等数据，在面阵的相应位置实时产生特征信号。其简化数据交互关系如图 3-1所示。



图3-1仿真试验数据交互关系图

可见，仿真试验过程中的数据交互关系繁杂，涉及多处相对坐标与绝对坐标的相互转化。因此，有必要明确各局部坐标系的定义，并推导坐标系间的相互转化关系，以保证交互数据的一致性。

### 3.2.2坐标系定义及变换关系

由于物体的运动状态只具有相对意义，故某一物体的运动对不同的坐标系可做出不同的描述。在体系对抗仿真系统中，依据各组成部分问题的性质和研究的方便，统一考虑选取各局部坐标系。明确了各局部坐标系的定义之后，通过恰当的坐标变换即可实现正确的数据交互。

#### 3.2.2.1应用坐标系

通过综合分析对比，选定以下几个右手直角坐标系进行介绍。

1)大地坐标系

在态势设置中，通常选用大地坐标系。大地坐标系以起始大地子午面赤道面和椭球面为坐标面的坐标。地球上某一点位的大地坐标由该点的大地经度、大地纬度和大地高程3个参数唯一确定。其中大地高程为该点沿法线至参考椭球面的距离，并从参考椭球面起算，向外为正，向内为负。以经纬度和高程表示物体位置，在态势设置过程中可以直观地和实际地理位置关系相对应，便于设置试验态势。

2)地面坐标系

对于导弹而言，地面坐标系即惯性坐标系，主要用于确定导弹质心位置和空间姿态基准。地面坐标系Axyz(图3-2)与地球固联，原点 A通常取导弹质心在地面 (水平面)上的投影点，Ax轴在水平面内，指向目标(或目标在地面上的投影)为正:Ay轴与地面垂直，向上为正；Az轴按右手定则确定。



图3-2地面坐标系与弹体坐标系示意图

弹体坐标系 (图3-2)与导弹速度量固联，是一个动坐标系，其原点取在导弹的质心上；轴与弹体纵轴重合，指向头部为正；与位于弹体纵向对称面内，垂直于轴，向上为正；轴垂直于平面，方向按右手定则确定。弹体坐标系与地面坐标系配合即可确定弹体姿态角。

4)实验室坐标系

实验室坐标系的原点在目标阵列所在球面的球心上，即三轴飞行转台的回转中心 轴水平并指向目标阵列的中心点，轴垂直向上，轴由右手坐标系法则确定。通常情况下，实验室坐标系与三轴飞行转台的三个转轴的起始位置完全一致，所以实验室坐标系也可称为转台坐标系。

5)目标阵列坐标系

在射频目标模拟部分一般采用目标阵列坐标，目标阵列坐标系是一个两维坐标系，它用两个角度坐标来定义，目标阵列坐标系的与实验室坐标系的视线角之间的关系为：

6)倾斜惯性坐标系

为方便描述，首先定义弹上惯性坐标系 。弹上惯性坐标系与地面坐标系三个轴平行，只是原点随导弹运动而移动，是一个动坐标系。

通常情况下，在仿真试验过程中，当地面坐标系与实验室坐标系相一致时，弹体姿态角与三轴飞行转台运动角度相同，实验室中的弹目视线角与地面坐标系下弹目视线角一致。但在实际应用中，由于受到三轴飞行转台最大运动范围和目标阵列视场角的影响，往往需要改变弹上惯性坐标系使弹目视线变换在目标阵列视场角范围内。改变后的弹上坐标系称为倾斜惯性坐标系 。

#### 3.2.2.2坐标变换关系

以体系对抗仿真系统导弹实体为例，可将坐标转换时序及关系描述如下：

1)态势设置部分。试验指挥控制系统利用大地坐标系完成态势设置，将导弹、目标的位置参数转换为地面坐标，供仿真态势预演及仿真运行调用。

2)态势预演部分。态势预演就是利用全数字仿真系统运行所设试验态势，检验试验态势的合法性。因此，在态势预演过程中需要将导弹的为位置信息、目标位置信息在地面坐标系、弹体坐标系实验室坐标系下进行转换运行，确定相应倾斜惯性坐标系及试验相关初始工作参数。

3仿真运行过程中，仿真主机解算弹道仿真模型，结合倾斜惯性坐标系，将弹体姿态角转换为三轴飞行转台三轴角度，驱动三轴飞行转台运动；输出导弹质心位置和目标质心位置，供射频环境模拟器调用，经倾斜惯性坐标系、目标阵列坐标系转换，确定目标阵列中信号产生位置。

4)导引头部分。导引头开机后，所接收的目标信息经实验室坐标系、地面坐标系弹体坐标系转换后，输出弹目视线角，供仿真主机解算弹道仿真模型调用，形成闭环。

在仿真试验过程中，涉及的坐标转换关系如表 3-1所示

表3-1试验数据坐标变换关系表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 导弹位置 | 导弹姿态 | 目标位置 |
| 态势设置 | 大地坐标系 | 地面坐标系 | 大地坐标系 |
| 态势预演 | 地面坐标系 | 地面坐标系 | 地面坐标系 |
|  |  | 弹体坐标系 | 实验室坐标系 |
| 弹道结算 | 地面坐标系 | 地面坐标系 | 地面坐标系 |
|  |  | 弹体坐标系 |  |
| 三轴转台 |  | 倾斜惯性坐标系 |  |
| 目标模拟 | 地面坐标系 |  | 实验室坐标系 |
|  |  |  | 倾斜惯性坐标系 |
|  |  |  | 目标阵列坐标系 |

### 3.2.3体系对抗仿真坐标变换方法及实现

#### 3.2.3.1典型坐标变换方法

对于两个直角坐标系，一般可以通过坐标系的平移和绕坐标轴的旋转由一个坐标系得到另一个坐标系，该变换关系可通过变换矩阵描述。

1)坐标平移

给定空间直角坐标系，将坐标原点依次沿轴正方向移动距离a，沿轴正方向移动距离b，沿轴正方向移动距离c可以得到一个新的坐标系，则空间任何一点在新坐标系中的坐标与其在原坐标系中的坐标之间的关系为：

2)坐标旋转

给定空间直角坐标系 若使其绕轴逆时针旋转一个角，可获得一个新的坐标系。则空间任何一点在新坐标系中的坐标与其在原坐标系中的坐标 之间的关系为:

其中，坐标变换矩阵由方向余弦给出，故可称为方向余弦阵，即：

同理，坐标系只绕 、轴逆时针旋转角度时，相应的方向余弦阵为：

依次绕各坐标轴旋转坐标系，可将坐标系旋转到任意姿态相应的方向余弦阵可由三个基本旋转矩阵相乘求得。在描述导弹运动时，通常所说的欧拉角 (或弹体姿态角)就是根据上述坐标旋转过程进行定义的。

#### 3.2.3.2坐标变换的实现

通过坐标平移和旋转的恰当组合即可实现任意两个直角坐标系间的相互转换，下面以确定倾斜惯性坐标系与弹上惯性坐标系间的初始偏置角为例，给出坐标变换过程。

倾斜惯性坐标系可以认为是弹上惯性坐标系依次绕相应的轴、轴进行两次而得到，即

式中：称为偏置角，逆时针旋转为正，可根据态势预演获得的弹道计算数据来确定。其原则是，使倾斜惯性坐标系的轴指向该条弹道仿真试验过程中，弹目视线角变化范围的中心点附近，可采用作图法求得。因此，均为常值矩阵。

建立倾斜惯性坐标系的目的是要和实验室坐标系相对应，以解决目标阵列视场角不可能太大所带来的实际问题。应用上述坐标变换方法可推导得目标阵列坐标变换为，即：

同样道理，为了使转台正确复现导弹的姿态运动，转台三个框的转角应根据倾斜坐标系进行相应调整，新的转台三框转角位置可根据导弹姿态角和偏置角通过坐标变换推导求解。

## 3.3 体系对抗仿真数据预处理

在对体系对抗仿真建模的过程中，由于数据来源和格式不尽相同，所以建立模型前必须对数据进行预处理。如果数据来源没有DEM数据，可以利用高程点和等高线矢量数据生成高程栅格数据并进行格式转换。

目前，我们购买的最常见DEM数据格式是\*.dem格式。通常\*dem有USGS-DEM和NSDTF-DEM两种格式。USGS是美国地质调查局使用的DEM数据格式，NSDTF是我国国家标准地球空间数据交换格式，二者都是格网数据交换格式。

### 3.3.1NSDTF格式处理

1) NSDTF格式

DataMark:中国地球空间数据交换格式­——格网数据交换格式的标志

Version：该空间数据交换格式的版本号

Unit：坐标单位，K表示千米，M表示米，D表示以度为单位的经纬度，S表示以度分秒表示的经纬度。

Alpha：方向角。

Compress：压缩方法，0表示不压缩，1表示游程编码

Xo：左上角原点X坐标

Yo：左上角原点Y坐标

DX：X方向的间距

DY：Y方向的间距

Row：行数。

Col：列数。

HZoom：高程放大倍率。设置高程的放大倍率，使高程数据可以整数存贮，如高程精度精确到厘米，高程的放大倍率为100。如果不是DEM则HZoom为1。

2) NSDTF格式处理方法

在建立三维模型过程中，DEM数据必须采用栅格格式。以ArcGIS平台为例，USGS格式的文件利用DEM转栅格操作选择浮点输出数据类型即可。ArcGISGRID数据的文件头按如下方式记录相关信息：

ncols：数据列数。

nrows：数据行数

xllcorner：数据左上角的X值。

yllcorner：数据左上角的Y值。

Cellsize：数据分辨率(栅格单元的宽高)。

NODATA\_value：无值数据标志。

鉴于与栅格单元数据值记录方式基本一样，主要是头文件信息不同，若使用NSDTF格式数据，将文件头进行转换，保留后面的数据。

### 3.3.2生成DEM数据

不规则三角网数字模型(TIN)是用一组连续而不重复的三角形逼近地形表面，其表面数字模型由结点、边、三角形、包面和拓扑组成，重要的是每个结点都必须包含一个Z值。边的形成是为生成符合Delaunay的三角形，三角形面是为描述TIN表面的行为，包则是构建TIN的整组数据点的面构成，拓扑则是定义三角形的结点、边数、类型以及与其它三角形的关系信息。生成TIN时，混合加载高程点文件(.shp)和等高线文件(.shp)，在对高程点文件和等高线文件高程要素赋值时，选择Elevation高程字段对等高线文件SF类型赋值时选择软边，即可生成 TIN 数据。然后由TIN转栅格数据(Raster)，将地表高程点用像元灰度的形式连续表达，输出数据类型为浮点的形式。为保证高程模型的精度，采样的距离与DEM数据分辨率相匹配。

## 3.4 基于GPU加速和快速KNN搜索的自适应IDW插值算法原理

本文在现代图形处理器（GPU）基础上提出了一种高效的采用快速kNN搜索的并行自适应反距离加权（AIDW）插值算法。在AIDW中，它需要为每个插值点找到几个最近的相邻数据点，以自适应地确定权重参数；然后通过使用权重参数的加权插值来获得插值点的期望预测值。在这项工作中，开发了一种基于空间分区数据结构和网格的快速kNN搜索方法，以改进IDW算法在插值精度和计算速度上的性能。改进算法由kNN搜索和加权插值两个阶段组成。为了评估改进算法的性能，一共进行了五组实验测试。实验结果表明：(1)与相应的串行算法相比，改进后的算法可以实现高达1017倍的加速；(2)利用快速kNN搜索可以显著提高整个GPU加速的AIDW算法的计算效率。

### 3.4.1AIDW插值算法

AIDW是标准IDW的改进版本，该标准由Lu和Wong (2008)提出。AIDW背后最基本也是最关键的思路如下。它根据插值点附近数据点的空间模式自适应地确定距离衰减参数。换句话说，距离衰减参数不再是预先指定的常数值，而是根据最近相邻数据点的分布，针对特定的未知插值点进行自适应调整。

当使用AIDW预测插值点的期望值时，通常有两个阶段：第一个阶段是根据数据点的空间模式自适应地确定功率参数；第二种是对数据点的值进行加权平均。第二阶段与标准IDW相同。

在AIDW中，对于每个插值点，可以根据以下步骤自适应地确定参数。

Step1 通过将观察到的平均最近邻距离与预期的最近邻距离进行比较来确定空间模式：

1. 使用以下公式计算随机模式的预期最近邻距离：

其中n是研究区域中的点数，A是研究区域的面积。

1. 通过取所有点的最近邻距离的平均值来计算观测到的平均最近邻距离：

其中k是最近邻点的数量，是最近邻距离，可以在插值之前指定k。

1. 通过以下方式获得最近邻统计量：

其中S0是插值点的位置。

Step2 将归一化为，使得通过模糊隶属函数由0和1定界：

其中或是指局部最近邻统计值（通常，和可以分别设置为0.0和2.0）。

Step3 通过三角隶属函数将值映射到的范围来确定距离衰减参数，三角隶属函数属于距离衰减值的某些级别或类别：

其中、、、、被指定为距离衰减值的五个级别或类别。

在确定参数后，可以通过加权平均获得每个插值点的期望预测值。该阶段与标准IDW中相同。

### 3.4.2 并行化AIDW算法

3.4.2.1 AIDW算法并行化分析

AIDW算法本质上适合在GPU架构上进行并行化。这是因为：在AIDW中，每个插值点的期望预测值可以独立计算，这意味着自然可以同时计算许多插值点的预测值，而任何一对插值点的插值过程之间没有任何数据依赖性。

由于AIDW插值算法的固有特性，允许单个线程计算插值点的插值值。例如，假设有n个插值点需要预测它们的值，例如海拔，然后需要分配n个线程来同时计算所有这n个插值的期望预测值。因此，AIDW方法非常适合在GPU架构上进行并行化。

在GPU计算中，共享内存比全局内存快得多。因此，任何用共享内存访问取代全局内存访问的策略都应该被使用。一种常见的优化策略被称为“平铺”，它将存储在全局存储器中的数据划分为称为瓦片的子集，以便每个瓦片都适合共享存储器。这种优化策略“瓦片”也被用来加速AIDW插值算法：数据点的坐标首先从全局存储器转移到共享存储器；则线程块内的每个线程可以同时访问存储在共享存储器中的坐标。由于驻留在GPU中的共享存储器是每个SM（流多处理器）所限制的，因此全局存储器中的数据，即数据点的坐标，需要首先被分割/平铺成小块，然后传输到共享存储器。通过采用“平铺”策略，可以显著减少全局内存访问，从而期望提高整体计算效率。

#### 3.4.2.2数据布局的选取

数据布局是在对多值数据（如3D点集）进行操作时，应在内存中组织和访问数据的形式。选择合适的数据布局是GPU加速应用程序开发中的一个关键问题。由于使用不同类型的数据布局，同一GPU应用程序的效率性能可能会大不相同。

通常，数据布局有两种主要选择：结构阵列（AoS）和阵列结构（SoA）见图3-3。在AoS布局中组织数据会导致数据交错时的合并问题。相反，由于没有数据交织，根据SoA布局组织数据通常可以充分利用存储器带宽。此外，基于SoA布局的全局存储器访问总是合并的。

在实践中，对于特定的GPU应用程序，哪种数据布局将获得更好的性能并不总是显而易见的。一个常见的解决方案是分别使用上述两种布局来实现特定的应用程序，然后比较性能。

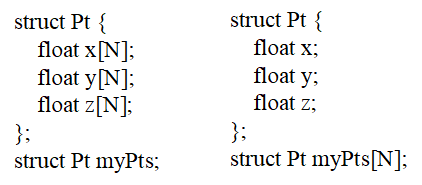


图3-3数据布局SOA和AOS

### 3.4.3基于KNN的GPU加速AIDW算法原理

AIDW方法最基本也是最主要的思路如下。它根据每个插值点的空间分布模式自适应地确定功率参数。在AIDW算法中，空间分布模式被认为是位于插值点周围的几个最近的相邻数据点的分布密度，可以通过相邻数据点到插值点的平均距离来估计。

在确定插值点空间分布模式的过程中，可以通过快速kNN来快速确定插值点的k个最近邻数据点，进而确定插值点的空间分布模式，具体步骤如下：

1. 创建一个偶数网格来划分平面区域，该平面区域包围了所有数据点和插值点的投影位置；

2. 将所有数据点和插值点分布到网格中，并记录位置；

3. 在网格内执行局部快速搜索，以找到每个插值点的最近相邻数据点。

在获得这些相邻数据点的平均距离后，将根据平均距离确定自适应功率参数。最后，可以通过使用参数进行加权平均来获得每个插值点的期望预测值。

综上所述，改进的GPU加速AIDW算法主要由两个阶段组成：（1）kNN搜索和平均距离计算，（2）确定自适应功率参数后通过加权插值得到预测值。如图3-4所示：



图3-4改进的GPU加速AIDW算法过程

#### 3.4.3.1 KNN搜索

kNN搜索阶段的工作流程如图3-4所示，下面是每一步的具体细节。

1. **创建均匀网格**

偶数网格是一种用于空间划分的简单类型的数据结构，由正方形或立方体等规则单元组成，参见图3-5所示的平面网格示例。与其他高效但复杂的空间划分数据结构（如k-d树）相比，偶数网格更容易创建和搜索对象。在这项工作中，通过使用平面偶数网格来划分所有数据点以通过局部搜索来加快kNN搜索。

建立一个均匀的平面网格是很简单的。首先计算或指定正方形单元的宽度，然后根据所有点的最小和最大x和y坐标确定用于划分的平面矩形区域，即获得矩形的长度和宽度。之后，通过划分矩形可以很容易地确定网格的行数和列数。

1. **将数据点分布到单元格中**

每个数据点的分布是为了找出数据点位于哪个网格单元中。由于每个网格单元都可以使用其行索引和列索引进行定位和记录，因此每个数据点的分布实际上是为了获得其所在单元的行索引和列索引。

这个过程也可以很容易地执行：计算数据点的坐标与所有单元格的最小坐标之间的差，则行和列的索引可以通过将上述差除以单元宽度来获得。



图3-5数据点划分到网格中

1. **确定每个单元格中的数据点**

利用空间划分背后最重要和最基本的想法是在局部区域内执行局部搜索，而不是全局搜索。在搜索最近邻居时，首先搜索几个局部区域内的近似最近邻居，然后通过过滤不需要的点来找到确切的最近邻居，这在计算上是最优的。

由于本地搜索是在区域内操作的，因此需要确定哪些数据点位于特定区域内。换句话说，需要知道位于同一区域中的那些数据点的数量和索引。此外，存储数字和索引的布局应该小心处理。

对于每个网格单元，为了存储位于同一单元中的那些数据点的上述数量和索引，通常需要分配整数的动态数组。在传统的CPU计算中，动态数组的分配和操作易于实现，计算成本低廉。然而，在GPU计算中，它不再易于实现或计算成本低廉。这是由于以下两个原因造成的：（1）在GPU计算中，CUDA等编程模型无法支持C++STL（标准模板库）中向量和列表等动态数组/容器的分配和操作；（2）用于存储每个GPU线程内数据点索引的足够大静态整数阵列（例如int index[1000]）的分配不是存储器高效的。

由于上述原因，设计了一个最佳布局来存储数据点的数量和索引。基本想法如下：如果位于同一单元格内的那些点的索引存储在一个连续的段/整数值中，那么只需要知道段中第一个点的地址和同一段中的点数（即段的大小）。

在这种情况下，对于每个单元格，只能使用两个整数值来记录位于同一单元格中的数据点的数量和索引。一个整数用于保存数字，另一个用于记录每个段中头/第一个点的地址。以上两个值可以以并行的方式非常有效地确定。

在确定位于同一单元格中的数据点的数量和索引之前，应连续记录这些数据点。由于已经获得了每个数据点所在的单元格的索引，如果按照它们对应的单元格索引升序对所有数据点进行排序，那么位于同一单元格中的那些数据点可以聚集在一个连续的段中。此排序过程适合在GPU上进行并行处理。

使用分段并行缩减来确定位于同一单元中的数据点的数量。如上所述，在根据单元索引对所有数据点进行排序之后，将所有数据点存储在一组段中；每个段都用单元索引进行标记，并包含位于同一单元中的数据点的索引。由图3-6a可知位于同一区域中的数据点的数量可以通过对每个分段执行减少来实现。类似地，图3-6b表明可以使用分段平行扫描来获得每个分段的第一点的头部索引。



图3-6分段并行确定数据点数量

1. **搜索最近邻点**

在这一步中，采用了一种空间划分数据结构，即偶数网格来增强kNN搜索算法。使用空间划分背后最重要和最基本的思想是在局部区域内执行局部搜索，而不是全局搜索。

这种想法在实践中非常有效，因为可以显著减少查找和比较所需的点的数量，因此可以提高计算效率。

kNN搜索每个插值点的过程可以总结如下：

Step1将插值点定位到偶数网格中

Step2确定网格分层

Step3查找区域内的最近邻点

Step4计算平均距离

将每个插值点定位到先前创建的平面网格中是非常简单的。由于每个网格单元都可以使用其行索引和列索引进行定位和记录，因此每个插值点的分布实际上是为了获得其所在单元的行索引和列索引。首先，计算插值点的坐标与所有单元的最小坐标之间的差；则行和列的索引可以通过将上述差异除以单元宽度来获得。

网格单元级别的确定实际上是为了确定应该在其中执行局部最近邻居搜索的区域；见图3-5中网格单元的三个层次。在kNN搜索中，最近邻居的数量k通常是预先指定的；显然，位于本地小区中的数据点的数量必须大于数量k。因此，可以通过将当前找到的数据点数量与数量k进行比较来迭代地确定小区扩展的级别。例如，当k被指定为15时，并且在级别1的区域内只有十个数据点，因此级别1需要扩展到级别2。类似地，如果在级别2区域内只能找到14个数据点，则需要将该级进一步扩展到3个。反复重复此过程，直到找到足够的数据点为止。

事实上，在局部区域中的kNN搜索是通过过滤一些不需要的点来进一步找到精确的最近邻点。首先分配一个大小为k的数组来存储距离，并将所有距离初始化为0。然后，对于位于局部单元中的每个数据点，计算距离dist，并将dist与第k个距离进行比较；如果dist小于第k个距离，则用dist替换第k个距离；之后反复比较并交换从第k个距离到第一个距离的相邻两个距离，直到所有k个距离都按升序重新排序。

在找到每个插值点的最近邻点之后，可以计算每个最近邻点与插值点之间的距离，并且最终可以获得期望的平均距离。

#### 3.4.3.2 加权插值

根据AIDW插值算法的原理，单个GPU线程可以单独负责计算插值点的预测值。例如，假设有n个插值点需要预测它们的值，例如海拔，然后需要分配n个线程来同时计算所有这n个插值的期望预测值。

在GPU计算中，共享存储器上的数据访问本质上比全局存储器上的访问快得多；因此，应该利用任何用共享内存访问来代替全局内存访问的选择。由于GPU中的共享内存在每个SM（流多处理器）中是有限的，因此经常使用一种称为“平铺”的常见优化策略来处理上述问题，该策略将存储在全局内存中的数据划分为称为瓦片的块，以便每个瓦片都适合共享内存的大小。

上述“平铺”策略也被用于增强GPU加速的AIDW算法。首先，将数据点的坐标从全局存储器加载到共享存储器中。然后，同一线程块内的所有线程都能够同时访问当前驻留在共享内存中的坐标。通过使用“平铺”策略，可以明显减少对全局内存的访问；并且期望实现性能增益。

### 3.4.4基于GPU加速和快速KNN搜索的自适应IDW插值算法实现

如上所述，改进的GPU加速AIDW插值算法主要由两个阶段组成，即kNN搜索阶段和加权插值阶段，本节将描述上述两个阶段的一些实现细节。

#### 3.4.4.1 kNN搜索实现

1. **创建均匀网格**

偶数网格由一组网格单元组成，每个网格单元都是一个正方形。创建偶数网格实际上是为了确定网格的位置、单元格的大小和单元格的分布布局。在算法中，创建了一个均匀的平面网格来覆盖所有数据点和插值点的投影位置所在的平面区域。首先使用Thrust库提供的函数thrust::minmax\_element() 来获得所有数据点和插值点的最小和最大坐标，并计算这些最小和最大坐标在x和y方向上的差值。在大致确定平面区域后，根据等式计算间隔单元的长度width，即正方形单元的宽度。然后可以容易地计算网格单元的行数和列数。

1. **将数据点分布到单元格**

创建均匀网格后，接下来的步骤是将所有数据点分布到网格中。由于可以独立地执行每个数据点的分布，因此该过程可以自然地并行化。假设有m个数据点，则分配m个GPU线程来分配所有的数据点。每个线程负责计算位于网格中的一个数据点的位置，即确定数据点所在单元格的索引。

网格中的单元格可以根据行和列的索引精确定位，即int col\_idx, row\_idx。此外，每个网格的位置可以根据其全局索引找到，全局索引可以使用简单的变换计算，global\_idx = row\_idx \* nCol + col\_idx。

上述变换公式可用于将每个网格单元的二维索引变换为唯一的一维索引。显然，这种转换可以很容易地转换回来。进行转型的原因如下：首先，由于只需要存储一个整数数组，因此减少了内存需求；其次是以一个值为键的排序比以两个值为关键字的排序快得多。

为了获得位于每个单元格中的数据点的索引和数量，一个有效的解决方案是连续存储位于同一单元格中的这些数据点，对连续数据段的操作可以是非常有效的。

1. **确定每个单元格中的数据点**

在kNN搜索阶段，目标是为每个插值点找到k个最近的相邻数据点。对每个插值点的kNN搜索是在几个网格单元内局部执行的。第一个要求是确定每个网格单元中有多少数据点以及哪些数据点。更具体地说，需要知道索引和位于每个网格单元中的数据点的数量。如图3-6所示，可以通过简单地通过使用并行归约和扫描来获得这一点。

在进行并行归约和扫描之前，应连续存储位于同一单元格内的数据点。这一要求可以通过使用单元格的全局索引作为关键字的并行排序来实现。并行排序是通过使用库Thrust 的函数thrust::sort\_by\_key(keys, values) 提供的相应并行原语来实现的。

由于位于同一单元格中的那些数据点是连续存储的，如果知道位于同一个单元格中的数据点的数量，那么只需知道第一个数据点的第一个地址就可以根据第一点的地址及其本地位置来参考其余数据点中的每一个，这与数组中值/元素的引用非常相似。

然后，通过使用Thrust提供的函数来执行并行缩减和扫描，使用细胞的全局索引作为分段缩小和扫描的关键。使用分段缩减和扫描而不是全局缩减和扫描的原因是在当前步骤中只需要对位于同一单元中的数据点进行操作，并且位于同一区域中的那些数据点已经被连续存储并且使用小区的全局索引作为标志来标记。

位于同一单元格中的数据点的数量是通过使用函数thrust::reduce\_by\_keys() 来获得的, 并且使用thrust::unique\_by\_keys() 来找到每个数据点段的第一个点的索引。如图3-6所示，还使用了一个常量整数的辅助数组来计算存储在同一段/段中的数据点的数量。

1. **搜索最近邻点**

对于每个插值点的k个最近的相邻数据点的查找可以使用并行化。假设有n个插值点，分配n个线程来搜索所有插值点的最近邻点。调用每个线程只为一个插值点找到最近邻点。

在每个线程中，首先通过计算行索引和列索引将插值点分布到创建的网格中。然后，通过根据数据点的数量近似计算扩展的级别来确定局部单元的区域。当前位于所确定的局部单元中的那些数据点是插值点的近似最近邻点。之后，通过插入和交换来过滤那些近似的最近邻居，从而进一步找到精确的最近邻点。最后，计算精确最近的相邻数据点和目标插值点之间的期望平均距离。

当根据点之间的欧几里得距离找到最近邻点时，不使用实际距离值，而是使用距离的平方值。这是因为在GPU计算中，平方根的计算相当耗费计算资源，应该避免使用计算平方根的方式。因此，在计算平均距离的最后一步才计算平方根，而不是在搜索最近邻点的步骤中。

#### 3.4.4.2 加权插值实现

本小节将介绍在GPU加速的AIDW算法中实现插值阶段的细节。我们只使用数组的数据布局结构（SoA）实现了两个版本：朴素版本和平铺版本。

1. **朴素版本**

在这个版本中，会使用GPU架构上的全局内存和寄存器，而不使用共享内存。输入数据和输出数据被存储在全局寄存器中。假设有m个数据点用于评估n个插值点的预测值，会分配n个线程来并行化插值。

由于在使用kNN搜索之后，已经获得了平均距离，即等式（3-12）中定义的，因此在这个阶段，每个线程只负责根据等式（3-11）和（3-13）计算和。之后，被归一化为，使得通过模糊隶属函数由0和1定界，参见等式（3-14）。最后，通过三角隶属函数将值映射到α的范围来确定功率参数，参见等式（3-15）。

在自适应地确定功率参数之后，可以通过加权平均来获得每个插值点的期望预测值。这个计算加权平均值的步骤与标准IDW方法中的步骤相同。

1. **平铺版本**

平铺版本的实现过程与朴素版本相同。朴素版本不利用共享内存，而平铺版本会利用共享内存来提高计算效率。

当实现平铺版本时，要计算网格内块的数量，网格中的每个线程负责（1）将一个数据点的坐标从全局存储器传输到共享存储器；（2）计算到当前驻留在共享存储器中的数据点的距离和权重。

当线程块中的所有线程完成部分距离和权重的计算时，随后的点坐标波再次从全局内存转移到共享内存。新数据会被用来计算部分距离的当前波和相应的权重。

当完成部分距离和权重的计算时，调用每个线程将所有权重和加权值累积到两个寄存器中。最后，计算未知点的期望预测值后将其写入全局存储器。

# 4 体系对抗仿真三维数据重建效率评估

体系对抗仿真试验的结果体现了对抗双方充分利用战场资源展开全系统、全要素、全时空的对抗能力，反映了体系对抗效能。本章将在AIDW算法的基础上，对GPU加速和快速kNN两处改进进行实验分析，最后发现GPU加速的AIDW算法朴素版本和平铺版本在单精度上近似实现约270和400的加速，使用快速kNN搜索改进GPU加速AIDW算法比改进前GPU加速AIDW算法快至少两倍，比相应的串行算法快约1017倍。进而从中得到结论：同时采用GPU加速和快速kNN搜索可以显著提高整个AIDW算法的计算效率

## 4.1 GPU加速的AIDW 实验分析

### 4.1.1实验环境和测试数据

为了评估GPU加速AIDW方法的性能，在个人笔记本电脑上进行了几组实验测试。该电脑配备Intel Core i7-4700MQ（2.40GHz）CPU、4.0 GB RAM内存和显卡GeForce GT 730M。所有实验测试都在操作系统Windows 7 Professional（64位）、Visual Studio 2010和CUDA v7.0上运行。

GPU加速AIDW的两个版本，即原始版本和平铺版本，通过使用数据布局SoA和AoaS来实现。这些GPU实现是在单精度和双精度上进行评估的。然而，AIDW实现的CPU版本仅在双精度上进行测试，并且该CPU版本的所有结果被用作比较计算效率的基线结果。

所有的数据点和预测点都是在一个正方形内随机创建的。预测点和数据点的数量是相等的，使用以下五组数据大小，即10K、50K、100K、500K和1000K，其中一个K表示1024的数量（1K=1024）。

对于GPU实现，记录的执行时间包括将输入数据点从主机传输到设备以及将输出数据从设备传输回主机所花费的成本，但它不包括创建测试数据所花费的时间。同样，CPU实现也不考虑生成测试数据所花费的时间。

### 4.1.2单精度

AIDW算法的CPU和GPU实现在单精度上的执行时间在表4-1给出。

GPU实现相对于基准CPU实现的加速如图4-1所示。

根据这些测试结果：（1）使用数据布局SoA的平铺版本实现后，对计算速度加速约为100～400倍，最高加速可达400倍；（2）平铺版本的速度大约是朴素版本的1.45倍；（3）数据布局SoA的速度略快于AoaS。

在实验测试中，当数据点和插值点的数量约为100万（1000K=102.4万）时，CPU版本的执行时间超过18小时，而平铺版本只需要不到3分钟。因此，在实际应用中使用单精度GPU平铺版本加速AIDW方法执行效率更高。

表4-1AIDW算法在单精度上CPU和GPU运行的执行时间

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 版本 | 数据布局 | 数据量(1K=1024) | | | | |
| 10K | 50K | 100K | 500K | 1000K |
| CPU | - | 6791 | 168234 | 673806 | 16852984 | 67471402 |
| GPU朴素 | SoA | 65.3 | 863 | 2884 | 63599 | 250574 |
| AoaS | 66.3 | 875 | 2933 | 64593 | 254488 |
| GPU平铺 | SoA | 61.3 | 714 | 2242 | 43843 | 168189 |
| AoaS | 61.6 | 722 | 2276 | 44891 | 172605 |

图4-1GPU加速的AIDW算法在单精度上的加速效果

### 4.1.3双精度

在双精度上评估朴素版本和平铺版本的计算效率。显而易见地，在双精度GPU架构上操作的算法会比在单精度上慢得多。在实验测试也证实了这种结果：在双精度上，GPU版本比CPU版本的加速仅约为8（见图4-2），远低于单精度。

同样还能发现：（1）与原始版本相比，平铺版本没有获得性能增益；（2）数据布局的使用，即SoA和AoaS，不会导致计算效率的显著差异。

如图4-2所示，双倍精度的情况下大多数情况下产生的加速约为8，这意味着AIDW方法的GPU实现远未实际使用。因此在实际应用中更应该使用单精度的GPU实现。在接下来的部分中，将只讨论在单精度下获得的实验结果。

图4-2 GPU加速的AIDW算法在双精度上的加速效果

### 4.1.4 实验结果分析

#### 4.1.4.1 数据布局对计算效率的影响

在本节中，分析两种数据布局SoA和AoaS实现的朴素版本和平铺版本在计算效率上的差异，实验结果表明SoA数据布局可以实现比AoaS更好的效率。然而，当使用上述两种数据布局时，效率没有显著差异。如图4-3所示，对于朴素版本和平铺版本，SoA布局仅比AoaS快1.015倍左右。

由于没有数据交织，根据SoA布局组织数据通常可以充分利用存储器带宽。而且基于SoA布局的全局存储器访问总是合并的。这也许就是为什么在实验测试中数据布局SoA可以比AoaS获得更好性能的原因。然而对于特定的应用程序，哪种数据布局会获得更好的性能并不总是显而易见的，在本节中观察到应该优先使用布局SoA。

图4-3 SoA和AoaS布局的性能比较

#### 4.1.4.2 朴素版本和平铺版本的性能比较

在图4-4表明无论采用哪种数据布局， 平铺版本的平均加速都是原始版本的1.3倍。这种性能的提高是由于优化策略“平铺”使用了共享内存。在GPU架构上，共享内存本质上比全局内存快得多。因此，应该利用任何用共享存储器访问取代全局存储器访问的机会。

在平铺版本中，最初存储在全局内存中的数据点的坐标被划分为适合共享内存大小的瓦片，然后从慢速全局内存加载到快速共享内存。

在计算距离时，线程块内的所有线程都可以很快访问存储在共享内存中的这些坐标。通过这种方式阻止计算，利用快速共享内存著减少了全局内存访问：数据点的坐标只从全局内存读取（n/threadsPerBlock）次，其中n是预测点的数量。

这就是平铺版本比朴素版本更快的原因。因此，从实际使用的角度来看，用户采用GPU实现的平铺版本拥有更快的加速效果。

图4-4朴素版本和平铺版本的性能比较

总结：开发了两个版本的基于GPU加速的AIDW插值算法，一个是不适用共享内存朴素天真版本，另一个是使用共享内存的平铺版本。使用了两种数据布局，即单精度和双精度的AoS和AoaS，实现了朴素版本和平铺版本。

实验表明，朴素版本和平铺版本可以分别在单精度上近似实现约270和400的加速。此外，在单精度上使用布局SoA的实现总是比使用布局AoaS的实现略快。然而，在双精度的情况下，总体加速仅为8左右。观察到：（1）与朴素版本相比，平铺版本没有获得性能增益；（2）数据布局的使用不会导致计算效率的显著差异。因此，在实际应用中应使用单精度布局SoA开发的平铺版本。

## 4.2基于快速KNN搜索的GPU加速AIDW实验分析

### 4.2.1实验环境和测试数据

本节将专注于通过利用快速kNN搜索方法来改进GPU加速AIDW算法，研究快速kNN搜索对GPU加速的AIDW算法的影响。

为了评估改进算法的计算效率，在同一台笔记本电脑上进行了五组实验测试，该电脑配备了Intel Core i7 CPU（2.40GHz）、4.0 GB RAM内存和GeForce GT730M卡。所有实验测试都在操作系统Windows 7 Professional（64位）、Visual Studio 2010和CUDA v7.0上执行。

在单精度上使用SoA布局对GPU加速的AIDW两个版本（朴素版本和平铺版本）实现进行改进。将AIDW实现的CPU版本在双精度上的测试当作基准，通过与CPU上的结果进行比较来对所有GPU实现的效率进行基测试。

在评估GPU实现的执行时间时，会将输入数据（即数据点和插值点的坐标）从主机侧传输到设备侧以及将结果从设备侧传输到主机侧所花费的开销考虑在内，但不包括生成测试数据所花费的时间。AIDW插值的输入是数据点和插值点的坐标，由于输入数据的大小不同，CPU和GPU实现的效率可能不同。由于本文的研究目标是使用快速kNN搜索来改进GPU加速的AIDW算法，因此只考虑插值点和数据点数量相同的特定情况。

包括数据点和插值点在内的所有测试数据都是在一个正方形内随机生成的，一共设计了五组尺寸，即10K、50K、100K、500K和1000K，其中一个K表示1024的数量（1K=1024）。通过将数据点和插值点的数量设置为上述五组大小来执行五个测试。

### 4.2.2基于快速kNN的GPU加速AIDW算法性能

#### 4.2.2.1 计算效率

一共使用五组测试数据评估了使用快速kNN搜索改进后的GPU加速AIDW算法的计算效率，表4-3和表4-4中分别列出了算法在运行时间和GFLOPS的结果。表4-3为不使用快速kNN的GPU加速AIDW算法性能。

计算了使用快速kNN改进的GPU加速AIDW算法相对于串行算法（即表v中列出的CPU版本）的加速效果（图4-5）。结果表明：（1）原始版本和平铺版本实现的最高加速分别可达543和1017；（2）平铺版本总是比原始版本快。表4-1中列出的GFLOPS还表明，对于原始和改进的GPU加速AIDW算法，平铺版本总是比原始版本快。

表4-2 AIDW算法在单精度上 CPU和GPU版本的运行时间(ms)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 版本 | 数据量(1K=1024) | | | | |
| 10K | 50K | 100K | 500K | 1000K |
| CPU | 6791 | 168234 | 673806 | 16852984 | 67471402 |
| 原始朴素版 | 65.3 | 863 | 2884 | 63599 | 250574 |
| 原始平铺版 | 61.3 | 714 | 2242 | 43843 | 168189 |
| 改进朴素版 | 27.9 | 400 | 1366 | 31306 | 124353 |
| 改进平铺版 | 21.0 | 233 | 771 | 16797 | 66338 |

表4-3 使用快速KNN前后的GPU加速AIDW算法的GFLOPS

|  |  |
| --- | --- |
| 版本 | FGLOPS |
| 原始朴素版本 | 51.81 |
| 原始平铺版本 | 107.12 |
| 改进朴素版本 | 100.95 |
| 改进平铺版本 | 192.34 |

图4-5改进前后GPU加速AIDW算法与串行AIDW算法相比的效果

#### 4.2.2.2 改进后朴素版本和平铺版本的比较

由于平铺版本中的插值阶段比原始版本中的计算效率高得多，所以从实验结果中观察到，改进算法的平铺版本比原始版本快约1.33–1.87倍，参见表4-4中插值阶段的执行时间。

改进后的算法包括朴素版本和平铺版本，可分为两个主要阶段：即kNN搜索阶段和加权插值阶段。上述两个版本中的第一阶段相同，而第二阶段不同。

在平铺版本的插值阶段利用了共享内存，而在朴素版本中则并未使用共享内存。因此，平铺版本插值阶段的执行速度是朴素版本的1.79–1.89倍。因此，整个平铺版本比朴素版本更有效率，表4-3朴素版本和平铺版本的GFLOPS也验证了这一点。

表4-4改进前后GPU加速AIDW算法中kNN搜索阶段和加权插值阶段的执行时间(ms)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 阶段 | 数据量(1K=1024) | | | | |
| 10K | 50K | 100K | 500K | 1000K |
| kNN搜索 | 12.3 | 36 | 81 | 440 | 917 |
| 加权插值(改进朴素) | 15.6 | 364 | 1286 | 30866 | 123437 |
| 加权插值(改进平铺) | 8.7 | 197 | 691 | 16357 | 65421 |

#### 4.2.2.3KNN搜索和加权内插两个阶段之间的工作量

改进的GPU加速AIDW算法主要有kNN搜索和加权插值两个阶段。为以后进一步优化效率瓶颈，表4-4记录了kNN搜索和加权插值阶段的执行时间。

图4-6还评估了朴素版本和平铺版本中上述两个阶段之间的工作量百分比。由图4-6可以发现在kNN搜索阶段花费的计算成本比在加权插值阶段花费的要小得多。此外，随着测试数据量的增加，kNN阶段运行时间成本的权重显著降低，最低甚至减少到大约百分之一。这一结果表明朴素版本和平铺版本中的大部分开销都花在了加权插值阶段，而不是kNN搜索阶段。因此，可能需要采用进一步的优化来提高加权插值的效率。

图4-6改进后GPU加速AIDW算法中两个阶段的计算量对比a朴素版本b平铺版本

#### 4.2.2.3 与原始GPU加速的AIDW算法的比较

在“实验环境和测试数据”部分，将改进的GPU加速AIDW算法与原始串行AIDW算法进行了比较（表4-2，4-3），并发现改进后的算法可以获得很好的加速。本小节将把目前改进的GPU加速AIDW算法与原始GPU加速的AIDW算法进行对比。

改进后GPU加速AIDW算法相对于原始算法的加速如图4-7所示。结果表明，改进后朴素版本和平铺版本分别比原始朴素版本和平铺版本快2.02倍和2.54倍。这也表明，通过使用快速kNN搜索改进原始算法能够获得显著的性能增益。

原始算法和改进算法之间的主要区别在于使用了kNN搜索方法。下面将通过分析kNN搜索算法对计算效率的影响来解释为什么获得了显著的性能增益。

首先，通过从总执行时间中减去加权插值阶段所花费的时间来获得原始算法中kNN搜索的计算时间（见表4-5）。加权插值阶段的执行时间成本是直接从改进的算法中导出的，因为（1）原始算法和改进算法中的加权插值是相同的；（2）在改进的算法中，加权插值的运行时间可以单独测量，而原始算法不能精确地评估专门用于加权插值的执行时间。

其次，通过计算改进算法中kNN搜索的运行时间相对于原始算法的百分比(图4-8)，可以发现在原始版本和平铺版本中改进算法中的kNN搜索的执行时间比原始算法中的执行时间短得多，例如，在数据量为大约一百万个点时，kNN搜索的执行时间只占不到一个百分比。这表明使用快速kNN搜索方法可以显著提高整个GPU加速的AIDW插值算法的效率。

图4-7 改进前后GPU加速AIDW算法对比

表4-5 改进前后GPU加速AIDW算法中kNN搜索阶段的执行时间

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 版本 | 数据量(1K=1024) | | | | |
| 10K | 50K | 100K | 500K | 1000K |
| 原始朴素版 | 49.7 | 499 | 1598 | 32733 | 127137 |
| 原始平铺版 | 52.6 | 517 | 1551 | 27486 | 102768 |
| 改进版(朴素和平铺) | 12.3 | 36 | 81 | 440 | 917 |

图4-8改进算法中kNN搜索的运行时间与原始算法相比所占百分比

总结：在本节中，利用快速kNN搜索方法在GPU上提出了一种高效的AIDW插值算法。所提出的算法由两个主要阶段组成，即kNN搜索和加权插值两个阶段，并通过使用快速kNN搜索改进GPU加速AIDW算法来开发。kNN搜索是基于偶数网格进行的，并且能够非常快速地为每个插值点找到精确的最近邻点。一共进行了五组实验测试，以评估改进的GPU加速AIDW算法的性能。最后发现：（1）对于一百万点，改进的算法可以比相应的串行算法实现高达1017的加速；（2） 改进的算法比改进前GPU加速AIDW算法快至少两倍；（3）利用快速kNN搜索可以显著提高整个GPU加速的AIDW算法的计算效率。

# 5 体系对抗仿真实体关联技术

在周期性仿真模拟的过程中，需要将模型每周期解算的结果和需要发布的数据上传至仿真平台。更新数据通常包含了实体平台的属性，该部分属性通过实体平台每周期的仿真解算，属性值会产生变化和修改，例如经纬高位置属性、姿态属性、雷达探测角属性等。其中，姿态属性包含了坡度坡向的计算，可以通过给定位置信息，将实体所在位置的坡度坡向信息通过数值模拟的方法计算出来并关联到实体上，或者通过位置信息和给定的坡向来计算特定方向的坡度值，以便于进行指挥决策，如实体的坡度坡向数据关系到实体的路径规划具体行路路线，同时也关系到炮弹发射的角度偏向等。C. Saranya 等针对复杂环境的路径规划问题，提出了一种改进的 D\*算法，将地形坡度引入成本函数计算，通过仿真与实验证明了该算法的有效性，其可用于保障无人机在复杂环境中的飞行安全。

## 5.1坡度坡向

坡度是局部地表在空间的倾斜程度指标, 其大小直接影响着地表物质流动和能量转换的规模和强度,是工程设计和生产力空间布局的重要因子。作为一种最基本的地形因子，坡度与其他因子一起使用有助于解决诸如森林蕴藏量估算、水土保持、野生动植物保护、选址分析、土地利用及工程设计等应用领域。国内外对于坡度的研究,主要从 5个方面展开，即坡度的分级和制图、基于DEM的坡度信息提取方法、DEM误差对坡度的影响分析、坡度与DEM 分辨率的关系、区域尺度水土流失和水文模型中的坡度指标及其尺度转换等。

坡度具有方向性,通常基于DEM所计算的坡度为该点最大坡降方向(坡向)上的坡度值。其实,由于地形的各向异性,任意一点在各方向坡度可能不同,如山脊上沿山脊线坡度较小,而垂直于山脊线坡度较大,各类工程如道路、铁路、水利、输电线路等也常常需要计算给定方向上的坡度值以辅助设计。基于此,本章主要探讨基于 DEM的任意给定方向的坡度计算问题。

## 5.2坡度计算模型

### 5.2.1坡度坡向定义

坡度反映曲面的倾斜程度,定义为曲面上一点 P的法线方向与垂直方向(即天顶)之间的夹角,而坡向是斜坡面对的方向,定义为 P的法线正方向在平面的投影与正北方向按顺时针方向的夹角，如图 5-1所示



说明:x轴的方向为正北方向

图5-1坡度和坡向定义

空间曲面在平面上表示一等值线簇 (为任意常数),当z为高程时则为等高线。对于曲面上点 ,沿的梯度反方向，取得其下降最快值。在地形分析中,该值即为的坡度,其下降最快方向即为坡向。对于函数,P点的梯度表示为

式中:,为单位矢量;分别为方向的偏导数,其模即为坡度,表示为单位长度上的高程升降,通常以百分数表示,即

式中:为坡度。当坡度以角度计算时(即P的法线与天顶 z之间的夹角),由式5-2得

当 时(,坡向为 ),梯度方向即为坡向,定义为

一般情况下,坡向以北方向为起始方向，并按顺时针方向度量,则坡向在 x轴为南北方向(北方向 )、y轴为东西方向的坐标系中表示为

坡度范围一般取为,坡向范围为。

### 5.2.2任意方向坡度计算模型

式(5-3)~(5-5)给出的是特定方向(梯度方向)上的坡度和坡向值。对于任意给定方向 L,设L与北方向的顺时针方向夹角(方位角)为，其单位向量为 ,则曲面沿 L方向的方向导数为

式中:表示 和的夹角，由下式得到,即

式(5-6)本质上刻画了函数 沿给定方向 L的高程变化率,即该方向上的坡度 ,可表示为

式中:的单位取决于 的单位。由(5-8)式可看出:当 时,即 L与曲面法向量投影(梯度)方向一致时,方向导数取得极大值 ,即(5-1)式,或者说是通常意义上的坡度坡向值。

## 5.3基于DEM任意坡度计算

由 (5-7)可看出,任意给定方向坡度计算,本质上还是对 的求解。在格网 DEM上，的计算，一般是在局部范围内(3×3移动窗口,如图5-2)，利用数值微分方法或局部曲面拟合方法进行。表 1对目前格网 DEM 上常用的坡度计算模型算法进行了总结。



图5-2 DEM 3×3局部移动窗口

文献[5-9]的研究表明,在表 5-1所列的二阶差分、三阶不带权差分、三阶反距离平方权差分、三阶反距离权差分、Frame差分和简单差分等算法中,三阶不带权差分由于对 DEM误差有一定的平和过滤作用，而能给出较高坡度计算精度。本章即选用该算法,为便于比较，同时也给出了简单差分、二阶差分、三阶反距离平方权差分 3种坡度计算模型的运算结果。

表5-1坡度坡向计算模型

|  |  |
| --- | --- |
| 算法名称 | 计算表达式 |
| 二阶差分 |  |
| 三阶不带权差分 |  |
| 三阶反距离平方权差分 |  |
| 三阶反距离权差分 |  |
| Frame差分 |  |
| 简单差分 |  |

表中表示DEM格网点高程；i为格网点编号，参看图5-2，计算点为3×3窗口中心点5；g为DEM格网分辨率。

## 5.4计算流程与实例

### 5.4.1计算流程

在一幅 DEM上，对指定的格网点(计算点)按给定计算方向(以方位角形式给出)的坡度计算流程如下:

1. 形成计算点周围的 3×3局部窗口，并进行适当的编号(图5-2)。
2. 按照选定算法(表 5-1)计算该点处的x和 y方向偏导数 ，,按照(5-2)式计算给定点的梯度模。
3. 计算给定方向 L的方向余弦,以及与梯度方向的夹角 (式5-7)。
4. 由(5-8)式计算 L方向的坡度。

### 5.4.2算例

图5-3为某地区1:10000 DEM栅格分辨率为 5m。在该区域内随机选取了 4个高程、坡度和坡向有显著差异的格网点(表5-2),按照上述流程各个点在给定方向下(给定方向分别取 坡向方向)应用三阶反距离平方权差分计算模型的坡度计算结果,如表5-3所示。



图5-3某地区DEM栅格

表5-2计算点信息

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 坐标(x,y,z)/万m | 坡度/° | 坡向/° |
| 1 | (44.38,416.10,0.11) | 49.90 | 158.36 |
| 2 | (44.40,415.87,0.12) | 4.16 | 339.95 |
| 3 | (43.84,416.02,0.09) | 2.52 | 119.43 |
| 4 | (43.94,416.23,0.10) | 32.49 | 310.75 |

表5-3算例计算结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 计算方向 | 计算模型 | 计算点的坡度/° | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0° | 简单差分 | 44.729 | -2.931 | 1.294 | -12.167 |
| 二阶差分 | 48.404 | -3.576 | 1.293 | -23.001 |
| 三阶不带权差分 | 47.627 | -4.023 | 1.220 | -22.428 |
| 三阶反距离平方权差分 | 47.823 | -3.912 | 1.238 | -22.571 |
| 120° | 简单差分 | -0.302 | 13.563 | -1.480 | 24.933 |
| 二阶差分 | -0.025 | 0.410 | -1.654 | 17.418 |
| 三阶不带权差分 | -0.054 | -0.038 | -1.677 | 17.899 |
| 三阶反距离平方权差分 | -0.064 | 0.074 | 1.671 | 17.779 |
| 240° | 简单差分 | 22.927 | 6.657 | -0114 | 8.704 |
| 二阶差分 | 34.088 | -1.947 | -0.222 | -3.891 |
| 三阶不带权差分 | 32.359 | -2.497 | -0.281 | -3.156 |
| 三阶反距离平方权差分 | 32.798 | -2.359 | 0.266 | -3.340 |
| 坡向方向 | 简单差分 | 49.974 | 15.513 | 2.390 | 31.202 |
| 二阶差分 | 50.199 | 3.944 | 2.546 | 32.593 |
| 三阶不带权差分 | 49.801 | 4.242 | 2.510 | 32.454 |
| 三阶反距离平方权差分 | 49.898 | 4.162 | 2.519 | 32.488 |

## 5.5总结

任意方向的坡度计算更具普适性，本章通过分析探讨了格网 DEM 上任意方向的格网点的坡度计算模型, 给出了相应的计算实例。通过任意给定方向上的坡度计算，将坡度坡向信息与体系对抗仿真实体进行关联，为 DEM 及其地形分析体系对抗仿真的进一步应用打下了基础。

# 6 论文总结与工作展望

## 6.1 论文总结

1. 论文先介绍了体系对抗仿真场景三维数据重建的背景，然后介绍三维数据重建的重要技术：DEM插值，然后针对DEM插值算法中的反距离加权法提出一种新的插值核函数以提高距离较远处的点对插值点的影响。对数据插值之后的结果，运用不同分析方法在插值参数和地形地貌两大方面对插值结果进行评估。当数据插值之后，针对体系对抗仿真场景对坡度、曲率和地形起伏度的需求，在数据重建后能够对任意一个二维平面左边计算相应的坡度、曲率和地形起伏度。

## 6.2 未来工作展望

本文针对体系对抗仿真需求的三维数据重建做了一定的研究工作，但每个模块都有提升和进一步研究的空间，基于此对未来的工作要点总结如下：

克里金插值算法的深入研究：本文研究的插值算法是最常用的反距离加权插值法，特点是算法简单、实现容易、运算效率高、插值中所需存储空间最小。但是，反距离加权法主要依赖于反距离的幂值，幂指数可基于距插值点的距离来控制已知点对插值点的影响，只考虑了距离的影响，没有考虑到点的结构的影响。需要进一步研究克里金法。

# 参考文献

[1]冯克涛，李晓毅，吴乐华，钱璇，王申涛，陈谋，李梦如，李昆仑.基于数字高程模型的起伏地形对紫外光非直视通信的路径损耗[J].光学学报，2022，42(06):151-164.

[2]肖峰，李斐，张胜凯，郝卫峰，耿通，宣越.利用CryoSat-2波形数据建立南极Lambert冰川流域DEM[J].地球物理学报，2020，63(08):2893-2900.

[3]秦臣臣，陈传法，杨娜，高原，王梦樱.基于ICESat/GLAS的山东省SRTM与ASTER GDEM高程精度评价与修正[J].地球信息科学学报，2020，22(03):351-360.

[4]罗竹，刘凯，张春亢，邓心远，马荣华，宋春桥.DEM在湖泊水文变化研究中的应用进展[J].地球信息科学学报，2020，22(07):1510-1521.

[5]赵文豪. 地形纹理特征深度学习的多尺度DEM综合技术研究[D].武汉大学，2018.DOI:10.27379/d.cnki.gwhdu.2018.000027.

[6]杨光义，李卓鸿，黄和，杨鸿海，张洪艳.基于地形约束的多尺度DEM融合[J].武汉大学学报(工学版)，2022，55(03):292-299.DOI:10.14188/j.1671-8844.2022-03-011.

[7]孔乔，韩露，刘兴坡，丁永生，王一帆.一种采用SRTM DEM重构河床数字地形的方法[J].地球信息科学学报，2021，23(03):385-394

[8]颜金彪，段晓旗，郑文武，刘媛，邓运员，胡最.顾及空间异质性的自适应IDW插值算法[J].武汉大学学报(信息科学版)，2020，45(01):97-104.

[9]王光霞。DEM 精度模型建立与应用研究[D].郑州:信息工程大学博士学位论文，2005.

[10] Krummel，J.R.，and Gardner，R.H.and Sugihara，. et al.1987. Landscape patterns in a disturbed environment.

[11] 刘湘南，黄方，王平.GIS 空间分析原理与方法[M].北京:科学出版社，2005.

[12] 刘学军．基于规则格网数字高程模型解译算法误差分析与评价[D]．武汉：武汉大学博士学位论文，2002．

[13] 王家耀．空间信息系统原理[M]．北京：科学出版社，2001．

[14] 武胜林，张学礼，刘文锴．DEM 中顾及方向的单点移面内插法[J]．测绘科学，2001，26(2)：27-30．

[15] 吕言．数字地面模型的插值中多面函数法与配置法的比较研究[J]．武汉测绘学院学报，1982，11(3)：185-191．

[16] 陈联．用薄板样条函数建立沙漠地区的 DEM[J]．地理空间信息，2005，3(5)：56-57．

[17] 靳国栋，刘衍聪，牛文杰．距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]．武汉测绘科技大学学报，2003，24(3)：

53-57．

[18] 史文中．空间数据与空间分析不确定性原理[M]．北京：科学出版社，2005．

[19] 岳天祥，杜正平．高精度曲面建模：新一代 GIS 与 CAD 核心模块[J]．自然科学进展，2005，15(3)：73-82．

[20] 岳天祥，杜正平．高精度曲面建模与经典模型的误差比较分析[J]．自然科学进展，2006，16(8)：986-991．

[21] 岳天祥，杜正平．高精度曲面建模最佳表达形式的数字实验分析[J]．地球信息科学，2006，8(3)：83-87．

[22] 王耀革．DEM 建模与不确定性分析[D]．郑州：信息工程大学博士学位论文，2009

[23] 韩富江，刘学军，潘胜玲．DEM 内插方法与可视性分析结果的相似性研究[J]．地理与地理信息科学，2007，23(1)：31-35．

[24] 贾旖旎，汤国安，刘学军．高程内插方法对 DEM 所提取坡度、坡向精度的影响[J]．地球信息科学学报，2009，11(1)：38-41．

[25] 刘湘南，黄方，王平．GIS 空间分析原理与方法[M]．北京：科学出版社，2005．

[26] 张仁铎．空间变异理论及应用[M]．北京：科学出版社，2005．

[27] 张景雄．空间信息的尺度、不确定性与融合[M]．武汉：武汉大学出版社，2008．

[28] Schuts G．Review of interpolation methods for digital terrain models[J]． International Archives of Photogrammetry，1976，21(3)：160 -167．

[29] 王建，白世彪，陈晔．Sufer 8 地理信息制图[M]．北京：中国地图出版社，2004．

[30] 王家华，高海余，周叶．克里金地质绘图技术——计算机的模型和算法[M]．北京：石油工业出版社，1999．

# 致 谢

硕士研究生的学习过程是我人生中收获颇多的一个阶段，在专业知识不断积累的同时，我的综合素质能力也得到了很大的提升。在这期间，我的各方面成长离不开导师的细心栽培、家人的无私关爱以及实验室同学们的热情帮助。在此，我要对这些关心我的人致以最诚挚的感谢。

首先要感谢我的导师刘志强老师，感谢刘老师将我带入我所热爱的软件工程领域内深入钻研，使我得以迅速成长提升。在科研工作中，刘老师严谨认真、善于思考，并且非常重视时间观念，他的工作态度深深影响到了我，让我改掉了一些不好的习惯，受益良多。在日常生活中，刘老师为我提供了实验室良好的科研环境和各种实践学习的机会，并且在生活上给予了我很大的帮助。在这三年的学习生活中，刘老师不仅教导我学习专业领域知识，而且还十分注重训练我的沟通表达能力以及分析、解决问题时的思维方法，这将是我一生的宝贵财富。在毕业论文的写作过程中，刘老师对我悉心指导，提出了很多珍贵意见，在此向刘老师致以深深的感谢。

感谢研究生期间相处时间最多的实验室同学们，感谢你们为实验室营造了良好的科研氛围，也是你们让我深刻明白了团队协作的重要性。感谢家人对我的照料与关心，你们无私的爱是我得以不断前进的动力。正是有了你们的支持和信任，才能让我心无旁骛地完成学业。同时也感谢我的朋友们，感谢你们为我平淡的学习生活中增添了无数乐趣。最后感谢参与此次论文评阅、指导的各位老师、专家们，感谢您们利用自己的时间对我的论文进行指导与评阅，谢谢您们！