

一种地形分析方法在航迹规划中的应用

赵红¹, 何华灿¹, 赵宗涛², 虞蕾^{2,3}

(1. 西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072; 2. 西北大学 计算机科学系, 陕西 西安 710049; 3. 西安高技术研究所 计算机室, 陕西 西安 710025)

摘要:为提高巡航导弹的实时地形匹配概率,通过利用分形学中的分数布朗运动函数推导了地形分数维 D 和方差 σ^2 值的求解公式,提出利用分数维地形分析方法进行巡航导弹航迹规划的选取流程。依据该推导公式计算了地形图中地形区域的分数维和方差值,从而成功地比较了地形匹配的概率。实例表明,该方法能明显地增大地形匹配的成功概率。

关键词:分数维;方差;信息熵;航迹规划

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)04-0036-03

分形理论作为现代非线性科学研究的重要成果,由于其专门研究自然界中没有特征长度而又具有自相似性的形状与现象,是一种新的非整数维的测度观,已成为定量描述不稳定、不规则自然现象的有效手段^[1]。分形布朗运动(fractional Brownian motion)是用以描述地形表面分形特征最有效的数学模型之一。

巡航导弹航迹规划时,应选择最有利于匹配的地形路线。进行地形分析时,先进行方差分析,方差量表征地形的起伏;满足地形方差指标后的地形再进入下一阶段的分数维分析,分数维表征局部地形粗糙的程度;最后进入最大信息熵分析,信息熵表征在某一方向上地形复杂的程度。本文主要应用分数维分析,配合方差计算和信息熵的计算来进行航迹优化选取。

1 分形布朗函数与航迹规划

1.1 分形学与分数维

分形学(Fractal)是由美国人 B. Mandelbrot(1975)首先提出并创立的边缘科学,现已被广泛应用于各种自然现象的解释和自然现象的仿真等领域。用分形学解释地理现象也正是 Mandelbrot 的初衷之一。海岸线的长度问题是分形学最初研究的问题之一:假设我们沿着海岸线,用等距离 δ 设定观察点,在海岸线长度一定时,观察点的数量 $N(\delta)$ 随着 δ 的减少而增大,海岸线的长度 $L(\delta)$,也随 δ 的减少而增大。但人们发现海岸线长度与 δ 之间存在一个近似关系:

$$L(\delta) = \alpha\delta^{1-D} \quad (1)$$

将式(1)画在 $\log - \log$ 对数纸上,却是一条直线,其斜率为 D 。如英国的海岸线 $D \approx 1.3$;挪威的海岸线 $D \approx 1.52$ 。我们称 D 为分数维。 D 的物理意义是海岸线弯曲变化的程度, D 越大,这种程度也相应越大。

1.2 分形布朗函数

分数布朗运动是常用分形数学模型。研究认为布朗运动是一均值为零,方差 σ^2 的高斯或正态分布的随机过程。由于许多物体的表面形态特征与布朗运动有相似之处,因而布朗运动成为分形学的重要手段。

设分形布朗函数 $f(x)$ 是一实值随机函数,这样,对于所有 x 和 Δx ,有:

收稿日期:2005-11-16

基金项目:二炮基金资助项目(EP010240-10)

作者简介:赵红(1970-),女,汉族,北京人,博士生,主要从事精确制导技术研究;

何华灿(1942-),男,北京市人,教授,博士生导师,主要从事人工智能研究;

赵宗涛(1946-),男,江苏徐州人,教授,博士生导师,主要从事数据库信息化处理研究。

$$P, \left\{ \frac{f(x + \Delta x) - f(z)}{\|\Delta x\|^H} < t \right\} = F(t) \quad (2)$$

其中: x 表示 E 维欧拉空间 R^E 中的一个点; $F(t)$ 是随机变量 t 的累加函数; H 叫做Hrust参数,其值 $0 < H < 1$ 。该函数给定的分数维为

$$D = E + 1 - H \quad (3)$$

对于3D表面,如地形表面, $E = 2$,则分数维为

$$D = 3 - H \quad (4)$$

由于我们假设 $F(t)$ 是零均值、 σ^2 方差的高斯分布 $N(0, \sigma^2)$, $F(t)$ 又可由下式表示:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{s^2}{2\sigma^2}} ds \quad (5)$$

由式(2),对于所有 $\|\Delta x\|$,有下列等式成立:

$$E[|f(x + \Delta x) - f(x)|] \|\Delta x\|^H = C \quad (6)$$

其中, $E[|f(x + \Delta x) - f(x)|]$ 是固定 $\|\Delta x\|$ 对所有 $f(x + \Delta x)$ 与 $f(x)$ 之差的期望值,常数 C 是随机变量 t 的均值。这样由式(5)可得 C 与 σ 之间的关系为

$$C = 2/\sqrt{2\pi}\sigma \quad (7)$$

将式(6)两边取对数得:

$$\log E[|f(x + \Delta x) - f(x)|] - H \log \|\Delta x\| = \log C \quad (8)$$

由于 H 和 C 是常数,因此,式(8)在 $\log - \log$ 双对数图上是一斜率为 H ,截距为 $\log C$ 的直线。然后,我们用最小二乘法求出式(8)所示直线的 H 和 C ,进而求出分数维 D 和均方差 $\sigma^{[2]}$ 。

若考虑二维函数 $f(i, j)$,那么 $x = (i, j) \in R^2, z = f(i, j)$ 就是DEM(数字高程模型)中的高程数据。假设考虑的地形是各向同性的,取 $\|\Delta x\| \in [\|\Delta x_{\min}\|, \|\Delta x_{\max}\|]$,且从东至西、南至北、西北至东南、西南至东北各个方向取 $\|\Delta x\|$,并计算:

$$e^2 = \sum_{\|\Delta x\| = \|\Delta x_{\min}\|}^{\|\Delta x\| = \|\Delta x_{\max}\|} [\log E(|f(x + \Delta x) - f(x)|) - H \log \|\Delta x\| - \log C]^2 \quad (9)$$

的最小值,求得 H 和 C 。根据式(4)和式(7)计算 D 和 σ 。

1.3 航迹规划选取流程

航迹规划是依靠地形信息和目标信息,在某些约束条件下,找出巡航弹从发射点到目标点生存概率最大的飞行航迹^[3]。巡航导弹在地形匹配时,应选择最有利于匹配的路线,即:在已知的地形下,选择最佳飞行路线问题。在航迹规划时,我们要进行地形分析。地形分析时首先进行方差分析,满足地形方差指标后的地形进入下一阶段的分数维分析,经过第二次筛选地形进入最大信息熵分析,选出进入地形分析的最佳位置和方向。

实验证明:巡航导弹在选取飞行航迹时,在高低不平的山地地形,宜用高程匹配算法;在平原地区,宜用GPS定位法规划^[4,5]。我们采用高程匹配算法。通过方差分析求出 σ ,用来表征地形起伏。 σ 越大,地形的起伏变化越大,越有利于运用高程匹配算法,实际应用中选用 σ 大于某阈值 η_0 的地形区。而后,进行分数维分析,求出分数维 D ,选取 D 大于某值 η 的局部区域。分数维是表征地形粗糙程度的, D 越大,地形越粗糙,计算机内预先存储的用于巡航弹航迹规划的基准数字地图的数值变化就越大,也就越有利于与通过巡航导弹实际飞行时测出的地形高度值变化进行比较(匹配),确定出巡航导弹偏离预定基准弹道的偏差量,给出修正指令,使巡航导弹回到预定的弹道上来。对于较光滑的地形,某区域(单位距离内)地形的高度都会集中在某一高度值,这样就不能精确确定在这一个距离内所要走的弹道,给航迹规划造成了困难。最后进行最大信息熵分析。巡航导弹最佳路径选择问题是在地形选择完成后,选择什么样的方向和位置进入已选地形才利于匹配的。最大信息熵分析较好地解决了这个问题。信息熵越大,单位距离内地形高度值变化越大,所确定的巡航弹航线越有利于实时飞行匹配。

2 应用分析

我们对取自不同地区的两幅地形图进行分数维分析和方差分析,分别求出分数维 D 和均方差 σ 。图1

(a)所显示的山地较之图1(b)所显示的山地地形起伏大,地表面也更粗糙,实验计算得出地形图1的 D 和 σ 值比地形图2的要大, D 和 σ 大的山地等地形区域更适于地形匹配,进行航迹规划。



(a)地形图1

 $D = 2.324 \quad \sigma = 36.271$


(b)地形图2

 $D = 2.103 \quad \sigma = 32.536$

图1 实验地形图与相应的分数维和方差

经多次地形匹配仿真实验,得出图1中两幅地形图的匹配成功率比较图,如图2所示。其中虚线表示地形图1当 D 为2.324时的匹配成功率,实线表示地形图2当 D 为2.103时的匹配成功率。从图中看出随着匹配次数的不断增加, D 值大的地形图1的匹配成功率明显大于 D 值较小的地形图2。这也进一步证实了分数维 D 可作为地形分析的重要方法之一:地形的分数维越大,地形表面粗糙程度就越大,地形给巡航导弹提供的信息就越多,越有利于匹配完成。

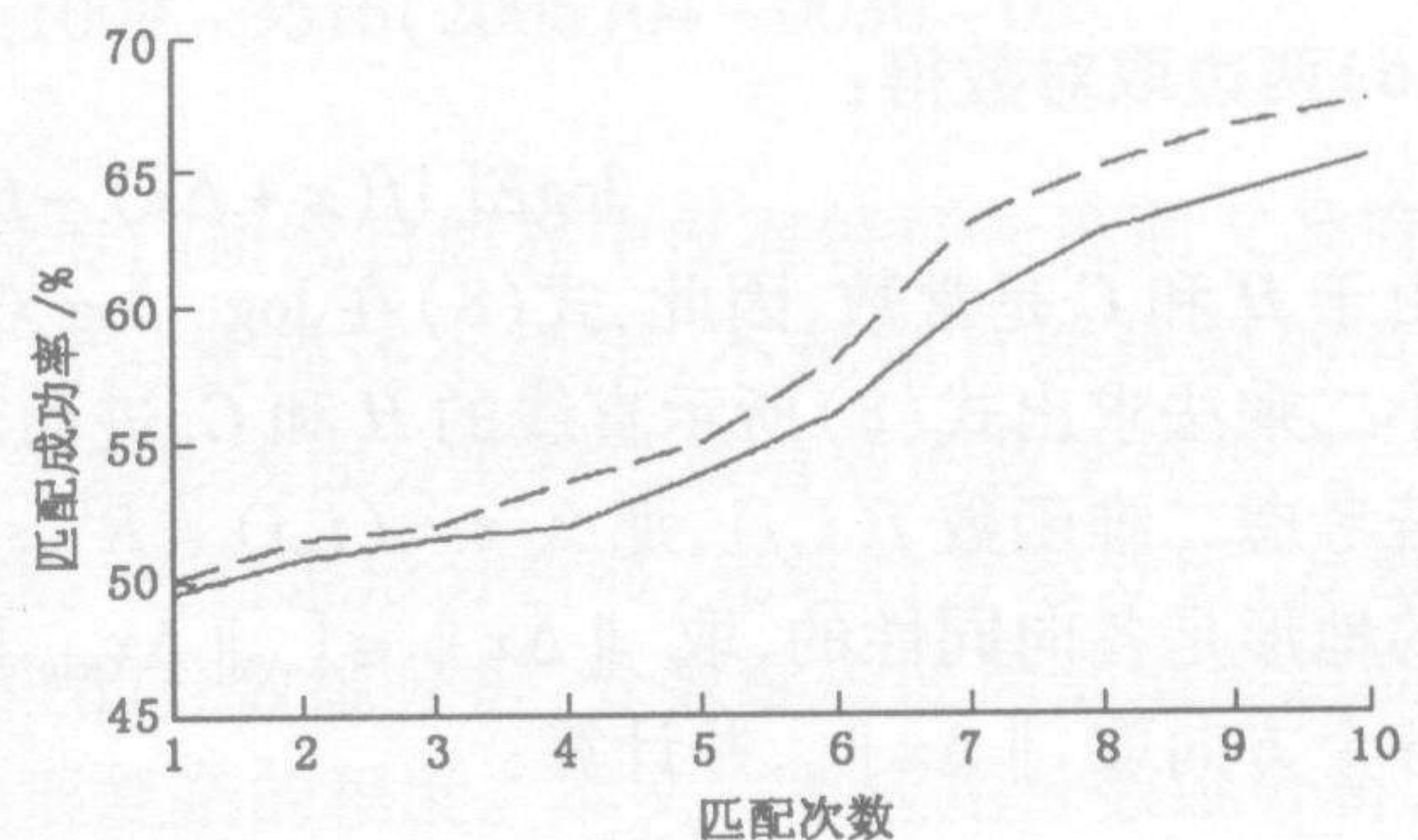


图2 匹配成功率比较图

3 结论

本文提出了基于分数维地形分析在航迹规划中的应用,配合方差分析提出了航迹规划选取流程。该过程对巡航导弹的航迹规划具有重要意义,它既考虑地形的局部性质,又考虑地形的整体性质,优选出来的匹配区域更能适合地形匹配,而且解决了在地形筛选完成后,巡航导弹进入地形的最佳位置和方法的选择问题。

当然,巡航弹的航迹规划中还牵涉到其它诸多的因素,例如要回避敌方的火力点以及飞行燃料消耗的经济问题等,这些都有待进一步解决。

参考文献:

- [1] 张济忠. 分形[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
- [2] Batty M. The Fractal Nature of Geography[J]. Geographical Magazine, 1992, 64(5): 32-36.
- [3] 毋河海. 地图信息的分形描述[J]. 测绘通报, 2001, 1(2): 24-26.
- [4] 陈树新, 王永生, 陆旭明. 白化处理对快速确定GPS整周模糊度算法的研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(5): 14-17.
- [5] 白渭雄, 吴法文, 刘伶. 便携导弹抗击巡航导弹作战效能研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2004, 5(2): 51-53.

(编辑:田新华)

(下转第74页)