

地形匹配辅助导航中的地形独特性分析*

吴尔辉 沈林成 常文森

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

摘要 本文提出了一种用于地形匹配辅助导航系统中地形独特性分析方法。该方法从地形匹配的物理模型出发,定义了描述局部地形独特性的一个概率向量,在此基础上,给出了地形独特性的熵度量方法。分析和仿真实验表明,地形熵越小,地形就越独特,地形匹配区的可导航性就越好。

关键词 飞行器,地形匹配,信噪比,熵

分类号 O 221

Terrain Uniqueness Analysis in Terrain Contour Matching

Wu Erhui Shen Lincheng Chang Wensen

(Department of Automatic Control, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract This paper presents an approach to terrain uniqueness analysis in terrain contour matching. The approach, based on the physical model of terrain contour matching, defines a probability vector to describe the local terrain uniqueness and thus provides a way to measure terrain uniqueness via entropy. From analysis and computer simulation, the paper concludes that the lower the terrain entropy, the better the terrain uniqueness and the higher the performance of terrain contour matching.

Key words aircraft, terrain contour matching, signal to noise ratio, entropy

地形匹配辅助导航,也称为地形等高线匹配技术(Terrain Contour Matching,简称TERCOM),它通过飞行器飞越特定地区(称为修正区,或者匹配区)采集的实时地形剖面数据(实时图),与预存的地形数据(基准图)间的相关,来获取飞行器的位置信息,以此为依据,修正惯导系统的误差。这种辅助导航技术具有自主式、全天候等一系列优点,因而在飞行器辅助导航方面得到了广泛的应用^[1,2]。然而,TERCOM系统对地形有着苛刻的要求,在修正区,地形不仅要有大的信噪比,而且必须足够独特。由于地形独特性定量描述和计算存在困难,地形匹配区的选取,成为十分棘手的工作。

地形匹配区的选取,称为地形可导航性分析。在应用信噪比准则对地形可导航性进行分析讨论的较多^[3,4],对地形独特性的定量描述和计算问题的探讨,则还难见到。本文从地形匹配的物理模型出发,定义了描述局部地形独特性的一个概率向量,在此基础上,给出了地形独特性的熵度量方法。分析和仿真实验表明,地形熵越小,地形就越独特,地形匹配区的可导航性就越好。

1 地形匹配的物理模型

设由矩形表达的给定的地形区域为集合 V , $V = \{h_{ij}\}$, h_{ij} 为网格坐标 (i,j) 处的地形海拔高度, $(i,j) \in A:A = \{(i,j) | 1 \leq i \leq H, 1 \leq j \leq W\}$ 。定义实时采集的地形剖面中心所对应的基准地图上的位置为修正中心,所有可能的修正中心构成集合 B (B 为一矩形区域), B 为 A 的真子集: $B = \{(k,l) | k_1 \leq k \leq k_2, l_1 \leq l \leq l_2\}$ 。根据惯性导航系统的误差,可以确定集合 B ,如飞行器可以均匀分布规律在整个匹配区进行采样,则此时 $k_1 = 1, k_2 = H, l_1 = n/2, l_2 = W - n/2, n$ 为实时采集的地形剖面长度。由

* 1997年10月20日收稿

第一作者:吴尔辉,男,1968年生,博士生

此得到如图 1 所示的地形导航示意图。

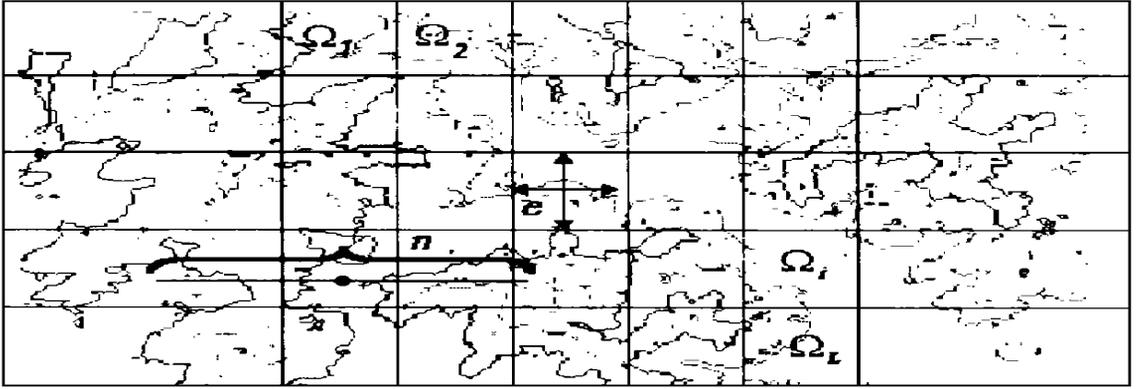


图 1 地形导航示意图

其中 e 为允许的导航误差。这样得到 B 的一个划分 Ω :

- (1) $\Omega = \Omega_i, i = 1, 2, \dots, L, L = (k_2 - k_1 + 1)(l_2 - l_1 + 1)$;
- (2) $\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset, \forall i \neq j, 1 \leq i, j \leq L$;
- (3) $\forall (k, l) \in B, (k, l)$ 唯一地属于某个 Ω_i 。

为了叙述方便, 约定:

- (1) ω 为 Ω_i 的中心点, $\omega = c(\Omega_i)$;
- (2) $\omega = (k, l) \in B, \omega$ 属于某个 Ω_i ;
- (3) ω 作为修正中心, 其对应的地形剖面为 $l(\omega)$;
- (4) $l(\omega)$ 的中心点为 $c(l(\omega)) = \omega$, 简记为 $c(l)$;
- (5) 实时图为 l , 其中心点为 $v = c(l)$;
- (6) $\omega, \omega' \in \Omega, D(\omega, \omega')$ 为 ω, ω' 间的欧氏距离。

地形匹配辅助导航, 就是要确定 v 在区域 Ω 中的最可能位置。由于最大化目标函数等价于其负值的最小化, 因此如下的讨论以最小化目标函数的相关算法为例。

定义 1 δ_i 为 l 在 Ω_i 中按相关算法 f 得到的最大值, 即

$$\delta_i = \max_l \{f(l, l) \mid c(l) \in \Omega_i\}$$

定义 2 ω_{des} 为目的符号, 如果

$$\begin{aligned} \omega_{des} &= c(l_{des}) \\ l_{des} &= \{l \mid \min_l (l, l), c(l) \in \Omega\} \end{aligned}$$

定义 3 判别准则

如果 ω_{des} 为地形匹配过程的目的符号, $\omega_{des} \in \Omega$, 则在允许误差 e 的条件下, $\omega = c(\Omega_i)$ 为 v 的最可能位置, 即当 $D(\omega_{des}, \omega) \leq e, d(\omega_{des}) = \omega, d(\cdot)$ 为判别准则。

说明: 理想的地形匹配区, 具有完全的特点, 即任给 l , 得到唯一的目的符号, 判别准则输出 v 的唯一最可能位置。

2 地形独特性的描述和计算

为了描述地形的独特性, 定义如下的集合:

$$\mathfrak{E} = \{\omega \mid f(l(\omega), l(\omega)) \leq \delta_i, \omega \in \Omega, \omega' \in \Omega\}$$

\mathfrak{E}_k 为 \mathfrak{E} 在 Ω 上的收缩:

$$\mathfrak{E}_k = \{\omega \mid f(l(\omega), l(\omega)) \leq \delta_i, \omega \in \Omega, \omega' \in \Omega\}$$

集合 \mathfrak{E} 是局部地形 Ω 作为地形匹配中的空间信息源, 其可导航性的一种体现, 具有明确的物理含义:

如果 $v = c(l)$ 对应的修正中心 $v \in \Omega$, 则与局部地形 Ω 相关联的地形匹配概率 P_D 为

$$P_D = \text{Prob}(D(c(l), c(l)) \leq e | f(l, l) \leq \delta, c(l) \in \Omega)$$

可近似地表达为

$$P_D \approx N(\mathfrak{E}|_i) / N(\mathfrak{E})$$

$N(\bullet)$ 为获取集合的元素数目。如果 e 取为地形相关长度, 按文献 [5] 的定义, $1 - P_D$ 可以认为是与局部地形 Ω 相关联的虚警概率:

$$1 - P_D = \text{Prob}(D(c(l), c(l)) > e | f(l, l) \leq \delta, c(l) \in \Omega)$$

定义概率向量 P_i 为

$$P_i = (p_i^{(1)}, p_i^{(2)}, \dots, p_i^{(k)}, \dots, p_i^{(L)})$$

其中 $p_i^{(k)}$ 为

$$p_i^{(k)} = N(\mathfrak{E}|_k) / N(\mathfrak{E})$$

显然有:

$$\sum_k p_i^{(k)} = 1$$

定义局部地形 Ω 的熵函数 $E(\Omega)$:

$$E(\Omega) = - \sum_k p_i^{(k)} \ln(p_i^{(k)})$$

则 $E(\Omega)$ 构成了局部地形 Ω 的地形独特性的判别函数:

(1) 当 $p_i^{(1)} = p_i^{(2)} = \dots = p_i^{(k)} = \dots = p_i^{(L)}$ 时, 局部地形熵函数 $E(\Omega)$ 达最大(最可几状态), $E(\Omega) = \ln L / L$ 。此时, 无法通过地形匹配获得任何定位信息。

(2) 当 $p_i^{(i)} = 1$, 而 $\forall k \neq i, p_i^{(k)} = 0$ 时, 局部地形熵函数 $E(\Omega)$ 达最小, $E(\Omega) = 0$ 。此时, 地形独特性达最佳状态, 匹配系统给出准确的定位信息。

这两点也符合统计物理和信息论中对熵的意义的解释^[6]。

3 仿真实验

取一块 105×105 个点的方形地形区域, 每个点表示 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 范围的平均地形高度, 如图 2 所示。由两个方向进入该区域(西东和北南), 得到两块子区域 A 和 B , 其中 A 为方形地形区域的第 11 行至第 52 行 (42×105), B 为第 20 列至 61 列(转置后也为 42×105)。

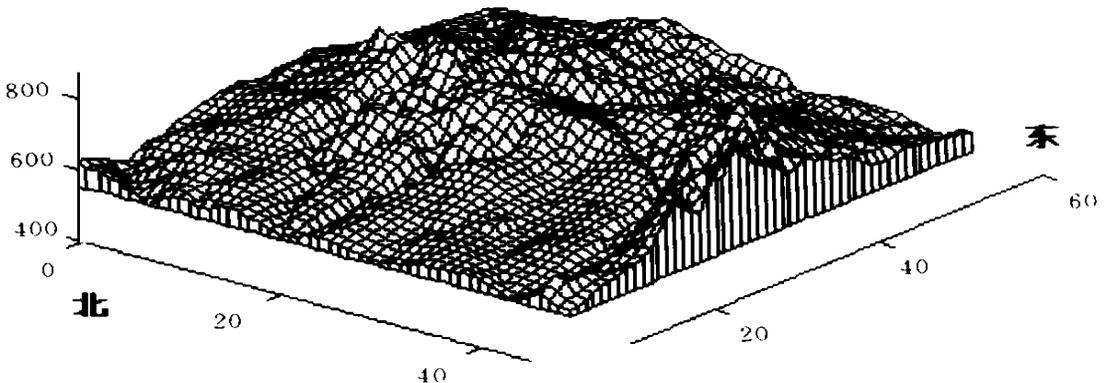


图 2 实验用地形数据 (105×105)

根据局部地形熵的定义, 可计算出两块区域的平均局部地形熵如表 1 所示。

定义信噪比 $\gamma = \sigma_x^2 / \sigma_n^2$, σ_n^2 为地形相关系统引入噪声的方差, σ_x^2 为地形数据的方差。在给定 σ_n^2 的情况下, 单纯从信噪比看, A 区域的地形可导航性(标准差为 53.36m) 应优于 B 区域(标准差为 48.35m), 但考虑到平均局部地形熵的计算结果, B 区域的地形独特性(平均局部地形熵为 0.367bit) 则

表1 两块区域的平均局部地形熵比较

	允许的导航 误差/m	实时数据采集 长度/m	平均局部地形 熵/bit	地形标准差 /m
A	100	6400	0.569	53.36
B	100	6400	0.367	48.35

优于A区域(平均局部地形熵为0.569bit)。因此,在相同的信噪比水平下,B区域的地形可导航性应优于A区域,这可从如下的仿真结果得到验证。仿真以MSD算法为例,其定义见参考文献[5]。仿真时,假定飞行器按均匀分布规律进入匹配区进行采样,噪声(假定为0均值的正态分布)的标准差由20m变化至40m,A、B区域各得到一组匹配概率统计结果。单个匹配概率由1764次实验得到。该仿真在Sun Ultra2(两个CPU)上进行,限于篇幅,不再赘述。

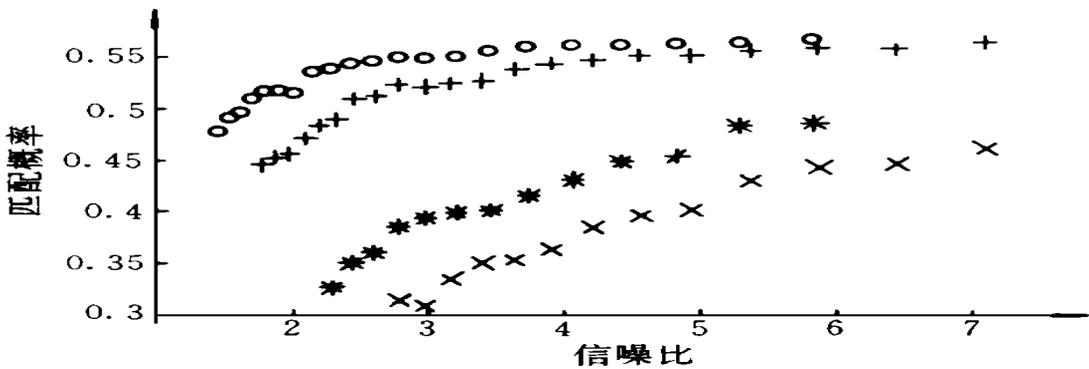


图3 仿真结果

图3中,‘+’和‘o’曲线分别表示在100m误差范围内(一个网格单元),A区域和B区域的匹配概率,每条共21个数据点;‘x’和‘*’曲线分别表示准确定位时A区域和B区域的匹配概率,每条共13个数据点,在低信噪比处两条曲线分别省略8个数据点。在相同信噪比条件下,B区域两类匹配概率皆大于A区域相应的两类匹配概率。

4 结论

地形匹配辅助导航技术的应用始于60年代,然而一直未能定义一种有效的地形可导航性的判别方法。单纯依据信噪比,则有相当大的局限性。本文从地形匹配的物理模型出发,给出了地形可导航性的熵度量方法,在描述地形独特性方面可以很好地弥补信噪比准则的不足,且该方法具有如下的特点:

- (1) 建立在地形匹配的物理模型基础上,具有明确的物理含义;
- (2) 不需要对地形的统计特性作任何假设。

参考文献

- 1 Baird et al. A Comparison of Several Digital Map-aided Navigation techniques. Proc. of IEEE PLAN 84: 286~293
- 2 Ritland J.T. Survey of Aided-inertial Navigation Systems for Missiles. AIAA 89-3497
- 3 Young D.J. A Review of Navigational Techniques Employed in Cruise Missiles and Proposed Alternative Resolution. N91-11744, 1990
- 4 Jeff Hollowell. Terrain Referenced Navigation for Cruise Missiles, SAND-91-2189C
- 5 孙仲康,沈振康.数字图像处理及其应用.北京:国防工业出版社,1985
- 6 周曼殊.改革开放与复杂系统.长沙:国防科技大学出版社,1990