

文章编号: 1001-2486 (2000) 04-0098-04

# 基于地形差分矩的 TERCOM 地图性能估计\*

朱华勇, 沈林成, 常文森

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 提出了一种非平稳地形中 TERCOM 地图匹配性能的估计方法。首先利用地形差分过程研究相关匹配算法度量值的统计特性, 获得度量值的均值和方差关于地形差分矩的解析表达。然后讨论度量值统计特性与局部匹配搜索截获概率的关系, 建议用地形差分矩和局部搜索截获概率作为 TERCOM 地图匹配性能的估计。通过对实际地形的试验, 说明基于地形差分矩的匹配性能估计方法是有效的。

**关键词:** 地形匹配性能; 差分过程; 矩

中图分类号: V249.3 文献标识码: A

## Estimating the Performance of TERCOM Map Based on Moment of Terrain Difference

ZHU Hua-yong, SHEN Lin-cheng, CHANG Wen-sen

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A method for estimating the matching performance of TERCOM map under non-stationary terrain is proposed. First, the statistical property of measures of terrain matching algorithms is studied through difference process of terrain. The mean and variation of measures are expressed with regard to the moment of terrain difference. Then, the relationship between the statistical property of measures and the probability of partial searching acquisition is discussed. Estimation of TERCOM map performance with the moment of terrain difference and the probability of partial searching acquisition is proposed. Experimental results of real terrain show that the method herein is efficacious.

**Key words:** TERCOM performance; difference process; moment

地形匹配 (terrain contour matching, 简作 TERCOM) 是一种利用地形轮廓特征实现精确定位的导航技术。TERCOM 被应用于现代远程高精度武器系统并获得成功。例如, 海湾战争中战果丰硕的“战斧 II”、美军现役的 BGM-109A 和 AGM-129A、前苏联的 SS-N-21 以及法国的 APTGD 等型巡航导弹都采用了 TERCOM 辅助惯性导航。近几年, 美军使用 GPS 接收机取代某些型号巡航导弹的 TERCOM 设备, 以减少对地形的依赖。然而 GPS 系统也存在问题: 一方面, GPS 依赖的导航卫星易受攻击, 信标欺骗也比较容易; 另一方面, 配合相应坐标系统的地图制作起来很困难。由于 TERCOM 具有自主、可靠、简单和相对定位精度高等优点, 因此, 美军的所有核攻击型和部分常规型巡航导弹仍然保留这种导航方式。可以说, TERCOM 是使用中的高精度导航技术。

地形匹配不是在任何地形上都能工作, 因为 TERCOM 使用的地形必须是独特的, 即 TERCOM 地图中任一给定剖面不能与该地图中的其它剖面相似<sup>[1]</sup>。这种 TERCOM 地图必须作为整个任务规划过程的一部分予以精心准备, 而其中的主要工作是地形匹配性能分析——给出地形是否适合于匹配的评价作为地形匹配区选择的依据。

研究快速、高效的地形匹配性能评价方法对 TERCOM 航线规划具有重要意义。

### 1 问题的提出

多数地形匹配性能分析方法使用了地形方差和相关长度<sup>[1~3]</sup>, 所得出的结论与实际情况存在较大差异。因为一般地形是非平稳的, 对于长达数千米的剖面而言, 平稳独立像元假设<sup>[2]</sup>和平稳相关性假

\* 收稿日期: 2000-03-28

作者简介: 朱华勇 (1971), 男, 博士生。

设<sup>[3]</sup>很难满足。地形的方差和相关长度是地形的总体特征, 在非平稳性的影响下, 往往不如局部化特征(如坡度<sup>[4]</sup>等)更能反映地形匹配性能。

本文取消对地形的种假设, 以使结论具有较一般的意义。为了便于讨论并简化结果, 需要作一些基本的假设。这些假设条件也是其它文献<sup>[2,3]</sup>所采用的。

基本假设: 实时数据  $y_i$  被认为是附加噪声的基准数据, 即  $y_i = x_i + n_i$ , 假设噪声  $n_i$  和地形  $x_i$  彼此独立,  $n_i$  为零均值平稳各态历经的高斯过程, 且像元值相互独立。

相关匹配算法: 本文研究平均平方差 MSD 算法, 用  $D_j$  表示相关匹配算法的度量值

$$D_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{i+j} - y_i)^2 \quad (1)$$

其中,  $N$  为进行相关的数据像元总数, 即一维实时图长度,  $x_i$  为基准剖面的第  $i$  个像元,  $y_i$  为实时剖面的第  $i$  个像元,  $j$  为基准剖面相对于实时剖面的位置偏移量。度量值的最小极值给出最佳匹配。

在上述的基本假设条件之下, 相关匹配算法的度量值可写为

$$D_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{i+j} - x_i - n_i)^2 \quad (2)$$

若令  $z_{ij} = x_{i+j} - x_i$  表示位置偏移为  $j$  的两处地形的差分, 那么, 上式即为

$$D_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_{ij} - n_i)^2 \quad (3)$$

这样, 相关匹配算法的度量值以及地形的匹配性能, 可以通过地形差分过程来讨论。

## 2 地形差分矩与度量值统计特性

记第  $k$  次飞行试验的 MSD 算法度量值为

$$D_j^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_{ij}^k - n_i^k)^2 \quad (4)$$

对试验集合  $K$ , 求取度量值的均值和方差, 则有

$$\begin{cases} \overline{D_j} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_{ij}^k - n_i^k)^2 \\ \sigma_{D_j}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_{ij}^k - n_i^k)^2 \right]^2 - \left( \overline{D_j} \right)^2 \end{cases} \quad (5)$$

用  $d_j^2$  和  $v_j^4$  分别表示位置偏移为  $j$  的地形差分过程的二阶矩和二阶矩的分散程度, 即

$$d_j^2 \triangleq \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_{ij}^k)^2 \right], \quad (6)$$

$$v_j^4 \triangleq \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_{ij}^k)^2 \right]^2. \quad (7)$$

因为已假设的噪声与地形数据独立, 故地形差分过程  $z_{ij}$  与噪声  $n_i$  独立。

应用地形差分矩, 并结合噪声的独立零均值平稳各态历经高斯过程的假设, 可以导出度量值的均值和方差关于地形差分矩和噪声方差  $\sigma_n^2$  的解析表达式。在物理匹配位置 ( $j=0$ ), 有

$$\begin{cases} \overline{D_0} = \sigma_n^2 \\ \sigma_{D_0}^2 = \frac{2}{N} \sigma_n^4 \end{cases} \quad (8)$$

在非匹配位置 ( $j \neq 0$ ), 有

$$\begin{cases} \overline{D_j} = d_j^2 + \sigma_n^2 \\ \sigma_{D_j}^2 = v_j^4 + \frac{4}{N} \sigma_n^2 d_j^2 + \frac{2}{N} \sigma_n^4 - d_j^4 \end{cases} \quad (9)$$

## 3 TERCOM 地图匹配性能估计

在地形相关匹配中, 不同的空间位置通过地形标高剖面的独特特征来区分, 预存的基准剖面的集

合就是TERCOM地图。飞行器在地形匹配区上空即时测量的实时剖面与基准剖面进行相关匹配搜索,从而获得精确的地理位置信息。由于各种误差因素的影响,实时剖面与同一位置的基准剖面之间存在差异,相关匹配搜索过程就不一定能截获正确的位置。正确截获的概率反映搜索截获过程的可靠性,是描述地形匹配性能的重要指标。

### 3.1 地形差分二阶矩准则

根据前面的讨论,  $\overline{D_0}$ 和 $\overline{D_j}$ 分别是物理匹配位置和非匹配位置上相关匹配算法度量值的均值,它们的差值从某种角度反映了匹配搜索过程截获物理匹配位置的可能性的。由式(8)和式(9)知,地形差分二阶矩  $d_j^2$  就是 $\overline{D_0}$ 和 $\overline{D_j}$ 的差值

$$d_j^2 = \overline{D_j} - \overline{D_0} \quad (10)$$

即位置偏移为  $j$  的两处地形剖面在相关匹配算法度量之下的平均差别。

再来考察地形方差对匹配的意义。地形方差是分析匹配性能的最常用的准则量。由文献[2, 3]知,在平稳高斯独立像元假设的地形中,方差  $\sigma_x^2$  与 $\overline{D_0}$ 、 $\overline{D_j}$ 的关系为

$$2\sigma_x^2 = \overline{D_j} - \overline{D_0} \quad (11)$$

这表明,在非常严格的假设之下,地形方差反映了地形剖面可以被相关匹配算法区分的程度。对实际的非平稳地形,地形匹配性能与地形方差的变化趋势不是很一致(如图1示)。

比较式(10)与式(11),显然,用  $d_j^2$  作为TERCOM地图选择的准则是可能的。同方差准则相仿,为了获得较好的匹配性能,应该选取地形差分二阶矩较大的那些区域。

图2为实际地形的匹配性能随地形差分二阶矩变化的情况(工作条件同图1),其中位置偏移值在飞行方向和侧向上的分量都等于1倍格网间距。试验结果表明,正确截获概率与地形差分二阶矩有较一致的变化趋势。由于地形二阶矩与算法度量值的关系是在一般意义下导出的,所以地形二阶矩准则比地形方差准则更精确。

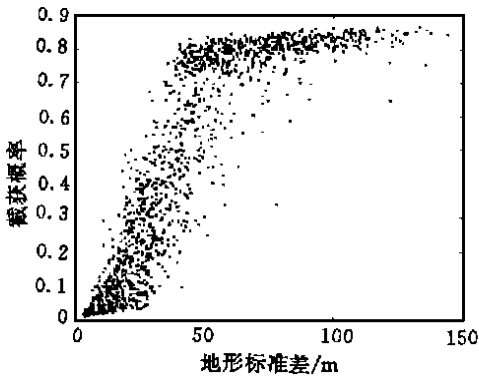


图1 地形方差对匹配性能的影响

Fig. 1 Matching performance changes with terrain variation

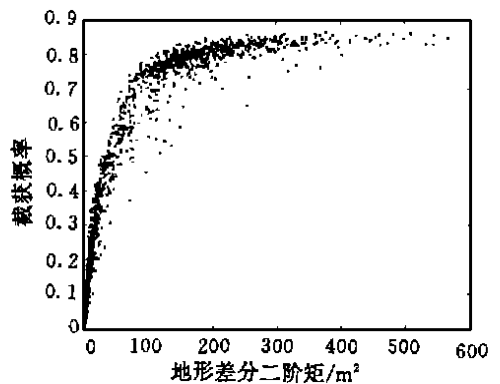


图2 地形差分二阶矩对匹配性能的影响

Fig. 2 Matching performance varies with second moment of terrain difference

### 3.2 局部搜索截获概率

以地形方差或差分二阶矩作为准则量选择TERCOM地图时,未直接给出具有概率意义的匹配性能评价,需要根据经验确定它们的定量关系。这里讨论地形差分矩与正确截获上界的解析关系。

地形相关匹配过程中,当正确截获(即算法检测出的最佳匹配位置与物理匹配位置一致)时,实时剖面  $Y$  与各基准剖面的度量关系为

$$D(X_r, Y) < D(X_j, Y), \quad \forall X_j \in \mathcal{N} - \{X_r\} \quad (12)$$

其中  $\mathcal{N}$  为TERCOM地图包含的全部基准剖面的集合,  $X_r$  为物理匹配位置的基准剖面。于是,正确截获率  $P_c$  可由下式表示

$$P_c = \text{prob} \left[ \bigcap_{X_j \in \mathcal{N} - \{X_r\}} D(X_r, Y) < D(X_j, Y) \right] \quad (13)$$

正确截获时, 式 (13) 包含的所有不等式关系必须同时满足。由于各次比较事件之间有一定关联, 因此  $P_c$  不等于所有这些事件的概率之乘积。又由于事件之间的关联程度不便于描述, 所以获得  $P_c$  的解析表达非常困难。文献 [2] 建议使用地形相关长度来修正独立的搜索位置数, 但是正确截获概率的含义被改变了, 无法反映地形的实际匹配性能。

注意到这样一个事实, 当搜索过程为正确截获时, 任意的包含物理匹配位置的局部搜索也必然正确地截获, 称为局部搜索截获。简单地, 构造局部搜索位置集合  $\Omega'$  为

$$\Omega' = \{\omega_j\} \cup \{\omega_j\}, \quad \omega_j \in \Omega \text{ and } \omega_j \neq \omega_j \quad (14)$$

其中,  $\Omega$  为搜索区域位置集合,  $\omega_j$  表示物理匹配位置。因为正确截获事件包含于局部搜索截获事件之中, 故由概率的有限可加性知, 正确截获概率不超过局部搜索截获概率。

利用匹配算法度量值的统计特性表示在  $\Omega'$  中的局部搜索截获概率  $P_{c1}$

$$P_{c1} = \int_{-\infty}^{\infty} p(D/j = 0) \int_D^{\infty} p(D'/j \neq 0) dD' dD \quad (15)$$

假设度量值的条件概率密度函数  $p(D/j = 0)$  和  $p(D'/j \neq 0)$  是正态的<sup>[2]</sup>, 由式 (8) 和式 (9), 有

$$P_{c1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] \left[\frac{1}{2} - \text{erf}(Az + B)\right] dz \quad (16)$$

其中,  $A = \frac{\sigma_{D_0}}{\sigma_{D_j}}$ ,  $B = \frac{\overline{D_0} - \overline{D_j}}{\sigma_{D_j}}$ ;  $\text{erf}(x) \triangleq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$  为误差函数。

局部搜索截获概率  $P_{c1}$  是正确截获概率  $P_c$  的上界, 可以作为 TERCOM 地图匹配性能的乐观估计。在实际应用中,  $P_{c1}$  能够迅速排除大量的匹配性能明显不好的区域。选择一些有代表性的局部搜索位置集合,  $P_{c1}$  与  $P_c$  很接近, 尤其是匹配性能较好的情形。因为在匹配性能较好的地形区域中, 正确截获的成功率主要受试验位置附近的地形匹配性能影响。

图 3 是局部截获概率应用于实际地形的分析结果, 并与模拟飞行试验的正确截获概率作了对比。局部截获概率与实际地形匹配性能有一致的变化趋势, 估计的地形匹配性能优于和实际的匹配性能, 当局部截获概率大于 80% 时, 两者相差很小。又由于局部截获概率通过地形差分二阶矩解析表达, 计算简单。因此, 这种评价地形匹配性能的方法是行之有效的。

## 4 结论

对于一般的非平稳的地形, 地形差分矩是较为理想的刻画地形匹配性能的物理量。利用地形差分二阶矩可以设计非常简单而且有效的地形匹配区选择准则。通过地形差分矩解析表达的局部搜索截获概率是对正确截获概率的上限近似, 它给出了具有概率意义的地形匹配性能度量。可以预见, 本文建议的地形匹配性能估计方法, 可以极大地改善 TERCOM 地图分析和设计的时间性能。

## 参考文献:

- [1] 刘徐德. 地形辅助导航系统技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.
- [2] 孙仲康 沈振康. 数字图像处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [3] 朱华勇, 沈林成, 常文森. 地形相关算法的度量值统计特性 [J]. 长沙: 国防科技大学学报, 1999, 21 (4).
- [4] 苏康, 关世义等. 在不同地形条件下的地形辅助导航系统定位精度评估 [J]. 北京: 宇航学报, 1998, (1).

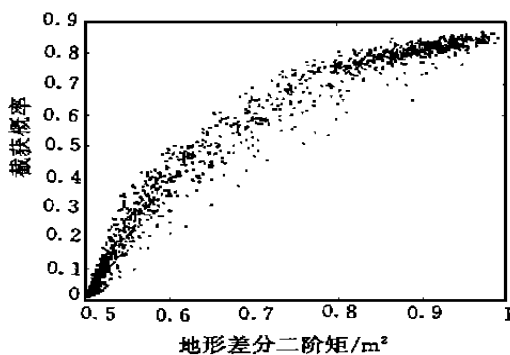


图 3 局部搜索截获概率与截获概率的比较

Fig. 3 Comparison of probability between partial searching acquisition and correct acquisition