

一种能适应飞行器航偏的快速地形相关算法

高志勇

(电子技术系)

摘要

文中推广了文[4]的结果, 并利用飞行器航迹的连续性, 提出一种能较好地工作在飞行器偏离参考图坐标轴情况下的快速地形相关算法—推广的指标排序截获算法。它不仅可串行地处理实时图数据, 而且在匹配过程中还能不断地给出粗略的配准信息。在一张实际地形图上的仿真表明, 在偏角 $\theta < 5^\circ$, 信噪比 $\sigma_x/\sigma_n=3$ 时, CEP 在 50 米以下。

关键词: 导航与制导地形相关, 图象匹配

1 引言

现行的各种地形相关算法, 无论是 MAD、MSD 和归一化极相关等常用算法^[3], 还是近年来发展起来的各种快速序贯算法, 如 SSDA^[1,2], SMTA 组合相关算法^[4]等, 对于飞行器对参考图坐标轴偏离是十分敏感的。一般当偏角 $\theta \geq 2^\circ$, 即实时图的横坐标有一格的变化时, 各种相关算法就基本不能工作了^[5]。因此这个问题一直是相关算法类中尚待解决的问题。文献[4]中提出了一种能工作在短数据、低 SNR 下的快速组合相关算法—统计量排序截获算法。它的基本原理是, 用实时图的一段数据去寻找配准位置时, 由于数据太短, 真正的配准位置所对应的统计量的值不一定处于最佳值, 但一般应落在前几个最佳位置中。所以可把实时图分为 K 段, 并利用最优统计量 T_{N_i} 进行分段判决。每计算一段均剔除一些和实时图段差别较大的位置。整个 N 点 K 段的实时图计算完成后, 最佳的 T_N 所对应的位置即取为配准位置。

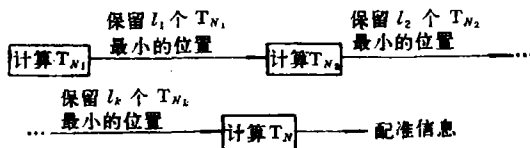


图 1 统计量排序截获算法原理图 ($T_s = \sum_{i=1}^s (Z_i - x_{i+j})^2$, $l_1 > l_2 > \dots > l_k \geq 1$ $N > N_k > \dots > N > 1$)

当 $\sigma_x/\sigma_n=1, 2$ 时, 在一张 30×120 的实际地形图上进行了仿真匹配。该地形图采样间隔 l 为 100 米, 相关长度 $L \approx 10$ 。在仿真中, 将实时图分为五段, 第一段 32 点,

以后每段 8 点。仿真所得的圆概率误差和幅度信噪比 $SNR = \sigma_x / \sigma_n$ 的关系曲线如图 2 ($CEP = 0.75\sqrt{\sigma_{Zx}^2 + \sigma_{Zy}^2}$)。

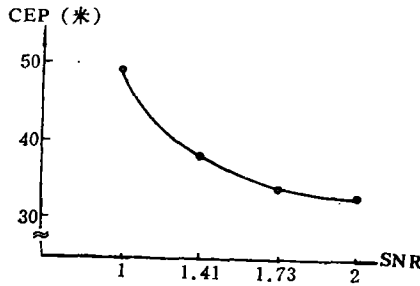


图 2 统计量排序截获算法的 CEP~SNR 曲线

2 新算法和仿真结果

现将上述算法推广为能工作在较大随机偏航（这对应于飞行器作机动飞行的实际情况）对航偏不太敏感的相关算法。由于飞行航迹是连续的，所以在每段计算完后，不仅对每一保留位置继续积累 T_s 的值，而且对其左边一条和右边一条路线也同时积累 T_s 值并进行比较，如图 3 所示。因此现在每一保留位置对应的不再是一条积累路线，而是三条路线。

飞行器发生偏航在数字地形图上就等效于在 Y 坐标上的某几点 Y_1, Y_2 和 Y_3 等处 X 坐标增 1 或减 1，如图 4 所示。

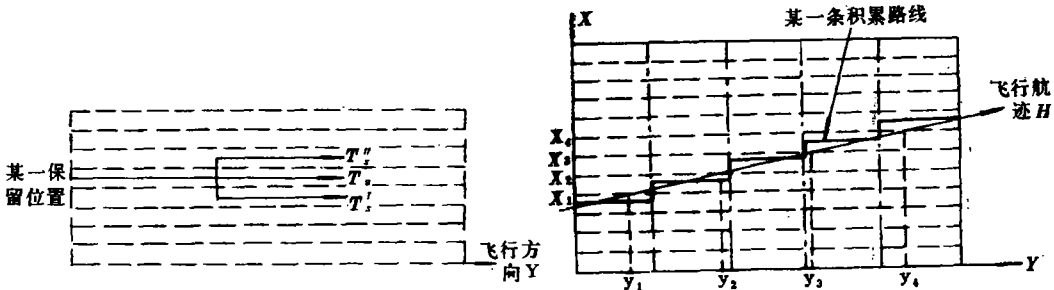


图 3 推广的统计量排序截获算法 T_s 值积累示意图

图 4 一条偏航路线及其对应的最佳拟合积累路线

一般的相关算法，按 X 不变的方向去积累 T 值。由于 X_1, X_2, X_3 和 X_4 四条路线都只有很小一部份与飞行航迹 H 重合，因此这些路线上的 T 值都很难达到最小。这就导致了几乎不可能找出正确的配准位置。现行绝大多数相关算法在 $\theta > 2^\circ$ （约相当于 X 方向偏出 1~2 格）时就基本不能工作的原因就在于此。而本文提出的算法则用分段的折线与 H 相拟合，所以对航迹拟合得较好。

下面来证明，当统计量 T 选为由最小总错误概率确定的最佳统计量后，用推广的统计量排序截获算法(GOAS)，其性能可接近最佳。

图象匹配的过程就是从参考图中实时图可能出现的 M 个位置中选出一个最佳位置的

过程。这是一个典型的多元假设检验问题。在没有先验知识的前提下, 一个合理的假设是实时图出现在 M 个位置中的任一个均为等可能的, 设

H_K : 第 K 个位置是配准位置 ($K=1, 2, \dots, M$)

$$\text{则 } P(H_K) = P \quad (1 \leq K \leq M) \quad (1)$$

$$\text{实时图矢量 } Z = X^K + V \quad (1 \leq K \leq M)$$

其中 X^K 为参考图中代表位置 K 的 N 维矢量。 V 为 N 维测量噪声矢量。若设 V 为高斯白噪声, 则 V 的协方差阵为 ($V = (v_1, v_2, \dots, v_N)^T$)

$$P_V = I_N \sigma_v^2 \quad (2)$$

其中 I_N 为 N 阶单位矩阵, $\sigma_v^2 = E\{v_i^2\}$ 。

在上述假设下, 由多元假设检验的理论, 最小总错误概率准则等效于最大似然准则。若已知 V 的分布密度为 $p(V)$, 则 H_K 成立时

$$Z - X^K = V$$

故似然函数为

$$p(Z/H_K) = p(V) |_{v=Z-X^K} \quad (3)$$

若 $\{v_i\}$ 为高斯白噪声, 则

$$V \sim N(0, I_N \sigma_v^2) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } p(Z/H_K) &= \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{N}{2}} \frac{1}{\sqrt{|\sigma_v^2 I_N|}} \exp\left\{-\frac{1}{2} (Z - X^K)^T P_V^{-1} (Z - X^K)\right\} \\ &= \left(\frac{1}{2\pi\sigma_v^2}\right)^{\frac{N}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_v^2} \sum_{i=1}^N (z_i - x_i^K)^2\right\} \quad (K=1, 2, \dots, M) \end{aligned} \quad (5)$$

最大似然准则就是取 $\max_K p(Z/H_K)$ 对应的假设为真。也就是相当于取统计量

$$T_N = \sum_{i=1}^N (z_i - x_i^K) \quad (x_i^K \text{ 为 } X^K \text{ 的分量}) \quad (6)$$

最小时对应的位置为配准位置。在偏航角 $\theta=0^\circ$ 时, 最佳算法显然就是普通MSD算法。用类似方法可找出各种噪声分布 $p(V)$ 对应的最佳统计量。例如, 当 $p(V)$ 为对称指数分布时, MAD 算法是最佳的。

由于每一 X^K 代表一条可能的飞行航迹, 在无偏航情况下, 飞行路线都是平行于参考图 Y 轴的直线。因此在 MSD 算法中, 每一条可能的路线都会被取到, 从而算法可达到最佳。在存在未知偏航的情况下, 在 GOAS 算法中是用固定长度的平行折线去拟合真实的飞行航迹 H 。所以 H 在 $\{X^K\}$ 中不一定找得到对应点, 而只有 H 的某一条近似路线在 $\{X^K\}$ 中有对应点, 因此我们说 GOAS 算法不能完全达到最佳, 只能达到准最佳。折线对 H 拟合程度越好, 性能就越接近最佳。

粗略地看, 每一平行折线段越短, 似乎越能逼近真实的 H 。但另一方面, 由于地形的相关性, 折线段越短, 可能的路线 X^K 就越多, 使 M 急剧增大, 其中与真实的 H 相似的路线也增加了, 从而导致伪配准的增加。所以综合考虑的结果如下: 若偏角 θ 未知, 按最保守的情况估出其最大值 θ (在仿真中, 作者取其最大值为 5°), 为了使每一段内横坐标最多变化一格, 则每段格数 n 必须满足

$$nl \cdot \text{tg} \theta \leq l \quad (l \text{ 为地形图采样间隔})$$

故
$$n \leq \frac{1}{\text{tg}\theta} = \text{ctg}\theta \tag{7}$$

对 θ 已知的情况，则可用平面插值法较精确地找出与 H 非常接近的 X^* ，以使算法性能更接近于最佳。具体作法是利用地形一般具有较强的相关性这一特点。因此在小范围内可将其近似看作平面，用飞行航迹 H 经过的点和邻近几个点的高度作一拟合平面，再在拟合面上根据已知的 H 的坐标求出对应的高度矢量 X^* 。

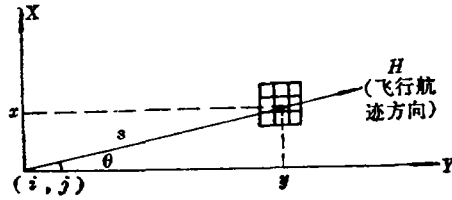


图5 拟合平面示意图

由图5，设 (i, j) 为参考图上 H 的起始点，则

$$\begin{cases} x = i + [s \cdot \sin\theta] \\ y = j + [s \cdot \cos\theta] \end{cases} \tag{8}$$

其中 $[t]$ 表示不超过 t 的最大整数。

在飞行过程中，只要确定了起始时间， s 总是已知的。若 θ 已知，则对每一可能的飞行路线起点 (i, j) 都能由(8)确定它对应的 (x, y) 。而 (x, y) 即为飞行器航迹 H 当时所在的那一点。因此可以它为中心，与其周围 m 个点（如9点）构成一个小区域，以它们的高度值 h_1, h_2, \dots, h_m 用最小二乘法做拟合平面。如对图5中的9个点，设拟合平面方程为

$$h = ax + by + c \tag{9}$$

令
$$J = \sum_{i=1}^9 (h'_i - h_i)^2 = \sum_{i=1}^9 (h_i - ax_i - by_i - c)^2 \tag{10}$$

其中
$$h'_i = ax_i + by_i + c \quad (i=1, 2, \dots, 9)$$

令 $\frac{\partial J}{\partial a} = 0, \frac{\partial J}{\partial b} = 0, \frac{\partial J}{\partial c} = 0$ ，得以下方程组

$$\begin{cases} a \sum x_i^2 + b \sum x_i y_i + c \sum x_i = \sum x_i h_i \\ a \sum x_i y_i + b \sum y_i^2 + c \sum y_i = \sum y_i h_i \\ a \sum x_i + b \sum y_i + c = 0 \end{cases} \tag{11}$$

得出 a, b, c 后，由

$$\begin{cases} x^* = s \cdot \sin\theta \\ y^* = s \cdot \cos\theta \end{cases} \tag{12}$$

代入拟合平面方程即可估出当时 H 的端头对应的地形高度 h^* ，

$$h^* = ax^* + by^* + c \tag{13}$$

值得指出的是，在作拟合面时，坐标原点选在图5所示 (i, j) 处。

在一张尺寸为 30×120 ，相关长度 $L \approx 10$ ，采样间隔 $l=100$ 米，均方差 $\sigma_x=30$ 米的实际数字地形图上用64点的实时图在 $\sigma_x/\sigma_y=3$ ， $\theta \leq 5^\circ$ 的情况下对GOAS算法进行了 Monte-Carlo 仿真匹配。仿真中设 θ 未知（这更符合实际），采用平行折线法拟合 H 设 P_{F_2} 表示错配两格以上的概率，仿真结果如表 1。

从以上结果看出，GOAS 算法对航偏不太敏感，而且精度也较高， $CEP < 50$ 米。特别指出的是它的速度比一般无航偏的 MSD 算法还快了两个数量级以上^[4]。这点与 OAS 算法相同。因此它是一种性能比较优越，耐偏航的快速相关算法。遵循本文的思路，现行许多相关算法均可改进为耐航偏的快速算法。这是由于统计量是可变的。

本文是在我的导师孙仲康、沈振康二位教授直接指导下完成的，在此谨表衷心感谢。

表 1 仿真结果

θ	P_{F_2}	CEP(米)
1.8°	0.01	41.8
2.7°	0.03	42
4.5°	0.09	44

参 考 文 献

- [1] B.I. Barner and H.F. Silve man. A class of Algorithms for Fast Image Registration. IEEE Trans. , 1972; (21): 179~186
- [2] Dai Le-Pin and Sun Zhong-Kang. A improved sequential similarity detection algorithm. proc. of NAECON, 1983
- [3] 孙仲康, 沈振康. 数字图象处理及其应用. 北京国防工业出版社, 1985
- [4] 高志勇. 在低 SNR 下快速配准两幅数字图象的组合相关法. 第一届全国信号处理学术会议录, CCSP-84, 1984: 447~452
- [5] M.W. Canon. Ferrain Coutour matching Sensivity to heading and ground-speed. AD- A056127, 1978

A Transforming Adaptive Algorithm for Implementation of The Eigenvector Spectrum

Zhao Binsheng Lu Zhongliang

Abstract

The eigenvector spectrum method is an effective method for resolving coherent signals in array processing. It requires that the minimum eigenvector of the received array signals covariance matrix R should be obtained first. Instead of gradient descent and space triangular ladder methods, we propose a new one — transforming adaptive algorithm method for implementation of the eigenvector spectrum. This method turns the problem of finding the minimum eigenvector, through a simple transformation, into that of finding the maximum one, thus the complicated calculation of R^{-1} can be eliminated. Theoretic analysis and simulation results show that this new method is superior to gradient descent one in convergence rate and to space triangular ladder one in computation complexity.

Key words: Superresolution, Coherent signals, Eigenvector spectrum, Eigenvalue

A Fast Terrain Correlation Algorithm for Aircraft Off-Course

Gao Zhiyong

Abstract

In the paper a fast terrain correlation algorithm to be called the generalized ordering acquisition of statistics (GOAS) is proposed by means of continuity of the aircraft track, which is better adaptable when the course of aircraft drifts off the axis of reference image. The algorithm can not only serially process the data of real-time image but also continually gives rough match information. Monte-Carlo simulations have shown that its performance was better for the drift angle $\theta < 5^\circ$ and its CEP was less than 50m for SNR=3.

Key words: Guidance, Image match, Terrain Correlation