

文章编号:1000-6893(2010)05-0996-08

不同参数对地形等值线匹配算法 精度影响的评估分析

杨勇, 王可东, 吴镇, 王海涌, 张弘

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

Evaluation of Performance of ICCP Algorithm with Different Parameters

Yang Yong, Wang Kedong, Wu Zhen, Wang Haiyong, Zhang Hong

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

摘要: 影响地形辅助导航匹配算法性能的因素很多,而目前基于信噪比的分析方法不能全面准确地评估匹配精度受各种参数的影响情况。本文以等值线(ICCP)算法为研究对象;首先,通过理论分析指出目前基于信噪比的分析方法的局限性和算法灵敏度受航向的影响情况;然后,通过仿真分别研究高度测量精度、惯导(INS)航迹精度、初始位置误差、航向误差、采样设置等因素对匹配精度的影响,并进一步从地图独特性、高度测量误差和INS航迹误差3个方面综合分析了各类误差和具体的误差参数对匹配性能的综合影响;最后,从算法的匹配精度和实时性等角度总结了各种参数的影响情况,为ICCP算法的工程应用提供理论基础。

关键词: 等值线算法;地形辅助导航;惯性导航;匹配精度;信噪比

中图分类号: V249.32⁺8

文献标识码: A

Abstract: The performance of terrain-aided navigation (TAN) algorithm is influenced by many factors. Obviously, the relationship based on the signal to noise ratio, which is currently popular, cannot evaluate the effect of the factors on the performance of the TAN algorithms comprehensively and accurately. In this article, the performance of the iterative closest contour point (ICCP) algorithm is studied both in theory and by simulation. First, the shortcomings of the relationship based on SNR and the ICCP algorithm's sensitivity to the vehicle's heading are analyzed in theory. Then, the effect of height measurement accuracy, the accuracy of inertial navigation system (INS), the initial INS errors, heading errors and sampling parameters on ICCP performance are studied by simulation. The factors are further classified into the three categories of the uniqueness of the matching map, the height measurement error, and the INS path error in shape. The composite effect of the factors is also analyzed briefly. Finally, the effect of the factors on the accuracy and/or computation burden of the ICCP algorithm is discussed to provide the theoretical basis for its engineering application.

Key words: iterative closest contour point; terrain-aided navigation; inertial navigation systems; matching precision; signal to noise ratio

等值线(Iterative Closest Contour Point, ICCP)算法是一种利用参考航迹(一般是惯导(Inertial Navigation System, INS)航迹),依据高度采样序列进行航迹估计的地形辅助导航方法^[1]。与地形轮廓匹配(Terrain Contour Matching, TERCOM)和桑地亚惯性地形辅助导航(Sandia Inertial Terrain-aided Navigation, SITAN)系统等地形辅助导航匹配算法一样,ICCP算法的匹配性能也是由INS性能(初始误差和精度等)、测高精度、地图性能(起伏特征和分辨率等)、载体运动参数(速度和航向等)和算法参数(匹配序列长度和

采样间隔等)所决定的。尽管匹配算法原理是研究重点^[2-5],但匹配算法的适应性也是直接影响算法可行性的关键。影响匹配算法性能的因素主要包括两个方面:地形特征的独特性和高程测量误差。目前相关的研究中用地形高程的标准差来表达地形特征的独特性,用高程测量标准差作为测量噪声,二者之比构成信噪比参数,进而建立匹配误差与该信噪比之间的定量关系。但是,地形高程分布为二维随机场,并不一定呈高斯分布^[6],高程标准差并不能准确描述高程的起伏变化;测量噪声则包括了高程测量误差和等效的高程误差,其中包括INS误差和地图误差等等效的高程误差,这种等效关系是由具体的地形高程分布函数决定的。因而,基于信噪比的

收稿日期:2009-04-22; 修订日期:2009-10-13

基金项目:航空科学基金(20060851013)

通讯作者:王可东 E-mail: wangkd@buaa.edu.cn

定量模型很难准确描述匹配算法的适应性^[7-9]。本文将通过对 ICCP 算法匹配准则进行理论分析,从理论层面初步确定影响算法匹配性能的关键因素;然后,通过数值仿真,详细研究算法匹配性能与 INS 性能、测高精度、地图性能、载体运动参数和算法参数等因素之间的关系,从而将目前笼统的信噪比具体化,使得研究更有针对性;最后,总结本文的研究结果,为 ICCP 算法的工程应用提供方法指导。

1 ICCP 算法的灵敏度分析

ICCP 算法需要优化方法来寻找最优估计航迹,但是不同的环境条件对优化结果具有不同的影响。理想的优化条件是单峰情况,且收敛点附近很陡,这样不仅优化速度快,而且收敛精度也高;相反,如果寻优平面具有多个极值,则很容易发生误匹配,特别是如果收敛平面很平滑,那么收敛速度会很慢。本节主要分析航向与等高线夹角对导航精度的影响。

ICCP 算法理论表明优化目标函数为优化参数 ρ_i 和 θ_i 的函数,但是,在实际应用中,目标函数的计算受多种误差源的影响,其中包括制图误差、测高误差和 INS 误差等,从而使得通过理论分析方法判断这些误差因素对匹配性能的影响十分困难。因此,下面将采用一定的简化方法来进行理论分析^[10]。

令地图的高度 h 为经度 λ 和纬度 L 的函数:

$$h = f_{\text{map}}(\lambda, L) \quad (1)$$

ICCP 算法的优化目标函数为

$$E = f_e(\rho_i, \theta_i) = \sum_{i=1}^w \sqrt{\rho_i^2 + \zeta_i^2} + K \sum_{i=1}^w \| \mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i \| \quad (2)$$

式中: E 为目标函数,即总误差,距离度量, m ; \mathbf{x}_i 为估计点的位置; \mathbf{y}_i 为 \mathbf{x}_i 在等值线上的投影或离等值线的最近点的位置; K 为刚度系数; ρ_i 为运载体速度误差与采样间隔的乘积; θ_i 为运载体的航向误差; $\zeta_i = \| \mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{i-1} \| \theta_i$ 。

当 E 取最优值时,优化参数为式(3)。

在理想情况下,INS、数字地图和实测高度均无误差,即当 $\rho_i^* = 0, \theta_i^* = 0$, 且 $\mathbf{x}_i = \mathbf{y}_i$ 时, $E = 0$, 取极小值。下面针对理想情况,分别对 ρ_i 和 θ_i 进行讨论。

$$\rho_i^*, \theta_i^* = \arg \min E =$$

$$\arg \min \left(\sum_{i=1}^w \sqrt{\rho_i^2 + \zeta_i^2} + K \sum_{i=1}^w \| \mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i \| \right) \quad (3)$$

只考虑 θ_i 时的一步转移中的过程示意图如图 1 所示。假设 θ_i 较小,则可以把旋转的弧线近似为 ζ_i ,估计点 \mathbf{x}_i 与等值线上最近点 \mathbf{y}_i 之间的连线与该弧线的夹角为 α_i ,表征了航向与等值线之间的关系:航向趋于平行于等值线, α_i 趋于 0° ;航向趋向于垂直于等值线, α_i 趋于 90° 。此时,式(2)可改写为

$$E = f_e(\theta_i) = \sum_{i=1}^w | \zeta_i (1 + K \cos \alpha_i) | \quad (4)$$

由式(4)可知: α_i 越小,目标函数变化越大,灵敏度越高,越容易找到最优解。因而,当航迹与等值线平行时,寻优的灵敏度越高。

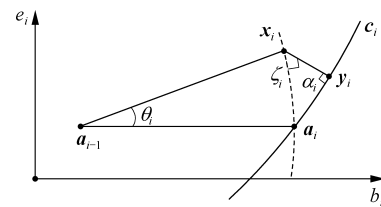


图 1 航向偏转引起的目标函数变化

Fig. 1 Variation of the object function value due to heading deflection

只考虑 ρ_i 时的一步转移中的过程示意图如图 2 所示。估计点 \mathbf{x}_i 与等值线上最近点 \mathbf{y}_i 之间的连线与航向的夹角为 β_i ,当航向趋于平行于等值线, β_i 趋于 90° ;航向趋向于垂直于等值线, β_i 趋于 0° 。此时,式(2)可改写为

$$E = f_e(\rho_i) = \sum_{i=1}^w | \rho_i (1 + K \cos \beta_i) | \quad (5)$$

由式(5)可知: β_i 越小,目标函数变化越大,灵敏度越高,越容易找到最优解。因而,当航迹与等值线垂直时,寻优的灵敏度越高。

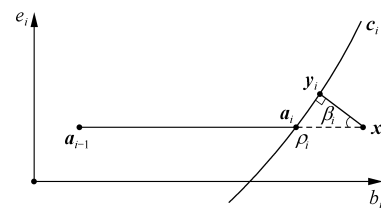


图 2 载体速度误差引起的目标函数变化

Fig. 2 Variation of the object function value due to vehicle velocity error

综上所述,当航迹平行于等值线时,航向误差

就会容易得到修正;当航迹垂直于等值线时,速度误差就容易得到修正。在选择航迹时,为了同时修正航向和速度误差,要避免让航迹一直同等级线平行或者垂直。

2 影响 ICCP 算法匹配性能因素的理论分析

2.1 粗匹配过程的匹配精度

粗匹配过程采用 TERCOM 方法(衰减绝对差(AD)方法)^[11],有效提高了等值线算法的效率。这里使用常用的 TERCOM 理论精度作为粗匹配的精度估计。根据假设的不同,可以有式(6)和式(7)两种表达^[12]。

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2p}} \cdot \frac{1}{\text{SNR}} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{1}{3} \cdot$$

$$\ln \left[\frac{2\text{SNR}^2 \left[1 + \Phi^{-1}(P_D) \sqrt{\frac{1}{p} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right)} \right]^2}{(1+2\text{SNR}^2)(\Phi^{-1}(P_D) - \Phi^{-1}(P_E)) \sqrt{\frac{1}{p} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right)}} \cdot \frac{1}{2 + (\Phi^{-1}(P_D) + \Phi^{-1}(P_E)) \sqrt{\frac{1}{p} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right)}} \right] \quad (7)$$

式中: σ 为匹配精度方差; p 为匹配序列长度(对于衰减 AD, p 随衰减系数递减^[11]);SNR 为信噪比; $\Phi(x)$ 为标准高斯分布;限于篇幅, P_D 和 P_E 的含义参见文献^[12]。

由式(6)和式(7)可以看出:当噪声比较大时,例如高度测量误差较大,或者 INS 指示位置误差较大,那么匹配精度较低;匹配序列越长(对应于衰减 AD 的衰减系数越小),误差越小,精度越高。但正如前所述,由于此处的高程噪声为等效噪声,一方面并不能直观准确表达测量误差对匹配精度的影响关系,另一方面也不便于有关理论指导匹配算法的实际应用,比如 INS 精度的确定。因此,匹配误差更明确的表达式应为

$$\sigma = g(\text{SNR}(\sigma_h, \Delta h, f_x \Delta x, f_y \Delta y), p, l) \quad (8)$$

式中: $g(\cdot)$ 为匹配误差关系式; σ_h 为地图高程标准差; Δh 为高度方向测量误差(包括高度计误差和地图高程方向误差等); Δx 和 Δy 为水平方向误差(包括 INS 的经纬度误差和地图的经纬度误差等); f_x 和 f_y 为地形高程梯度; l 为地形的相似性参数(如相关长度)。

在本文后续的研究中,将通过数值仿真,定性

地研究各种具体的误差因素对匹配精度的影响情况,一方面验证基于信噪比的定量理论模型的正确性,另一方面为以后的定量理论模型研究奠定基础。

2.2 ICCP 调优过程(精匹配)的目标函数阈值

式(2)可改写为

$$\left. \begin{aligned} E &= E_{\text{INS}} + E_{\text{H}} \\ E_{\text{INS}} &= \sum_{i=1}^w \sqrt{\rho_i^2 + \zeta_i^2} \\ E_{\text{H}} &= K \sum_{i=1}^w \| \mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i \| \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: E_{INS} 为 INS 航迹和估计航迹之间的差值,假定估计航迹在真实航迹附近,那么这部分差值主要由 INS 的漂移所造成; E_{H} 为有关估计点与等值线最近点之间的关系,这部分主要由高度测量误差所产生。假设高度测量误差绝对值的数学期望为 $E(\Delta H)$,所经过地形的平均坡度的数学期望为 $E(\alpha)$ 。则近似有

$$E(E_{\text{H}}) = KW \frac{E(\Delta H)}{E(\alpha)} \quad (10)$$

式(10)说明目标函数的期望与高度测量误差成正比,与地形坡度成反比。所以该算法更适用于地形坡度较大、高度测量较精确的情况。

如图3所示为仿真试验中得到的目标函数 E_{H} 与地形坡度倒数平均值的变化趋势对比^[13],可知两者具有较强的相关关系,间接证明上面理论分析的正确性。

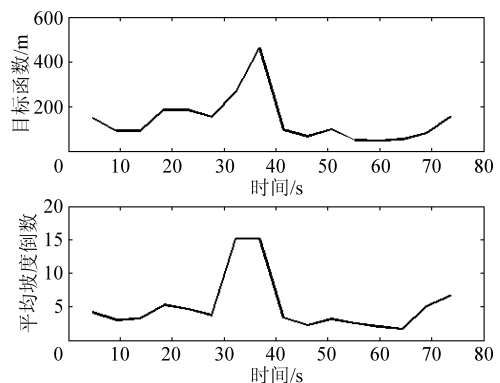


图3 坡度与阈值曲线

Fig. 3 Curves of $1/\alpha$ and E_{H}

3 高度测量精度对匹配精度的影响

高度测量传感器为气压高度表和雷达高度表,除了有传感器误差之外,还受地面植被和大气

传输等因素的影响,存在一定的测量误差。因此,有必要具体研究高度误差对算法匹配精度的影响情况。

如图 4 所示为高度测量误差从 2 m 变化增加到 31 m 时匹配误差曲线;图 5 和图 6 分别为匹配误差均值和算法运算时间随高度测量误差的变化曲线。由仿真结果可知,随着高度测量误差的增加,ICCP 算法匹配过程变得不稳定,定位误差也相应增大,这与基于信噪比的理论模型是相吻合的。不过,ICCP 算法具有很好的收敛能力,在高度测量误差达到 30 m 时,算法仍然是收敛的。但是,随着高度测量误差的增加,匹配搜索范围也

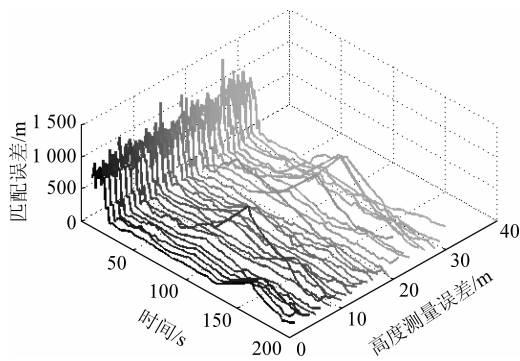


图 4 不同高度测量精度时的误差曲线

Fig. 4 Matching errors with different height measurement accuracies

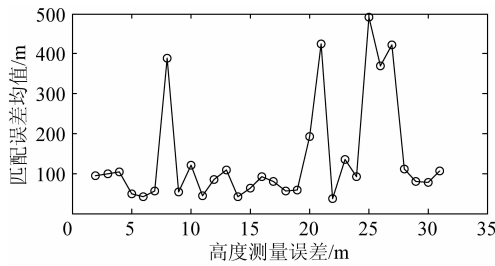


图 5 不同高度测量精度时的匹配误差均值

Fig. 5 Means of matching errors with different height measurement accuracies

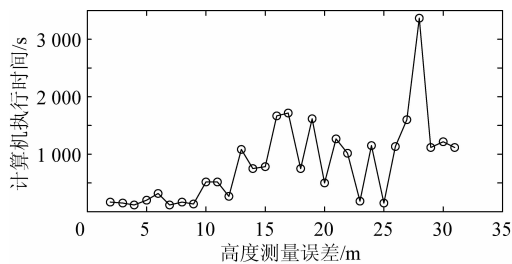


图 6 不同高度测量精度时的计算机执行时间

Fig. 6 Computing time with different height measurement accuracies

相应扩大,不仅导致了误匹配概率的增加,也使得匹配时间增大,在一定程度上影响了算法的实时性,这一点显然是目前基于信噪比的理论模型所忽略的。因此,为了达到较高的匹配精度和实时性,要确保一定精度的高度测量,例如高度测量误差小于 10 m 时,匹配精度较高,匹配过程也稳定,算法的实时性也得到了保证。

4 INS 精度对匹配精度的影响

对于高速空中载体,由于 ICCP 和 TERCOM 这类批处理的匹配算法在一块可匹配区内的工作时间并不长(如 200 s),这段时间内的 INS 漂移并不很大,所以 INS 精度对最终的匹配误差影响不会太大,如图 7 所示为匹配误差随 INS 精度的变化情况。图 7 横坐标只标出了单轴的漂移速率。仿真中使用的 INS 精度实为三轴漂移率:从 $0.01 (^{\circ})/h$ 开始,每次递增 $0.02 (^{\circ})/h$;另外对应的加速度计误差从 $1 \times 10^{-5} g$,每次递增 $1 \times 10^{-4} g$ 。

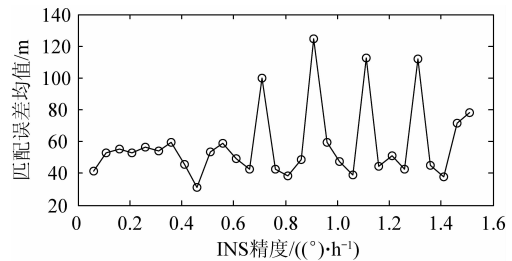


图 7 不同 INS 精度时的匹配误差均值

Fig. 7 Means of matching errors with different INS accuracies

但是,对慢速水下载体,ICCP 和 TERCOM 等批处理算法在一块可匹配区内的工作时间往往会很长(可达 2 h),此时 INS 的漂移误差影响很大,如图 8 所示为不同精度 INS 时 TERCOM 算法的匹配误差变化情况^[14],其中 INS 精度如表 1 所示。随着 INS 精度的下降,匹配误差逐渐增大,在局部出现了较大的误匹配,其中陀螺仪精度对匹配结果的影响更为明显,这主要是由于陀螺仪精度对 INS 航迹的形状影响较大,而匹配航迹的形状取自于 INS 航迹的形状,如果 INS 航迹形状与真实航迹形状相差较大,必然导致较大的误匹配。因此,为了提高匹配精度,应尽量提高 INS 精度,特别是陀螺仪的精度。另外,由图 8 可知,由于地形高程分布的非线性,导致 INS 误差等效的高程误差也是非线性的,对匹配效果的影响就有了差异。例如,由于图中 2 000~4 500 s 时经

过的地形高程分布较为平坦,INS测量的经纬度误差等效的高程误差影响就较大,因为等效的信噪比降低了,使得这段时间的误匹配率增大,匹配精度降低,这在式(6)和式(7)中均无法直接体现,而应用式(8)则可以明确表达。

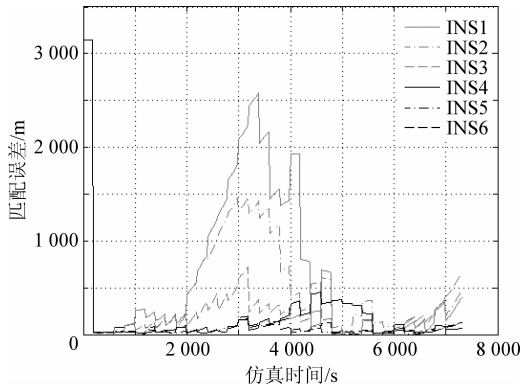


图8 不同INS精度时的匹配误差

Fig. 8 Matching errors with different INS accuracies

表1 不同精度的INS

Table 1 Different accuracy INSs

编号	陀螺仪/ $(^{\circ} \cdot h^{-1})$	加速度计/ g
INS1	0.01	1×10^{-4}
INS2	0.01	1×10^{-5}
INS3	0.01	1×10^{-6}
INS4	0.001	1×10^{-4}
INS5	0.001	1×10^{-5}
INS6	0.001	1×10^{-6}

5 初始位置误差对匹配精度的影响

ICCP算法首先经过衰减AD算法的粗匹配,然后在粗匹配基础上进行精细调整匹配^[11]。衰减AD算法具有较好的鲁棒性,能够在大初始位置误差条件下收敛。如图9所示为初始位置误差与匹配误差均值之间的变化关系,当初始位置误差在900~2400 m范围内变化时,匹配精度受影响很小。

TERCOM算法由于没有精匹配阶段,在受初始位置误差的影响上有一定的区别。如图10所示为初始误差分别为 0.03° 、 0.04° 和 0.05° (经纬度误差 0.01° 相对于1.57 km)时水下TERCOM算法的匹配结果^[6],当初始误差增大时,匹配误差将显著增大;当初始误差增大为 0.05° 时,匹配误差均值为2047.54 m,接近发散状态。这主要是由于此时算法匹配搜索范围相应扩大,导致相似地形特征区域增多,误匹配的概率随之变

大,不利于算法匹配精度的提高。这方面的影响在式(6)和式(7)中均未体现,而在式(8)中则可以由相似性参数 l 来体现。

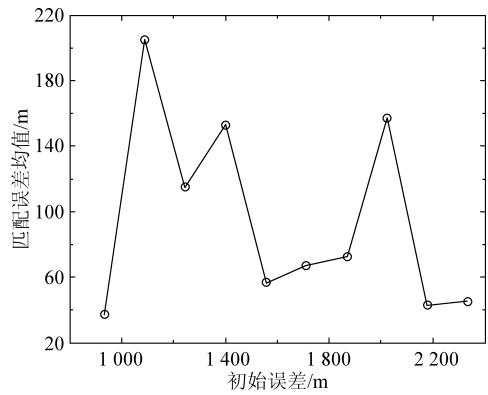


图9 不同初始位置误差时的匹配误差均值

Fig. 9 Means of matching errors with different initial INS errors

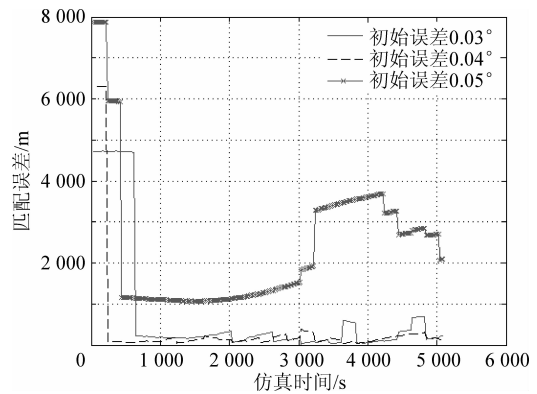


图10 不同初始位置误差时的匹配误差

Fig. 10 Matching errors with different initial INS errors

6 航向误差对匹配精度的影响

航向误差主要由INS的漂移误差所产生,在ICCP算法中参数 θ_i 直接反映航向误差的影响,航向误差增大, θ_i 的取值范围相应增大,即寻优范围变大,误匹配概率也会增加。图11所示为航向误差从 $1^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 时的匹配误差曲线变化情况;图12和图13分别为航向误差变化时的匹配误差均值和算法运行时间的变化情况。随着航向误差的增大,调优的过程越来越不稳定,定位误差越来越大,算法运行时间也相应增加。这是因为随着航向误差的加大,需要增大 θ_i 取值范围,从而增加了调优范围和次数,也增加了误匹配概率。仿真表明,当航向误差小于 3° 时,ICCP算法的匹配精度和实时性均较好。

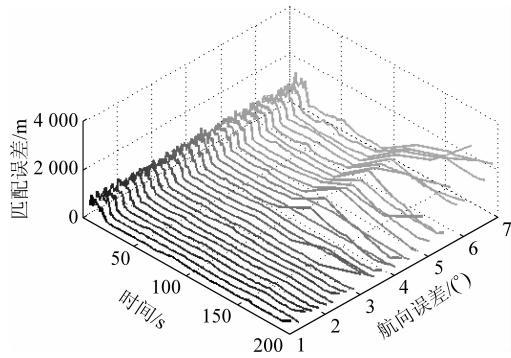


图 11 不同航向误差时的匹配误差

Fig. 11 Matching errors with different heading errors

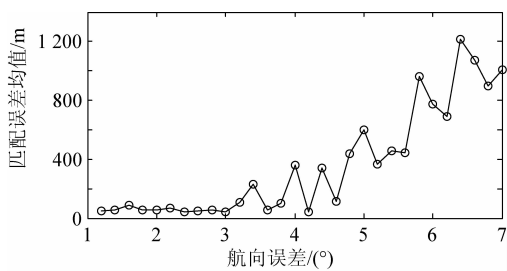


图 12 不同航向误差时的匹配误差均值

Fig. 12 Means of matching errors with different heading errors

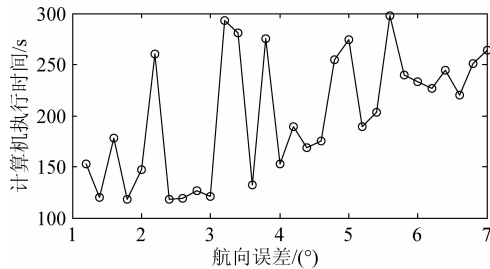


图 13 不同航向误差时的计算机执行时间

Fig. 13 Computing time with different heading errors

7 ICCP 采样设置对匹配精度的影响

采样设置关系到算法的匹配精度和实时性,下面主要研究采样点数和采样间隔对 ICCP 算法的匹配性能的影响。

7.1 采样点数设置

一次匹配的采样点数越多,那么待优化调整的参数也越多,寻优迭代次数相应增加,从而降低调优速度。不过,在总航迹长度一定的情况下,单次匹配采样点数的增加会减少总的调优次数。当一次匹配采样点数较少时,某一次较大的误匹配可能会在随后的匹配中得到快速修正,从而对后

续的匹配结果影响不大。相反,如果一次匹配采样点数较多时,一次较大的误匹配将影响很多点的匹配结果,而且由于总的匹配次数不多,导致在后续的匹配中得到纠正的机会也减小,因而对匹配结果的影响更大。因而需要综合考虑,选取合适的采样点数。如图 14 和图 15 所示分别为采样点数为 11~40 时 ICCP 算法匹配误差均值和算法运行时间的变化情况。仿真表明,采样点数为 11~20 时,匹配精度较高,算法实时性也较好。当采样点数为 18 时,运算耗时较长(如图 5 所示),这是因为仿真包含了随机因素,可能导致耗时较长,但从统计上看为 11~20 时,效果较佳。

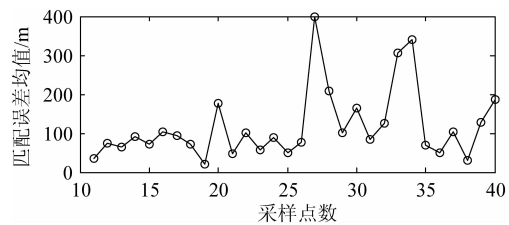


图 14 不同采样点数时的匹配误差均值

Fig. 14 Means of matching errors with different sampling points

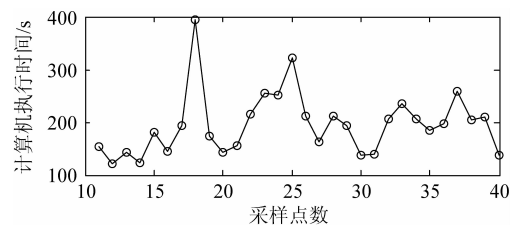


图 15 不同采样点数时的计算机执行时间

Fig. 15 Computing time with different sampling points

7.2 采样间隔设置

除了一次匹配中的采样点数对匹配性能有影响,2 个连续采样点之间的采样间隔也在一定程度上影响匹配效果,因为采样间隔减小虽然有利于提高匹配精度,但也相应增加了计算量,不适合实时性要求很高的应用场合。如图 16 和图 17 所示分别为采取点数为 2~7 时的匹配误差均值和算法运行时间的变化情况,当采样间隔为 2 时,匹配误差较小(约 50 m),不过算法运行时间也很长;当采样间隔为 7 时,匹配精度要相对低一些,但实时性较好。仿真表明,当采样间隔为 5 时,ICCP 算法的匹配精度和实时性均较好。

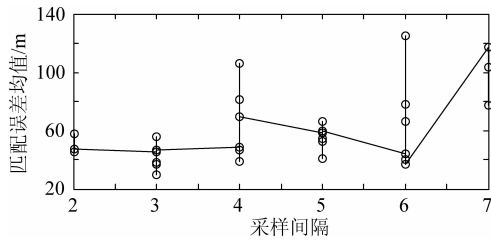


图 16 不同采样间隔时的匹配误差均值

Fig. 16 Means of matching errors with different sampling frequencies

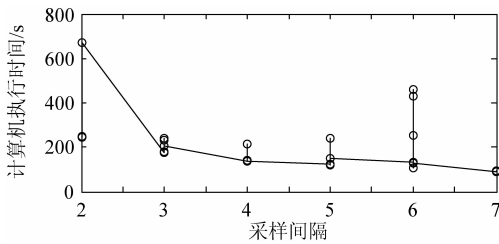


图 17 不同采样间隔时的计算机执行时间

Fig. 17 Computing time with different sampling frequencies

8 进一步分析

上述的理论分析和仿真试验中,都是单独研究每个参数对 ICCP 算法匹配性能的影响情况,而在实际应用中需要考虑多个因素的综合影响情况。因此,有必要进一步研究多个因素的耦合影响。限于篇幅,本文只进行有关综合分析,更细致的研究将另行展开。

虽然影响匹配精度的因素很多,但总体可以分为如下 3 类:匹配地图独特性、高度测量精度和 INS 航迹误差。

描述匹配地图独特性的参数很多^[12],与匹配精度相关的参数也很多,主要从宏观的起伏特征、微观的破碎特征和相似特征等 3 个方面侧重描述匹配地图的地形变化特征。因而,单一的高度标准差很难从匹配算法角度准确地描述匹配地图的地形特征变化情况。相关研究另行展开,本文仍然以高度标准差和相关长度来描述匹配地图的地形变化。

高度测量精度是另一个影响匹配精度的决定性因素,其中包括高度表精度和等效的高度精度。等效的高度精度包括 INS 的定位精度、匹配地图的制图精度和地球形状精度等。INS 的定位精度是决定匹配窗口大小的依据,由式(1)可知:

$$\delta h = \frac{\partial f_{\text{map}}}{\partial \lambda} \delta \lambda + \frac{\partial f_{\text{map}}}{\partial L} \delta L \quad (11)$$

如果 $\delta \lambda$ 和 δL 是由于 INS 的定位精度所产生的经纬度偏差,那么 δh 大于高度测量误差时才有可能将真实的位置包括在匹配区域内,这样 INS 的定位精度就间接地影响了匹配性能。当然,由式(11)可知,地图的高度分布也决定 δh 的大小,显然在平坦区域由于梯度小,需要开更大的匹配窗口才可能使 δh 足够大,这样不仅增加了匹配计算量,还增大了误匹配概率。地球形状则在 INS 解算和制图时均有影响。

对 ICCP 这类序列匹配算法,INS 对匹配精度影响还有一个方面就是匹配航迹的形状,因为匹配航迹的形状只能参考 INS 航迹的形状确定,而当 INS 航迹形状由于 INS 误差与真实航迹形状相差过多时,将产生较大的匹配误差。不过,对空中快速载体而言,这种影响可以忽略;而对水下慢速载体,这种影响就很突出。当然,本文应用的 ICCP 算法由于有精匹配可以调整航迹形状,可以在一定程度上减小这种误差影响,是该算法的优势所在。

综上,匹配地图的独特性强(高度方差大、相关长度小)、高度测量精度高、INS 的定位姿态精度高和制图误差小,则匹配精度高;相反,则匹配精度低。另外,INS 初始误差、航向误差和匹配序列长度等间接受匹配地图独特性和/或 INS 精度的影响。如表 2 所示为各种参数对 ICCP 算法匹配性能影响的汇总。

表 2 影响 ICCP 算法匹配性能参数汇总

Table 2 Summary of factors affecting performance of ICCP

影响因素	参数说明	对 ICCP 的影响	
地图独特性	起伏特征	高度标准差、峰态系数、偏态系数等	越独特,匹配精度越高;反之,匹配精度越低
	破碎特征	粗糙度、坡度、坡向、分形参数 H 、地形熵等	
	自相似特征	相关长度	
高度测量精度	高度表精度、制图精度、等效高度精度	高度测量精度越差,匹配精度越差	
其他	匹配航迹的形状误差	INS 航迹误差	越大匹配精度越差
		匹配序列长度	不宜过长或过短
与地图自相似特征有关的误差	INS 初始误差、航向误差	越大匹配精度越差,实时性越差	

9 结 论

(1) 沿平行于等高线方向航行时,ICCP 算法的航向误差灵敏度高;沿垂直于等高线方向航行时,速度误差灵敏度高。

(2) 理论分析表明,ICCP 算法匹配性能主要由采样点数、地形坡度、INS 误差和高度测量误差等因素决定。

(3) 仿真结果表明,高度测量精度直接影响 IC CP 算法的匹配精度,如果高度测量精度较低,会造成调优过程不稳定,甚至发散。

(4) INS 精度和初始位置误差对 IC CP 算法的直接影响不明显,但 INS 精度间接决定航向误差,从而对匹配精度有很大的影响。

(5) 航向误差越大,调优的范围也就越大,不仅会降低算法收敛速度,还容易增加误匹配的概率,降低匹配精度。

(6) 采样点数以及采样间隔需要综合考虑匹配精度和算法实时性,选取合适的数值。

参 考 文 献

- [1] Behzad K P, Behrooz K P. Vehicle localization on gravity maps[C]//Proceedings of SPIE Conference on Unmanned Vehicle Technology. 1999, 3693: 182-191.
- [2] Lin Y, Yan L, Tong Q X. Underwater geomagnetic navigation based on ICP algorithm[C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2007: 2115-2120.
- [3] Kubota T, Moesl K, Nakatani I. Autonomous navigation based on map matching for planetary rover[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. 2007.
- [4] Cowie M, Wilkinson N, Powlesland R. Latest development of the TERPROM® digital terrain system[C]//Position, Location and Navigation Symposium. 2008: 1219-1229.
- [5] Jan G E, Chang K E, Parberry I. Optimal path planning for mobile robot navigation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(4): 451-460.
- [6] Bishop G C. Gravitational field maps and navigational errors[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(3): 726-737.
- [7] 刘徐德. 地形辅助导航系统技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.
- Liu Xude. Technology of terrain-aided navigation system

- [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994. (in Chinese)
- [8] Metzger J, Wisotzkyy K, Wendelz J, et al. Sigma-point filter for terrain referenced navigation[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2005: 1-13.
- [9] Bergman N. Recursive bayesian estimation navigation and tracking applications[D]. Linköping: Linköping University, 1999.
- [10] 刘承香. 水下潜器的地形匹配辅助定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.
- Liu Chengxiang. A study on terrain matching assistant positioning technology for underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003. (in Chinese)
- [11] 杨勇, 王可东. 迭代最近等值点算法在 TAN 中的应用[C]//北京航空航天大学第五届研究生学术论坛论文集——自动化分论坛论文集. 2008: 12-16.
- Yang Yong, Wang Kedong. The application of iterative closest contour point algorithm in TAN[C]//The 5th Academic Forum for Graduate Students at Beijing University of aeronautics and astronautics. 2008: 12-16. (in Chinese)
- [12] 张继贤. 地形辅助导航的地理数据分析与处理[R]. 武汉: 华中理工大学博士后研究报告, 1997.
- Zhang Jixian. Terrain reference navigation oriented analyzing and processing for GEO-DATA[R]. Wuhan: Postdoctoral Research Report of Huazhong University of Science and Technology, 1997. (in Chinese)
- [13] Yang Y, Wang K D. Mismatching judgment using PDAF in IC CP algorithm[C]//The 4th International Conference on Natural Computation. 2008, 7129: 172-176.
- [14] 王可东, 杨勇. 地形辅助导航匹配误差研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1809-1813.
- Wang Kedong, Yang Yong. Research on matching error of terrain-aided navigation[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 1809-1813. (in Chinese)

作者简介:

杨勇(1984—) 男,硕士。主要研究方向:导航、制导与控制。
Tel: 010-82339586
E-mail: yangyong@sa.buaa.edu.cn

王可东(1975—) 男,博士,副教授。主要研究方向:导航、制导与控制。
Tel: 010-82339586
E-mail: wangkd@buaa.edu.cn

(编辑:张利平,晓坤)