ICCP中单纯形优化的误匹配检测

杨 勇 王可东

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 在迭代最近等值点 ICCP(Iterative Closest Contour Point)算法的地形辅助导航中,利用单纯形优化方法实现对最优航迹的估计,但在匹配中往往得到的只是局部最优解,导致误匹配发生,严重时导致匹配发散. 以 ICCP算法为研究对象,研究并建立了 ICCP方法的误匹配判断准则,以减小误匹配误差的影响和提高匹配精度. 利用概率数据关联建立 ICCP算法的误匹配判断准则,仿真结果表明,与无误匹配方法匹配结果相比,提高了其收敛性和精度;与 *M* /*N* 方法相比,降低了误匹配概率的 30%,提高了导航的精度和算法的稳定性.

关 键 词: 地形辅助导航; 迭代最近等值点算法; 概率数据关联; 惯性导航系统

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)03-0334-04

Mismatching judgment in simplex optimization for ICCP algorithm

Yang Yong Wang Kedong

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

Abstract: Iterative closest contour point (ICCP) algorithm was applied into map aided navigation, in which simplex algorithm was used to estimate the optimal trace of vehicle. However, simplex algorithm was usually convergent at the local optimization so that there was mismatching or even diverging. The rule of mismatching judgment for ICCP was established to reduce mismatching probability. The rule of mismatching judgment for ICCP was established by probability data association filter(PDAF). Simulation shows that PDAF improves the convergence and precision compared with the ICCP algorithm without mismatching judgment, and its mismatching probability decreases 30 percent compared with *M* /*N* method. The PDAF method for mismatching judgment increases precision and stabilization.

Key words: terrain aided navigation; iterative closest contour point algorithm; probability data association filter; inertial navigation system

地形辅助导航作为导航的一种辅助手段,在低空、遮蔽环境,以及地形跟踪、贴地飞行中具有重要地位. 文献[1]将迭代最近等值点 ICCP(Iterative Closest Contour Point)算法引入到水下载体重力匹配. 该算法是一种在惯导 INS(Inertial Navigation System)航迹和地形高程序列中寻求最优化的方法,如何实现快速、全局收敛是该算法能否成功应用的关键. 不同 INS精度、高度测量精度、制图精度等环境参数,不同的最优化参数将直接影响 ICCP的收敛速度和精度.

M /*N* 方法是常用的误匹配判断方法,可以有效地剔除误匹配点,但要进行多次匹配,且可能降低精度. 在图像匹配中常用几何关系进行误匹配判断[2],另外还有基于区域特征的误匹配检测手段[3],基于盲分离的多目标识别[4],基于非平稳假设的虚定位检测方法[5]. 基于 ICCP算法,研究了目标函数最小阈值选取问题;利用概率数据关联方法对误匹配进行判断,建立概率数据关联滤波 PDAF(Probability Data Association Filter)误匹配判断准则,仿真试验结果证明该方法提高了 IC-

收稿日期: 2008-03-31

基金项目: 航空科学基金资助项目(20060851013)

作者简介: 杨 勇(1984 -),男,河北秦皇岛人,硕士生, yangyong@sa buaa edu cn.

CP算法的匹配精度和收敛性.

1　迭代最近等值点算法基本原理

如图 1所示为 ICCP基本工作原理,运动载体有一真实航迹,由 $P_i'(i=1, 2, \cdots, W)$等点组成,其中 W是估计航迹的长度;同时, INS给出测量航迹,即 INS航迹,由 P_i等点组成;另外,地理特征传感器测量到当地实际高程值 c_i,每一高程值对应于高程地图中的一条高程等值线. 具体工作原理可以参考文献 [1, 6].

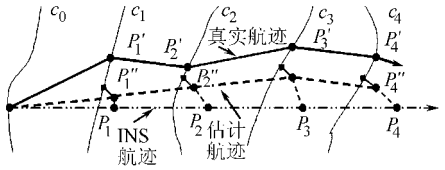


图 1　ICCP匹配算法基本原理

目标函数表示如式 (1)所示[1]:

$$E = \sum_{i=1}^{W} d(x_i - x_{i-1}, a_i - a_{i-1}) + K\sum_{i=1}^{W} d(x_i, y_i) \tag{1}$$

式中, E为目标函数,即总误差; $d(p, q)$为 p与 q之间的距离; x_i为估计点 P_i'的位置; a_i为 INS指示位置; y_i为 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. 经过变换[1]有:

$$E = \sum_{i=1}^{W} \sqrt{(\rho_i^2 + \zeta_i^2)} + K\sum_{i=1}^{W} \| x_i - y_i \| \tag{2}$$

式中, ρ_i为载体速度误差与采样间隔之积; θ_i为载体的航向误差; $\zeta_i = \| a_i - a_{i-1} \| \theta_i$,详见文献 [1, 6].

取初始位置 $x_0 = a_0 + \rho_0 (b_0 + e_0)$,其中 b_0和 e_0分别为航向在经度和纬度方向上的单位向量.

优化过程即是对式 (2)进行最优化处理的过程,由于 x_i和 y_i均是 ρ_i和 θ_i的函数,因此优化变量是 ρ_i和 θ_i,目标函数是 E. 调优单纯形法被用来对式 (2)进行最优化处理,单纯形法的优点是无须求解目标函数的梯度,而是直接对目标函数值进行计算和比较. 本文假定初始匹配点已经在真实位置附近,即针对于小误差情况适用. 对于大误差可以首先利用 TERCOM算法进行粗匹配,以减小大误差[6];或者在可能位置附近多次随机采样来提高全局收敛性[7].

2　目标函数阈值的确定方法

单纯形算法是一种局部最优化方法,为实现全局最优,则应在初始点位置多选择几组初始的 ρ_i和 θ_i,在同一匹配序列情况下,进行多次的 ICCP调优操作,最后综合选取最优解,选取的方法在第 4节中介绍. 多次调节的情况下,目标函数最小值的范围成为一个需要解决的问题:它可辅助判断优化结果的真匹配概率. 在优化中,阈值大小是跳出调优的关键,而不同的地形对应的阈值是不同的. 下面将讨论目标函数阈值的计算方法.

已知目标函数 E是 ρ_i, θ_i, x_i和 y_i的函数. 将其分成两部分来考虑,如式 (3)和式 (4)所示:

$$E = E_{NS} + E_H \tag{3}$$

$$\left.\begin{aligned} E_{NS} &= \sum_{i=1}^{W} \sqrt{(\rho_i^2 + \zeta_i^2)} \\ E_H &= K\sum_{i=1}^{W} \| x_i - y_i \| \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中, E_{NS}是 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,则 E_{NS}对于目标函数的贡献即 INS的漂移,可通过对 INS建模获得. E_H是有关估计点与等值线最近点之间的关系,这部分主要来自于高度测量误差. 假设高程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 $E(\alpha)$. 则近似有如下关系:

$$E(E_H) = K \cdot W \cdot E(\Delta H) / E(\alpha) \tag{5}$$

式 (5)说明目标函数与高程测量误差成正比,与地形坡度成反比. 所以该算法更适合于地形坡度较大、高度测量较精确的地形.

利用如上的关系,可以计算在一定误差下的目标函数范围,为 ICCP提供自适应的阈值,有利于对优化结果进行快速判决,提高计算速度.

3　概率数据关联判断误匹配概率

ICCP算法针对 W个点的 INS航迹和地形高程序列进行优化处理,兼顾了 INS航迹和地形高程接近程度,对 Q次优化后的定位处理可以采用 PDAF方法[8]进行误匹配判断.

首先,为了获得全局最优,初始值选取采用随机采样方式,即以 INS航迹为基准,对 ρ_i和 θ_i进行随机采样,共计采样 Q组,然后对这 Q组优化初值分别进行 ICCP最优化计算,其目标函数收敛到 E_{min}或者迭代次数超过阈值 T_{max}时,记录此时的目标函数 E值作为匹配的指标. 一般情况下这几组初值都能够收敛,只是根据初值的不同可能收敛到全局或局部最优解. 如果把其中 E值最小的那组优化结果作为该次的匹配结果[7],那么一旦真实的位置因误差收敛到局部最优,就会出现误匹配. 作为解决方案,可以采用概率数据关联对多次匹配的目标函数进行综合考虑,建立

PDAF误匹配判断准则,这样不仅能够得出是否接受优化结果的结论,而且可获得可信度的大小.

对于 Q 次 W 点最优化的结果,得到 Q 个不同的 E 值和优化后的终点位置(简称优化位置),按 E 值计算概率,首次概率计算见式(6).

$$\beta_i = \frac{1/E_i}{\sum_{k=1}^{Q}(1/E_k)} \tag{6}$$

式中,β_i ($i=1, 2, \cdots, Q$)是各次优化位置的概率.

将前次的优化位置的概率记为 $\beta'_{j'}$, $j'=1, 2, \cdots, Q$,本次的优化位置的概率记为 β_i, $i=1, 2, \cdots, Q$,将前次优化位置的预测位置(简称预测位置,按惯导航迹进行预测)绘制在本次优化位置的图中,如图 2所示. 前次的 INS预测位置与本次的 INS位置重合.

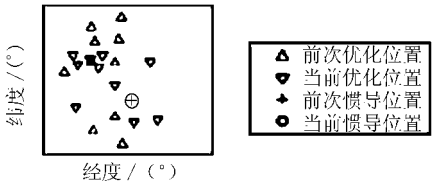


图 2 两次优化位置分布示意图

各优化位置都对应着一个编号,假定本次的每一个优化位置都可能来自于预测位置. 如果 INS定位误差服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布,那么预测位置的第 j 点对本次优化位置的第 i 点作用的概率密度见式(7)所示.

$$p(i \mid j') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{s^2}{2\sigma^2}} \tag{7}$$

式中,s 为 i, j 两个优化位置的距离.

本次的 Q 个优化位置都可能来自于预测位置中的第 j 点. 条件概率如式(8)所示:

$$P(i \mid j') = \frac{p(i \mid j')}{\sum_{k=1}^{Q} p(k \mid j')} \tag{8}$$

利用式(8)和全概率公式可以获得 Q 个预测位置对本次第 i 个优化位置的影响,即第 i 个优化位置的联合概率. 如式(9)所示:

$$P(i) = \sum_{j=1}^{Q} \beta'_{j'} \cdot P(i \mid j') \tag{9}$$

最终的匹配概率的计算见式(10)所示:

$$\beta_i = \frac{P(i)/E_i}{\sum_{k=1}^{Q}(P(k)/E_k)} \tag{10}$$

选取最大概率的优化位置作为最终匹配结果.

4 仿真验证

主要仿真条件如表 1所示,高度测量仪表精度见表 2所示. 图 3为地形图,实际飞行自西向东航行. 所经航线的地形高程起伏情况比较明显,适合地形匹配定位.

综合各项仿真条件,获得如图 4所示的目标函数 E_H 与地形坡度倒数平均值的关系,可以看出,两者具有较强的相关关系,间接证明第 3节的分析是现实可用的. 在坡度较大的地方,坡度倒数较小,使得 ICCP调节目标函数值较小,可获得较好的匹配结果.

表 1 主要仿真条件

载体	初始经、纬度误差/(°)	0.003
	采样步长/s	2
	速度/(m·s^{-1})	200
陀螺仪	x, y, z 轴随机偏差/((°)·h^{-1})	0.1
	x, y, z 轴随机游走/((°)·h$^{-1/2}$)	0.05
加速度计	x, y, z 轴随机偏差/g	1×10^{-4}
	x, y, z 轴随机游走/(g·h$^{-1/2}$)	5×10^{-5}
地图网格	经、纬度方向/m	90

表 2 高度表数据

类型	使用范围/m	精度/m
气压高度表	0～1 000	0.1% $\times h_1$ +1
	1 000～5 000	0.3% $\times h_1$ +2
	>5 000	-
雷达高度表	0～30	0.1% $\times h_2$
	30～150	0.3% $\times h_2$
	150～2 000	0.4% $\times h_2$
	>2 000	-

注: h_1 为气压高度表测量值; h_2 为雷达高度表测量值.

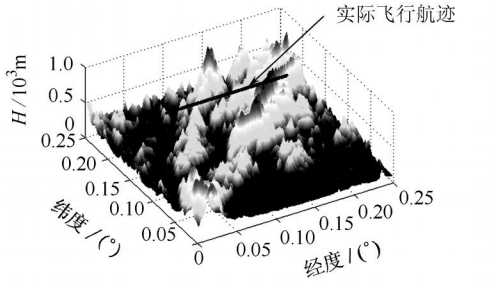


图 3 地形图及飞行航迹

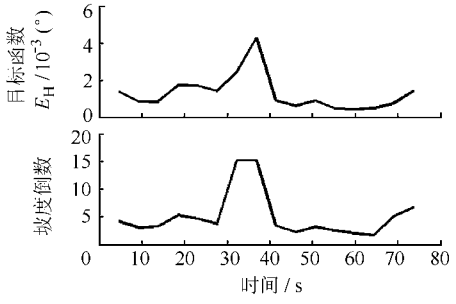
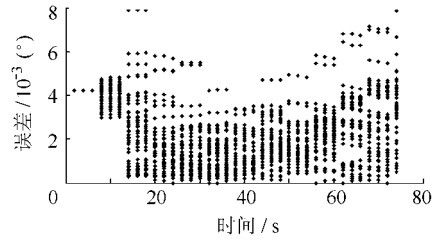


图 4 坡度与阈值关系曲线

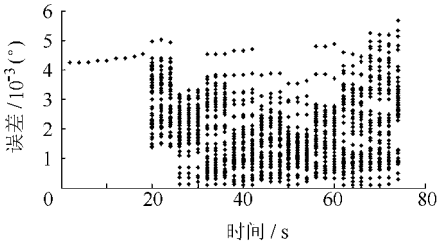
由图 4可以看出 10个点的 E_H 最大值小于 0.005°;每个点高程测量误差引起的 E_H 约为 0.0005°;由 INS仿真可得采样间隔产生的 E_{NS} 约为 0.0001°;综合得到 E_{min} = (0.0005 +

0.000 1) ×W. 当 W =3时, E_{min}取整为 0.002;选择 T_{max} =60; K =1; Q =20.

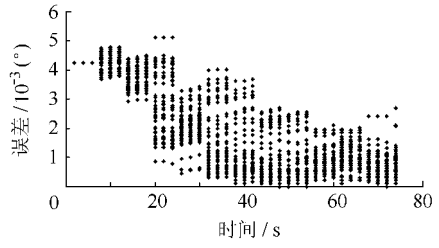
对 ICCP调节在不同的误匹配判断方法下进行随机试验,获得的试验结果见图 5所示. 图示为 50次随机试验的所有匹配样本与真实位置的误差值. 其中图 5b中取 N =3, M =2,判决关系是误差小于 0.003 °.



a　无任何误匹配判断手段



b　M /N误匹配判断准则



c　PDAF误匹配判断准则

图 5　匹配结果

对于图 5所示的 3种误匹配判断方法,从第 4次匹配开始计算误匹配概率 (M /N 方法从第 4次匹配才开始引入 ICCP匹配结果),将误差大于 0.003 的匹配结果记为误匹配,那么结果见表 3所示.

表 3　误匹配概率对照表

检测方法	误匹配数	总点数	误匹配率 /%
None	360	1 400	25.71
M /N	416	1 400	29.71
PDAF	299	1 400	21.36

5　结　论

以 ICCP算法为研究对象,通过分析,建立了基于概率数据关联方法的误匹配准则,结论如下: ①ICCP算法易于发散,很可能因为某几次连续不匹配而导致严重发散,在实际中不宜单独使用; ②M /N方法收敛性较好,可以有效地减小大误差的产生,防止了发散情况的发生;但是参数 N, M 和评判准则都不易选择,且定位精度无法得到有效提高,其误匹配概率较大甚至大于无误匹配判断时的概率; ③PDAF方法可以改善发散问题,该方法的鲁棒性比较好. 该方法较之前面的两种误匹配判断减小了误匹配概率,比 M /N 方法的误匹配概率减小了约 30%.

参考文献 (References)

[1] Kamgar-Parsi B. Vehicle localization on gravity maps [C] // Proceedings of SPIE. Orlando, Florida: [s n.], 1999, 3693: 182 - 191

[2] 黄锡山, 陈慧津, 陈哲. 景像匹配误匹配点的剔除算法 [J]. 中国图象图形学报, 2002, 7A (8): 783 - 787
Huang Xishan, Chen Huijin, Chen Zhe. Algorithms of eliminating the mismatching points in scene matching guidance system [J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7A (8): 783 - 787 (in Chinese)

[3] 李从利, 韩裕生, 冷晓艳, 等. 序列图像拼接过程中误匹配的消除 [J]. 计算机应用与软件, 2006, 23 (11): 93 - 95
Li Congli, Han Yusheng, Leng Xiaoyan, et al. Elmination of pseudo matching in image stitching [J]. Computer Applications and Software, 2006, 23 (11): 93 - 95 (in Chinese)

[4] 董志峰, 汪增福, 刘庆文. 去除交叉定位中虚假定位的一种快速算法 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14 (4): 527 - 530
Dong Zhifeng, Wang Zengfu, Liu Qingwen. A method for eliminating false location in cross-localization [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14 (4): 527 - 530 (in Chinese)

[5] 冯道旺, 徐欣, 周一宇, 等. 一种基于非平稳性分析的虚假定位点识别方法 [J]. 电子与信息学报, 2002, 24 (11): 1675 - 1681
Feng Daowang, Xu Xin, Zhou Yiyu, et al. A novel method for false location identification based on nonstationary verification [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002, 24 (11): 1675 - 1681 (in Chinese)

[6] 王可东, 陈偲. 水下地形匹配等值线算法研究 [J]. 宇航学报, 2006, 27 (5): 995 - 999
Wang Kedong, Chen Si. Iterative closest contour point for underwater terrain-aided navigation [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27 (5): 995 - 999 (in Chinese)

[7] 刘承香, 刘繁明, 刘柱, 等. 快速 ICCP算法实现地形匹配技术研究 [J]. 船舶工程, 2003, 25 (3): 54 - 56
Liu Chengxiang, Liu Fanming, Liu Zhu, et al. Study on technique for seabottom terrain mapping system by means of rapid ICCP algorithm [J]. Ship Engineering, 2003, 25 (3): 54 - 56 (in Chinese)

[8] 冯庆堂, 沈林成, 常文森. 基于概率数据关联的地形辅助导航算法 [J]. 宇航学报, 2003, 24 (5): 440 - 443, 462
Feng Qingtang, Shen Lincheng, Chang Wensen, Terrain aided navigation basing on PDAF [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24 (5): 440 - 443, 462 (in Chinese)

(责任编辑:张　嵘)