改进的SSDA并行算法及其在TEM中的应用

胡 凯 张新宇 杨 锐 刘德卿

(北京航空航天大学 计算机学院,北京 100191)

摘 要:介绍了一种把图像匹配中的序贯相似性检测算法(SSDA,Sequential Similarity Detection Algorithm)应用到地形匹配中的方法,把地形匹配系统中的数字高程模型、高程数据和实时剖面数据分别视为SSDA算法中的搜索图、灰度值和模板,同时提出了动态门限序列和分组选取随机点的方法,最后将改进的SSDA算法进行并行化并用消息传递接口(MPI, Message Passing Interface)实现.实验结果表明,改进的SSDA算法能有效地提高地形匹配的速度和计算精度,而相应的并行程序也能取得较好的加速比,从而一定程度上解决了传统的地形匹配算法时间复杂度高、实时性差的问题.

关 键 词:地形高度匹配;序贯相似性检测算法;动态门限序列;并行化

中图分类号:TP 316.4

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2009)10-1224-04

Parallel algorithm based on improved SSDA in TEM

Hu Kai Zhang Xinyu Yang Rui Liu Deqing

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

Abstract: A new terrain elevation matching (TEM) method using sequential similarity detection algorithm (SSDA), which is an image matching algorithm was presented, while regarding the digital elevation model, height value and real-time profile data in TEM as searching image, hue value and template in SSDA respectively. The dynamic threshold sequence and the method of selecting random points in groups were described. A parallelism algorithm based on improved SSDA was designed and implemented with message passing interface(MPI). The experiment results show that the improved SSDA algorithm can effectively increase the matching speed and the precision, and the corresponding parallel program can also get good speed-up ratio. Therefore the problem of high time complexity and lack of real time feature in traditional TEM was solved to some extent.

Key words: terrain elevation matching (TEM); sequential similarity detection algorithm (SSDA); dynamic threshold sequence; parallelism

现代的高精度导航系统通常使用综合导航系统,将惯性导航系统(INS,Inertial Navigation System)作为主导航系统,将导航定位误差不随时间积累的导航系统作为辅助导航系统[1].地形高度匹配技术(TEM,Terrain Elevation Matching)是一种自主、隐蔽、全天候的辅助导航技术,有较高的定位精度.TEM技术测量飞行路径正下方的地形高度,并和存储的参考地图比较得出飞行器位置的估计值,利用这个估计值修正INS的误差.最著名的TEM算法是地形等高线匹配算法(TERCOM,Terrain Contour Matching)和桑地亚惯性地形辅助导航算法.TERCOM将测得的实时图与基准图进行相关,按最佳相关确定飞行器的位置.常见的确定相似程度的相关匹配算法有积相关算法(Prod,Product Correlation Algorithm)、平均绝对差算法(MAD,Mean Ab-

收稿日期:2008-10-09

基金项目:航空科学基金资助项目(2007ZC51032);国家863计划资助项目(2007AA01A127)

作者简介:胡 凯(1963—),男,湖南长沙人,副教授,hukai@buaa.edu.cn.

solute Difference)和平均平方差算法(MSD, Mean Square Difference)等. 桑地亚算法使用一个改进的扩展卡尔曼滤波器,在滤波器算法中对地形进行局部随机线性化,实现对惯导状态误差的最优估计[2].

但一般的 TEM 算法时间复杂度高,实时性较差,所以将速度较快的序贯相似性检测算法(SSDA, Sequential Similarity Detection Algorithm)引入到 TEM 中,并对 SSDA 算法进行了改进和并行化,提高了地形匹配的速度,最后用实验进行了验证.

1　基本的 SSDA 算法

将大小为 $K\times L$ 的模板 P 在大小为 $M\times N$ 的搜索图 S 上平移,选择 P 的左上角为参考点,当参考点在 S 中的坐标为(i,j)时,模板 P 覆盖下的 S 中的子图为 S_{ij},在传统的图像匹配算法中,对每个不同的(i,j)要将搜索子图与模板进行 $K\times L$ 次相关,算法的总的时间复杂度为 $O(M\times N\times K\times L)$. 为了减少匹配相关运算量,文献[3]提出了 SSDA,文献[4]对 SSDA 算法进行了重要的改进,通过优化减少算法中匹配判断的时间. SSDA 算法的相似性判决指标为 MAD,即图像像素灰度差的绝对值之和,基本思想如下:

1) 当参考点在 S 中坐标为(i,j)时,相对于参考点的位置为(u,v)的点的匹配误差定义为

$$\varepsilon(i,j,u,v)=|\ S_{ij}(u,v)-P(u,v)\ |=$$
$$|\ S(u+i,v+j)-P(u,v)\ | \qquad (1)$$

2) 在 S_{ij} 中随机选取 k 个不重复点(u_1,v_1), (u_2,v_2),…,(u_k,v_k),定义累加误差和为

$$e(i,j,k)=\sum_{m=1}^{k}\varepsilon(i,j,u_m,v_m)=$$
$$\sum_{m=1}^{k}|\ S(i+u_m,j+v_m)-P(u_m,v_m)\ | \qquad (2)$$

当累加误差和超过不变阈值时,则停止该处的计算,并记下 k;否则进行下一随机点的计算.

3) 对所有不同的待匹配点(i,j)进行上述匹配计算,所有点的最大 k 值对应的待匹配点位置就是要找的匹配点.

2　SSDA 算法的应用与改进

2.1　SSDA 算法在地形匹配中的应用

SSDA 算法是一种图像匹配算法,由于它的运算速度很快,本文将其应用到地形高度匹配中. 在地形高度匹配系统中,基准图是由数字高程地图(DEM,Digital Elevation Model)表示的地形信息,它记录了相关区域内地理位置坐标及其相应的地形高度. 而飞行器采样的实时图是匹配区上空实时测量的地形高程剖面,实际上就是地形的一维轮廓. 由于基准图是二维的,因此需要确定在基准图中与实时图的位置形状对应的一系列相互平行剖面,称之为基准子图. 实时图剖面的位置形状由各采样点的相对位置决定. 一般的,在地理坐标轴上将采样点位置离散化对应到最邻近的格网,基本思想如下:

将第 1 个采样点定位在某个格网的中心,并设飞行器的航线方向是东偏北 θ 角,2 个采样点的间隔长度是 l,格网间距为 s,第 i 个采样点相对于第 1 个采样点所在格网的位置为(d_x,d_y),d_x, d_y 表示格网数,其计算公式为

$$d_x=\left[\frac{(i-1)\times l\times\cos\theta-\frac{s}{2}}{s}\right]=\left[\frac{(i-1)\times l\times\cos\theta}{s}-\frac{1}{2}\right] \qquad (3)$$

$$d_y=\left[\frac{(i-1)\times l\times\sin\theta-\frac{s}{2}}{s}\right]=\left[\frac{(i-1)\times l\times\sin\theta}{s}-\frac{1}{2}\right] \qquad (4)$$

所以将由 DEM 表示的基准图视为图像匹配中的搜索图,将高程数据视为图像的灰度值,将实时剖面数据视为模板,就可以将 SSDA 算法应用到地形匹配系统中了.

2.2　自适应动态门限序列

在 SSDA 算法中,判决门限即阈值决定了何时终止匹配计算过程,是影响 SSDA 算法性能的重要因素. 门限取值太大无法有效减少匹配计算量,不能提高匹配速度;太小可能会过滤掉合适的候选匹配点,使匹配结果不准确. 为了在匹配的速度与准确率之间取得平衡,提出了自适应动态门限序列的方法. 门限序列中的门限值是递增的,在匹配计算过程中,根据累加误差和,序列中的各个门限可以动态减少,从而减少了匹配运算量,提高了匹配运算速度.

设 n 为最多可选取的随机点个数,$T[n]$为门限序列,$T(k)$表示第 k 个随机点对应的门限,$e(k)$为 k 个随机点的累加误差和. 自适应动态门限序列的基本思想如下:

1) 选取初始门限序列. 为了得到比较能体现基准图特征的初始门限,在基准图中随机选取四角以及中心 5 个点,分别在这 5 个点处计算 n 个

随机不重复点的匹配误差的累加和，取误差和的平均值作为序列中各个门限的初始值，序列中的各个门限的初始值相等，计算公式如下：

$$T(k)=\frac{1}{5}\sum_{m=1}^{5}e(i_m,j_m,n)\quad k=1,\cdots,n \tag{5}$$

2）对基准图中每个不同的(i,j)进行步骤3）中的匹配相关运算.

3）在匹配运算的过程中，$e(k)$同$T(k)$进行比较，并动态调整门限序列，方法如下：

当$k<n$时

$$T(k)=\begin{cases}\dfrac{T(n)+e(k)}{2} & T(k)>\dfrac{T(n)+e(k)}{2}\\ T^2(k) & \text{其它}\end{cases} \tag{6}$$

当$k=n$时

$$T(n)=\begin{cases}T(n) & T(n)\leqslant e(n)\\ e(n) & T(n)>e(n)\end{cases} \tag{7}$$

可见，门限序列是一个单调递增的序列，并在变化的过程中逐渐减小. 但$T(k)$一直大于$T(n)$的一半，为的是不漏掉合适的匹配点.

2.3 随机点的选择方式

传统的SSDA算法使用随机不重复顺序选取随机点，但由于地形的相邻点的统计特征值有相似性，这样会使累加和误差超线性增长. 为了解决这个问题，设计了分组选取随机点的方法.

假设地形高程序列总长度为Q，其中的高程点记为$(1,2,\cdots,Q-1,Q)$，记$\omega=\lfloor Q/n\rfloor$. 将这些高程点尽量平均的分成$n$组，则前$Q-\omega n$组每组中有$\omega+1$个点，其余组有$\omega$个点，即

$$\text{第 } i \text{ 组区间}=\begin{cases}[(i-1)\times(\omega+1)+1,i\times(\omega+1)] & i\leqslant Q-\omega n\\ [(i-1)\times\omega+Q-\omega n+1,\omega i+Q-\omega n] & i>Q-\omega n\end{cases} \tag{8}$$

在取第k个随机点时，就在第k组随机选择一个点，将原来的选择随机不重复点变成了在某个特定组选择随机点. 每一次计算匹配误差时，会得到新的相关性信息，累加误差近似线性增长，能更快地区分出不匹配和匹配序列，及时停止对不匹配序列的匹配计算过程，提高匹配速度.

2.4 算法复杂度分析

传统的TERCOM算法要对每个匹配点做完Q次比较计算，总共做$M\times N\times Q$次，时间复杂度为$O(M\times N\times Q)$；改进的SSDA算法计算次数取决于超过阈值而停止计算时的步数，最坏情况下每次都比较完n个点，则复杂度为$O(M\times N\times n)$.

3 改进的SSDA算法的并行化

地形匹配系统主要用在飞机、导弹等对实时性要求较高的场合，因此常采用并行计算的方法.

3.1 并行性分析与任务映射方案

在改进的SSDA的算法中，各个待匹配点的匹配运算是相互独立的，可以作为数据划分的一个基本的子任务. 但各个待匹配点的运算是不平衡的. 例如，当待匹配点在基准图的边缘时，实时图的一部分可能会落在基准图外面，则不用在这个点进行相关匹配运算了.

为了平衡各处理器上的负载，提出了待匹配点螺旋分配的策略. 以基准图的左上角为开始位置，用螺旋式绕圈的遍历方法，从外到内，把经过的点上的相关匹配计算任务循环分配给各处理器. 这样，每一个处理器得到边界上的点或中心区域上的点的概率是大致相等的，基本上能达到负载平衡的要求. 图1为处理器个数为5的螺旋分配的示意图，其中P_i表示第i个处理器.

P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_0	P_1	P_2
P_2	P_3	P_4	P_0	P_1	P_2	P_3	P_3
P_1	P_2	P_3	P_4	P_0	P_1	P_4	P_4
P_0	P_1	P_4	P_0	P_1	P_2	P_0	P_0
P_4	P_0	P_3	P_3	P_2	P_3	P_1	P_1
P_3	P_4	P_2	P_1	P_0	P_4	P_2	P_2
P_2	P_3	P_2	P_1	P_0	P_4	P_3	P_3
P_1	P_0	P_4	P_3	P_2	P_1	P_0	P_4

图1 任务的螺旋分配示意图

3.2 主从式的并行程序设计模式

本文采用主从式的并行计算模式，在主进程中维护一个公共的全局门限序列，而在每个从进程中维护一个本地独立的门限序列. 主进程接收从进程发送的门限序列，更新全局门限序列，并广播更新后的全局门限序列；收集各从进程计算的本地最优的待匹配点，得到最优的匹配点. 从进程采用改进的SSDA进行匹配计算，向主进程发送计算过程中更新后的门限序列，同时接收主进程发送的门限序列来更新本地序列，计算完成后向主进程发送本地得到的最优的待匹配点.

4 实验结果及分析

实验的硬件环境为IBM刀片集群HS 20系

列,8 个集群节点.每个集群节点为双处理器,并行程序采用 C++和消息传递接口(MPI,Message Passing Tnterface)编写.用高斯分布随机产生数据高程模型中的高程格网矩阵,作为地形匹配区的基准图,对每个基准图随机生成 20 次实时图,进行匹配计算最后取平均值.

4.1　各种算法的比较

串行程序的实验结果如表 1 和图 2 所示.

表 1　匹配区为 1 500×1 500 时各算法的比较

算　法	运行时间/ms	匹配精度/%
基于 MAD 的 TRECOM	13 675	99.8
SSDA 算法	1 730	97
改进的 SSDA 算法	1 005	99.8

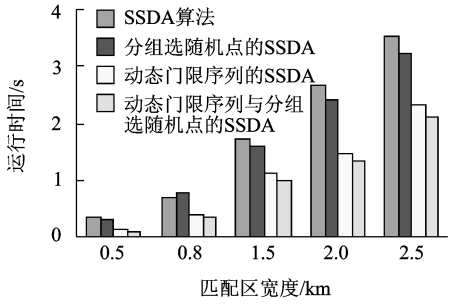


图 2　SSDA 的各算法的运行时间比较

从实验结果可知,SSDA 算法与 TERCOM 相比能较大的提高匹配速度,而改进的 SSDA 算法速度更快.但由于随机点的选取方式的影响,SSDA 的准确率稍差,而改进的 SSDA 则较好.

在改进的 SSDA 的各因素中,分组选取随机点的方式在大多数情况下可以提高匹配速度,但有时传统的 SSDA 在选取随机点时会找到误差较大的点,从而及早地结束匹配计算过程.相比之下,动态门限序列可以及时的发现不匹配序列,结束匹配的过程,从而很大程度上提高了速度.

地形匹配算法的鲁棒性分析比较复杂,需要专门设计试验验证,目前的研究尚未做到.不过通过分析可知,SSDA 算法和传统 TERCOM 算法都是对高程值进行匹配,只是速度更快,应当具有相似的鲁棒性.

4.2　并行程序的加速比

由于采用了主从式的并行模式,至少需要 2 个节点来运行并行程序.首先在一个节点上运行改进的 SSDA 算法的串行程序,然后分别在 2～8 个节点上运行并行程序,结果如图 3 所示.

可见,当并行进程数为 2 时,运行时间比串行程序还要长,这是因为并行程序的 2 个进程一个为主进程,一个为从进程,但只有从进程参与计算,和串行程序相比,只是增加了通信的开销,所以运行时间较长.当进程数增加时,运行速度会显著提高.但当进程数增加到某个值时,此时由于通信的开销占主导地位,并行程序的性能受到了影响,运行时间会逐渐增加.

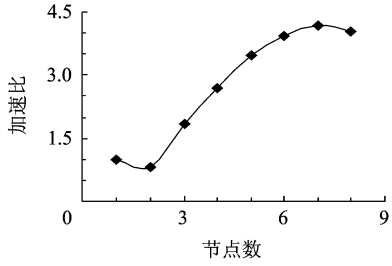


图 3　并行程序的加速比

并行程序的加速比与基准图和硬件的特性有很大关系,在本实验中 7 个节点时有最好的效果,但是推广到其它应用环境时还要依据实验决定取多少节点为宜.

5　结 束 语

本文将应用到地形匹配系统中的 SSDA 算法进行了改进与并行化.实验表明,改进的 SSDA 算法能有效的提高地形匹配的效率与精度,而并行程序也能取得较好的加速比.在实际应用中,可以结合粗-细分层搜索等策略进一步提高性能.

参考文献(References)

[1] 李宁宁,安雪滢,汤国建,等.巡航导弹组合导航中综合地形匹配算法研究[J].飞行力学,2008,26(6):60－63
Li Ningning, An Xueying, Tang Guojian, et al. Synthetic terrain-matching algorithm used in integrated navigation of cruise missile[J]. Flight Dynamics, 2008, 26(6): 60－63(in Chinese)

[2] 冯庆堂.地形匹配新方法及其环境适应性研究[D].长沙:国防科学技术大学机电工程与自动化学院,2005
Feng Qingtang. The research on new terrain elevation matching approaches and their applicability[D]. Changsha: College of Mechaeronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2005(in Chinese)

[3] Barnea D I, Silverman H F. A class of algorithm for digital image registration[J]. IEEE Trans Computers, 1972, C-21: 176－186

[4] Hatabu A, Miyazaki T, Kuroda I. Optimization of decision-timing for early termination of SSDA-bassed block matching [C]//International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway, NJ: IEEE, 2003, 2: 821－824

(编　辑:文丽芳)