

一种改进的邻近粒子搜索算法

梁志剑^{1,2}, 周文娟²

(1 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051; 2 中北大学 计算机与控制工程学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 为提高 SPH 方法中邻近粒子的搜索效率, 采用条形 Point-In-Box(PIB)搜索法和邻域区域相关搜索法交替执行机制, 实现了一种邻近粒子融合搜索算法. 实验中, 分别用融合搜索法的 SPH 方法和条形 PIB 搜索法的 SPH 方法对溃坝现象进行了模拟, 并对条形 PIB 搜索法、邻域相关搜索法和融合搜索法在搜索时间和准确率上进行了比较, 证明了融合算法的可行性和高效性.

关键词: 邻近粒子搜索; 条形 PIB 搜索; 邻域相关搜索; 融合搜索

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)11-095-04

An Improved Neighbor Particle Search Algorithm

LIANG Zhi-jian^{1,2}, ZHOU Wen-juan²

(1 Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory,
North University of China, Taiyuan 030051, China; 2 School of Computer and Control
Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To improve the efficiency of searching for neighboring particles in SPH, a merge search algorithm, which used striped point-in-box (PIB) search algorithm and neighborhood correlation search algorithm work alternatively, was employed. In experiment, the Dam Break phenomenon was simulated by using SPH with merge search algorithm and striped PIB search algorithm respectively. And compare striped search method, neighborhood correlation search method and merge search method by testing the search time and accuracy. All of them proved that this modified search method is highly efficiency and feasibility.

Key words: neighborhood particle search; striped PIB search; neighborhood correlation search; merge search

1 引言

在模拟结构复杂、细节丰富的流体效果时, 基于物理的流体模拟方法比基于非物理的参数建模方法表现得更优, 特别是平滑粒子流体动力学^[1] (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法在这方面的应用更为广泛. 而邻近粒子的搜索又是模拟过程中的一个重要环节, 邻近粒子搜索是为获得某个粒子邻域内包含的所有粒子信息, 通过流体力学中的物理计算方法, 利用其邻域内的粒子对当前粒子的作用来确定该粒子的下一步运动状态, 由于每个时间步内都需要对邻近粒子进行搜索, 因此搜

索效率及搜索正确率对流体模拟效果的好坏起到了关键的作用^[2].

2 邻近搜索法

在解决邻居搜索问题时, 常用的方法主要有直接搜索法、链表搜索法和树形搜索法等. 直接搜索法的时间复杂度为 $O(n^2)$ (n 为粒子数目), 搜索效率低. Monaghan 和 Gingold 提出的链表搜索算法^[2] 在光滑长度不变时, 可大大提高程序的运行效率. 为更有效地搜索变光滑长度的流体粒子, Hernquist 和 Katz 提出了一种综合能力较强的树形搜索算法^[3], 算法可靠性及运行效率更高.

人们不断优化邻近粒子搜索算法,主要分为两个方向:一是基于硬件加速器的改进,如文献[4-6];一是基于算法本身的改进,如文献[7]利用 PIB 搜索法完成了相邻粒子的搜索,不考虑粒子分布的影响,该算法比前面列出的各种算法效率更高,且算法运行时所需的存储空间大大降低.文献[8]对传统 PIB 搜索法进行改进,提出一种条形 PIB 搜索法,并通过实验验证了其性能优于树形搜索法和传统 PIB 搜索法,但该算法在每个时间步内进行邻近粒子搜索时,要对问题域进行条形子集的重新划分.

3 条形 PIB 搜索法和邻域相关搜索法

3.1 条形 PIB 搜索法

条形 PIB 搜索法是对传统 PIB 搜索法的改进,可用于光滑粒子法的相邻粒子搜索,该算法的基本思想如下.

(1) 以包围盒的最长边为条形方向(设条形方向为 Y 方向),沿 X 方向、 Z 方向对整体进行条形子区域分割,条形子区域的数量 N_{sub} 由式(1)得出:

$$N_{\text{sub}} = \left(\text{int} \left[\frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta_s} \right] \right) \left(\text{int} \left[\frac{z_{\max} - z_{\min}}{\Delta_s} \right] \right) \quad (1)$$

条形尺寸大小 Δ_s 由式(2)得出:

$$\Delta_s = 2 \sqrt{h_{\max} h_{\min}} \quad (2)$$

式中, $h_{\max}$ 和 $h_{\min}$ 分别为所有粒子的最大光滑长度和最小光滑长度.

(2) 对条形子区域按式(3)编号,将所有粒子分配到相应的条形区域

$$bh(s_n, s_z) = (s_z - 1)s_n + s_z \quad (3)$$

式中, s_n, s_z 为条形区域在 X 方向和 Z 方向的序号.

(3) 为每个条形子集中的粒子按坐标方向进行排序,并为每个粒子编号;

(4) 以粒子 i 为中心构造边长为 $2h_i$ 的正方体区域,与该正方体区域相交的条形子区域在 X 轴方向的序号范围为 $(\frac{[i_x - h_i]}{\Delta_s}, \frac{[i_x + h_i]}{\Delta_s})$, Z 轴方向的序号范围为 $(\frac{[i_z - h_i]}{\Delta_s}, \frac{[i_z + h_i]}{\Delta_s})$.

其中, i_x, i_z 为粒子 i 在 X 轴和 Z 轴上的坐标值, h_i 为粒子 i 的光滑搜索半径.

(5) 对步骤(4)所述范围的每个条形子区域内的点用二分法搜索,将每个条形子集内搜索到的点合并,得到指定区域内的所有点.

3.2 邻域相关搜索

利用 SPH 方法模拟流体运动时,流体粒子的运动只受到其邻域粒子的影响和作用,因此可将搜索范围定义在粒子周围.这个“周围区域”可以通过相关邻域区域来确定.这就是邻域相关搜索算法的基本思想.搜索原理如下:假设式(4)为粒子 i 在 t 时刻的邻近粒子集

$$N_1 = \{N_i^\gamma \mid \gamma = 1, 2, \dots, \delta\} \quad (4)$$

则在 $t + \Delta t$ 时刻,粒子 i 搜索邻近粒子的范围如式(5)所示.

$$N_2 = \{N_{i_\alpha}^{\beta\gamma} \mid \alpha = 1, 2, \dots, \delta; \beta = 1, 2, \dots, \gamma_\alpha\} \quad (5)$$

式中, N_i^γ 表示粒子 i 的第 γ 个邻近粒子, $N_{i_\alpha}^{\beta\gamma}$ 为粒子 i 的第 α 个邻近粒子的第 β 个邻近粒子.

当问题具有如下特征时:上一时刻不属于粒子 i 的邻域粒子节点 j 在某一时刻进入粒子 i 的邻近区域,继续使用邻域相关搜索法,将出现搜索不到粒子 j 的结果,当越来越多的真实邻域粒子不能被搜索到时,算法将出错.因此,在整个搜索过程中仅使用该算法,尽管搜索速度得到了提高,但搜索精确度大大地降低了.

4 融合搜索算法

4.1 算法描述

结合条形 PIB 搜索法搜索准确度高和邻域相关搜索法搜索速度快的优势,提出了一种邻近粒子的融合搜索算法,按照“条形 PIB 搜索法-邻域相关搜索法”的交替方式完成搜索过程,具体实现步骤如下:

(1) 对所有粒子各个坐标方向的坐标值按升序排序,找出 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}$, 建立以 $x_{\max} - x_{\min}, y_{\max} - y_{\min}, z_{\max} - z_{\min}$ 为边长,以 $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$ 为原点的长方体包围盒,即包含所有数据的最小长方体空间.其中式(6)为该长方体包围盒体积:

$$V = (x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})(z_{\max} - z_{\min}) \quad (6)$$

(2) 用条形 PIB 搜索法得到方形域内的所有粒子;

(3) 若步骤(2)中搜索到的粒子 j 满足式(7),则将粒子 j 记为粒子 i 的邻近粒子,否则粒子 j 不是粒子 i 的邻近粒子

$$d_{ij} < 2\bar{h}_{ij} = h_i + h_j \quad (7)$$

(4) 保存条形 PIB 搜索得到的每个粒子的邻近粒子的编号;

(5) 用邻域相关搜索法对步骤(4)中的邻近粒

子的邻近粒子进行搜索(该过程不需要重新对搜索空间进行划分),依据式(7)判断是否为邻近粒子;

(6) 不断重复步骤(2)~(5),直至满足算法的终止条件(如达到算法的预设时间或算法所要求的精度)为止。

可以采用式(8)求 t 时刻任一粒子 i 的光滑搜索半径

$$h_i = h_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_i} \right)^{1/d} \quad (8)$$

式中, h_0, ρ_0 分别为粒子的初始光滑半径和初始密度, d 为空间维度, ρ_i 为粒子 i 在 t 时刻的密度,根据式(9)求出。

$$\rho_i = \sum_j m_j W(r_i - r_j, h) \quad (9)$$

式中, m_j, ρ_i 表示粒子 j 的质量和密度, r_j 表示粒子 j 的位置, $W(\cdot)$ 表示光滑核函数。光滑核函数采用文献[9]的形式,如式(10):

$$W(R, h) = \frac{1}{3\pi h^2} \times \begin{cases} R^3 - 6R + 6, & 0 \leq R < 1 \\ (2 - R^3), & 1 \leq R < 2 \\ 0, & R \geq 2 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $R = |r_i - r_j|$ 。

4.2 算法复杂度分析

假设问题域中共有 N 个粒子,条形 PIB 算法搜索时,粒子集划分为 M 个条形子集,则每个条形粒子子集的平均粒子数为 N/M ,搜索一个粒子的所有相邻粒子的时间复杂为 $O(M \log(N/M))$,那么搜索粒子集中所有粒子的相邻粒子的时间复杂度为 $O(NM \log(N/M))$;用邻域相关算法搜索时,设每个粒子的邻域粒子数为 P ,则搜索每个粒子的邻近粒子平均需要搜索 $P * P$ 次,搜索所有粒子的邻近粒子需要进行 $P^2 * N$ 次,因此该搜索法的时间复杂度为 $O(N)$ 。综上可知,融合搜索法的时间复杂度为 $\frac{1}{2}(O(NM \log(N/M)) + O(N))$ 。

对于变光滑长度的邻近粒子搜索,条形 PIB 搜索法每个时间步都需要对空间进行重新划分,额外操作占用了一定的搜索时间,而邻域相关搜索法对上一时间步的配对运算存储的数据进行了充分利用,因此,将条形 PIB 搜索法和邻域相关搜索法交替执行在一定程度上可以提高算法的搜索效率。

综上可知,在保证搜索精度的前提下,与条形 PIB 搜索法相比,采用融合搜索法对邻近粒子的查找,理论上可以提高算法的搜索效率。

5 实验测试与分析

仿真实验在 Matlab 2014b 环境下进行,实验中粒子初始密度 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$,初始邻域半径 $h_0 = 0.0015 \text{ m}$ (粒子间距的 1.5 倍),重力加速度 $g = 10.0 \text{ m/s}^2$,粘度 $\mu = 1.003 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,时间步长 $\Delta t = 2 \times 10^{-5} \text{ s}$,邻域粒子的搜索半径由式(8)求得,采用文献[10]的方法求各个粒子的作用力,并采用蛙跳积分法[11]对粒子的位置和速度更新。

5.1 溃坝模拟

分别用条形 PIB 搜索法的 SPH 方法和融合搜索法的 SPH 方法对典型的二维水流溃坝模型进行模拟。初始状态如图 1 所示,在矩形容器(宽度 $W = 2 \text{ m}$,高度 $H = 1.5 \text{ m}$)的左下角位置有一矩形水柱,水柱的高度和宽度分别为 $H_f = 1 \text{ m}$, $W_f = 0.6 \text{ m}$,矩形水柱被夹在容器的竖直的三个墙面(前、后、左)和一个挡板(右)之间保持静止。当把水右侧的挡板迅速移开时,会出现水坝倒塌并迅速冲向容器右侧墙壁的现象,同时伴随着流体反弹、飞溅的效果。图 2 实现了使用条形 PIB 搜索法和融合搜索法的 SPH 方法模拟流体溃坝实验时在两个不同时刻的粒子分布情况。

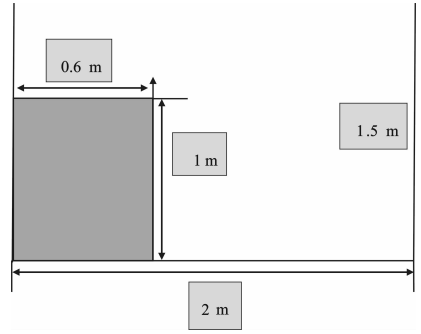


图 1 溃坝模型的初始状态

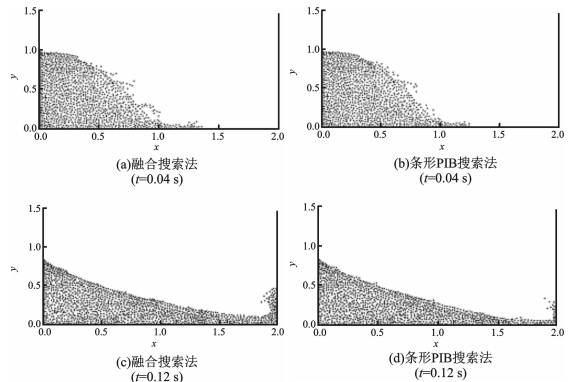


图 2 溃坝中不同时刻的粒子分布情况

从图 2 可以看出,在 $t = 0.04 \text{ s}$ 时,图 2(a)中粒子的最远位置要大于图 2(b)中粒子的最远位置,且

图 2(a)中的流体自由表面细节较图 2(b)复杂. $t=0.12\text{ s}$ 时,图 2(c)中有较多的粒子与壁面反生了碰撞并反弹的现象,而图 2(d)中出现该现象的粒子数量明显少于前者. 即其他条件均一致的情况下,两种搜索法的 SPH 方法模拟出的实验结果存在一定的差距,实验表明融合搜索法具有较高的搜索效率.

5.2 搜索时间对比

实验中分别对不同粒子数量的点集采用条形 PIB 搜索法和融合搜索法对邻近粒子进行了搜索,表 1 所示为融合搜索法和条形 PIB 搜索法分别执行 2 000 次(一次执行两个时间步长)的平均搜索时间.

表 1 条形 PIB 算法和融合算法的搜索时间对比

粒子数	条形 PIB 搜索法	融合搜索法
6 000	0.013	0.011
20 000	0.052	0.049
80 000	0.208	0.179
126 000	0.361	0.286

从表 1 可以看出,采用条形 PIB 算法和融合算法对邻近粒子搜索时,随着粒子数量的增多,两种搜索算法的搜索时间也在不断地增加,但融合搜索算法的搜索时间总低于文献[11]所提出的条形 PIB 搜索算法.

5.3 搜索准确率对比

基于 SPH 方法中时间步长一般取值在 $1\times10^{-6}\sim5\times10^{-5}$ 范围内,实验根据不同的时间步长,对条形 PIB 搜索法、邻域相关搜索法及融合搜索法在搜索准确率上进行了测试. 表 2~4 为粒子数量 N 与各粒子的邻近粒子数 M 不同时,分别对三种搜索算法执行 2 000 次(一次执行两个时间步长)的平均搜索准确率.

表 2 $N=6\ 000,M=20$

时间步长/ s	条形 PIB 搜索法/%	融合搜 索法/%	邻域相关 搜索法/%
1×10^{-6}	100	100	98.33
5×10^{-6}	100	100	97.50
1×10^{-5}	100	100	89.18
5×10^{-5}	100	99.99	71.47

表 3 $N=20\ 000,M=60$

时间步长/ s	条形 PIB 搜索法/%	融合搜 索法/%	邻域相关 搜索法/%
1×10^{-6}	100	100	93.67
5×10^{-6}	100	100	88.71
1×10^{-5}	100	100	83.23
5×10^{-5}	100	99.98	68.07

表 4 $N=126\ 000,M=110$

时间步长/ s	条形 PIB 搜索法/%	融合搜 索法/%	邻域相关 搜索法/%
1×10^{-6}	100	100	92.13
5×10^{-6}	100	100	85.34
1×10^{-5}	100	100	71.57
5×10^{-5}	100	99.98	57.12

从以上结果可以看出,随着粒子总数量和各粒子的邻近粒子数量增多,邻域搜索法的搜索精度不断下降,且时间步长越大,搜索准确率越低;在相同条件下,条形 PIB 搜索法的搜索精度始终保持最优,同时融合搜索算法的精度也保持在 99.95% 以上.

6 结束语

基于融合搜索算法的 SPH 方法增强了对结构复杂、细节丰富流体的模拟效果. 较条形 PIB 搜索算法、邻域相关搜索法,融合搜索算法具有更高的运行效率. 该算法将逐步应用于解决模拟管道中水体的流动问题.

参考文献:

[1] 周光正,葛蔚. 光滑粒子动力学方法在复杂流动中的研究进展[J]. 化工学报,2014,65(4):1145-1161.

[2] Monaghan J J, Gingold R A. Shock simulation by the particle method SPH [J]. Journal of Computational Physics,1983,52(2):374-389.

[3] Hemquist L, Katz N. TreeSPH-A unification of SPH with the hierarchical tree method[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series,1989,70(6):419-446.

[4] 包南森,李正杰,柴亚辉,等. 邻居搜索问题在 CUDA 上基于 KD-TRIE 方法的优化与实现[J]. 上海大学学报(自然科学版),2012,18(3):305-310.

[5] Huang C, Zhu J, Sun H, et al. Efficient fluids simulation and rendering on GPU[C]// Proceedings of the 12th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry. New York,NY, USA:ACM, 2013:25-30.

[6] Wu F, Wang F, Jiang P, et al. A nearest neighbor searches (NNS) algorithm for fast registration of 3D point clouds based on GPGPU[J]. International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering, 2015,11(7):2153-2158.

[7] Hu D, Long T, Xiao Y, et al. Fluid - structure interaction analysis by coupled FE - SPH model based on a novel searching algorithm[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2014, 276(7):266-286.

模拟,并对二者的故障覆盖率和CPU耗时进行对比,结果如表2所示,其中故障仿真工具LIFTING使用平行故障模拟法,且r(SAF)和r(STF)分别表

表2 不同算法对ISCAS'85标准电路的故障模拟结果对比

电路	逻辑门个数	测试向量个数	LIFTING		本文算法		
			CPU耗时/s	r(SAF)/%	CPU耗时/s	r(SAF)/%	r(STF)/%
C17	6	9	0.063	68.00	0.015	68.00	56.00
C432	160	76	10.545	96.48	3.073	97.05	93.41
C499	202	83	35.004	96.05	4.511	97.10	95.46
C880	383	97	49.984	96.33	4.801	96.70	94.24
C1355	546	128	279.29	95.76	56.96	95.63	90.94

由表2可知,对于同一电路,使用相同的测试向量集,本文算法的固定故障覆盖率接近于故障仿真工具LIFTING,CPU耗时却大幅降低,且随电路复杂度的增加,检测效率的提升更加显著.另外,本文算法还可同时检测跳变时延故障,证明了本文算法的精确性和高效性.

5 结束语

本文同时考虑了自屏蔽和多路敏化现象对扇出源临界性的影响,并使用18值真值表进行符号仿真,本文算法可以同时检测固定故障和跳变时延故障,从而实现了临界路径跟踪算法的改进和完善.与传统的故障仿真方法相比,改进后的临界路径跟踪算法在故障模拟精度和诊断效率方面都有了显著提升,证明了本文算法的精确性和高效性.

参考文献:

[1] 杨士元. 数字系统的故障模拟与可靠性设计[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

[2] Abramovici M, Menon P R, Miller D T. Critical proceedings of the 20th path tracing - An alternative to fault simulation [C]// IEEE Design Automation Conference, Piscataway NJ,USA;ACM, 1983; 214-220.

[3] Girard P, Landrault C, Pravossoudovitch S. A reconvergent fanout analysis for the CPT algorithm used in

示固定故障和跳变时延故障的故障覆盖率. 程序运行环境为Windows平台的Visual Studio 2010,计算机配置:内存为4 GB,CPU为AMD Phenom x4.

delay-fault diagnosis [C]// proceedings of the date European Test Conference, Rotterdam, Netherlands; IEEE, 1993; 83-88.

[4] Wu L, Walker D M H. A fast algorithm for critical path tracing in VLSI digital circuits [C]// IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems. Monterey, CA, USA; IEEE, 2005; 178-186.

[5] Bosio A, Girard P, Pravossoudovich S, et al. SoC symbolic simulation: a case study on delay fault testing [J]. IEEE Workshop on Design Diagnostic of System, 2008,16(5):966-975.

[6] Bosio A, Di Natale G. LIFTING: a Flexible Open-so simulator [C]// proceedings of the 20087 17th Asian Test Symposium, Washington,DC,USA;ACM,2008; 35-40.

作者简介:

侯明星 女,(1990-),硕士. 研究方向为数字电路建模和故障模拟.

何亮 男,(1975-),博士,讲师. 研究方向为数据挖掘与软件工程.

黄斌科(通讯作者) 男,(1974-),博士,副教授. 研究方向为微波毫米波器件、数字电路故障诊断.
E-mail: bkhuang@mail. xjtu. edu. cn.

张喜俊 男,(1980-),硕士,高级工程师. 研究方向为测试测量仪器软件.

(上接第98页)

[8] 肖毅华,张浩锋,胡德安,等. 基于改进PIB搜索法的SPH方法在高速冲击模拟中的应用[J]. 振动与冲击, 2015,34(23):88-92.

[9] 杨秀峰,刘谋斌. 光滑粒子动力学SPH方法应力不稳定性的一种改进方案[J]. 物理学报, 2012, 61(22): 255-262.

[10] 张中兴,李冬梅,李涛,等. 一种新的有效模拟不可压缩流体的SPH方法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(3):946-949.

[11] 李会珍. 采用SPH方法的拉格朗日方式流体运动模拟 [D]. 合肥:安徽大学,2013.

作者简介:

梁志剑 男,(1978-),博士,副教授,硕士生导师. 研究方向为仿真与可视化、计算机技术.
E-mail: zhijianliang@163. com.

周文娟 女,(1991-),硕士研究生. 研究方向为仿真与可视化.