A Particle-Based GPU Parallel Method for Fast and High-Quality Tetrahedral Mesh Generation

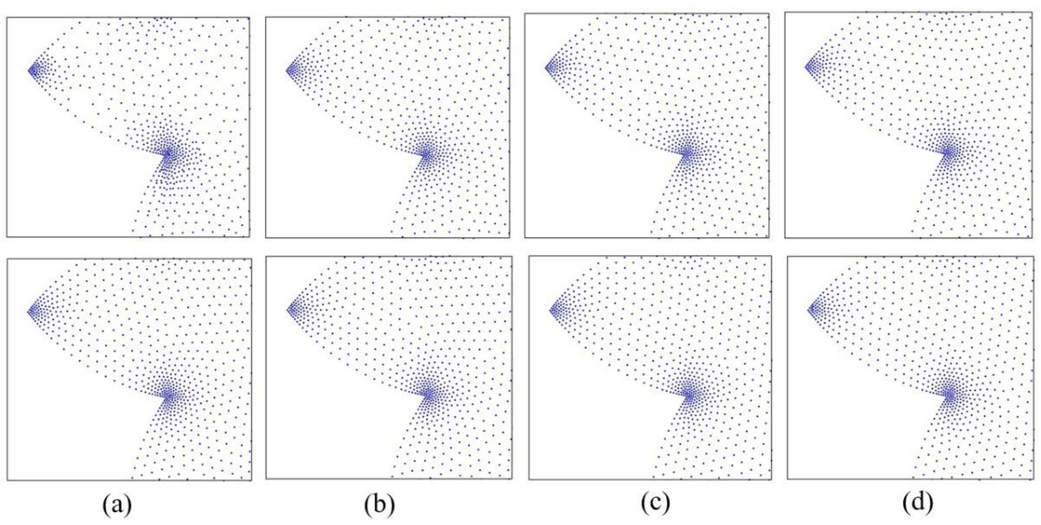
Yuefan Hu[1] Honglei Bai[1] Chunguang Xu[1] Huaibao Zhang[1]*

[1] School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China * 通讯作者：zhanghb28@mail.sysu.edu.cn

一、研究背景

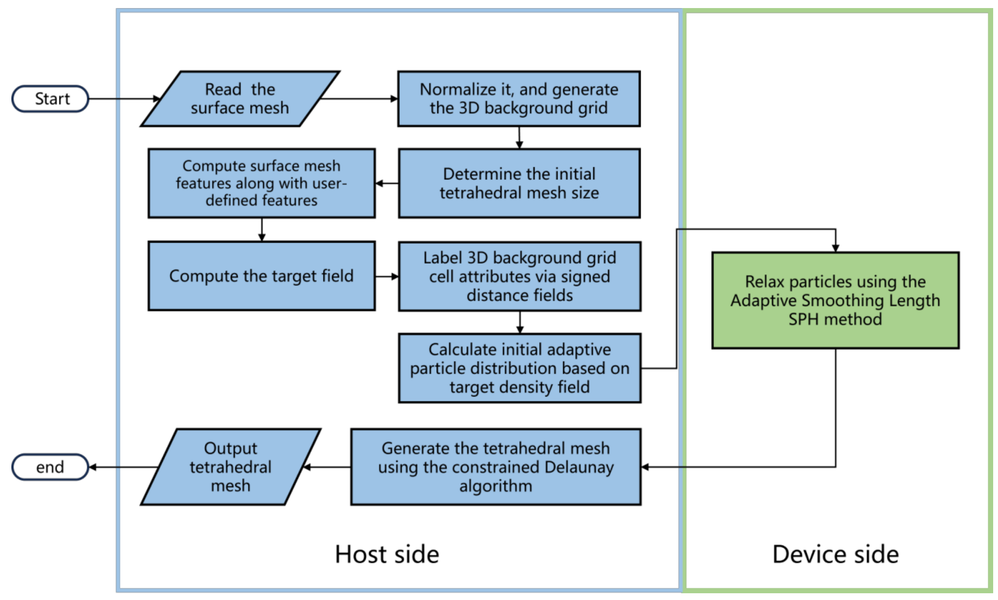
- 网格生成约占数值仿真总耗时的 60%，被 NASA CFD Vision 2030 列为关键瓶颈；其中四面体网格应用最广。
- 主流方法（Delaunay、推进波前、八叉树）均为串行架构，难以适配 GPU 细粒度并行。
- **粒子类方法**将网格点视为相互作用粒子：SPH 松弛得到适配尺寸场的优化点云，再由 Delaunay 连接成网格；但迭代开销大、效率受限。
- **本文思路：GPU 并行 ASL-SPH 粒子松弛 + 背景网格积分自适应初始布点，兼顾效率与质量。**

PLC 表面网格输入 → **GPU 并行 ASL-SPH 松弛** → **TetGen Delaunay 四面体化**

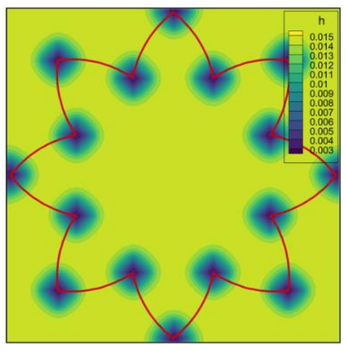


粒子松弛过程（500/2000/5000/10000 步）：上排为均匀初始分布，下排为自适应初始分布——后者约 500 步即接近平衡，收敛显著加快。

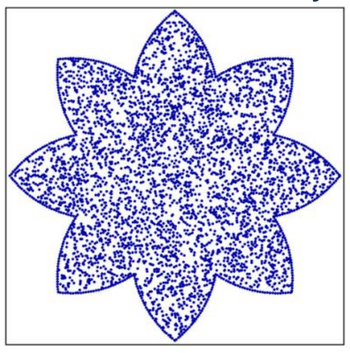
二、研究方法



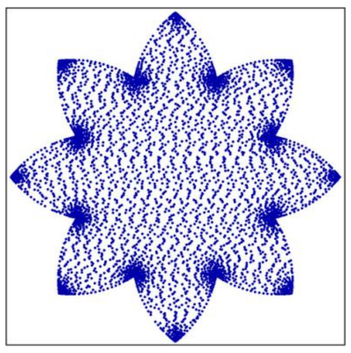
- **目标场：**尺寸场 $h_t(x)$、密度场 $\rho_t = 1/h_t^3$ 与符号距离场，存于 GPU 友好的三维均匀背景网格。
- **自适应初始布点：**逐背景网格积分 $m_{cell} = V_{cell}\cdot\rho_{t,cell}$，累计质量每满 1 即在单元内随机放置一个粒子。
- **ASL-SPH 松弛：**光滑内核采用Wendland C6 核；光滑长度按目标尺寸场插值，压力驱动粒子趋向目标密度。
- **GPU 并行（CUDA）：**哈希网格邻域搜索 + Thrust 排序，一线程一粒子；收敛后由 TetGen 完成受约束 Delaunay 四面体化。



目标尺寸场



均匀初始分布



自适应初始分布

三、结果与讨论

2D 花朵域：平均粒子密度收敛历程（红：均匀初始；绿：自适应初始）

自适应初始分布加速收敛

收敛步数 6000 → 1000，时间 2.510 s → 0.683 s，约 3.7× 提速；网格质量相当，θavg 54.8° vs 54.0°。

GPU 并行高效加速（Lake 域）

粒子松弛 0.635 s（GPU） vs 5.669 s（CPU），约 8.9× 提速，质量一致，$\theta_{avg} \approx 53.8°$。

五个三维模型与 TetGen 对比（相同边界输入，表中为 本文 / TetGen）

模型	总时间 s	θavg °	SEavg
齿轮	8.9 / 11.5	43.3 / 40.9	0.304 / 0.340
M6 机翼	5.9 / 6.6	44.7 / 41.2	0.280 / 0.336
火箭	12.3 / 17.4	45.6 / 41.4	0.266 / 0.333
潜艇	20.8 / 24.0	43.8 / 41.5	0.297 / 0.332
汽车	33.5 / 47.1	46.3 / 41.6	0.251 / 0.330

本文方法

TetGen

角度质量分布

SE 分布

汽车模型：本文方法的截面单元质量（左）与质量分布（右）均优于 TetGen，高质量单元占比明显更高。

四、结论

22.4%–29.0%
总生成时间缩短
（对比 TetGen 完整流程）

≈8.9×
GPU 粒子松弛加速
（Lake 域，质量一致）

6000 → 1000
收敛步数减少
（自适应初始分布）

- 提出 GPU 并行的 ASL-SPH 粒子松弛框架：空间索引、邻域搜索与物理量计算全线 CUDA 并行。
- 提出基于三维背景网格局部积分的自适应初始粒子分布策略，显著加速收敛。
- 生成速率 1.26–1.49×10⁵ cells/s；网格生成总时间缩短约 22.4%–29.0%。
- 网格质量整体提升：θ_{avg} 达 43.35°–46.33°，TetGen 为 40.94°–41.58°；平均 SE 全部更低。

本文方法

TetGen

齿轮模型截面角度质量对比

交流联系

通讯作者：Huaibao Zhang
zhanghb28@mail.sysu.edu.cn
第一作者：Yuefan Hu
hyfgrid@163.com
中山大学 航空航天学院