



Применение СПО для решения задач аэро- и газовой динамики

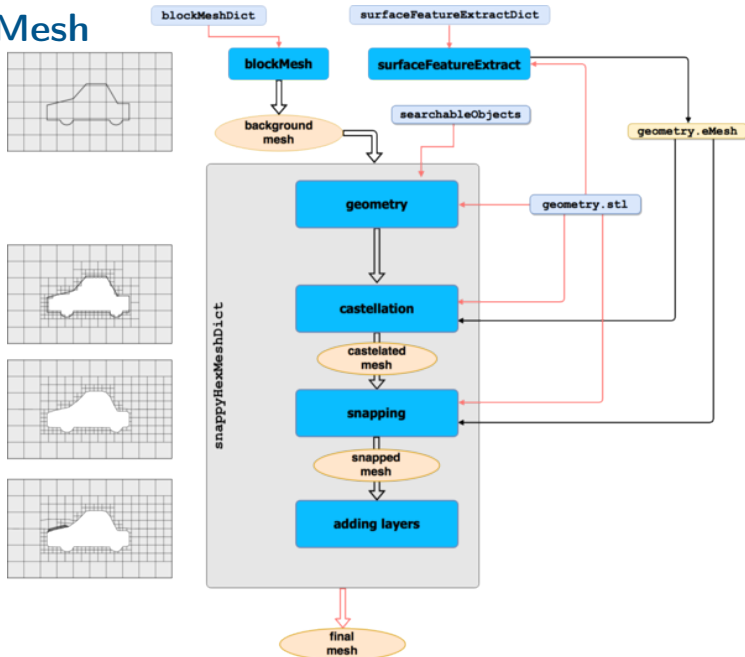
Семинар 3. Построение сетки вокруг формы с использованием утилиты `snappyHexMesh`.

Преподаватель: Романова Дарья Игоревна

Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

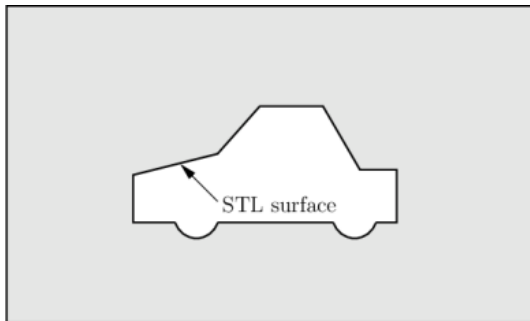
2023

snappyHexMesh



snappyHexMesh

Изучим утилиту создания сетки `snappyHexMesh`, поставляемую с пакетом OpenFOAM. Утилита `snappyHexMesh` автоматически генерирует трехмерные сетки, содержащие шестигранники (hex) на основе геометрии триангулированной поверхности в формате стереолитографии (STL). Утилита позволяет дробить сетку в выделенных областях, создавать слои измельчения, мельчить сетку в соответствии с требованиями качества сетки. Все эти действия утилита `snappyHexMesh` может проводить в параллельном режиме.



Файлы необходимые для запуска

Для запуска утилиты `snappyHexMesh` необходимы:

- ▶ файлы данных поверхности в формате STL (двоичном или ASCII), расположенные в подкаталоге `constant/triSurface` каталога кейса;
- ▶ фоновую сетку из параллелепипедов, которая определяет протяженность расчетной области и плотность сетки базового уровня (обычно генерируется с использованием `blockMesh`);
- ▶ словарь `snappyHexMeshDict` с соответствующими записями, расположенный в подкаталоге `system` каталога кейса.

snappyHexMeshDict

Файл snappyHexMeshDict содержит в себе выключатели для контроля различных этапов создания сетки и также вложенные словари для описания этих этапов.

Ключевое слово	Описание	Пример
castellatedMesh	Создать зубчатую сетку?	true
snap	Есть ли стадия привязки к поверхности?	true
addLayers	Добавить слои у поверхности?	true
mergeTolerance	Допуск слияния как доля ограничивающей рамки исходной сетки	1e-06
debug	Управляет записью промежуточных сеток и трафаретной печатью	
	— Записывает только конечную сетку	0
	— Записывает промежуточные сетки	1
	— Записывает volScalarField с уровнем ячейки для постобработки	2
	— Записывает текущие пересечения как .obj	4

snappyHexMeshDict

Ключевое слово	Описание
geometry	Подсловарь всей используемой геометрии поверхности
castellatedMeshControls	Подсловарь элементов управления для зубчатой сетки
snapControls	Подсловарь элементов управления для привязки к поверхности
addLayersControls	Подсловарь элементов управления для добавления слоев
meshQualityControls	Подсловарь элементов управления качеством сетки

snappyHexMeshDict

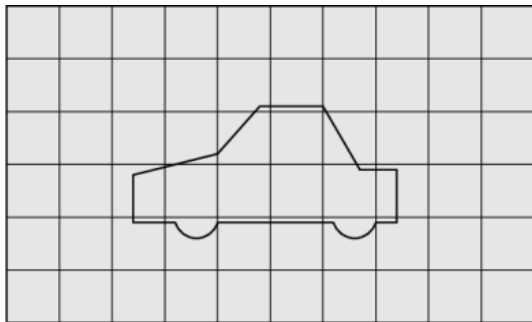
Вся геометрия, используемая `snappyHexMesh`, указана в подсловаре `geometry` в словаре `snappyHexMeshDict`. Геометрию можно указать с помощью поверхности STL или объектов ограничивающей геометрии в `blockMesh` OpenFOAM.

```
0 geometry{
1     surface.stl { // STL filename
2         type triSurfaceMesh;
3         regions{
4             secondSolid {           // Named region in the STL file
5                 name mySecondPatch; // User-defined patch name
6             }
7         }
8     }
9     box1x1x1 { // User defined region name
10         type      searchableBox;      // region defined by bounding box
11         min       (1.5 1 -0.5);
12         max       (3.5 2 0.5);
13     }
14 };
```

Полный список аналитических форм, например, для объектов ограничивающей геометрии можно найти в интернете: <https://www.openfoam.com/documentation/cpp-guide/html/guide-meshing-snappyhexmesh-geometry.html>

Создание фоновой сетки

Перед выполнением `snappyHexMesh` пользователь должен создать фоновую сетку из шестигранных ячеек, которая заполняет всю область внутри внешней границы.



Создание фоновой сетки с помощью утилиты blockMesh

Это можно сделать с помощью blockMesh. При создании фоновой сетки необходимо соблюдать следующие критерии:

- ▶ сетка должна состоять исключительно из шестигранников (желательно кубов);
- ▶ соотношение сторон ячеек должно быть приблизительно равно 1, по крайней мере вблизи поверхностей, к которым применяется последующая процедура привязки, иначе сходимость процедуры привязки будет медленной, а возможно приведёт к ошибке;
- ▶ должно быть хотя бы одно пересечение ребра ячейки с поверхностью STL, т.е. сетка из одной ячейки не подойдет.

Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

Измельчение сетки выполняется в соответствии со спецификацией, предоставленной пользователем в подсловаре `castellatedMeshControls` в `snappyHexMeshDict`.

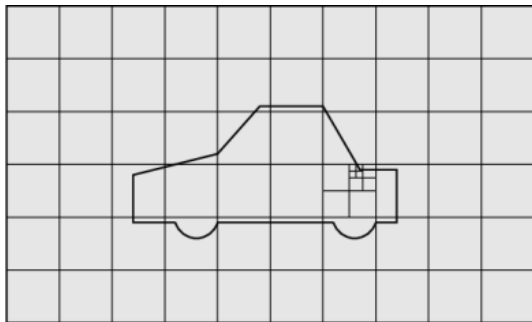
Ключевое слово	Описание	Пример
<code>locationInMesh</code>	Вектор указывающий на точку внутри сетки. Вектор должен указывать внутрь какой-либо ячейки (не на ребро или грань) как до, так и после процедуры измельчения сетки	(5 0 0)
<code>maxLocalCells</code>	Максимальное количество ячеек на процессор во время измельчения	10^6
<code>maxGlobalCells</code>	Общий лимит ячеек во время процедуры измельчения (т.е. перед процедурой удаления)	$2 \cdot 10^6$
<code>minRefinementCells</code>	Минимальное количество ячеек для измельчения, по достижении этой величины процесс прекращается	0

Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

Ключевое слово	Описание	Пример
<code>maxLoadUnbalance</code>	Максимальный дисбаланс нагрузки процессоров во время процедуры измельчения (значение 0 задаёт абсолютный баланс)	0.1
<code>nCellsBetweenLevels</code>	Количество буферных слоев ячеек между разными уровнями измельчения	1
<code>resolveFeatureAngle</code>	Применяет максимальный уровень измельчения к ячейкам, которые пересекаются с поверхностью STL под углом превышающим заданный	30
<code>allowFreeStandingZoneFaces</code>	Разрешить создание граней отдельно стоящих зон	false
<code>features</code>	Список особенностей для применения процедуры измельчения	
<code>refinementSurfaces</code>	Словарь поверхностей требующих процедуры измельчения	
<code>refinementRegions</code>	Словарь регионов требующих измельчения	

Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

Процесс измельчения начинается с ячеек пересекающихся с поверхностью STL, как показано на рисунке



Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

Ячейки пересекающиеся с поверхностью STL перечислены в файле `features.eMesh`. Подсловарь `features` содержит в себе имена файлов `edgeMesh`, содержащих в себе перечисления рёбер пересечения с поверхностью STL и уровень измельчения, который необходимо реализовать.

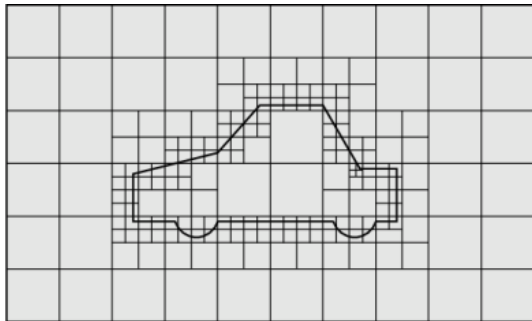
```
0 features
1 (
2     {
3         file "features.eMesh"; // file containing edge mesh
4         level 2;                // level of refinement
5     }
6 );
```

Файл `edgeMesh` может быть получен с помощью утилиты `surfaceFeatureExtract`:

```
0 surfaceFeatureExtract -includedAngle 150 surface.stl features
```

Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

Измельчённые ячейки, выбранные в соответствии с элементами, перечисленными в файле `features.eMesh`, показаны на рисунке



Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

В подсловаре `refinementSurfaces` словаря `castellatedMeshControls` объявляются все поверхности STL с указанием уровня по умолчанию для минимального и максимального измельчения. Минимальный уровень наносится обычно по всей поверхности; максимальный уровень применяется к ячейкам, которые могут видеть пересечения, образующие угол, превышающий угол, указанный в `resolveFeatureAngle`.

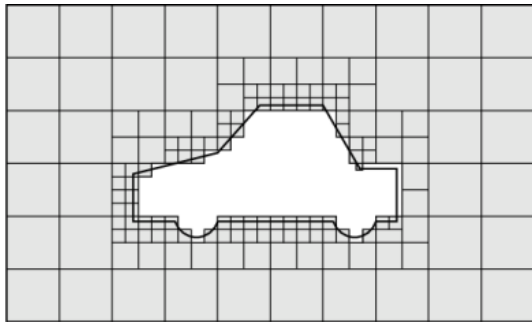
Дополнительное измельчение может быть задано для одной или нескольких конкретных областей поверхности STL. Эти области перечисляются в подсловаре `regions`. Для каждой такой области создается подсловарик с указанием уровня измельчения.

Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

```
0 refinementSurfaces
1 {
2     sphere.stl
3     {
4         level (2 2); // default (min max) refinement for whole surface
5         regions
6         {
7             secondSolid
8             {
9                 level (3 3); // optional refinement for secondSolid region
10            }
11        }
12    }
13 }
```

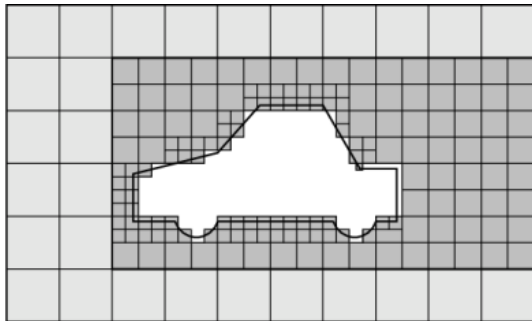
Удаление ячеек

После окончания процедуры измельчения по подсловарям `features` и `refinementSurfaces` начинается процедура удаления ячеек. Для удаления необходима область полностью находящаяся внутри поверхности STL. Область, в которой сохраняются клетки, задаётся вектором указывающим внутрь этой области, заданным ключевым словом `locationInMesh` в `castellatedMeshControls`. Ячейки сохраняются, если, примерно, 50% и более их объема приходится на область. Остальные ячейки удаляются.



Измельчение ячеек в регионах

Ячейки, находящиеся внутри некоторого региона могут быть дополнительно измельчены, как показано на рисунке (область закрашенная тёмным дополнительно измельчена).



Измельчение ячеек в регионах

Регионы для дополнительного измельчения перечислены в подсловаре `refinementRegions` словаря `castellatedMeshControls`. Дополнительное измельчение может быть применено к ячейкам

- ▶ находящимся внутри некоторого объёма,
- ▶ находящимся снаружи некоторого объёма,
- ▶ находящимся на некотором расстоянии от STL поверхности.

Для регионов измельчения задаётся уровень необходимого измельчения.

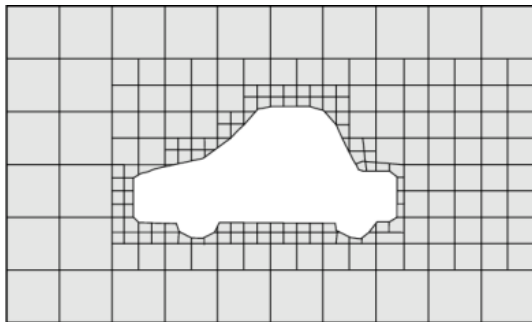
Измельчение ячеек в регионах

```
0 refinementRegions
1 {
2     box1x1x1
3     {
4         mode inside;
5         levels ((1.0 4));           // refinement level 4 (1.0 entry ignored)
6     }
7     sphere.stl
8     {                               // refinement level 5 within 1.0 m
9         mode distance;             // refinement level 3 within 2.0 m
10        levels ((1.0 5) (2.0 3)); // levels must be ordered nearest first
11    }
12 }
```

Уровень измельчения всегда задаётся в формате ((<дистанция> <уровень>)), в случае режима измельчения внутри подобласти параметр <дистанция> игнорируется. На различном удалении от STL поверхности можно задать различный уровень измельчения, уровни перечисляются в порядке возрастания дистанции.

Привязка к поверхности

Следующий этап процесса создания сетки включает в себя перемещение точек вершин ячеек на STL поверхность, чтобы удалить зубчатую поверхность сетки.



Привязка к поверхности

Процесс привязки:

1. сместить вершины зубчатой границы на поверхность STL;
2. перераспределить более равномерно внутреннюю сетку в соответствии с перемещёнными вершинами;
3. найти вершины, смещение которых привело к нарушению параметров качества сетки;
4. уменьшить смещение таких вершин и перераспределить внутреннюю сетку (повторяется до тех пор, пока требования к качеству сетки не будут удовлетворены).

Привязка к поверхности

Настройки для процедуры привязки вершин к поверхности перечислены в подсловаре `snapControls` словаря `snappyHexMeshDict`.

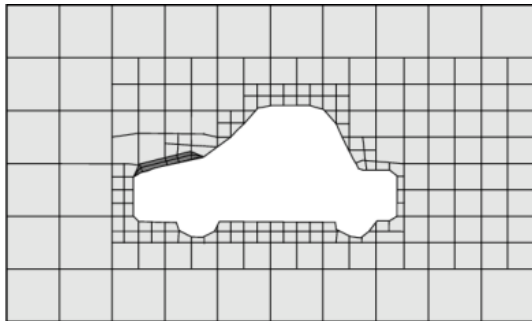
Ключевое слово	Описание	Пример
<code>nSmoothPatch</code>	Количество итераций сглаживания	3
<code>tolerance</code>	Отношение расстояния до точек от края к локальной максимальной длине края	4.0
<code>nSolveIter</code>	Количество итераций смещения внутренней сетки	30
<code>nRelaxIter</code>	Максимальное количество итераций перемещения точки с последующим смещением внутренней сетки	5
<code>nFeatureSnapIter</code>	Количество итераций создания новых ячеек с последующей привязкой вершин и смещением внутренней сетки для удовлетворения критериев качества сетки	10

Привязка к поверхности

Ключевое слово	Описание	Пример
<code>implicitFeatureSnap</code>	Локальный поиск вершин (по геометрическим параметрам)	false
<code>explicitFeatureSnap</code>	Глобальный поиск вершин с использованием параметров <code>castellatedMeshControls</code>	true
<code>multiRegionFeatureSnap</code>	Поиск вершин между несколькими поверхностями с использованием глобального поиска	false

Дополнительные слои сетки

Сетка полученная после этапа привязки вершин может быть подходящей для использования, однако ячейки вдоль STL поверхностей в ней могут быть распределены неравномерно. Для исправления этого недостатка существует дополнительный этап создания слоя ячеек сетки выровненных вдоль поверхности STL, как показано на рисунке.



Дополнительные слои сетки

Процесс добавления слоя сетки включает в себя отодвигание ячеек от STL поверхности посредством сжатия и вставку дополнительных слоев ячеек следующим образом:

1. сетка отодвигается от поверхности на заданную толщину в направлении внешней нормали к поверхности;
2. перераспределение сетки для равномерности из-за перемещения;
3. проверка удовлетворения критериев качества сетки, если критерии качества не удовлетворяются, то изменяется толщина смещения сетки и заново выполняется перераспределение сетки. В случае, если удовлетворить критерии качества не представляется возможным ни при какой величине смещения слои не вставляются;
4. если критерии качества удовлетворены, вставляются дополнительные слои сетки;
5. проверка удовлетворения критериев качества сетки, если критерии качества не удовлетворяются, то слои удаляются и заново выполняется этап перераспределения сетки.

Дополнительные слои сетки

Процедура добавления слоя использует настройки из подсловаря `addLayersControls` в словаре `snappyHexMeshDict`.

Ключевое слово	Описание	Пример
<code>layers</code>	Словарь перечисления дополнительных слоёв	
<code>relativeSizes</code>	Толщина слоя задаётся относительной величиной к неискаженному размеру ячейки вне слоя или абсолютной?	<code>true</code>
<code>expansionRatio</code>	Коэффициент расширения для слоев сетки	<code>1.0</code>
<code>finalLayerThickness</code>	Толщина самого дальнего от поверхности слоя, относительная или абсолютная в соответствии с записью <code>relativeSizes</code>	<code>1</code>
<code>firstLayerThickness</code>	Толщина ближайшего к поверхности слоя	<code>0.3</code>
<code>thickness</code>	Общая толщина всех слоев	<code>0.3</code>
<code>minThickness</code>	Минимальная общая толщина всех слоев, ниже которой дополнительные слои не добавляются	<code>0.1</code>

Дополнительные слои сетки

Ключевое слово	Описание	Пример
nGrow	Количество связанных слоев, которые не утолщаются во время этапа перераспределения сетки	1
featureAngle	Угол пересечения грани с поверхностью, выше которого измельчение происходить не будет	60
maxFaceThicknessRatio	Максимальное отношение для поверхности грани, выше которого измельчения не происходит (полезно для деформированных ячеек)	0.5
nSmoothSurfaceNormals	Количество итераций перераспределения (сглаживания) для нормалей к поверхности	1
nSmoothThickness	Толщина слоя сглаживания (перераспределения ячеек) от поверхности STL	10
minMedialAxisAngle	Угол, используемый для захвата точек медиальной оси	90

Дополнительные слои сетки

Ключевое слово	Описание	Пример
<code>maxThicknessToMedialRatio</code>	Уменьшение растяжения слоя при перераспределении сетки там, где отношение толщины к медиальному расстоянию велико	0.3
<code>nSmoothNormals</code>	Количество итераций перераспределения внутренних нормалей сетки	3
<code>nRelaxIter</code>	Максимальное количество итераций перераспределения сетки	3
<code>nBufferCellsNoExtrude</code>	Создание буферного слоя на границе старого и нового слоёв сетки	0
<code>nLayerIter</code>	Общее максимальное количество итераций добавления слоев	50
<code>nRelaxedIter</code>	Максимальное количество итераций, после которых используются элементы управления в подсловаре <code>relaxed</code> словаря <code>meshQuality</code>	20

Дополнительные слои сетки

Подсловарь `layers` содержит перечисление границ, требующих добавления дополнительных слоёв сетки.

```
0 layers
1 {
2     sphere.stl_firstSolid
3     {
4         nSurfaceLayers 1;
5     }
6     maxY
7     {
8         nSurfaceLayers 1;
9     }
10 }
```

Контроль качества сетки

Качество сетки контролируется опциями в подсловаре `meshQualityControls` в `snappyHexMeshDict`.

Ключевое слово	Описание	Пример
<code>maxNonOrtho</code>	Максимально допустимая неортогональность; 180 — отключено	65
<code>maxBoundarySkewness</code>	Максимальная скошенность грани (0 — выключено)	20
<code>maxInternalSkewness</code>	Максимальная скошенность внутренней грани (0 — выключено)	4
<code>maxConcave</code>	Максимально допустимая вогнутость грани (180 — выключено)	80
<code>minFlatness</code>	Отношение минимальной проекции площади к фактической площади (-1 — выключено)	0.5
<code>minVol</code>	Минимальный объём пирамиды (большое негативное число -10^{30} — выключено)	10^{-13}

Контроль качества сетки

Ключевое слово	Описание	Пример
minTetQuality	Минимальное качество тетраэдра, заданное отношением нормалей к граням из центра тетраэдра (большое негативное число -10^{30} — выключено)	10^{-13}
minArea	Минимальная площадь грани (-1 — выключено)	-1
minTwist	Минимальный поворот грани (-1 — выключено)	0.05
minDeterminant	Минимальный определитель ячейки: 1 задаёт куб, 0 — вырожденную ячейку	0.001
minFaceWeight	от 0 до 0.5	0.05
minVolRatio	от 0 до 1	0.01
minTriangleTwist	положительное число (-1 — выключено)	-1
nSmoothScale	Количество итераций распределения ошибок	
errorReduction	Величина уменьшения смещения в точках ошибки	0.75
relaxed	Подсловарь, который может включать измененные значения для указанных выше записей ключевых слов, которые будут использоваться при превышении nRelaxedIter в процессе добавления слоя	

Задачи

1. Изменить уровень измельчения сетки на пересечении со сферой на 3
2. Создать прямоугольную область (включающую в себя цилиндр и область за ним) с измельчением сетки до уровня 2
3. Создать дополнительный слой сетки толщиной в 3 ячейки
4. Изучить влияние качества сетки на аэродинамические коэффициенты (python3 CdCl.py)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Список литературы