

АЛГОРИТМ УЧЕТА КОНТРОЛЬНЫХ ОБЪЕМОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕУГОЛЬНЫХ СЕТОК ДЛЯ ЗАДАЧ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ В ПРЕПОСТПРОЦЕССОРЕ ЛОГОС

*Панкратов Дмитрий Михайлович (DMPankratov@vniief.ru),
Цалко Тарас Валентинович (TVTsalco@vniief.ru)*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе рассматривается подход к учету контрольных объемов при построении поверхностной треугольной сетки. В процессе учета контрольного объема проводится поиск пересечения треугольников модели с контрольным объемом для получения точек, лежащих на линии сечения поверхности исходной модели и контрольного объема. Полученные таким образом узлы вставляются в сетку для улучшения дискретизации модели. Для того чтобы задать в узлах сетки массив размеров, производится поиск треугольников, лежащих внутри контрольного объема. Результатом этапа учета контрольных объемов является вставка новых узлов в исходную модель и массив размеров, заданных в узлах сетки. Полученные на этом этапе данные передаются последующим этапам для дальнейшего перестроения сетки.

Ключевые слова: пакет программ ЛОГОС, препостпроцессор, генератор поверхностной треугольной сетки, контрольный объем.

LOGOS PREPOSTPROCESSOR: AN ALGORITHM OF USING CONTROL VOLUMES IN GENERATION OF TRIANGULAR SURFACE MESHES FOR AEROHYDRODYNAMICS MODELING

*Pankratov Dmitry Mikhailovich (DMPankratov@vniief.ru),
Tsalko Taras Valentinovich (TVTsalco@vniief.ru)*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper describes an approach to using control volumes when generating triangular surface meshes. In the control volume consideration process, searching for intersections of model triangles with the control volume is performed to detect points lying on the section line of the original model and control volume. These nodes are inserted in a mesh to improve model discretization. Detection of triangles inside the control volume is performed with a purpose of setting the sizes of mesh nodes. The stage of using control volumes results in new nodes inserted in the original model and the arrays of sizes at the mesh nodes. The data obtained at this stage is passed to the next stages for the further remeshing.

Key words: LOGOS software package, pre-postprocessor, surface triangular mesh generator, control volume.

Введение

В настоящее время в рамках работ по пакету программ ЛОГОС, разрабатываемом во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», проводится развитие генератора поверхностной треугольной сетки, который совмест-

но с генератором объемной сетки [1] проводит построение расчетной сеточной модели, применяемой в широком классе задач.

Описываемый в докладе алгоритм учета контрольных объемов является одним из этапов построения поверхностной треугольной сетки.

Целью применения контрольных объемов является задание сгущений сетки в определенных пользователем областях без выделения этих областей в отдельные границы. Контрольные области могут задаваться аналитически в виде прямоугольного параллелепипеда, сферы, усеченного конуса, тонкостенного цилиндра, так и в виде произвольного замкнутого тела, описанного набором треугольников. Для обобщения работы со всеми перечисленными формами в библиотеке поверхностного генератора используется только представление в виде замкнутой фасеточной поверхности. Остальные формы приводятся к этому виду перед запуском построения поверхностной сетки.

Описание алгоритма учета контрольных объемов

Алгоритм учета контрольных объемов можно разделить на три части:

1. Встраивание в сетку дополнительных узлов.
2. Поиск областей модели, входящих в контрольный объем.
3. Задание размеров в узлах для дальнейшего перестроения.

Так как на модели может быть задано несколько контрольных объемов, то описанная последовательность шагов выполняется с ними поочередно, поэтому при дальнейшем более подробном описании шагов будет упоминаться один контрольный объем.

Для ускорения пространственного поиска в библиотеке поверхностного генератора используется К-мерное дерево [2]. Построение к-мерного дерева осуществляется путем построения габаритной коробки для исходной модели, с последующим поочередным разрезанием исходного блока на меньшие блоки плоскостями, совпадающими с плоскостями образованными осями координат.

Алгоритмы библиотеки используют терминальные узлы, имеющие вид осе-ориентированных параллелепипедов и хранящие список треугольников, лежащих внутри или пересекающих их. Обычно алгоритм пространственного поиска заключается в переборе блоков дерева и переборе треугольников внутри блока.

На рис. 1 схематично изображено разбиение пространства на блоки к-мерным деревом.

Поскольку информация о занижении размеров габаритной коробки передается для дальнейшего перестроения сетки в виде приписанных к узлам размеров, большую важность имеет детализация исходной сетки в области, охватываемой контрольным объемом.

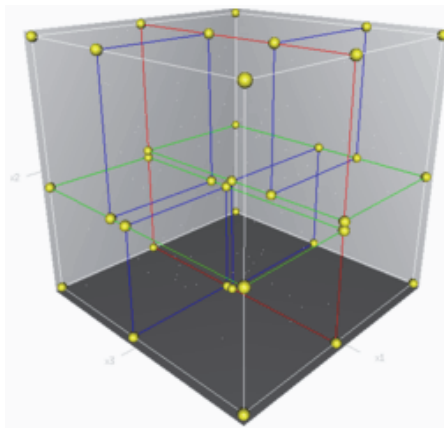


Рис. 1. Схематичное изображение к-мерного дерева

На моделях с низкой детализацией, например, полученных путем тесселяции параметрической геометрии может наблюдаться недостаточное количество узлов. В подобных ситуациях массив размеров не отражает требуемого распределения размеров и сгущения будут сильно зависеть от расположения узлов исходной сетки. На рис. 2 изображен пример относительного расположения контрольного объема и треугольника исходной модели, когда внутри объема не оказалось ни одного узла.

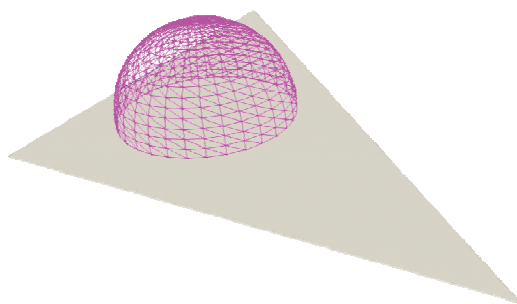


Рис. 2. Контрольный объем, пересекающий модель, но не содержащий ни одного узла

Для решения этой проблемы был разработан алгоритм встраивания дополнительных узлов в поверхностную сетку. Для улучшения детализации поверхности модели в области контрольного объема в нее вставляются дополнительные узлы, лежащие на линии пересечения контрольного объема и поверхности модели.

Первым шагом этого этапа является получение отрезков пересечения треугольников контрольного объема и треугольников модели. Для этого строится К-мерное дерево по контрольному объему и поверхности модели. Перебором пар треугольников, лежащих в блоках дерева, определяются отрезки пересечения треугольников объема и модели.

Далее производится сшивка отрезков, результатом чего является линия сечения модели контрольным объемом. Сшивка точек отрезков проводится с заданной точностью. Для ускорения поиска близких в пространстве точек применяется сортировка точек по координатам. Проверка близости точек проводится, только если они оказались рядом в отсортированном списке. Также по точности определяется положение точек относительно ребер и вершин треугольников. Точки, оказавшиеся вблизи вершины или ребра треугольника, переносятся соответственно в вершину или на ребро. Наличие сшитой линии сечения позволяет в дальнейшем встроить ее узлы в треугольники поверхности независимо друг от друга и получить после этого согласованную сетку.

Встраивание вершин в сетку

Для встраивания вершин сечения в сетку используется поочередная вставка в каждый треугольник всех приписанных к нему узлов. Благодаря проведенной ранее сшивке и определению положения узлов относительно ребер встраивание узлов в связанные с ними треугольники может быть проведено независимо на всех треугольниках. Если узел лежит на ребре то он будет встроен в оба соседних треугольника с одним и тем же индексом, что позволяет получить на выходе сшитую и согласованную сетку. Узлы, которые ранее были определены как попавшие в вершину треугольника, во вставку не участвуют.

Для вставки применяется алгоритм построения триангуляции Делоне на выпуклой плоской области методом «Удаляй и строй с кэшированием» [3]. Перед использованием алгоритма исходный треугольник переносится на двумерную плоскость. Соответствующее преобразование применяется и к встраиваемым узлам.

В процессе встраивания узлы вставляются в сетку поочередно по следующему алгоритму:

1. Поиск треугольника, в котором лежит узел.
 2. Удаление этого треугольника и всех соседних треугольников, в описанную окружность которых попадает узел.
 3. Вокруг узла достраиваются новые треугольники, закрывая получившийся открытый контур.
- На рис. 3 изображена последовательность этапов вставки узла в сетку.

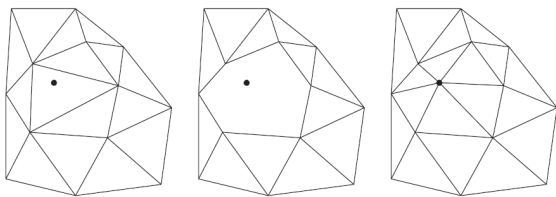


Рис. 3. Последовательность этапов вставки узла в сетку

Поиск треугольника, содержащего вершину

Поиск треугольника осуществляется при помощи кэширования. Для этого строится регулярная сетка из квадратных ячеек, покрывающая исходный треугольник. Количество ячеек определяется по формуле (1).

$$N = s \cdot n^s, \quad (1)$$

где N – размерность регулярной сетки, $s \approx 0,6-0,9$ – коэффициент размера, n – количество вставляемых узлов.

При каждом поиске треугольника, содержащего вставляемый узел, производится преобразование координат вершины к номеру ячейки регулярной сетки по формуле (2).

$$i = \left\lfloor \frac{x}{x_{\max}} \cdot N \right\rfloor, j = \left\lfloor \frac{y}{y_{\max}} \cdot N \right\rfloor, \quad (2)$$

где i, j – номер столбца и строки регулярной сетки, x, y – координаты вставляемого узла, x_{\max}, y_{\max} – габариты сетки, N – размерность регулярной сетки.

В ячейке хранится номер треугольника, поиск которого производился при предыдущем обращении к этой ячейке. Дальнейший поиск нужного треугольника производится последовательным перебором смежных треугольников сетки в направлении вставляемого узла по следующему алгоритму:

1. Для каждого ребра текущего треугольника вычисляется ориентированная площадь треугольника, образованного этим ребром и вставляемым узлом.
2. Если все найденные значения отрицательны, то узел лежит в текущем треугольнике и поиск завершается, а найденный треугольник записывается в кэш.
3. Из трех ребер выбирается ребро, для которого значение ориентированной площади положительно.
4. Соседний треугольник инцидентный выбранному ребру становится текущим, переход к шагу 1.

Отбор треугольников контрольным объемом

Следующим этапом для каждого треугольника проводится проверка попадания в контрольный объем. Для этого выполняется поиск пересечения луча, испущенного из вершин треугольника, с блоками кд-дерева. Направление луча выбирается в соответствии с направлением нормали треугольника. На рис. 4 схематично изображено определение положения треугольника относительно контрольного объема.

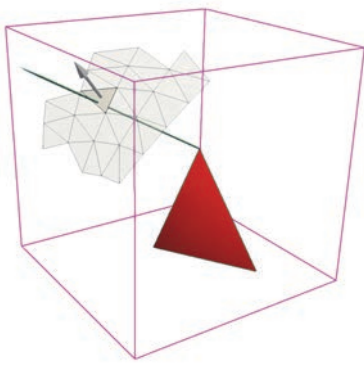


Рис. 4. Схематичное изображение поиска пересечения луча, испущенного из вершины треугольника модели с треугольниками контрольного объема

Если блок дерева пересекается хотя бы с одним из лучей, испущенных из вершин треугольников, то перебираются все треугольники, входящие в данный блок дерева, и ищется пересечение данных треугольников и лучей. В случае если блок дерева не пересекается с лучами, то проверка входящих в блок треугольников не производится.

Если найдено пересечение луча, выпущенного из вершины треугольника исходной сетки, и ближайшего треугольника в блоке дерева, то проверяется угол между вектором нормали треугольника исходной сетки и вектором нормали треугольника из блока дерева. Если угол между нормальными векторами меньше 90 градусов, то треугольник исходной сетки находится внутри или пересекает локальную область.

Для определения точки пересечения луча и треугольника был реализован алгоритм Моллера – Трумбора (3), по которому барицентрические координаты (u, v) и расстояние t от начала луча до точки пересечения может быть найдено из системы линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} -D, V_1 - V_0, V_2 - V_0 \\ t \\ u \\ v \end{bmatrix} = O - V_0, \quad (3)$$

где D – направляющий вектор луча, O – точка приложения луча, V – вершины треугольников, u, v – барицентрические координаты точки пересечения на треугольнике, t – параметр точки пересечения на луче.

Описанный алгоритм отбора треугольников обнаруживает все треугольники, полностью лежащие внутри контрольной области, что в сочетании с поиском пересекающихся с областью треугольников позволяет найти все треугольники, связанные с контрольным объемом.

Построение сетки

Результатом предыдущих этапов является массив размеров, заданных в вершинах сетки. Размер

в вершине сетки выбирается исходя из размера, заданного пользователем на границе, вычисленного по кривизне размера [4] и размера, заданного в контрольном объеме, содержащем вершину (4).

$$h = \max(h_{\min}, \min(h_{\max}, h_c, h_v)), \quad (4)$$

где h – вычисленный размер в узле, h_{\min}, h_{\max} – диапазон заданных на границе размеров, h_c – размер, вычисленный по кривизне, h_v – размер, заданный в контрольном объеме.

Вычисленные подобным образом размеры в вершинах сетки используются последующим этапом перестроения сетки [5].

Результаты

Результаты построения сетки приведены на рис. 5–7.

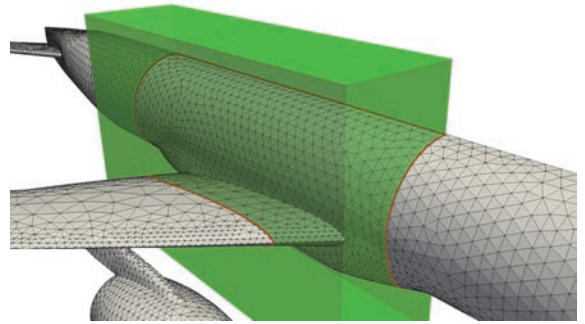


Рис. 5. Контрольный объем и линия сечения, построенная на фюзеляже летательного аппарата [6]

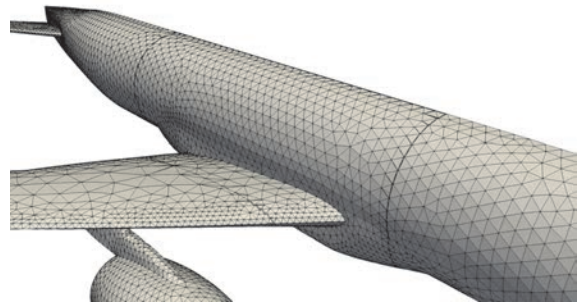


Рис. 6. Встроенные в модель узлы линии сечения

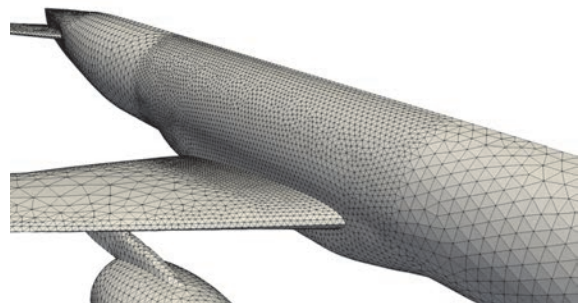


Рис. 7. Перестроенная в контрольном объеме сетка

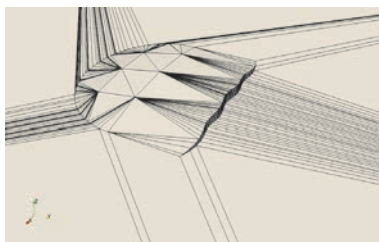


Рис. 8. Деталь исходной модели, на которой задан контрольный объем

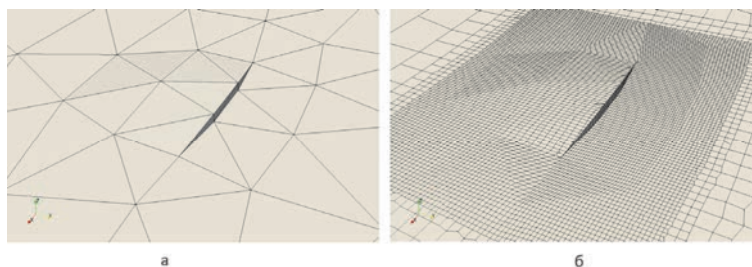


Рис. 9. Результат построения сетки без учета контрольного объема в поверхностной сетке: а – поверхностная сетка, б – расчетная сетка, построенная с учетом контрольного объема

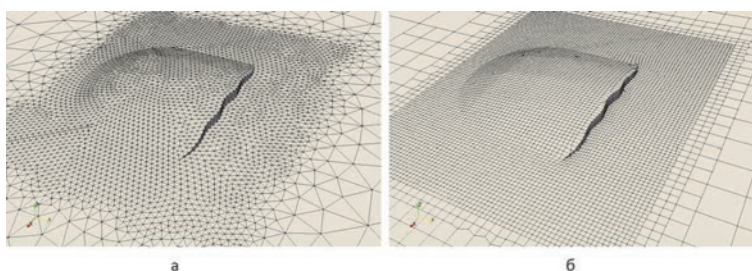


Рис. 10. Результат построения сетки с учетом контрольного объема в поверхностной сетке: а – поверхностная сетка, б – расчетная сетка, построенная с учетом контрольного объема

На рис. 8–10 изображены примеры влияния учета контрольного объема при построении поверхностной сетки на построенную расчетную сетку. Из рис. 9 видно, что при отсутствии учета контрольного объема при построении поверхностной сетки были потеряны некоторые детали исходной модели, что повлекло за собой построение более грубой расчетной сетки даже внутри контрольного объема.

В результате проведенных работ в построение поверхностной треугольной сетки была внедрена возможность учета контрольных объемов. Разработанные алгоритмы позволили снизить требования к подготовке параметров для входной геометрической модели и улучшить качество получаемых поверхностных сеток и, как следствие, проводить более детальное построение расчетных сеток в препостпроцессоре ЛОГОС.

Список литературы

1. Лукичев А. Н., Цалко Т. В., Панкратов Д. М., Логинов Д. В., Белова А. И., Моськина Е. О. Особенности построения триангуляционных сеток на поверхностях в аналитическом и фасеточном

представлении / 15-ая научно-техническая конференция «Молодежь в науке» // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 73–78.

2. Moore A. W.: An introductory tutorial on kd-trees // Technical Report No 209 Computer Laboratory, University of Cambridge, 1991.

3. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение. – Издательство томского университета, 2002.

4. Белова А. И., Лукичев А. Н., Борисенко О. Н. Вычисление кривизны дискретных поверхностей в генераторе поверхностных триангуляционных сеток ЛОГОС-ПРЕПОСТ / 15-ая научно-техническая конференция «Молодежь в науке» // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 34–40.

5. Описание возможностей библиотеки cm2meshtools [Электронный ресурс]: [веб-сайт]. – Электрон.дан. – 2020 – URL: <http://www.computing-objects.com/cm2-meshtools-suite/> (дата обращения: 01.07.2021).

6. 3rd AIAA CFD Drag Prediction Workshop [Электронный ресурс]: [веб-сайт]. – Электрон.дан. – 2006 – URL: <http://aiaa-dpw.larc.nasa.gov/Workshop3/workshop3.html> (дата обращения: 01.07.2021).