

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ФАСЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ И РАЗБИЕНИЕ НА ОДНОЗНАЧНО ПРОЕЦИРУЕМЫЕ ОБЛАСТИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТРЕУГОЛЬНОЙ СЕТКИ В ПРЕПОСТПРОЦЕССОРЕ ЛОГОС

*Г. В. Цалко, Д. М. Панкратов*

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

## Введение

Данный доклад посвящен одному из этапов подготовки сеточной модели для решения задач аэрогидромеханики – построению поверхностных треугольных сеток в ПРЕПОСТПРОЦЕССОРЕ ЛОГОС. Построение поверхностных сеток может проводиться на основе моделей в аналитическом или фасеточном представлении.

В предложенном докладе рассматривается ряд задач, связанных с особенностями генерации треугольной поверхностной сетки на основе геометрической модели в фасеточном представлении и методы их решения. Данные проблемы рассматриваются на примере построения поверхностных триангуляционных сеток.

В докладе рассматривается алгоритм восстановления информации о геометрических особенностях фасеточной геометрии и алгоритм разбиения исходной фасеточной модели на однозначно проецируемые области, их место в цепочке генерации поверхностной треугольной сетки, а также влияние на конечный результат.

## Препостпроцессор ЛОГОС

Препостпроцессор ЛОГОС является программным продуктом для задания начальных данных и построения сеточных моделей в задачах инженерного анализа прочности, теплопереноса, аэрогидромеханики. Препостпроцессор предоставляет графический интерфейс для подготовки и выполнения инженерного анализа с использованием отечественных счетных кодов.

## Технология подготовки расчета

Технология подготовки расчета включает в себя несколько этапов:

- Построение или импорт геометрической модели;
- Диагностика и исправление геометрической модели;
- Задание граничных и начальных условий;
- Построение поверхностной треугольной сетки;
- Построение объемной сетки;
- Подготовка входных данных для запуска счетных кодов;

- Получение решения;
- Визуализация результатов;

Геометрическая модель в данной цепочке может быть представлена как в параметрическом виде, так и в виде фасеточной геометрической модели. В данном докладе будут рассмотрены особенности построения поверхностной треугольной сетки на основе геометрической модели в фасеточном представлении. А также вкратце рассмотрены основные преимущества и недостатки фасеточного представления геометрической модели.

## Фасеточная геометрия

Геометрическая модель в фасеточном представлении описывает поверхность тела с помощью набора связанных треугольников таким образом, что отклонение полученной поверхности от реальной (исходной) было не больше заданного значения. В качестве критерия оценки отклонения используются различные подходы: абсолютное – расстояние между поверхностями, относительное – отклонение от поверхности на единицу длины/площади потеря объема.

## Преимущества фасеточного представления геометрии:

- Простейший формат представления и хранения – для полного описания поверхности достаточно массива треугольников с координатами вершин (формат STL).
- Простые и быстрые алгоритмы по обработке данной геометрии: проекция точки на поверхность, поиск кратчайшего пути по поверхности, пересечение поверхностей, различные аффинные преобразования, срединных поверхностей и т. д.

## Недостатки:

- Потеря точности: безвозвратное огрубление криволинейных поверхностей.
- В большинстве случаев – потеря или отсутствие топологической информации о геометрии: выделенных характерных ребер, граней, фрагментов. Необходимость ее восстановления.

Несмотря на недостатки, фасеточное представление геометрии незаменимо при решении множества практических задач:

- Восстановление поверхностей тел по данным, полученным в результате сканирования реального объекта.

- Построение оболочки для облака точек (частиц).
- Обработка сложных геометрий в аналитическом представлении с множеством несшитых поверхностей, при наличии самопересечений и искажений, связанных с особенностями CAD системы и трансляторов.

### Ключевые особенности фасеточной геометрии:

В отличие от аналитического представления, фасеточная геометрия не имеет функции преобразования объектов из 3D в 2D пространство и обратно.

Возможно отсутствие информации об особенностях геометрической модели.

Построение сетки на поверхности в фасеточном представлении часто включает в себя три этапа:

- Восстановление информации о геометрических особенностях модели.
- Декомпозиция поверхности.
- Отображение областей (патчей) (область (патч) – односвязное подмножество треугольников) на плоскость.

### Процесс построения поверхностной треугольной сетки

Процесс построения поверхностной треугольной сетки в Препостпроцессоре Логос разбит на несколько ключевых этапов.

1. Проверка исходной геометрической модели на наличие ошибок, удаление дефектов и упрощение исходной фасеточной модели.
2. Восстановление геометрических особенностей исходной модели;
3. Декомпозиция на области, проецируемые на плоскость.
4. Нахождение значений кривизны поверхности и величин, вычисляемых на основе размеров, заданных пользователем, в вершинах сетки.
5. Перестроение сетки в соответствии с параметрами, заданными пользователем.
6. Оптимизация полученной сетки.

В данном докладе будет рассмотрен этап восстановления геометрических особенностей исходной модели и этап разбиения исходной модели на области.

### Восстановление информации о геометрических особенностях исходной модели

Исходная фасеточная модель представлена в виде набора треугольников. Поэтому при построении поверхностной треугольной сетки на основе дискретной модели одним из важнейших этапов, является этап восстановления информации о геометрических особенностях исходной модели.

Геометрическим особенностям называют:

- Острые углы;
- Кромки;
- Скругления.

Геометрические особенности описываются как набор «характерных» ребер треугольников исходной

дискретной модели в совокупности образующих набор линий (характерных кривых) как это показано на рис. 1 (характерные линии выделены жирным).

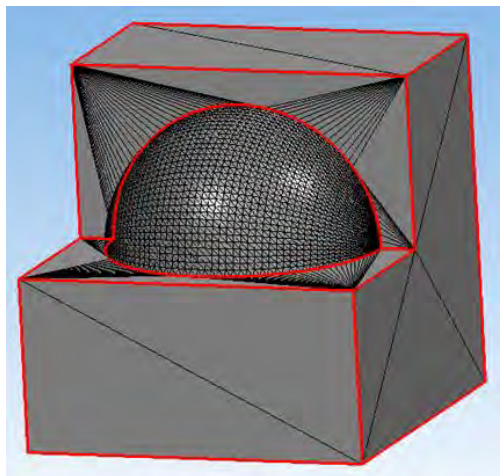


Рис. 1. Пример характерных линий на модели cubit

В ходе подготовки исходной модели и построения поверхностной сетки информация об особенностях исходной геометрической модели может быть потеряна, что может привести к искажению исходной модели и повлиять на построение объемной сетки в дальнейшем. Выделяя особенности геометрии характерными кривыми, мы гарантируем, что искажения модели не произойдет. Также данный этап непосредственно влияет на операцию разбиения модели на однозначно проецируемые области, о чем будет рассказано далее.

### Выделения характерных кривых по углу

Существуют несколько подходов к восстановлению особенностей геометрической модели. Изначально нами был реализован наиболее распространенный подход, основанный на сравнении угла между нормальными соседних треугольников с заданным пороговым значением. Если значение угла превышает пороговое значение, то ребро между треугольниками считается «жестким» и становится частью характерной кривой, как показано на рис. 2.

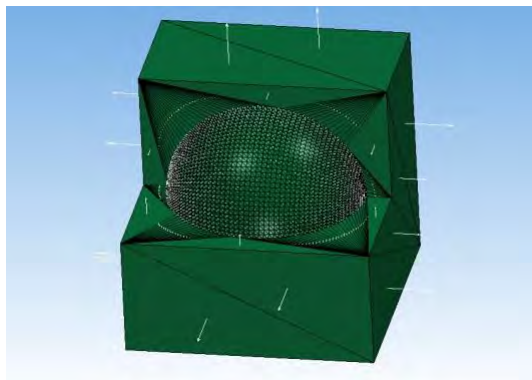


Рис. 2. Пример выделения характерного ребра на модели cubit по углу между нормальными

Основными достоинствами данного алгоритма является простота реализации и скорость. К недостаткам данного алгоритма относится его неустойчивость, то есть зависимость от качества исходной модели и общее глобальное пороговое значение угла для всей модели. Два этих фактора приводят к появлению ложноотрицательных и ложноположительных характерных ребер.

**Ложной позитивностью** – называется случай, когда алгоритм добавляет в характерную линию ребро, которое не является характерным для геометрической модели, как это показано на рис. 3.

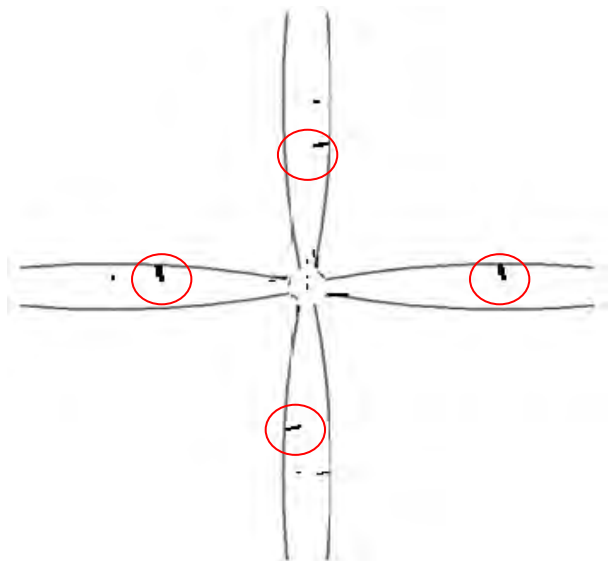


Рис. 3. Пример ложноположительных ребер на модели пропеллер

В случае ложной позитивности увеличивается количество характерных линий, как следствие сохраняются дефекты исходной модели и проявятся в построенной сетке за счет ухудшения качества треугольников и появления сгущений.

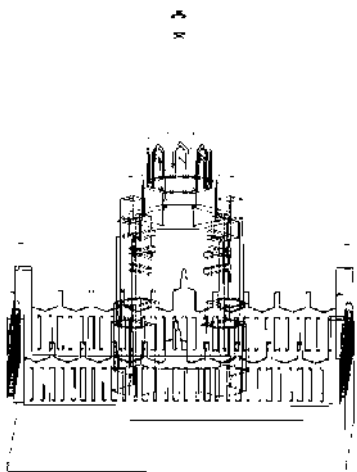


Рис. 4. Пример выделения характерных линий на модели MID

**Ложной негативностью** – называется случай, когда характерное ребро не включается в характерную линию, при этом являясь характерным для геометрической модели, как это показано на рис. 4 и 5.

### Алгоритм XiangminJiao и NarasimhaR. Bayuana

Для решения вышеописанных проблем был реализован алгоритм, разработанный XiangminJiao и NarasimhaR. Bayuana.

Данный алгоритм можно разделить на 3 этапа. На первом этапе производится расчет набора критериев для исходной модели. На втором этапе формируется набор квази-сильных ребер на основе характеристик, рассчитанных на первом этапе. На последнем этапе происходит фильтрация квази-сильных ребер.

Квази-сильными ребрами называются ребра, потенциально являющиеся частью характерных линий.

Основными критериями считаются значение дефицита угла в вершинах геометрической модели, значение дефицита угла в вершинах дискретной поверхности является интегральным значение величины гауссовой кривизны для дискретной поверхности в данной вершине, значение поворотного угла и одностороннего поворотного угла, которые являются значением величины кривизны поверхности в локальной области для дискретной поверхности.

На первом этапе работы алгоритма эти значения рассчитываются для каждой вершины в исходной геометрической модели. Изображение этих углов показано на рис. 6 [1].

Также производится формирование тензора на основе нормалей треугольников для некоей локальной области (кольцо треугольников первого порядка). Данный тензор записывается в виде матрицы размерностью  $3 \times 3$ , симметричной относительно главной диагонали. После расчета собственных векторов и значений матрицы на их основе определяется один из трех типов локальных областей исходной модели. Типы локальных областей изображены на рис. 7 [1].

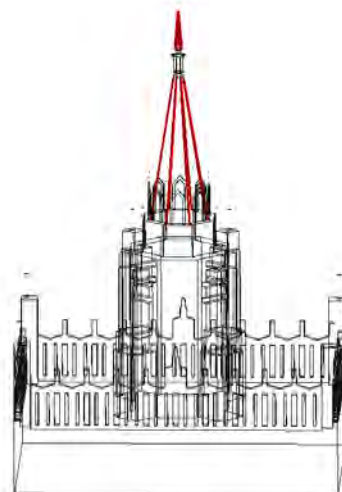


Рис. 5. Пример выделения характерных линий на модели MID (жирными линиями выделены ребра, которых нет на рис. 5)

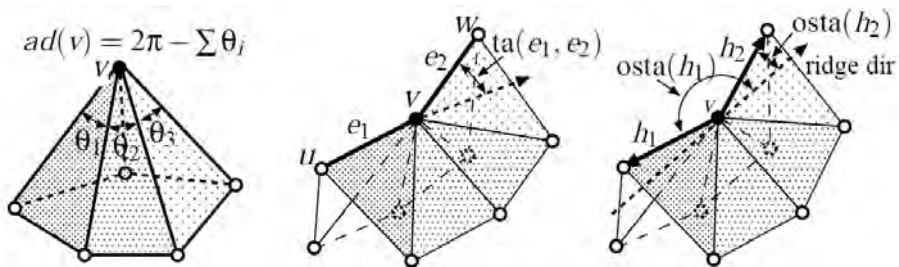


Рис. 6. Изображения дефицита угла, поворотного угла и одностороннего поворотного угла

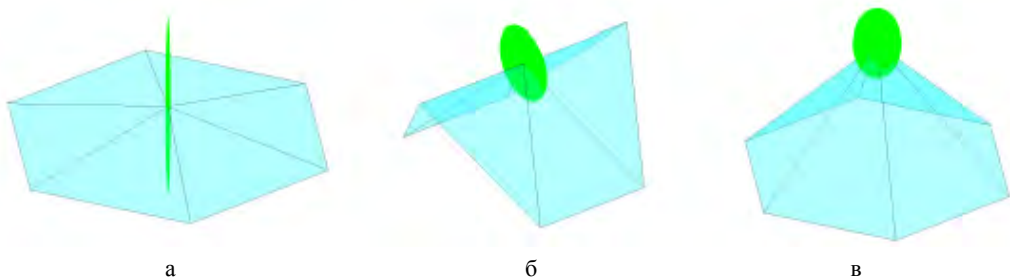


Рис. 7. Изображения локальных областей: а – плоскость, б – хребет, в – угол

На основе этой информации производится фильтрация выделенных квази-сильных ребер. Фильтрация производится итерационно, до момента, когда на итерации не было отфильтровано не одного ребра. Тогда процесс фильтрации останавливается. Все оставшиеся ребра считаются характерными ребрами геометрической модели.

Результаты работы реализованного алгоритма приведены на рис. 8 и 9.

### Декомпозиция модели на однозначно проецируемые области

В основе нашего подхода построения триангуляционной поверхностной сетки лежит алгоритм методом подвижного фронта на плоскости. Исходя из особенностей построения триангуляционной

сетки данным методом, возникает необходимость получения отображения 3Д сетки на плоскость.

Из-за сложной формы исходной модели спроецировать модель полностью на плоскость без появления самопересечений и искажения контура на плоскости чаще всего не представляется возможным.

Для решения данной проблемы в генераторе используется алгоритм декомпозиции, задачей которого является разбиение исходной модели на области с выполнением ряда критериев.

- Взаимно однозначное отображение области на плоскость;
- «Гладкие границы»
- Минимизация количества областей;
- Минимизация искажения треугольников;
- Оптимизация площадей областей.

На рис. 10 представлен пример критерия «Гладкие границы» [2].

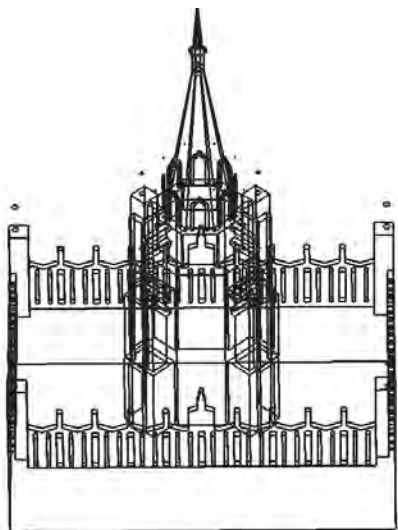


Рис. 8. Пример выделения характерных линий на модели MID

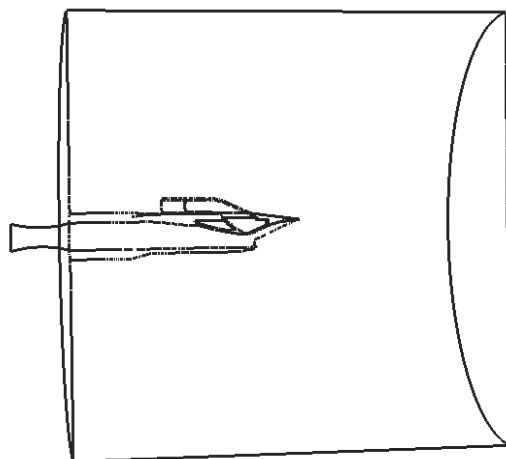


Рис. 9. Пример выделения характерных линий на модели воздухозаборника



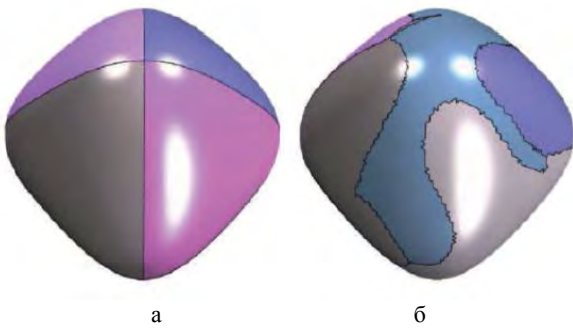


Рис. 10. Пример границы областей при декомпозиции геометрической модели: а – гладкой, б – не гладкой

Основными достоинствами данного алгоритма является то, что результатом его работы является гарантированная декомпозиция сложной геометрической модели на набор более простых областей для алгоритма генерации сетки. Также на каждой итерации алгоритма декомпозиции после объединения двух областей выполняется алгоритм проецирования получившегося фрагмента на плоскость и проверки его контура на самопересечение. Как следствие на каждой итерации алгоритма декомпозиции у нас имеется набор областей, которые сможет обработать алгоритм генерации сетки. Так же достоинствам алгоритма является его возможность учитывать характерные линии, полученные на этапе восстановления геометрических особенностей, как границы для предполагаемых областей, которые получатся в результате декомпозиции.

Основными недостатками алгоритма является время его работы, обусловленное его итерационной «природой».

Так же данный алгоритм чувствителен к качеству исходной геометрической модели.

### Алгоритм декомпозиции исходной модели в Препостпроцессоре Логос

Данный алгоритм относится к группе алгоритмов K-means кластеризации. Принцип работы алгоритма заключается в последовательном объединении треугольников в наборы областей, которые образуют очередь на объединение, после чего происходит их объединение в несколько итераций. Очередь формируется исходя из критерия качества области, полученной в результате слияния двух исходных областей.

Формула определения качества получившейся области (1).

$$Q_p = Q_s(Q_a + Q_{cc}) \quad (1)$$

$Q_s$  – качество по форме области,  $Q_a$  – качество по углу (угол между нормальными соседних треугольников),  $Q_{cc}$  – изменение кривизны поверхности.

Каждый параметр имеет диапазон значений от 0 до 1.

После объединения пары областей, получившаяся область проецируется на плоскость, если после проецирования получившийся контур не имеет самопересечений, то получившаяся область считается корректной.

После этого данная область изымается из очереди на объединение на данной итерации и производится слияние других пар областей по очереди в соответствии с понижением качества их результирующей области.

Процесс повторяется, если за одну итерацию алгоритма получилось объединить хотя бы одну пару областей.

Результат работы алгоритма показан на рис. 11 и 12.

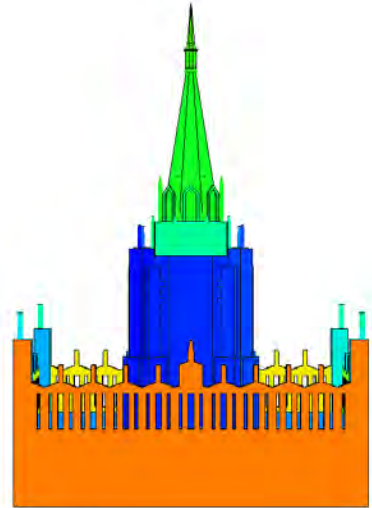


Рис. 11. Пример декомпозиции на области на модели MID

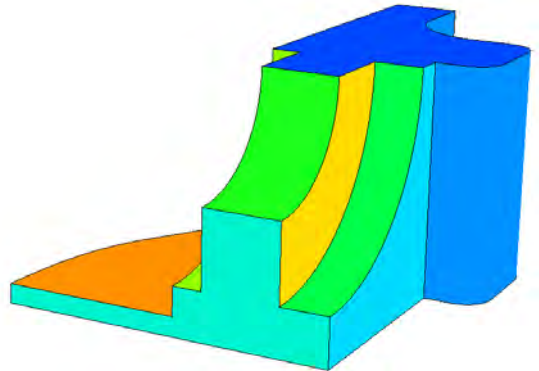


Рис. 12. Пример декомпозиции на области на модели fandisk

### Заключение

В докладе были показаны особенности построения поверхностной треугольной сетки в Препостпроцессоре Логос, связанные с особенностью построения поверхностной сетки на основе геометрической модели в фасеточном представлении. Показаны плюсы и минусы построения сетки на основе геометрии в фасеточном представлении.

В заключении хочется отметить, что алгоритм восстановления геометрических особенностей и алгоритм декомпозиции позволили:

- Улучшить качество треугольной поверхностной сетки для ряда производственных задач;
- Улучшить качество объемной неструктурированной сетки;
- Провести расчет ряда инженерных задач в Препостпроцессоре Логос.

## Литература

1. Identification of C1 and C2 Discontinuities for Surface Meshes in CAD Xiangmin Jiao Narasimha R. Bayyana // Computer-Aided Design Volume 40 issue, 2008 P. 160–175.
2. Shape segmentation by hierarchical splat clustering HuijuanZhang, ChongLi, LeileiGao, ShengLi // Computers & Graphics Volume 51, 1015 P. 136–145.