

Метод декомпозиции машиностроительных твердотельных моделей на элементы объема изъятия

Сергей Сляднев, Вадим Турлапов

Нижегородский Государственный Университет им. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

sergey.slyadnev@gmail.com, vadim.turlapov@itmm.unn.ru

Аннотация

Рассматривается одна из базовых задач CAD/CAM-систем будущего, состоящая в интерпретации геометрии конструкции в терминах технологии ее изготовления. Задача рассматривается в единстве с задачей реконструкции геометрической модели изделия из триангуляционной сетки.

Предложена расширяемая процедура геометрической реконструкции твердотельной модели в форме декомпозиции заготовки на конструктивные элементы. Рассмотрены конструктивные элементы представляющие собой объемы изъятия. Декомпозиция строится в формате граничного представления (B-Rep) и определяется разрешенными технологиями изготовления.

Предлагаемая процедура может служить основой для реализации специфических алгоритмов в разных инженерных областях, таких как: восстановление параметрической модели из «немой» геометрии (dumb geometry), например, для нужд реинжиниринга; упрощение модели для расчетов, например, для конечно-элементного анализа; планирование процессов механообработки на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: объемная декомпозиция, реинжиниринг, конструктивный элемент, упрощение граничной модели.

1. ТЕРМИНЫ

- Фичер (feature) – конструктивный элемент (КЭ) модели.
- Дельта-объем – материал, изымаемый из заготовки на этапе производства.

2. ВВЕДЕНИЕ

А. Ловыгин, 2016 [1] анализирует наиболее перспективные направления развития CAD/CAM-систем в ближайшем будущем. Особое место занимает проблема распознавания конструктивных элементов (КЭ) твердотельных B-Rep моделей. Декомпозиция модели на такие КЭ как карман, шлиц, отверстие и др., позволяет автоматизировать производство детали на станке с ЧПУ. Однако этот контекст использования фичеров не является единственным. Наличие морфологической информации в общем случае позволяет решать задачи преобразования моделей. Наиболее востребованы следующие два типа преобразований:

1. Упрощение – изъятие из модели несущественных (с какой-либо точки зрения) КЭ.
2. Идеализация – снижение размерности модели.

Упрощение может предвдварять анализ прочности изделия или подготовку к его производству на станке с ЧПУ. Идеализация обычно применяется для подготовки расчетных моделей и в настоящей статье не рассматривается.

Упрощение часто выполняется в той САПР, где данная модель создавалась. Доминирующей методологией автоматизированного проектирования на сегодняшний день

является параметрическое проектирование на основе конструктивных элементов (feature-based parametric modeling). Процесс проектирования порождает так называемую историю построения, в которой все КЭ имеют явное параметрическое представление. Конструктор реализует свой замысел в терминах фичеров, то есть на объектном уровне, надстоящем понятиям *грань*, *ребро* и *вершина*. Путем изменения параметров КЭ, а также состава дерева построения, из исходной конструкторской модели выводятся технологическая и расчетная модели.

Случай, когда история построения модели отсутствует или утеряна, не редок на практике. Примером являются задачи автоматизированного реинжиниринга геометрической модели из оцифрованных данных сканирования. В настоящей работе рассматривается задача восстановления набора конструктивных элементов и их параметров из «немой» геометрии (dumb geometry), т.е. геометрии без истории построения. Отсутствие строгого определения понятия «конструктивный элемент» привело к появлению множества его различных интерпретаций, подчиненных специфике конкретной задачи. Поэтому плодотворная работа в области воссоздания параметрической модели возможна только при введении ограничительных гипотез. В данной работе мы вводим следующие основные гипотезы:

1. Все КЭ модели являются фичерами удаления материала. Эта гипотеза ограничивает предметную область процессами механообработки.
2. КЭ с использованием геометрии свободной формы исключаются из рассмотрения.
3. Распознаются такие КЭ, как отверстия, шлицы и карманы.

Не уменьшая общности, будем считать, что исходная модель задается в формате STEP (ISO 10303). Выходом алгоритма является конструктивное дерево модели, листья которого представляют распознанные и параметризованные КЭ.

3. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ

Не теряющий актуальность обзор методов распознавания КЭ был дан Ю. Ханом, М. Праггом и У. Регли, 2000 г. [2]. Наиболее распространенными являются метод сопоставления графов (графовый метод), метод объемной декомпозиции и метод конструктивных подсказок.

Графовый метод был дан С. Джоши и Т. Чэнгом в 1988 г. [3]. Метод состоит в сопоставлении графа смежности модели с шаблоном КЭ. Графовые методы имеют два существенных недостатка. Во-первых, они не дают общего способа распознавания пересекающихся конструктивных элементов. Во-вторых, выходом метода является набор граней, а не твердотельный объект, то есть получить конструктивный элемент в явном виде методы данного класса не позволяют.

Другим подходом к выделению КЭ является *объемная декомпозиция*. Методы этого класса опираются на

использование дельта-объема. Этому подходу посвящены известные работы [4] и [5].

Методы конструктивных подсказок используют ребра модели как информацию для распознавания КЭ. Пионерами здесь являются Ванденбранде и Рекувич, 1993 г. [6].

Универсальный подход к распознаванию и подавлению КЭ едва ли может быть создан (Д. Шах, 2001 г. [7]). Более того, многие подходы существенно опираются на использование коммерческих систем моделирования, реализующих такие базовые операции, как удаление грани. Так в работе Ким, 2014 [8] примером «зависимой» операции является операция «wgar-around». На практике желательно, чтобы подход к декомпозиции обладал следующими качествами:

1. Адаптируемость к инженерному контексту.
2. Независимость от специфических операций в конкретных коммерческих системах.

Примером работы, явным образом подчиненной инженерному контексту, является статья Буссюж, 2014 г. [9]. Буссюж рассматривает объемную декомпозицию модели с целью выделения последовательного производящего процесса. Результатом оказывается модель, адаптированная для задач идеализации срединными поверхностями.

В качестве рабочих гипотез нашего метода выбираются гипотезы, схожие с теми, что использует Буссюж в [9]. В этом отношении наш метод представляет собой комбинацию двух подходов, а именно метода объемной декомпозиции и метода подсказок. Распознавание призматических элементов осуществляется на объеме изъятия, тогда как в [9] распознаванию подвергается сама исходная модель. Наш подход гарантированно завершается полной декомпозицией модели, но требует принятия строгих ограничительных гипотез, связанных с построением заготовки. На сегодняшний день мы видим следующие области приложения подхода:

1. Восстановление параметрической модели изделия.
2. Упрощение модели для дальнейшего анализа.
3. Распознавание конструктивных элементов для изготовления детали на станках с ЧПУ.

Заметим, что наличие параметрической модели изделия позволяет не только осуществлять его ручное редактирование, но и ставить задачи автоматической оптимизации формы. С.Н. Грудинин, 2013 [10] восстанавливает параметрическую модель манекена по оцифрованным данным, где параметры регулируют форму сечений. В работе [10] задача оптимизации ставится для минимизации погрешности реконструкции. Заметим, что методы оптимизации параметризованной формы активно применяются в индустрии в комплексе с инженерными расчетами для проектирования эффективных машиностроительных изделий. Одним из многочисленных примеров таких работ является публикация Т. Верстрате, 2010 [11]. Выделение объемных фичеров модели в виде твердотельных B-Rep объектов представляет особый интерес. Такие объекты могут использоваться в дальнейшем для создания расчетных сеток и последующего гидродинамического анализа (например, исследования потока воздуха через отверстия).

Предлагаемый в настоящей статье подход методологически схож с алгоритмами восстановления твердотельных моделей из чертежей, например, [17]. В указанной работе используются похожие гипотезы для выявления

конструктивных элементов модели с их последующей организацией в виде дерева булевых операций.

4. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

4.1 Общая процедура

На Рис. 1 показана общая схема предлагаемого подхода.



Рис 1: Основные этапы вычислительной схемы.

На первом этапе строится модель заготовки, т.е. геометрическое представление материала, из которого посредством механообработки получается целевое изделие.

На втором этапе геометрическая модель изделия вычитается из геометрической модели заготовки при помощи алгоритма регуляризованной булевой операции [12]. В результате образуется дельта-объем как геометрическая модель материала, предназначенного к изъятию.

На следующем этапе принимается второй комплекс гипотез, учитывающий нужды области приложения алгоритма. Предполагается, что декомпозиция дельта-объема может быть эффективно реализована, исходя из следующих гипотез:

1. Дельта-объем обладает достаточной симметрией для выделения фичеров вытягивания. Эта гипотеза равноценна принятой в современной работе [9].
2. Извлекаемые фичеры «максимальны», т.е. их объем может оказаться больше минимально необходимого для формообразования (Рис. 2).

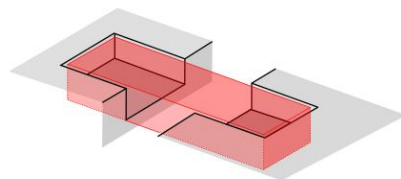


Рис 2: «Максимальный» элемент вытягивания.

Гипотезы декомпозиции, вообще говоря, могут быть выбраны иначе. Так, рассматриваемый подход расширяем для распознавания тел вращения, кинематических тел и других конструктивных элементов, наличие которых в параметрической модели изделия представляет интерес.

Последний этап схемы состоит в классификации выделенных примитивов по типу КЭ и их параметризации. Предлагается объектная модель (Рис. 3), содержащая три типа фичеров: «немой» фичер (dumb feature), отверстие (hole) и шлиц / карман (slot). «Немой» фичер является базовым типом и используется во всех случаях, когда дальнейшая декомпозиция и классификация конструктивного элемента невозможна. Его свойствами являются объем и ориентированный ограничивающий параллелепипед (Oriented

Bounding Box). Производные типы (отверстие и шлиц) предоставляют конкретные параметры формы, обеспечивая возможность редактирования модели.

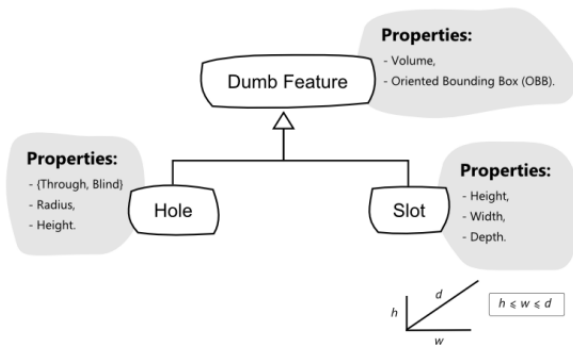


Рис 3: Принятая объектная модель фичеров. Стрелкой обозначено отношение наследования.

4.2 Максимизация границ

Задача максимизации границ неоднократно рассматривалась в литературе, например, в [9] и [12]. В работе [9] подчеркивается, что выбор топологических ограничений должен соотносываться с формой изделия, но не процессом конструирования этой формы. Топологические ограничения должны быть сняты везде, где это возможно без дополнительных геометрических построений (Рис. 4).

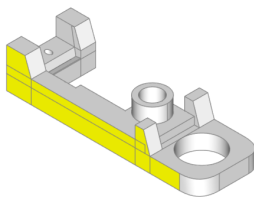


Рис 4: Тестовая модель MBV Gehäuse Rohteil и ее грани, подлежащие максимизации (желтый цвет).

В контексте задачи декомпозиции максимизация преследует несколько целей:

1. Устранить неоднозначность расчета выпуклости угла между гладко сопряженными гранями.
2. Повысить эффективность и надежность вычислений, в частности, твердотельных булевых операций.

Операция максимизации «безопасна» в том смысле, что относительно нее инвариантны эйлеровы характеристики тела [[13], раздел 3.5.6]. С точки зрения реализации, это итеративная процедура, состоящая в переборе смежных граней и объединении тех, которые имеют геометрически идентичные несущие поверхности (аналогично для ребер). Максимизация может быть реализована как предварительный этап общей схемы (Рис. 1).

4.3 Построение заготовки

В качестве модели заготовки нередко используется огибающий параллелепипед или выпуклая оболочка вершин модели изделия.

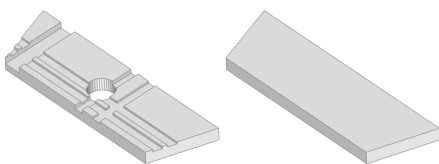


Рис 5: Тестовая модель и ее профильная заготовка.

В настоящей работе рассматривается реконструкция модели заготовки из модели изделия. Реконструкция производится следующим образом:

1. По исходной модели строится вспомогательная структура Attributed Adjacency Graph [3].
2. Находятся все выпуклые грани [3].
3. Из набора выпуклых граней выбираются те, что имеют уникальные несущие поверхности. Такие грани объявляются *несущими*.
4. Поверхности несущих граней пересекаются.
5. Кривые пересечений пересекаются между собой для построения вершин модели заготовки.
6. Вершины используются для построения ребер путем ограничения кривых пересечений.
7. Модель заготовки воссоздается на несущих поверхностях и реконструированных ребрах.

Изложенный метод позволяет получать профилированные заготовки, форма которых близка к форме изделия (Рис. 5). Такой метод применим к «технологически однородным» изделиям. В более общем случае возможно применение ориентированного ограничивающего параллелепипеда [14] или других заготовочных форм, геометрически описывающих модель изделия (в частности тех, что задаются пользователем явно).

4.4 Построение дельта-объема

Дельта-объем D (Рис. 6) – это результат регуляризованного булева вычитания модели изделия P из модели заготовки S .

$$D = S - *P.$$

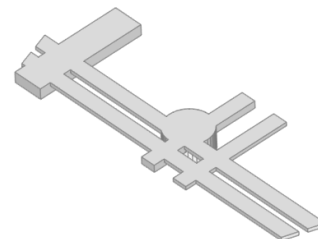


Рис 6: Дельта объем тестовой модели из Рис. 5.

Для выполнения геометрических теоретико-множественных операций мы использовали булев алгоритм открытого ядра геометрического моделирования OpenCascade [15].

4.5 Декомпозиция на элементы вытягивания

Распознавание призматических фичеров вытягивания производится в несколько этапов:

1. Находятся базовые грани, которые:
 - a. Являются плоскими.
 - b. Не содержат ни одной вогнутой вершины.
 - c. Имеют не менее трех ортогональных ребер в смежных гранях.
2. Восстанавливается призматический фичер D_i путем вытягивания базовой грани в сторону противоположную внешней нормали к телу.
 - a. В направлении обратном локальной нормали к телу испускается луч вплоть до пересечения с некоторой другой гранью тела.
 - b. Первое пересечение дает парную грань для примитива вытягивания. Параметр точки пересечения дает глубину вытягивания.

3. Осуществляется проверка по формуле $D_i - *D = \emptyset$, что гарантирует отсутствие «лишнего материала» в распознанном конструктивном элементе. Если в результате проверки образуется непустое множество точек, то конструктивный элемент D_i исключается из списка распознанных призматических фичеров.

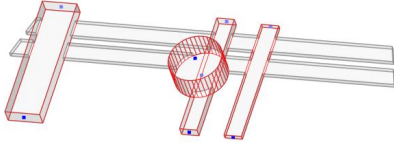


Рис 7: Распознанные элементы вытягивания (красный цвет) для модели из Рис. 5.

После нахождения всех элементов вытягивания (Рис. 7), оставшаяся часть дельта-объема извлекается булевым вычитанием:

$$D_R = D - * \cup D_i.$$

Аналогичная операция в [9] называется *операцией удаления примитива (primitive removal operator)* и совершается последовательно в серии булевых вычитаний. В нашей работе все призматические элементы удаляются путем единственной операции булева вычитания. Такая модификация подхода принята в силу следующих причин:

1. Элементы формы трактуются как равноправные: результат распознавания одного элемента не зависит от распознавания других.
2. Практика показывает, что единственное булево вычитание оказывается более эффективным и надежным, так как задача вычисления и слияния границ (boundary evaluation and merging [12]) решается только один раз.

В работе Буссюж [9] *последовательное* применение булевых операций является существенным, так как в [9] речь идет о выделении *порождающего процесса* CAD-модели («пользователь мыслит последовательно»). В этом отношении работа Буссюж описывает своеобразное «обращение времени». В нашей работе мы фокусируемся на *результате* декомпозиции, и порядок изъятия конструктивных элементов из заготовки в данном контексте не важен.

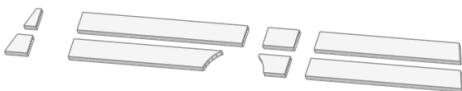


Рис 8: Элементы дельта-объема, оставшиеся после изъятия призматических элементов.

В результате вычитания тело D_R может оказаться несвязным многообразием (Рис. 8), перебор изолированных частей которого есть заключительный этап декомпозиции (Рис. 9).

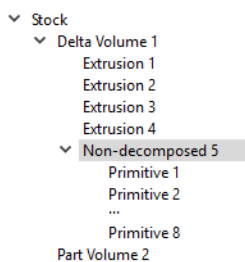


Рис 9: Дерево КЭ после декомпозиции.

4.6 Классификация

Классификация КЭ опирается на классификацию Точка-Тело [12]. Алгоритм классификации конструктивного элемента состоит из следующих этапов:

1. На каждой грани выбирается пробная точка, не принадлежащая другим конструктивным элементам.
2. Точка классифицируется на принадлежность исходному телу. Результатом классификации является состояние точки «ON» или «OUT».
3. Выполняется классификация КЭ с привлечением следующих гипотез:
 - a. Наличие топологически замкнутой цепочки произвольного количества «ON»-граней позволяет классифицировать элемент как отверстие (hole).
 - b. Наличие топологически незамкнутой цепочки из двух или трех «ON»-граней позволяет классифицировать конструктивный элемент как шлиц (slot).

Если ни одна из гипотез не выполняется для данного КЭ, то он классифицируется как «немой» фичер (dumb feature).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод объемной декомпозиции твердотельной B-Rep модели на конструктивные элементы. Метод реализован с использованием открытого программного обеспечения [15] и протестирован на широком наборе машиностроительных моделей. Полученное как результат декомпозиции дерево конструктивных элементов позволяет реализовывать разнообразные сценарии модификации модели (Рис. 10-12).

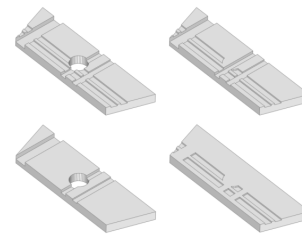


Рис 10: Различные варианты упрощения тестовой модели.

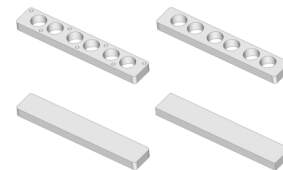


Рис 11: Последовательное упрощение тестовой модели.

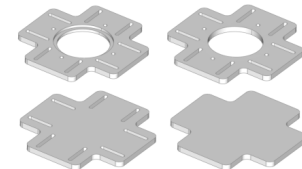


Рис 12: Последовательное упрощение тестовой модели.

Планируется развитие подхода в следующих направлениях: 1) расширение набора гипотез декомпозиции для выделения тел вращения и других типов КЭ; 2) реализация эффективного твердотельного булева алгоритма для повышения производительности; 3) реализация «нечеткого» режима булева алгоритма (fuzzy Booleans).

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ловыгин, А. Будущее САМ-систем / А. Ловыгин // САПР и графика. - 2016. - № 1. - С. 8-17.
- [2] Han J.H.J., Pratt M., Regli W.C. Manufacturing feature recognition from solid models: a status report // IEEE Trans. Robot. Autom. 2000. Vol. 16, № 6. P. 1-31.
- [3] Joshi S., Chang T.C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model // Comput. Des. 1988. Vol. 20, № 2. P. 58-66.
- [4] Sakurai H. Volume decomposition and feature recognition?: Part 1 polyhedral objects // Comput. Des. 1995. Vol. 27, № 11. P. 833-843.
- [5] Woo Y., Sakurai H. Recognition of maximal features by volume decomposition // CAD Comput. Aided Des. 2002. Vol. 34, № 3. P. 195-207.
- [6] Vandenbrande J.H., Requicha A.A.G. Spatial Reasoning for the Automatic Recognition of Machinable Features in Solid Models // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1993. Vol. 15, № 12. P. 1269-1285.
- [7] Shah J.J. et al. A Discourse on Geometric Feature Recognition From CAD Models // J. Comput. Inf. Sci. Eng. 2001. Vol. 1, № 1. P. 41.
- [8] Kim B.C., Mun D. Stepwise volume decomposition for the modification of B-rep models // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2014. Vol. 75, № 9-12. P. 1393-1403.
- [9] Boussuge F. et al. Extraction of generative processes from B-Rep shapes and application to idealization transformations // CAD Comput. Aided Des. 2014. Vol. 46, № 1. P. 79-89.
- [10] Грудинин С.Н., Фроловский В.Д. Сжатие геометрической информации и оценка близости сложных объектов на основе порождающих моделей // ГрафиКон 2013: труды 23 междунар. конф. по компьютерной графике и зрению, Владивосток, 16-20 сент. 2013 г. - Владивосток, 2013. - С. 286-289.
- [11] Verstraete T. CADO: a Computer Aided Design and Optimization Tool for Turbomachinery Applications // Int. Conf. Engineering Optim. Lisbon 2010. 2010. P. 1-10.
- [12] Requicha, Voelcker. Boolean Operations in Solid Modeling: Boundary Evaluation and Merging Algorithms. Proceedings of the IEEE 73(1):30-44, January, 1985.
- [13] Mantyla, M. An introduction to solid modeling. Computer Science Press, Maryland. 1988.
- [14] Gottschalk S. et al. OBB Tree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection // Proc. SIGGRAPH 96. 1996. № 8920219. P. 171-180.
- [15] Open CASCADE Technology, <http://opencascade.com>.
- [16] Сляднев С. Open CASCADE Technology Overview [Электронный ресурс] 2014. - Режим доступа: http://isicad.net/articles.php?article_num=17368.
- [17] Жилина Н., Лагунова М., Мошкова Т., Ротков С., Тюрина В. Автоматизация процесса чтения чертежа с использованием системы Компас-3D // ГрафиКон 2014: труды 24 междунар. конф. по компьютерной графике и зрению, Ростов-на-Дону, 30 сент. – 3 окт. 2014 г..

Об авторах

Вадим Евгеньевич Турлапов (vadim.turlapov@itmm.unn.ru) является профессором кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий Нижегородского

Государственного Университета им. Н.И. Лобачевского (Россия), руководит магистерской программой Компьютерная графика и лабораторией Компьютерной графики и мультимедиа.

Сергей Евгеньевич Сляднев (sergey.slyadnev@gmail.com) является аспирантом Нижегородского Государственного Университета им. Н.И. Лобачевского (Россия).