

К подавлению цепочек скруглений при помощи эйлеровых операторов

С.Е. Сляднев¹, В.Е. Турлапов¹

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

¹Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Описана процедура упрощения CAD-моделей путем распознавания и подавления некоторых типов скруглений и их цепочек. Предлагаемый метод основан на эйлеровых операторах KEV, KEF и KFMV, реализованных на базе геометрического ядра с открытыми исходными кодами. Упрощение задействует два этапа, а именно, распознавание скруглений и их подавление с гарантией топологической и геометрической целостности результата. Описанный подход ориентирован на использование в автоматическом режиме, предъявляющем высокие требования к надежности алгоритма. Ключевыми свойствами разработанного подхода являются надежность, предсказуемость результата и расширяемая архитектура, допускающая добавление новых топологических случаев без изменения основной процедуры упрощения. Распознавание состоит в построении графа смежности граней и насыщении его узлов атрибутами, содержащими информацию о типах ребер, их свойствах и предполагаемых видах скруглений. На этапе подавления, алгоритм итеративно проходит граф смежности граней, формируя цепочки скруглений. Для каждой грани в цепочке осуществляется распознавание локальной топологической ситуации, определяющей способ подавления в терминах эйлеровых операторов. Алгоритм может быть расширен путем добавления дескрипторов новых топологических ситуаций. После применения эйлеровых операторов затронутые ребра перестраиваются для получения геометрически корректного граничного представления.

Ключевые слова: подавление скруглений, упрощение CAD-модели, геометрическое моделирование, прямое редактирование, распознавание конструктивных элементов, Analysis Situs, OpenCascade.

Towards the suppression of blend chains using Euler operators and open geometric modeling kernel

S.E. Slyadnev¹, V.E. Turlapov¹

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

¹Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation

This paper presents a CAD model simplification procedure which consists of recognition and suppression of certain types of blend chains. The proposed method involves Euler operators KEV, KEF, and KFMV, which are developed on top of open-sourced geometric modeling kernel. The simplification process employs two stages: recognition and suppression. The suppression stage ensures the geometric and topological validity of the simplification result. The present approach is targeted for use in a batch mode, which poses strict requirements to the robustness of the suppression algorithm. The essential properties of the presented approach are its sustainability, the predictability of the result and the extensible architecture, which allows for adding new topological cases without affecting the algorithm's core. At the recognition stage, the algorithm constructs an attributed adjacency graph, which is then enriched with such information as edges' types, their properties, and the assumed kinds of blend faces. At the suppression stage, the algorithm iterates the adjacency graph and composes the blend candidate faces into the chains. For each face in a chain, a local topology analysis is performed to determine the corresponding sequence of Euler operators which are supposed to eliminate that face. The algorithm allows for extensions through adding descriptors of the new topology situations into the processing. After the Euler operators are done, the affected edges are reconstructed to obtain a watertight boundary representation of the model.

Keywords: blend suppression, CAD model simplification, geometric modeling, direct editing, feature recognition, Analysis Situs, OpenCascade.

1. Введение

Упрощение CAD-моделей и сборок выполняется для решения разнообразных инженерных задач. Среди прочих назовем подготовку геометрии к расчетам, сжатие данных для эффективной визуализации, защиту интеллектуальной собственности при обмене информацией, облегчение работы в системах проектирования, устранение вторичных конструктивных элементов для обеспечения распознавания первичных и т.п. В системах параметрического проектирования, основанных на истории построения, упрощение CAD-модели может быть выполнено путем исключения соответствующего набора конструктивных элементов из дерева операций [1]. В случае же, если история построения отсутствует или не имеет достаточно выразительной структуры, такой подход неприменим. Возникает необходимость использования операторов прямого редактирования, которые на сегодняшний день

отсутствуют в открытых библиотеках геометрического моделирования.

В данной работе мы описываем оператор подавления цепочек скруглений, основанный на распознавании конструктивных элементов с последующим применением эйлеровых операторов. Вкладом настоящей работы являются: а) реализация эйлеровых операторов KEV, KEF и KFMV на основе открытого ядра геометрического моделирования; б) разработка расширяемой архитектуры распознавания и подавления цепочек скруглений; в) реализация алгоритма подавления некоторых типов цепочек скруглений.

Предлагаемый алгоритм допускает работу в глобальном и локальном режимах. В первом случае осуществляется инкрементальное подавление, т.е. цепочки удаляются одна за другой с промежуточным перестроением вспомогательных структур данных. Во втором – локальном – режиме, распознавание цепочки начинается из грани, выбранной пользователем в качестве кандидата, притом

остальные цепочки оказываются нетронуты. Алгоритм подавления накапливает непрерывную историю модификации модели, позволяющую соотнести результирующее граничное представление с оригинальным, обеспечивая, тем самым, возможность сохранения ассоциированных данных (цветов, имен, аннотаций, допусков и т.п.).

Статья организована следующим образом. В разделе 2 дан обзор наиболее значимых работ, посвященных распознаванию и подавлению цепочек скруглений. В разделе 3 описан наш подход к распознаванию скруглений с использованием атрибутированного графа смежности граней. В разделе 4 представлен алгоритм подавления скруглений и инкрементальная процедура для его применения в пакетном режиме. Раздел 5 содержит некоторые примеры, демонстрирующие использование алгоритма на CAD-моделях из повседневной практики авторов. Вопросы, оставленные для дальнейшего исследования, приведены в разделе 6.

2. Состояние проблемы

Публикации, посвященные проблеме упрощения CAD-моделей и сборок, были рассмотрены нами в работе [2]. Там же дано описание соответствующего программного комплекса. Остановимся здесь на результатах, имеющих отношение исключительно к подавлению цепочек скруглений.

Авторы работы [3] описывают процедуру подавления скруглений, реализованную в популярной САПР Rhinoceros. Алгоритм выполняет предварительную классификацию граней по типам EBF (edge-blend face) и VBF (vertex-blend face), как показано на Рис. 1. После этого алгоритм рассчитывает новые геометрические носители граничных элементов (ребро для скруглений типа EBF и вершина для VBF). Топология модели изменяется на завершающем этапе процедуры и не предугадывается изначально.

Авторы работ [4,5] описывают «топологическую» процедуру подавления скруглений, основанную на применении эйлеровых операторов с последующим «стягиванием» геометрии. В отличие от эвристических «геометрических» подходов, таких как [3], алгоритмы [4,5] заранее готовят программу преобразования топологии модели в виде последовательности эйлеровых операторов, гарантирующих целостность граничного представления. Предсказуемость результата, достижимая благодаря локальному анализу топологии скруглений, делает, на наш взгляд, алгоритмы [4,5] предпочтительными для неструктивного автоматического упрощения CAD-моделей в пакетном режиме. Так, сложные конфигурации скруглений, которые не могут быть обработаны в силу ограничений алгоритма, окажутся нераспознанными еще на начальной стадии и будут пропущены. Таким образом, алгоритм примет в обработку только те топологические случаи, для которых достоверно известна соответствующая программа эйлеровых операторов. С другой стороны, реализация подобных алгоритмов требует наличия геометрического ядра, содержащего эйлеровы операторы (например, Parasolid или ACIS). Поскольку единственное открытое геометрическое ядро OpenCascade данных операторов не предоставляет, одной из наших задач в контексте настоящего исследования являлась их реализация.

Распознавание элементов скруглений на граничном представлении считается относительно простой задачей (в отличие от задачи их подавления). Действительно, всякая грань задается точным уравнением параметрической поверхности $s(u, v)$, имеющей, как правило, явный спецификатор собственного типа (плоскость, цилиндр, сфера, тор, сплайн и т.п.). На основании данного

спецификатора и дифференциальных свойств поверхности, можно заключить, является ли некоторая грань элементом скругления. В то же время, при относительной простоте классификации единичной грани, надежное распознавание цепочек, особенно в условиях их взаимоналожений, остается нетривиальным. Достаточно общий алгоритм распознавания цепочек, дающий также порядок их построения, был предложен в работе [6]. Работа [5] дополняет результат, оформленный в [6], алгоритмом подавления, где в качестве одного из этапов задействован оператор удаления грани [7] тех же авторов.

Комплекс работ [5,6,7], на наш взгляд, дает *принципиальное* решение проблемы распознавания и подавления скруглений. Как указано выше, основная идея этого «топологического» подхода состоит в предугадывании структуры результирующей модели с последующим преобразованием исходного граничного представления к заранее известному результату. Наша работа, таким образом, состоит в формализации и реализации данного принципа с использованием открытых средств геометрического моделирования.

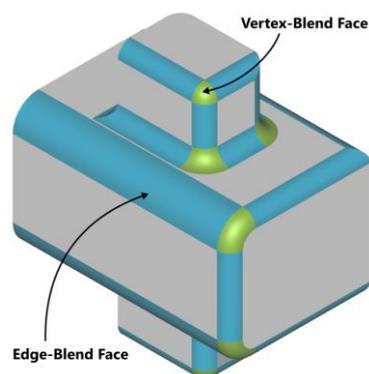


Рис. 1. Основные типы скруглений: EBF и VBF.

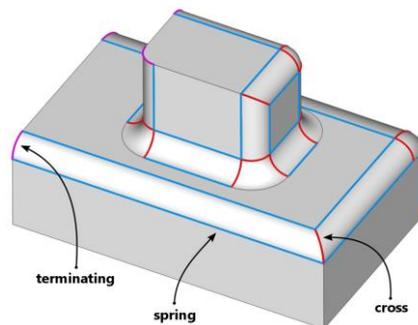


Рис. 2. Типы ребер, ограничивающих грани скруглений.

3. Распознавание

Для подавления цепочек скруглений их следует прежде всего распознать в исходной модели. На данном этапе задача состоит не только в поиске собственно граней, но также в классификации принадлежащих им ребер (Рис. 2). Классификация осуществляется по следующим типам: а) опорные ребра (spring edges); б) поперечные ребра (cross edges); в) терминальные ребра (terminating edges). Результат распознавания помещается в качестве атрибутов графа смежности граней. На данном этапе цепочки не формируются. Кратко, процесс распознавания состоит в последовательности следующих действий:

1. Построение атрибутированного графа смежности граней (attributed adjacency graph, AAG).
2. Распознавание граней типа EBF (edge-blend faces).
3. Распознавание граней типа VBF (vertex-blend faces).

- Уточнение терминальных ребер (терминальное ребро не может содержаться в двух гранях, распознанных как элементы скруглений).
- Извлечение результата.

Для распознавания граней типа EBF и VBF используется набор геометрических и топологических эвристик. Мы не приводим здесь их полное описание, отсылая читателя к исходным кодам алгоритма и их непосредственной документации [8].

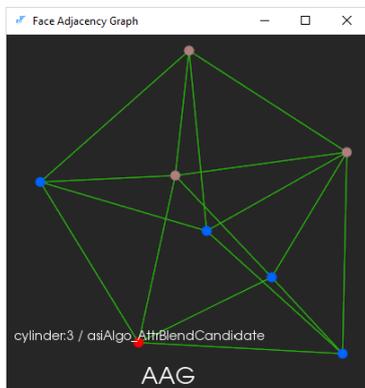


Рис. 3. Атрибутированный граф смежности граней. Элементы скруглений отмечены голубым маркером.

В результате процедуры распознавания, исходный граф смежности граней G преобразуется в эквивалентный граф \hat{G} , снабженный дополнительными атрибутами, ассоциированными с его вершинами (Рис. 3). Используются два типа атрибутов: а) элемент скругления (значение атрибута 1); б) несущая грань (значение атрибута 2).

4. Подавление

Подавление скруглений и их цепочек заключается в удалении соответствующих граней и стягивании соседних для получения «водонепроницаемой» оболочки. Собственно удаление может быть реализовано несколькими путями: а) исключение граней из топологической структуры модели с последующим затягиванием разрывов; б) применение последовательности эйлеровых операторов. В первом случае удаление выполняется в известной степени «вслепую», так как нет гарантии, что топологическая конфигурация в окрестности цепочки допускает корректное стягивание разрыва. Так, для управления процессом стягивания, авторы работы [9] осуществляют дополнительный анализ, сопоставляя локальную топологическую конфигурацию цепочки гомеоморфную ей абстрактную область. В случае, если для удаления используются эйлеровы операторы [10], топологические разрывы оказываются невозможны. С другой стороны, эйлеров оператор выполняет лишь синтаксическое преобразование модели, оставляя ее семантику (геометрию) нетронутой.

Формально, процесс удаления скруглений состоит в следующей последовательности действий:

- Обходом графа \hat{G} формируются цепочки скруглений в виде множеств граней модели $\{F_k\}$ ($k = \overline{1, K}$, где K – количество цепочек). Извлекаются только те вершины, которым отвечает подграф $\hat{C}_k \subset \hat{G}$, где $A(V_i(\hat{C}_k)) = 1$. Здесь функция $V_i(\cdot)$ возвращает вершину графа с номером $i = \overline{1, N_k}$, где N_k – количество граней в цепочке; Функция $A(\cdot)$ возвращает значение атрибута для

данной вершины (1 для элементов скруглений, 2 для опорных граней и 0 для остальных).

- Грани цепочки F_k удаляются из модели. Граф \hat{G} играет вспомогательную роль в процессе удаления, поэтому его перестроение необходимо лишь в том случае, если подавление будет продолжено для следующей цепочки, т.е. $k \neq K$.
- Затронутые ребра модели перестраиваются для «стягивания» опорных граней.

4.1 Базовый алгоритм

В базовом алгоритме подавления рассматриваются следующие топологические случаи для единичной грани:

- Изолированные скругления.
- Полные и неполные цепочки скруглений, набранные из граней типа EBF с чередующимися VBF.

На предварительном этапе выполняется проверка возможности подавления цепочки в целом. С этой целью используются дополнительные топологические эвристики. В частности, любое поперечное ребро цепочки должно содержаться ровно в двух гранях той же цепочки. В противном случае цепочка оказывается распознанной не полностью и считается неподдаваемой (Рис. 4).

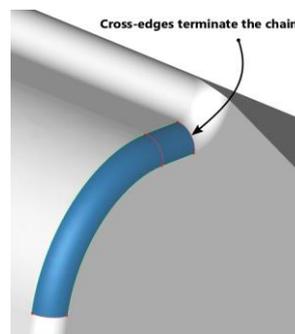


Рис. 4. Пример неподдаваемой цепочки: поперечное ребро содержится в единственной грани.

Последующие этапы алгоритма подавления состоят в следующем:

- Применение операторов Эйлера для топологической подготовки результата.
- Выполнение операции «стягивания» ребер для адаптации геометрии к новой топологической структуре.
- Апостериорная проверка корректности затронутых граней.

Шаг 1 состоит в последовательном применении операторов KEV (kill-edge-vertex), KEF (kill-edge-face), KFMV (kill-face-make-vertex) в порядке, определяемом дескриптором той или иной топологической конфигурации.

Шаг 2 выполняет чисто геометрические построения на предопределенной топологической структуре модели. На данном этапе реконструируются затронутые топологической операцией ребра, вершины и грани. Так, для получения новой несущей кривой ребра, осуществляется пересечение соответствующих поверхностей опорных граней.

Шаг 3 предохраняет алгоритм от возможных ошибок геометрических построений (пересечение поверхностей, проецирование кривой на поверхность и т.п.), связанных с небезупречной надежностью геометрического ядра. Кроме того, на данном этапе выполняется проверка самопересечений границы области определения D для

каждой затронутой грани. Последнее необходимо, поскольку подавление скруглений может, вообще говоря, привести к изменению количества компонент связности области D (Рис. 5). Предполагается, что количество компонент связности данной области есть инвариант оператора подавления скруглений.

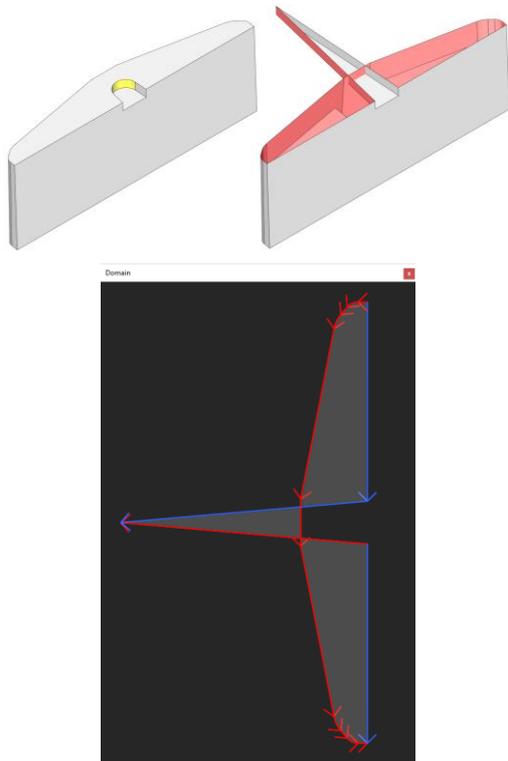


Рис. 5. Сверху: самопересечение в результате подавления изолированного скругления. Снизу: область определения D проблемной грани после модификации (нарушено свойство односвязности).

4.2 Инкрементальная процедура

Базовый алгоритм, описанный выше, позволяет упростить CAD-модель путем подавления единственной выбранной цепочки скруглений. Для упрощения в пакетном режиме этого недостаточно. Для расширения алгоритма на все цепочки, была реализована вспомогательная процедура т.н. инкрементального подавления.

Процедура начинается с конструирования атрибутированного графа смежности граней G . Данный граф должен быть перестроен всякий раз, когда изменяется топология модели, поскольку вершины графа адресуют граничные элементы модели через их серийные индексы, неустойчивые к операторам модификации [11].

Процедура реализует два вложенных цикла обработки данных (Рис. 6). На каждой итерации внешнего цикла, происходит распознавание цепочек скруглений F всей модели. После выбора произвольной грани $f \in F$, выполняется попытка подавления соответствующей ей цепочки $chain(f)$. В случае успеха, граф G перестраивается для обновленной модели s и осуществляется конкатенация локальной истории модификаций h в глобальную историю H . В случае же, если цепочка $chain(f)$ не может быть удалена (внутренний контур), соответствующие грани изымаются из очереди F на подавление, и выбирается новая цепочка без перестроения графа смежности. Кроме того, алгоритм сохраняет множество адресов неподдаваемых граней T , которые, как правило, остаются актуальными даже при изменении топологии (это т.н. «транзитные индексы»). Во внутреннем контуре алгоритм перебирает

цепочки до тех пор, пока подавление не будет осуществлено, либо не опустеет очередь F .

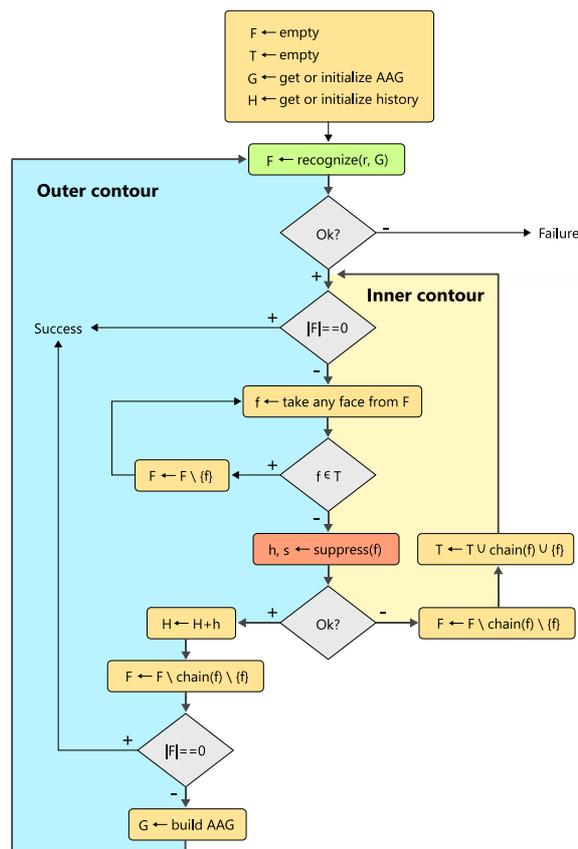


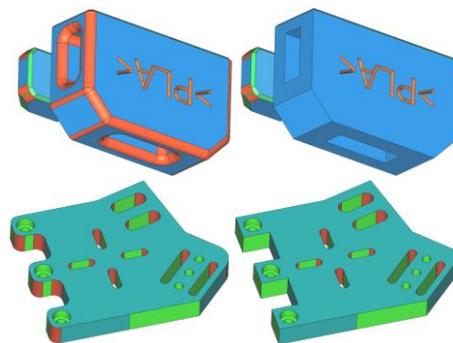
Рис. 6. Блок-схема инкрементальной процедуры подавления.

4.3 История модификаций

Как любой оператор редактирования формы, оператор подавления должен сохранять ассоциативность между граничными элементами результата и исходной модели. С этой целью, в алгоритм подавления была введена структура данных, представляющая историю модификации топологических элементов в виде графа. Поскольку описанная выше инкрементальная процедура состоит в неоднократном вызове оператора подавления, соответствующие структуры данных подлежат «склейке» для получения непрерывной истории каждого граничного элемента.

5. Примеры

Некоторые примеры, демонстрирующие результат подавления показаны на Рис. 7.



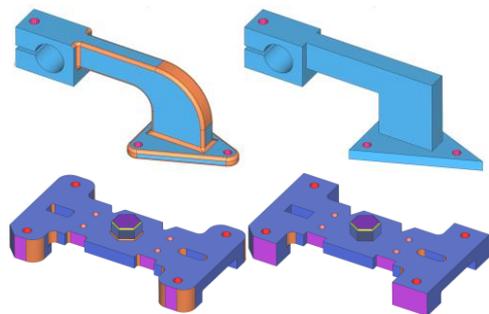


Рис. 7. Примеры подавления скруглений.

6. Заключение

Предложенный подход к распознаванию и подавлению цепочек скруглений был реализован на языке C++ с использованием геометрического ядра OpenCascade и платформы Analysis Situs [12], где осуществлялось прототипирование. В дальнейшем, алгоритм будет индустриализован в составе коммерческого программного обеспечения.

Отметим пути дальнейшего развития предложенного подхода. Во-первых, «каталог» обрабатываемых типов скруглений на сегодняшний день не является полным и должен быть расширен. Во-вторых, представляется возможной и целесообразной оптимизация производительности инкрементальной процедуры, которая выполняет глобальное перестроение графа смежности граней, несмотря на то, что каждая итерация состоит в локальном изменении топологии.

7. Литература

- [1] Belaziz, M., Bouras, A., and Brun, J.M. 2000. Computer-Aided Design 32, 5–6, 377–388.
- [2] Сляднев, С.Е., Малышев, А.С., Турлапов, В.Е. Автоматизированное упрощение машиностроительных САД-моделей и сборок без использования истории построения. Труды международной конференции Графикакон 2018, 488–494.
- [3] Lai, J.-Y., Wong, C., Huynh, T.T., et al. 2016. Small blend suppression from B-rep models in computer-aided engineering analysis. Journal of the Chinese Institute of Engineers 39, 6, 735–745.
- [4] Cui, X., Gao, S., and Zhou, G. 2004. An Efficient Algorithm for Recognizing and Suppressing Blend Features. Computer-Aided Design and Applications 1, 1–4, 421–428.
- [5] Venkataraman, S., Sohoni, M., and Rajadhyaksha, R. 2002. Removal of blends from boundary representation models. Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications - SMA '02, ACM Press, 83.
- [6] Venkataraman, S., Sohoni, M., and Elber, G. 2001. Blend recognition algorithm and applications. Proceedings of the sixth ACM symposium on Solid modeling and applications - SMA '01, ACM Press, 99–108.
- [7] Venkataraman, S. and Sohoni, M. 2002. Reconstruction of feature volumes and feature suppression. Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications - SMA '02, 60.
- [8] Analysis Situs: suppress blend. Режим доступа: http://analysis situs.org/features/features_suppress-blends.html, дата обращения 09.06.2019.
- [9] Zhu H, Menq C (2002) B-Rep model simplification by automatic fillet/round suppressing for efficient automatic feature recognition. Computer-Aided Design 34:109–123.
- [10] Mantyla and Sulonen. 1982. GWB: A Solid Modeler with Euler Operators. IEEE Computer Graphics and Applications 2, 7, 17–31.

- [11] Kripac, J. 1997. A mechanism for persistently naming topological entities in history-based parametric solid models. Computer-Aided Design 29, 113–122.
- [12] Slyadnev, S., Malyshev, A., and Turlapov, V. 2017. CAD model inspection utility and prototyping framework based on OpenCascade. GraphiCon 2017, 323–327

8. Об авторах

Турлапов Вадим Евгеньевич, д.т.н., профессор кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий ННГУ им. Н.И. Лобачевского, email: vadim.turlapov@itmm.unn.ru

Сляднев Сергей Евгеньевич, аспирант, ИИТММ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, email: sergey.slyadnev@gmail.com