

Дискретные модели геометрического моделирования компоновки авиационной техники

Маркин Л.В.^{1*}, Корн Г.В.^{2}, Куи Мин Хан^{1***}, Е Вин Тун^{1****}**

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

²*Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники, проспект Вернадского, 78, Москва, 119454, Россия*

^{1*} *e-mail:* markinl@list.ru

^{2**} *e-mail:* galkorn@yandex.ru

^{1***} *e-mail:* kyiminhan50@gmail.com

^{1****} *e-mail:* yewintun590@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы автоматизации компоновки изделий с высокой плотностью компоновки (прежде всего авиационной техники). Поскольку задача размещения является классической геометрической задачей, то для ее решения используется комплекс соответствующих геометрических моделей. В статье показано, что при обилии компьютерно-ориентированных геометрических моделей, позволяющих описывать геометрическую форму объектов любой сложности, их использование в задачах автоматизированной компоновки, не обеспечивает решение поставленной задачи максимально плотного размещения. Описана математическая постановка задачи компоновки как оптимизационная задача, с указанием ее целевой функции, ограничений и критериев эффективности. Предложен подход (использование рецепторных геометрических моделей), позволяющий при создании геомет-

рических моделей автоматизированной компоновки, перейти от переборных вариантов размещения компонуемых объектов к интеллектуальным алгоритмам автоматизированного размещения. Показаны результаты использования рецепторных геометрических моделей при автоматизированной компоновке летательных аппаратов (заполнение свободных пространств, трассировка, обеспечение зон обслуживания).

Ключевые слова: автоматизация проектирования, компоновка, геометрическое моделирование, рецепторные геометрические модели, распознавание формы, соединительные трассы, зоны обслуживания

Введение

При автоматизации проектирования любой техники на результат проектирования оказывает существенное влияние качество компоновки. Развитие современной транспортной и особенно, авиационно-космической техники, рост требований к ней и повышение плотности компоновки заставляют конструкторов постоянно совершенствовать методы автоматизации проектирования. Даже первые опыты компьютеризации процесса проектирования при решении отдельных частных задач показали их высокую эффективность. Работы по автоматизации размещения не составляли исключения. Первые публикации, посвященные автоматизации решения задач размещения, относятся к 60-м годам прошлого века и связаны с именами Л.В.Канторовича и В.А.Залгаллера по раскрою материалов методами линейного программирования. Однако переход от 2D объектов к 3D объектам и усложнение

формы размещаемых объектов от линейных полос до реальных объектов современной техники вызвало лавинообразное усложнение математического описания процесса размещения. Несмотря на то, что исследованию этого вопроса посвящены труды многих замечательных ученых – эта задача далека от своего разрешения. Дополнительные сложности, связанные с решением этой задачи, заключаются в следующем:

- необходимость оперирования с геометрической информацией, представление которой в ЭВМ представляет собой отдельную и весьма непростую задачу;

- неочевидность алгоритма решения задачи оптимального размещения. Если для проектанта при решении этой проблемы достаточно интуиции, которая подсказывает ему, куда и чего можно «подпихнуть» (а на самом деле она является сплавом прошлого опыта, ассоциативного мышления и пространственного воображения), то компьютер этими замечательными человеческими качествами не обладает, и поэтому нуждается в других механизмах мышления, которые должны быть переданы ему человеком посредством специального математического и программного обеспечения.

Что касается первой проблемы – представления геометрических образов в ЭВМ, то та сложнейшая проблема с различных аспектов исследовались в трудах отечественных ученых Валькова К.И., Денискина Ю.И., Иванова Г.С., Котова И.И., Михайленко В.Е., Осипова В.А., Полозова В.С., Похвалинского А.Б., Рвачева В.Л., Рыжова Н.Н., Стародетко Е.А., Толока А.В., Фролова С.А., Якунина В.И. и др., а также зарубежных - Поля де Кательджо, Роберта Фергюсона (Robert Fergusson),

Стивена Кунса (Steven Coons), Пьера Безье (Pierre Bézier), Шарля Эрмитта (Charles Hermite), Исаака Шенберга (Isaac Jacob Schoenberg), Карла де Бура (Carl de Boor), Кена Версприла (Ken Versprille), Юджина Ли (Eugene Lee), Стива Гейзберга (Steve Ginsberg) и других. В их трудах содержатся как классические, так и компьютерно-ориентированные методы задания, расчета и воспроизведения геометрических форм.

В данной статье рассматриваются принципы создания и возможности методов автоматизированной компоновки, основанные на использовании методов дискретизации пространства компоновки (рецепторных геометрических моделей).

1 Постановка задачи исследования

В разработке математического и программного обеспечения компьютерного моделирования формы компонуемых геометрических объектов обилие существующих методов ориентировано на описание геометрической формы разнородных технических объектов. Нам представляется наиболее рациональных для решения технических задач классификатор геометрических объектов, предложенный Семенковым О.И. – Осиповым В.А. [1], в основе которого лежит структура синтеза геометрических объектов из составляющих их элементов. Этот классификатор подразделяет все геометрические объекты (ГО) на две большие группы – геометрические объекты сложной технической формы и геометрические объекты сложной технической структуры. Объекты первой группы ограничиваются отсеками поверхностей, каждая из которых описана достаточно сложными аналитическими уравнениями или

системами уравнений. К ним относятся фюзеляжи самолетов, кузова автомобилей, корпуса судов, лопасти турбин и т.п. Объекты второй группы представляют собой объединенные на основе теоретико-множественных операций (объединение, пересечение, отрицание) ГО, как правило, относительно простых геометрических форм. Проведенные нами исследования по геометрическим моделям компоновки исходя из специфики решаемых задач показали целесообразность увеличения количества таких групп до четырех (рис. 1) [2].

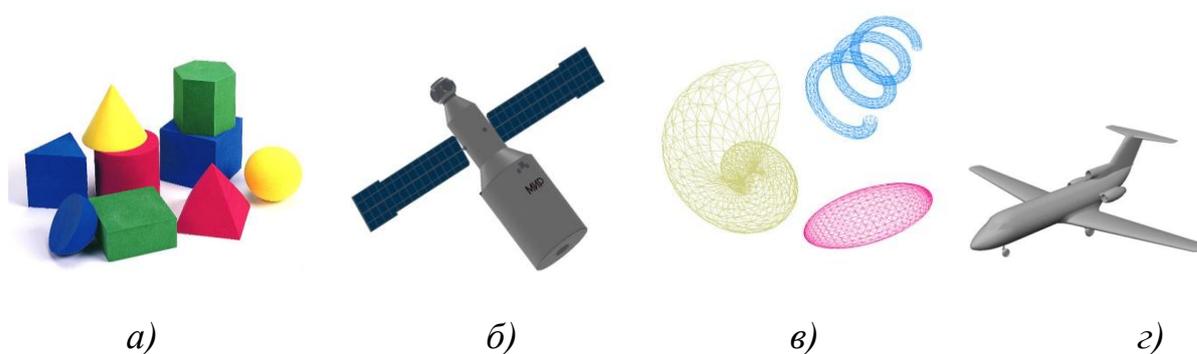


Рис. 1. Классификация геометрических объектов по уровню сложности: *а* – примитивы; *б* – объекты сложных технических структур; *в* – объекты сложных технических форм; *г* – объекты сложных технических форм и структур

Обилие геометрических форм объектов в технике, строительстве, дизайне и т.п. требует библиотеки методов геометрического моделирования, наиболее адаптированных для описания конкретных особенностей формы геометрических объектов. Поэтому помимо классификации геометрических объектов существуют и системы классификации методов геометрического моделирования (рис. 2).



Рис. 2. Классификация методов моделирования геометрических объектов

Скульптурные методы используются для создания геометрических моделей таких объектов, точное аналитическое описание которых неизвестно и вряд ли может быть получено. Не случайно они называются “скульптурными” – в своей работе не думая о математике и геометрии скульптор просто удаляет из камня “все лишнее” (рис. 3). Помимо дизайна скульптурные методы широко применяются и в технике (авиа-, судо- и автостроении), когда форма поверхности корректируется не только по эстетическим соображениям, но и на основании данных аэродинамического или гидродинамического эксперимента (рис. 4). Однако в итоге мы получаем аналитическое выражение геометрической формы этих объектов с той или иной степенью точности.

Реализация этого метода основана на довольно многочисленной библиотеке методов аппроксимации поверхностей с использованием сплайнов, В-сплайнов, NURBS, поверхностей Кунса, Эрмита, Лагранжа, Безье и т.п.



a)



б)

Рис. 3. Пример скульптурной поверхности (а) и работа скульптора над ее созданием (б)



Рис. 4. Примеры технических объектов, реализованных скульптурными методами

Методы аналитической аппроксимации используются для описания формы объектов, состоящих из сложных поверхностей второго и более высоких порядков. Поскольку прямая вычислительная обработка поверхностей столь сложной геометрической формы затруднена, они аппроксимируются участками поверхностей более низкого порядка (плоскостями, цилиндрами, сферами и т.п.) – рис. 5.

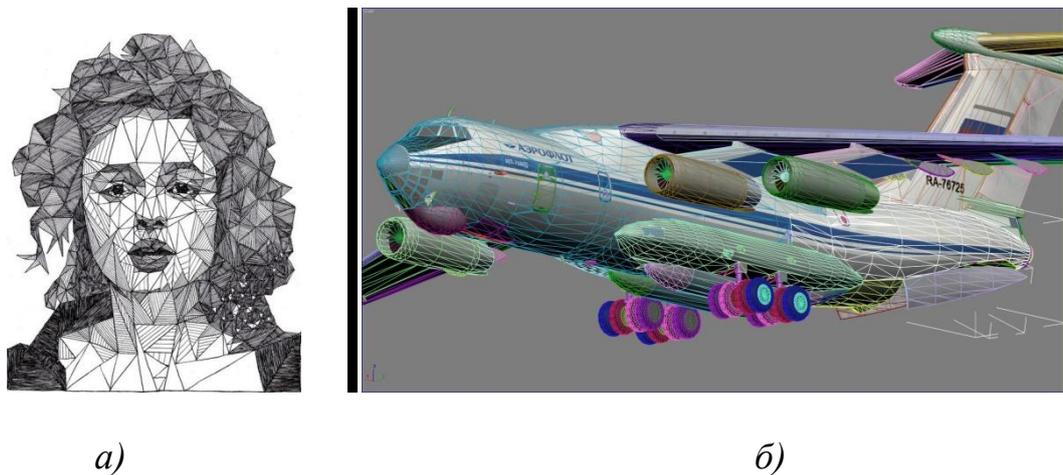


Рис. 5. Пример объектов очень сложной геометрической формы, полученной методом аналитической аппроксимации: *а* – биологического; *б* – технического

Точные методы моделирования трехмерных объектов представляют собой совокупность следующих известных методов, которые можно отнести к классическим методам прикладной геометрии: кинематического, параметрического, проволочно-каркасного, кусочно – аналитического, алгебро-логического (метод R-функций), метода “разложения на элементы”, метода конструктивной геометрии элементарных объемов.

Таким образом, пути геометрического моделирования технических объектов в авиастроении несколько разделились. Одно направление направлено на повышение точности описания заданных конструктором геометрических форм летательных аппаратов, а также сопутствующих этому характеристик (например высокому порядку гладкости моделируемых поверхностей). В теории все это выглядит достаточно красиво с математической точки зрения, но надо признать, что существенное увеличение вычислительных мощностей ЭВМ способствует решению всех этих вопросов

(обеспечению гладкости не только 2-го, но и 3-го порядков). Правда производственники не выражают восторга от такого повышения "качества" проектируемых поверхностей, справедливо полагая, что технологические процессы их воспроизведения с неизбежными для этого неконтролируемыми деформациями, вряд ли обеспечат гладкость даже первого порядка на реальных поверхностях.

Другим направлением исследований является геометрическое моделирование специфических технических задач, к которым следует отнести задачи размещения, рассматриваемые в данной статье. Переход к бесплазовому и безмакетному производству авиационной и ракетно-космической техники сделал актуальными вопросы геометрического моделирования именно этих процессов, имеющих свою специфику. Поэтому в данной статье будут рассматриваться методы, ориентированные на автоматизированное решение именно компоновочных задач.

Именно сложность геометрической формы компоновочных объектов в современной технике явилась камнем преткновения в исследованиях многих ученых при разработке «эрзац-мышления» для решения ЭВМ задач размещения. При этом выявилось любопытное наблюдение – методы, которые прекрасно работают в задачах с точки зрения геометрии несложных – раскрой плоских прямоугольных заготовок, разводка печатных плат, где достигаются результаты зачастую оптимальные, перестают работать в задачах с относительно сложной геометрией (например, в задаче размещения оборудования в техническом отсеке летательного аппарата (рис. 6). Однако в таких задачах перестает эффективно работать и интуиция человека, но уже по другой причине. В задачах большой размерности проектанту просто невозможно

удержать в голове массу требований, которые необходимо удерживать в голове в процессе компоновки. Здесь уже можно позавидовать ЭВМ, которая обладает свойством быстро получать количественные характеристики размещения и «ничего не забывать» в процессе работы. Кроме того, ЭВМ в процессе работы может и оптимизировать получаемый результат.

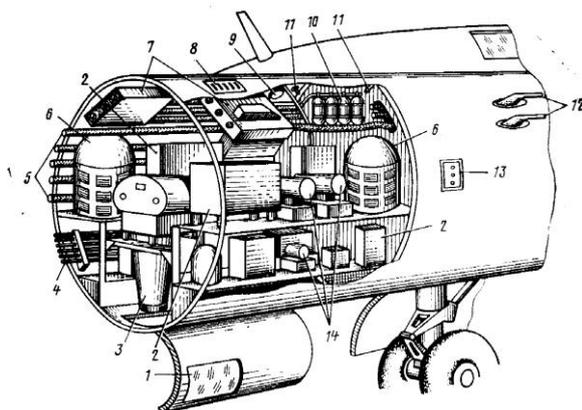


Рис. 6. Пример размещения оборудования в техническом отсеке самолета

Отдельной строкой можно рассматривать возможности, предоставляемыми современными CAD-системами, позволяющими своими инструментальными средствами выявить случаи взаимного пересечения уже скомпонованных объектов в созданной виртуальной моделировке. Но в этом случае речь идет не об автоматизированной компоновке, а о проверке уже сгенерированной с учетом опыта и интуиции проектанта варианта компоновки.

Таким образом, при решении поставленной задачи нам приходится выбирать рациональную геометрическую модель из дилеммы – что лучше – точная геометрическая модель, автоматическая компоновка которой невозможна, или грубая геометрическая модель, допускающая возможность автоматизированной компоновки.

Попытаемся при решении задачи автоматизированной компоновки выбрать компромиссное решение среди моделей в классе методов аналитической аппроксимации.

2 Использование рецепторного метода геометрического моделирования в задачах автоматизированной компоновки

Для решения поставленной задачи нам кажется предпочтительным использование рецепторных моделей, дискретизирующих пространство. В основу рецепторного метода (известного также как «матричный», «бинарный», «перечисления элементов пространства» и т.д.) положено приближенное представление геометрического объекта в поле или пространстве рецепторов. Для плоского случая поле рецепторов представляет собой однородную прямоугольную сеть $m \times n$, каждая клетка которой рассматривается как отдельный рецептор, который может иметь два состояния – «0» или «1». Математически рецепторная геометрическая модель описывается множеством $A = \{a_{i,j}\}$, где

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если рецептор возбужден,} \\ 0, & \text{если рецептор не возбужден} \end{cases}$$

Рецептор считается невозбужденным, если через него не проходит граница объекта и он не принадлежит внутренней области (рис. 7).

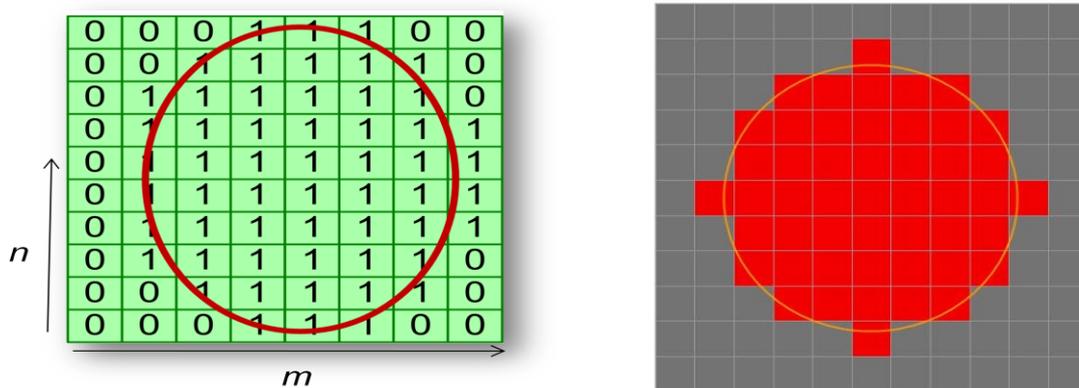


Рис. 7. Рецепторная модель 2D-тела

Трехмерные объекты описываются трехмерной матрицей $A = \{a_{i,j,k}\}$ размерностью $m \times n \times p$ (рис. 8).

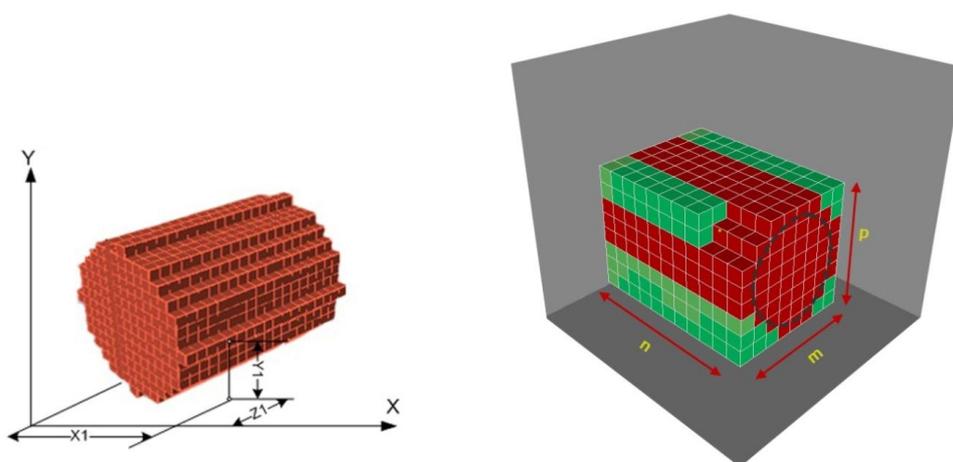


Рис. 8. Рецепторная модель 3D-тела

Очевидно, что точность описания геометрической формы объекта зависит от выбранной нами дискретности рецепторной матрицы. Этот метод геометрического моделирования был предложен в начале 70-х годов прошлого века белорусским ученым Зозулевичем Д.М. [3, 4], но в те он годы не получил распространения из-ог-

раниченных возможностей ЭВМ по памяти и быстродействию. Хотя им и коллективом его сотрудников и были решены этим методом отдельные прикладные задачи, на ЭВМ тех лет с 16-битной архитектурой и объемом оперативной памяти 32...128 килобайт было невозможно рассчитывать на эффективное использование рецепторных моделей.

В дальнейшем, в связи с развитием производительности вычислительной техники, рецепторные геометрические модели нашли свое практическое применение. Исследование и разработка рецепторных геометрических моделей для различных случаев применения была проведена в работах отечественных ученых Горелика А.Г., Герасименко Е.П., Клишина В.В., Рогозы Ю.А., Пащенко О.Б., Толока А.В., Ситу Лина, Ньи Ньи Хтуна, а также ряда иностранных авторов – Гаргантини И. (Gargantini I.), Реквишы А.А.Г., (Requcha A.A.G.) и ряда других.

Здесь же следует отметить очень близкие по идеологии исследования Наджарова К.М., Роткова С.И. и др., в которых в качестве элементарного объекта формы выступает не классический рецептор в виде куба или параллелепипеда, а более сложные фигуры – например гексоэксаэдр.

Подводя итог вышесказанному, нами предлагается использовать для решения поставленной задачи рецепторные геометрические модели, т.е. разбиение компонентного пространства на отдельные области в виде параллелепипедов (рецепторы - по западной терминологии **Voxel**), для каждой из которых в памяти компьютера присваивается значение «0» если она является свободной от размещенных объектов и доступна для размещения и «1» - если область уже занята размещенным объектом

или коммуникацией к нему. Этот метод, сравнивая значения рецепторов, позволяет легко определять пересечение объектов.

По своей геометрической сущности рецепторный метод, который мы предполагаем использовать для решения поставленной задачи, является частным случаем метода аналитической аппроксимации объектов, который используется для описания трехмерных объектов, включающих сложные поверхности второго и более высоких порядков. Поскольку вычислительная обработка таких поверхностей затруднена, они аппроксимируются участками поверхностей более низкого порядка (плоскостями, цилиндрами и т.п.).

Рецепторный метод имеет как свои достоинства, так и недостатки. К очевидным недостаткам следует отнести дискретность модели и потребность в больших объемах памяти СВТ для своей реализации, но сейчас увеличение памяти СВТ до любых объемов не представляет сложности ни технической, ни экономической. Другой сложностью является то, рецепторная геометрическая модель (РГМ) никогда не является изначальной. Размещаемые и уже размещенные изделия описываются конструктором, как правило, параметрическими геометрическими моделями (т.е. задающими вид объекта и его параметры - сфера радиусом R , параллелепипед размерами $a \times b \times c$ и т.д.). Поэтому возникает необходимость в дополнительном программном модуле «Параметрическая модель» \leftrightarrow «Рецепторная модель». Но вопросы такого преобразования решены в работах Г.В.Корн [5] и Ситу Лина [6].

Проектант работает с параметрической моделью (рис. 9), содержащей описание вида примитива и значения его основных параметров, что легко определяется из

чертежа. Таким образом, рецепторную модель можно рассматривать как «внутри-машинную».

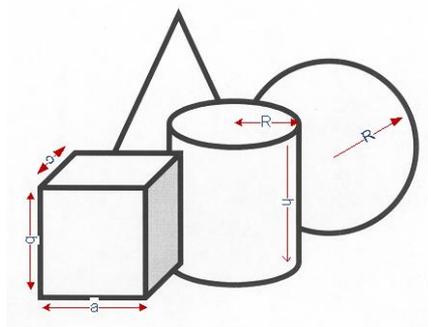


Рис. 9. Параметрические модели

Описание параметрической модели $P=f(\delta, \tau)$,

где δ - постоянная часть описания (задание типа примитива);

τ - переменная часть описания (задание размеров примитива)

Таким образом, для эффективного использования рецепторных моделей, необходимо организовать прямой и обратный переходы "рецепторная модель" ↔ "параметрическая модель" (рис.10). Таким образом, рецепторную модель можно рассматривать как «внутримашинную», требующую ввода и вывода информации в виде параметрических моделей.

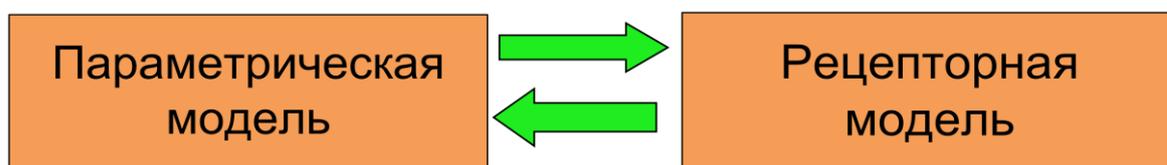


Рис.10. Преобразование "рецепторной ↔ параметрической" геометрических моделей

Понятно, что примитивы, имеющие простые параметрические модели, не исчерпывают все богатство форм компокуемых объектов современной авиационной техники, но по литературным данным [7] форму 98 % компокуемого приборного оборудования можно описать как примитивы или композиция примитивов.

Безусловным же достоинством РГМ является уникальная легкость определения условия взаимного непересечения (УВН) уже размещенных объектов – если значение конкретного рецептора «0», то он доступен для размещения, если «1» - то он уже кем-то «занят». Именно эти причины побудили в последние годы интерес к РГМ как в странах СНГ, так и на Западе (там они называются «воксельными» - элемент объема – по аналогии с «пиксельными» - элементами плоскости). Также легко решаются задачи определения объемов и сечений заданными плоскостями.

3 Математическая постановка задачи исследования

Известны методы геометрического моделирования, позволяющие решать определенные задачи автоматизированной компоновки [7]. Возникает вопрос - а имеются ли такие задачи, в которых рецепторный метод геометрического моделирования оказывается более эффективным по сравнению с другими методами. Опишем некоторые из них.

Одной из таких выигрышных для рецепторного метода задач является разработка геометрических моделей как размещаемых объектов, так и самого процесса размещения геометрических моделей определенного класса в замкнутых объемах среди уже размещенных объектов определенного класса. Выражаясь более понят-

ным языком эту ситуацию можно описать как решение задачи уплотнения уже существующей компоновки. Предполагается, что имеется замкнутое пространство с уже размещенными объектами (например, бортовым оборудованием в техническом отсеке самолета – см. рис. 6). Вместе с тем имеется ряд еще неразмещенных объектов, которые необходимо разместить в этом же отсеке. При этом совершенно неясно, смогут ли они быть размещены все полностью или частично и если могут, то в каком месте. Наша задача – разместить максимальное число еще неразмещенных объектов в возможных для этого местах. При этом их взаимовлияние друг на друга, длина коммуникаций и положение центра масс не учитывается. Таким образом, в данной работе размещение оптимизируется только по коэффициенту K_V . Коэффициент K_V (иногда его называют коэффициентом плотности компоновки) представляет собой отношение

$$K_V = \frac{\sum_{i=1}^n V_{к.о.}}{V_{отс.}}$$

где $\sum_{i=1}^n V_{к.о.}$ - сумма объемов n скомпонованных объектов,

$V_{отс.}$ - объем отсека, в котором производится компоновка.

Условие максимальной плотности компоновки записывается в виде выражения

$$\begin{aligned} & \text{Extr } V(X) \text{ при } X \subset \Omega \\ & K_V \rightarrow 1 \end{aligned} \tag{1}$$

Выражение (1) представляет собой пожелание приблизить объем скомпонованных объектов к общему объему отсека. Оптимизация по K_V достигается макси-

мально компактным (в идеале - плотным) размещением компоуемых объектов, фундаментальное понятие которого введено Ю.Г. Стояном и Н.И.Гилем [8].

Если для проектанта при решении этой проблемы достаточно интуиции, которая услужливо подсказывает ему, куда и чего можно «подпихнуть» (а на самом деле она является чудесном сплавом прошлого опыта, ассоциативного мышления и пространственного воображения), то компьютер этими замечательными человеческими качествами ни в малейшей степени не обладает, и поэтому нуждается в других механизмах мышления, которые должны быть переданы ему человеком посредством специального математического и программного обеспечения. Для человека, на первый взгляд, такая задача «доразмещения» объектов покажется достаточно легкой – в процессе эволюции для человека понятие объема было жизненно важным и человек без проблем может «на глаз» определить, как соотносятся между собой несколько объемов и какой предмет поместиться в другой, а какой нет. Но прежде чем мысленно поместить один предмет в другой, и мысленно оценить соотношение размеров, человек, возможно даже не сознавая этого, мысленно классифицирует предмет, т.е. соотносит его с одной или даже несколькими каноническими формами – этот предмет почти шар, почти цилиндр, почти параллелепипед и т.п. К сожалению эта столь простая для человека операция распознавания образов представляет значительную сложность даже для современных ЭВМ, которые с трудом распознают и классифицируют не то что трехмерные объекты, а обычный рукописный текст, который человек распознает за доли секунды.

4 Возможности практического использования рецепторных геометрических моделей

Идея используемого метода заключается в том, что перейдя к рецепторной геометрической модели мы кое-что потеряли (точность представления формы объекта стала зависеть от дискретности рецепторной матрицы, сама рецепторная матрица потребует ощутимых затрат памяти ЭВМ), но что-то и приобрели – возможность сокращения пространства признаков, или, выражаясь более простым языком, возможность анализировать объект по слоям. Это позволяет выявлять незаполненные при компоновке пространства для последующего размещения в них еще не размещенных объектов (так называемая задача "докомпоновки"). Решению этой задачи посвящена диссертация Ситу Лина [6].

Если среди скомпонованных объектов имеется незаполненное пространство (рис. 11 *a*), то на соответствующем срезе рецепторной матрицы оно сравнительно легко выявляется как «сгустки» нулевых рецепторов (рис. 11 *б*). Для этого был разработан алгоритм, позволяющий определить центр определенной свободной области (плоской!) и ее размеры. На рис. 12 *a* видно, что на срезе рецепторной матрицы алгоритм обнаружил 4 такие области, которые закрасил разным цветом (рис. 12 *б*). При работе алгоритма задается его определенная «чувствительность» - на рис. 12 *б* также видно, что некоторые рецепторы (окрашенные белым) не попали ни в размещенные объекты, ни в свободные области. Очевидно, что это пространство окажется для нас потерянным при компоновке.

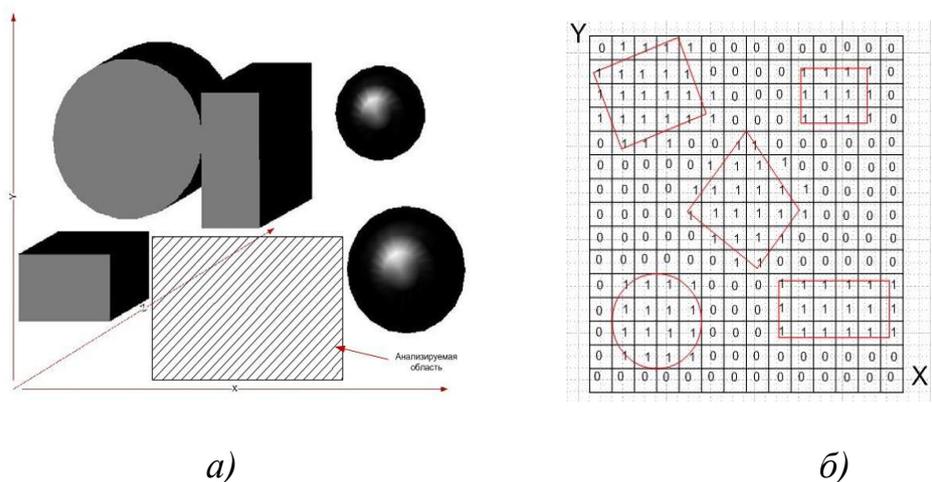


Рис. 11. Выявление незаполненных областей : а – местоположение тел в пространстве; б – его описание среза пространства рецепторной матрицей

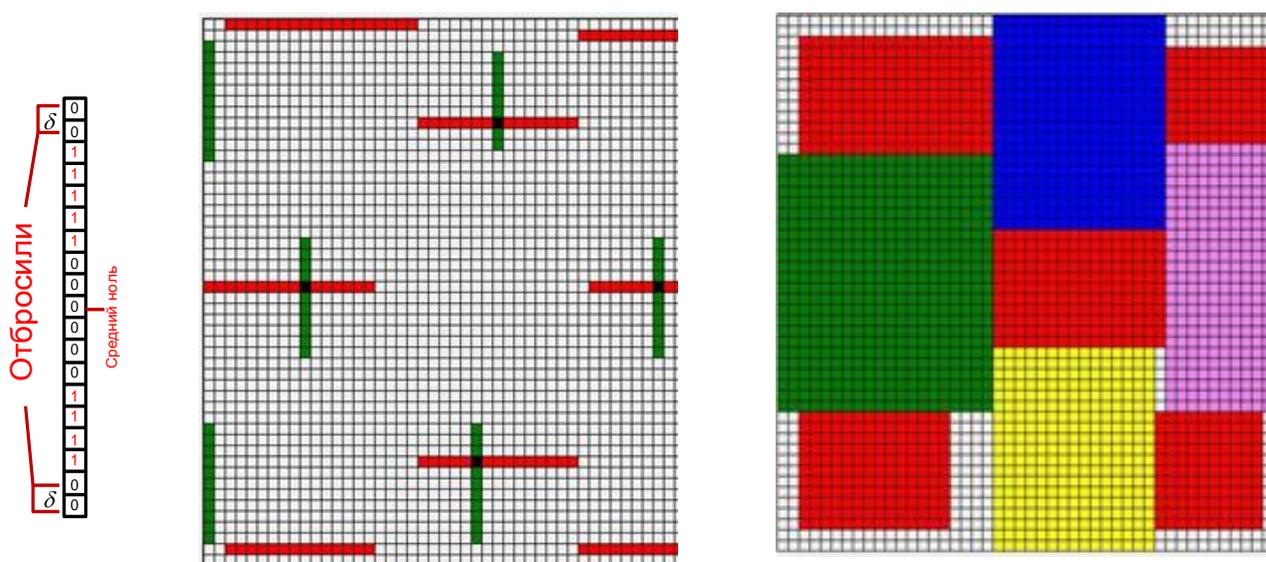


Рис. 12. Определение свободных областей в рецепторной матрице

Далее проводится сканирование строчек и столбцов для выявления наибольшего скопления неразрывно расположенных рецепторов и выявляются их центры. Для анализа отдельного сечения объекта используем принятый в теории распознавания образов переход от геометрической формы объекта (в виде дискретного набора

ра рецепторов) к «пространству признаков». Таким пространством признаков для нас станет годограф функции радиуса вектора от центра сечения (рис.13):

$$\Gamma = R_i(\varphi_i)$$

где R_i - текущая длина радиуса – вектора для i -го рецептора,

φ_i - текущий угол радиуса – вектора для i – го рецептора.

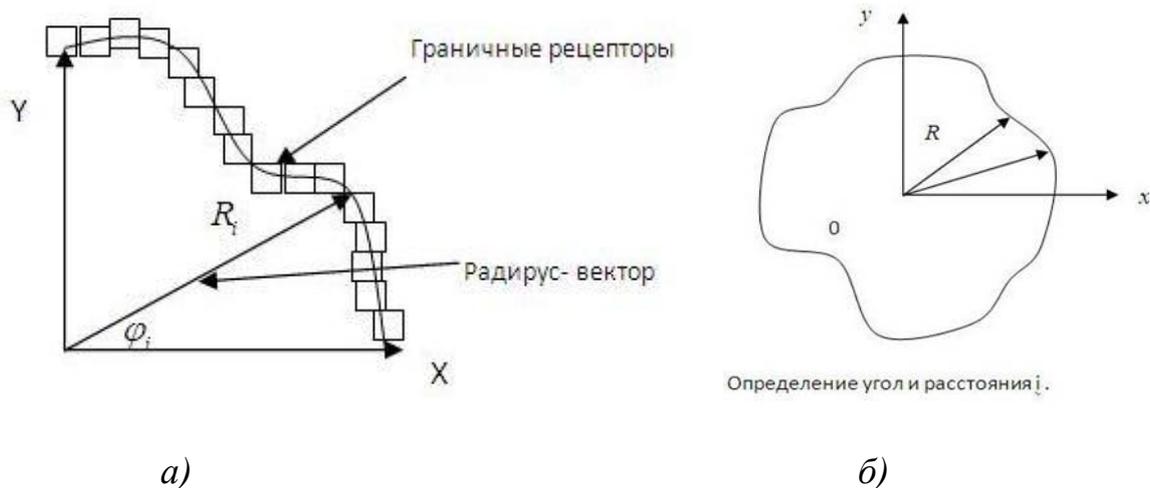


Рис. 13. Построение годографа функции радиуса-вектора

После того, как для конкретной плоской области мы построили функцию $R_i(\varphi_i)$, мы на время забываем о РГМ и начинаем анализировать эту функцию. Если формой этой области был бы круг, то функция была бы идеальной прямой, высота которой показала бы нам радиус этого круга (рис. 14), если многоугольник – то «пила» с количеством вершин, равным количеству сторон. Координаты вершин по φ позволят определить соотношения сторон прямоугольника. Для этого используется известный проверки статистических гипотез, реализованный как расчетный программный модуль.

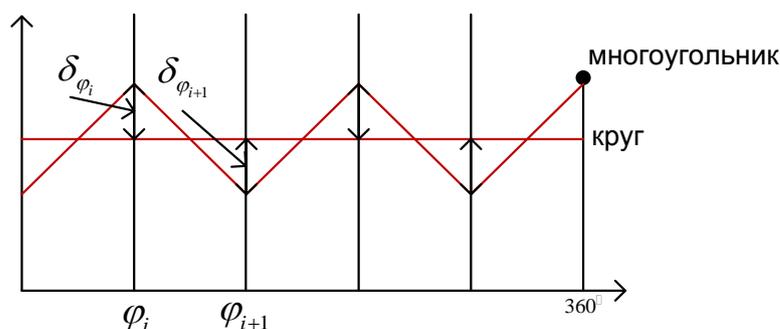


Рис. 14. Анализ незаполненной области пространства (случай – многоугольник)

На реальные результаты анализа годографа функции, естественно накладываются "шумы", обусловленные дискретностью описания компонентных объектов. Пример таких реальных годографов плоского среза компонентных объектов, статистически опознанные как срезы "многоугольника", "цилиндра" и "сферы" приведены на рисунке 15 а, б и в соответственно.

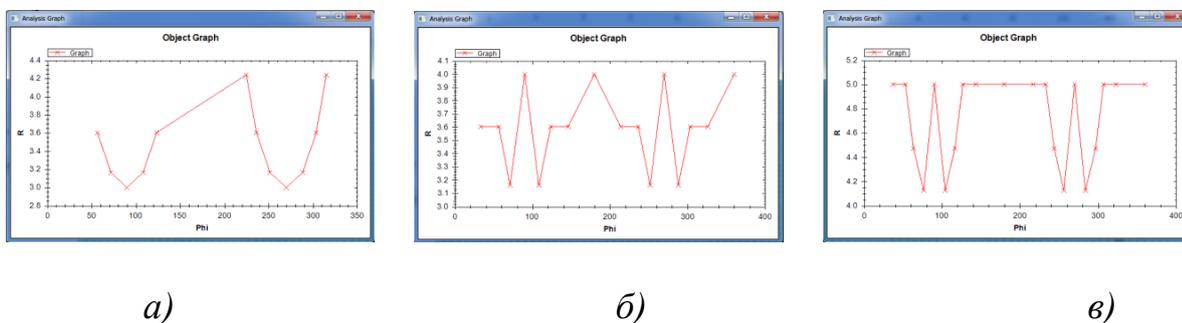
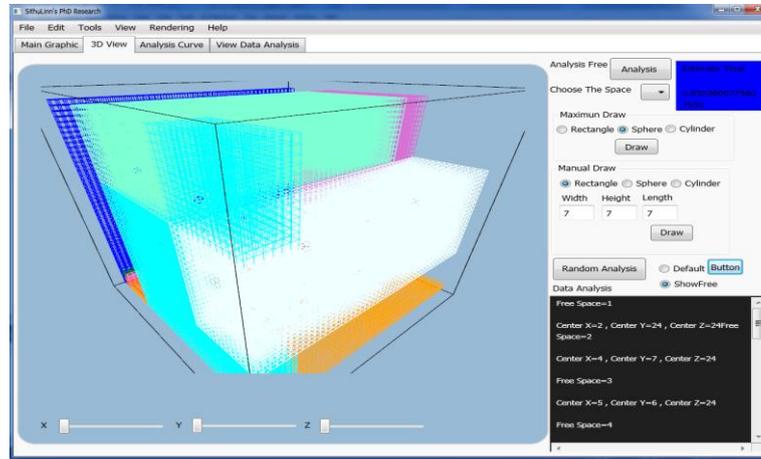


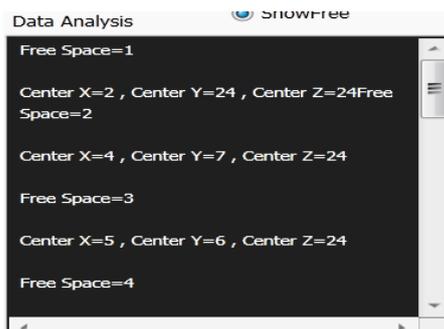
Рис. 15. Вид годографа функции среза R от φ для многоугольника (а), сферы (б) и цилиндра (в)

На рис. 16 а видно, что тестовое незаполненное пространство состоит из отдельных областей, автоматически пронумерованных системой. В каждую из них мы можем вписать пространственный объект той или иной формы или размера, но рекомендации системы подсказывают нам форму и размеры объекта, который наи-

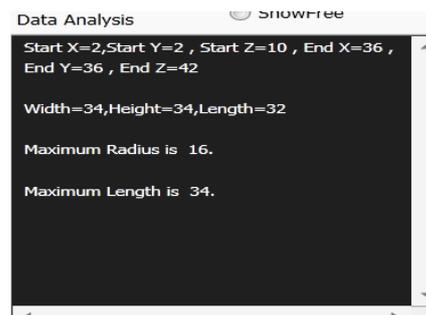
лучшим образом заполнил бы это пространство (рисунок 3.13 в). Иллюстрация программной реализации этого метода представлена на рисунке 16 [6] Полученные результаты реализованы в рамках графической оболочки, написанной на языке C#..



a)



б)



в)

Рис. 16. Определение конфигурации незаполненных пространств: а – визуализации пространства; б – вывод данных о размерах и положении свободной области; в – оценка возможности вписывания различных фигур

Если у нас есть желание разместить в этой области не параллелепипед максимального размера, а, например, сферу определенного радиуса, то она становится после этого полноправным участником сцены и после нажатия кнопки «Analysis» происходит новое определение конфигурации незаполненных пространств.

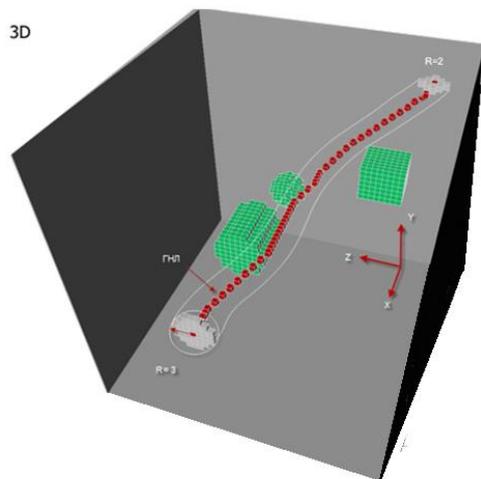
Другой проблемой, в которой использование рецепторных моделей показало свою эффективность, являются решение задач трассировки при обходе препятствий, в качестве которых выступают уже скомпонованные объекты или коммуникации между ними. Добавим дополнительное усложняющее условие - размеры соединительной трассы соизмеримы с размерами уже скомпонованных объектов (так называемый случай телесной трассировки). Такой "телесной" трассой является, например, воздуховод в двигателе автомобиля (рис. 17).



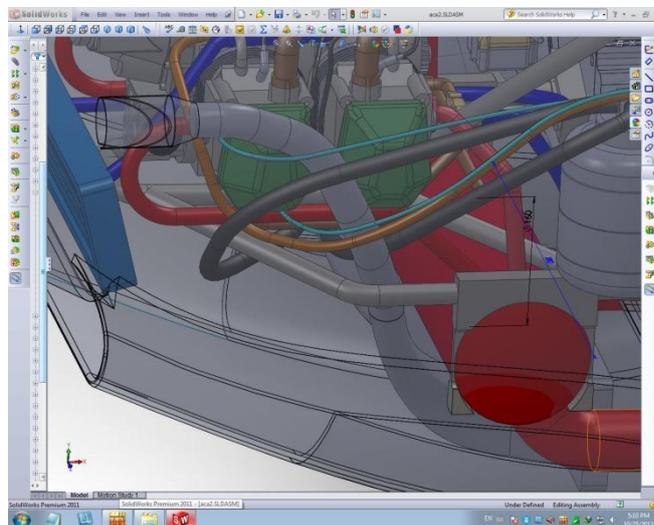
Рис. 17. Воздуховод двигателя как пример телесной трассировки

Большим преимуществом рецепторного подхода является легкость обнаружения препятствия по коду рецептора (0 или 1). Наипростейшим подходом к проблеме является игнорирование препятствий до столкновения с ними. Такой алгоритм будет выглядеть примерно так: между заданными точками входа и выхода выбрать направление для движения к цели и, пока цель не достигнута и направление свободно для движения (рисунок 18 а). В случае столкновения трассы с препятствием по на-

бору эвристических алгоритмов выбрать рациональный порядок обхода этого препятствия [9]. Пример такой трассировки двигательного отсека легкого самолета "АСА-2" показан на рис. 18 б.



a)



б)

Рис. 18 – Принцип обхода препятствий при построении каналовой поверхности рецепторным методом (*a*), использование метода при компоновке моторного отсека легкого самолета "АСА-2" (*б*)

Еще одним интересным применением рецепторного метода в автоматизированной компоновке является определение возможности обслуживания уже скомпонованных объектов. Имеются набор стандартных средств обслуживания (например гаечных ключей - рис. 19 *a*), которые необходимо доставить в определенное место (рис. 19 *б*) и обеспечить им необходимое пространство для работы (рис. 19 *в*). Сущность метода заключается в том, что рецепторной моделью представляется не только сам инструмент, но и совокупность всех его мгновенных положений как перемещении в рабочую точку, так и непосредственно при работе. В этом случае рецептор-

ная модель всех мгновенных перемещений компонуется в сцене как новый размещаемый объект с проверкой его непересечения с ранее уже размещенными объектами.

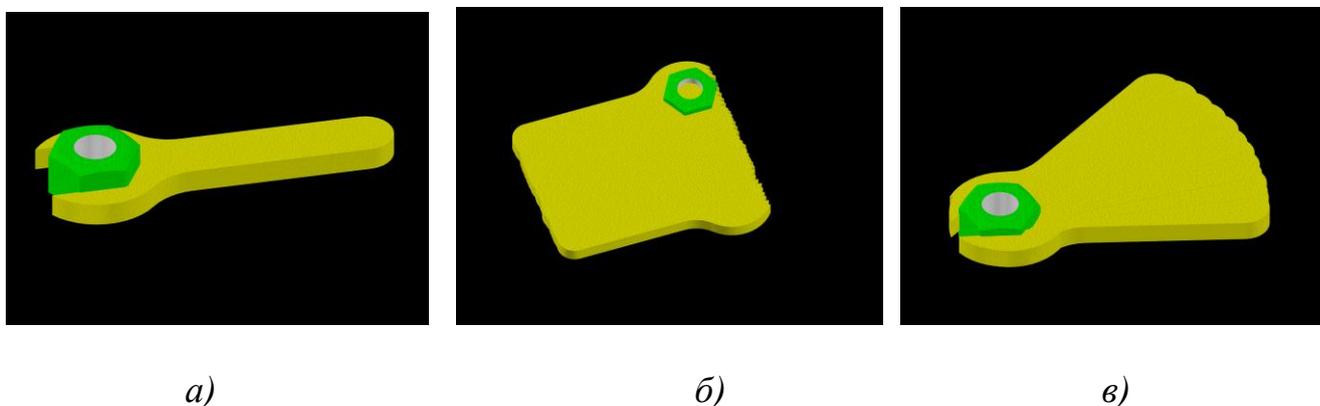


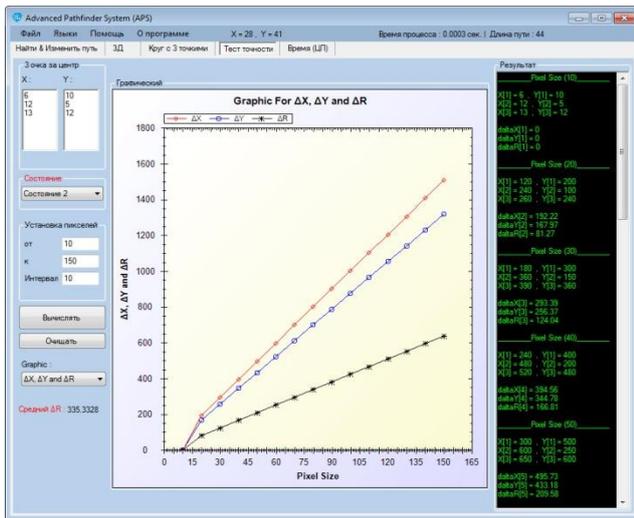
Рис. 19. Рабочее положение инструмента (а), моделирование перемещения инструмента в рабочую зону (б) и его рабочего движения (в)

Проведенное исследование показывает, что использование рецепторных геометрических моделей имеет как свои преимущества, так и свои недостатки, одним из которых является необходимость блока преобразования геометрических моделей "параметрическая модель ↔ рецепторная модель", что вносит некоторые дополнительные трудности в интерпретацию полученных результатов автоматизированной компоновки. Наиболее эффективно применение разработанных методов путем их интеграции в существующие CAD - системы, что выходит за рамки настоящего исследования.

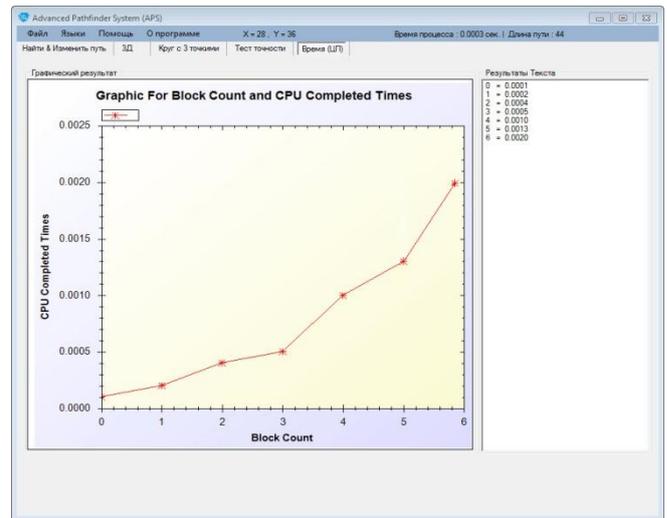
Оценка точности и производительности рецепторной геометрической модели

Важнейшим вопросом использование рецепторных геометрических моделей являются вопросы точности этой модели. Очевидно, что если моделируемый объект набирается как мозаика из кубиков, то чем меньше размер этих кубиков, тем точнее представляется ими моделируемый объект. Расплачиваться за увеличение точности приходится затратами вычислительных ресурсов. Оценка геометрической точности представления модели приведена в диссертациях Ситу Лина [6] и Ньи Ньи Хтуна [9]. Проведенное ими исследование точности модели на тестовых примерах с частным заранее известным результатом представлена на рис. 20 а. На этом графике приведены вычисленные значения погрешностей по осям Ox , Oy и Oz соответственно.

Оценка производительности рецепторных моделей зависит прежде всего от производительности конкретного компьютера, на котором проводились замеры скорости (частоты и архитектуры процессора, количества его ядер, количества и латентности оперативной памяти и производительности жесткого диска). Результаты оценки производительности для тестовых примеров применены для компьютера мощности (на данный момент) чуть выше средней. Результаты теста скорости приведены на рис. 20 б.



а)



б)

Рис. 20. График оценки точности рецепторной модели (а) и производительности (б), полученные на основании тестовых примеров с заранее известным результатом

Из этого рисунка видно, что именно процессорное время при увеличении дискретности пространства увеличивается примерно по квадратичной параболе, но все равно составляет доли секунды. Имитационное моделирование позволило оценить и затраты процессорного времени, которые также ожидаемого растут при уменьшении размера рецептора d и соответствующим увеличением точности модели по параболической зависимости от нескольких секунд до почти 3-х минут. Это означает, что при размере рецептора, например, 0,2 мм погрешность представления формы составляет $0,18 \pm 0,06$ мм, что вполне достаточно для этапа эскизного проектирования и является разумным компромиссом между ожидаемой точностью алгоритма и затратами вычислительных ресурсов для его реализации.

Необходимо отметить, что имеются немалые резервы для снижения и требуемой вычислительной мощности при реализации рецепторных геометрических моделей (например путем использования адаптивных размеров рецептора), однако рас-

смотрение этого вопроса выходит за рамки настоящей статьи. Быстрый рост производительности вычислительной техники делает дискретные рецепторные модели все более привлекательными и все более востребованными в практике проектирования высокотехнологичной техники.

Выводы и рекомендации

1. Рецепторные геометрические модели позволяют легко определять условия взаимного пересечения скомпонованных объектов в сцене при автоматизированном проектировании авиационной техники.

2. Использование рецепторных геометрических моделей позволяет создавать на их основе интеллектуальные алгоритмы автоматизированной компоновки.

3. Показаны примеры эффективного использования рецепторных алгоритмов в некоторых нетривиальных задачах компоновки (выявление незаполненных пространств, телесная трассировка, обеспечение зон обслуживания уже размещенных объектов).

4. Показано, что рецепторные геометрические модели обеспечивают достаточную точность и производительность на этапе эскизного проектирования авиационной техники.

Библиографический список

1. Семенков О.И. Введение в системы автоматизации проектирования. - Минск: Наука и техника, 1979. - 85 с.

2. Аведьян А.Б., Бибиков С.Ю., Маркин Л.В. и др. Компоновка самолетов / Под ред. М.Ю.Куприкова.- М.: Изд-во МАИ, 2012. - 296 с.
3. Герасименко Е.П., Зозулевич Д.М. Минимизация вычислительного процесса при решении геометрических задач с помощью рецепторных матриц // Вычислительная техника в машиностроении. Минск, ИТК АН БССР, 1970. С. 26 – 40.
4. Зозулевич Д.М. Машинная графика в автоматизированном проектировании. – М.: Машиностроение, 1976. – 240 с.
5. Корн Г.В. Методы формирования рецепторных геометрических моделей и их применение при решении инженерно-геометрических задач. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. - М.: МАДИ, 1990, - 22 с.
6. Ситу Лин. Разработка методов и геометрических моделей анализа незаполненных пространств в задачах размещения. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. - М.: МАИ, 2011, - 24 с.
7. Гаврилов В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1988. – 136 с.
8. Стоян Ю.Г., Гиль Н.И. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов. - Киев: Изд-во Наукова думка, 1976. - 249 с.
9. Ньи Ньи Хтун. Разработка и исследование рецепторных геометрических моделей телесной трассировки. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: МАИ, 2014, - 26 с.