

## **Рецепторные геометрические модели в задачах автоматизированной компоновки технического отсека легкого самолета**

Ситу Лин, Ньи Ньи Хтун, Маркин Л.В.

### **Аннотация**

В докладе рассмотрены вопросы, связанные с автоматизацией проектирования – размещение геометрических объектов среди уже размещенных и областей запрета. Такая задача возникает, например, при компоновке технического отсека легкого самолета. Показана возможность и результаты использования для этого рецепторных (воксельных) геометрических моделей. Алгоритм размещения основан на анализе формы и размеров свободных областей и подбора еще неразмещенных объектов подходящей формы и размера.

### **Ключевые слова**

геометрическое моделирование; рецепторные модели; компоновка; распознавание формы

### **Введение**

Развитие современной авиационно-космической техники, рост требований к ней и повышение плотности компоновки заставляют конструкторов постоянно совершенствовать методы проектирования. Даже первые опыты компьютеризации процесса проектирования при решении отдельных частных задач показали их высокую эффективность. 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 ученых – Стояна Ю.Г., Гиля Н.И., Гаврилова В.Н., Мальчевского В.В., Куприкова М.Ю. и др. [1...4], 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 услужливо подсказывает ему, куда и чего можно «подпихнуть» (а на самом деле она является чудесным 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 [5].

Именно разработке такого «эрзац-мышления» для решения ЭВМ задач размещения 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 техотсеке ЛА). Однако в таких задачах престаёт 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.

### **Постановка задачи исследования**

С математической точки зрения задача компоновки авиационной техники (впрочем, как и любой другой) может быть сформулирована как оптимизационная задача следующего вида.

Пусть имеется  $N$  компоуемых объектов  $T_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) и область размещения  $\Omega$ . Требуется разместить эти объекты с учетом заданных ограничений в области  $\Omega$  таким образом, чтобы функция цели компоновки  $\Phi(X)$  достигала экстремума, т.е. определить

$$\text{Extr } \Phi(X) \text{ при } X \subset \Omega$$

где  $X$ -некоторая переменная, определяющая параметры размещения.

Таким образом, математическая постановка задачи размещения включает 3 компонента:

- 1) Выбор функции цели  $\Phi(X)$ .
- 2) Выбор переменной  $X$ .
- 3) Выбор и формализация ограничений.

Основным геометрическим условием рационального размещения объектов является ус-

ловие рационального размещения в области  $\Omega$  некоторого множества компоуемых объектов  $\{T_i\}_1^n$  (где  $n$  достаточно велико) или наибольшего количества множеств объектов  $\{\{T_i\}_1^n\}_1^m$  (где  $m$  достаточно велико). В данном случае приходится говорить о рациональном, а не об оптимальном размещении объектов, т.к. в силу астрономического количества вариантов компоновки (ее многовариантности) достижение глобального экстремума функции цели компоновки практически исключается [6].

Очевидно, что в геометрическом плане основным критерием оптимизации размещения является оптимизация коэффициента заполнения пространства  $K_V$ . 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, тем не менее, не является самым удобным для проведения дальнейших компоновочных расчетов.

Поэтому дальнейшей детализацией выражения (1), необходимой для оптимизации по  $K_V$ , является переход от минимизации по объему к минимизации по расстоянию между объектами. Оптимизация по  $K_V$  достигается максимально компактным (в идеале - плотным) размещением компоуемых объектов, фундаментальное понятие которого введено Ю.Г. Стояном и Н.И.Гилем [1].

Было бы значительным упрощением считать, что максимальная плотность размещения является единственным критерием эффективности компоновки – в жизни все значительно сложнее – приходится учитывать и много других требований – заданную центровку, удобство обслуживания, взаимную совместимость объектов и т.п., но в данной статье мы ограничимся лишь чисто геометрическими требованиями к размещению.

Итак, будем решать задачу в следующей постановке – имеется замкнутая область (например, технический отсек летательного аппарата) с уже частично размещенным там оборудо-

дованием. Как правило, с геометрической точки зрения, такое оборудование представляет собой либо примитивы, либо комбинацию примитивов. Имеется набор оборудования, которое необходимо «доразместить». Возможности «доразмещения» определяются формой и размерами еще незаполненных пространств между уже скомпонованными объектами.

Поэтому целью данной статьи является разработка методов и алгоритмов оценки формы и размеров незаполненных пространств между уже скомпонованными объектами. Такие задачи возникают при компоновке технического отсека легких самолетов, где как уже размещенные объекты, так и подлежащие размещению, имеют сравнительно простые геометрические формы (примитивы и композиции примитивов) [2, 3].

### **Метод решения**

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.

Причиной этого является принятый в CAD/CAM системах в качестве основного полигональный подход к геометрическому моделированию, плюсом которого является быстрый рендеринг (визуализация) объекта. Однако реализация алгоритмов автоматизированного размещения, основанных на полигональных моделях (годограф функции плотного размещения, метод разделяющей плоскости и т.п.) изначально основана на методах «перебора переборов», что не позволяет их реализовать на практике для объектов сложных форма даже при современной мощности средств вычислительной техники (СВТ).

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 (рисунок 1 а)

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

Очевидно, что точность описания геометрической формы объекта зависит от выбранной нами дискретности рецепторной матрицы. Такой метод геометрического моделирования был предложен в начале 70-х годов прошлого века белорусским ученым Зозулевичем Д.М.[7,8], но в те годы не получил распространения из ограниченных возможностей СВТ (прежде всего 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.

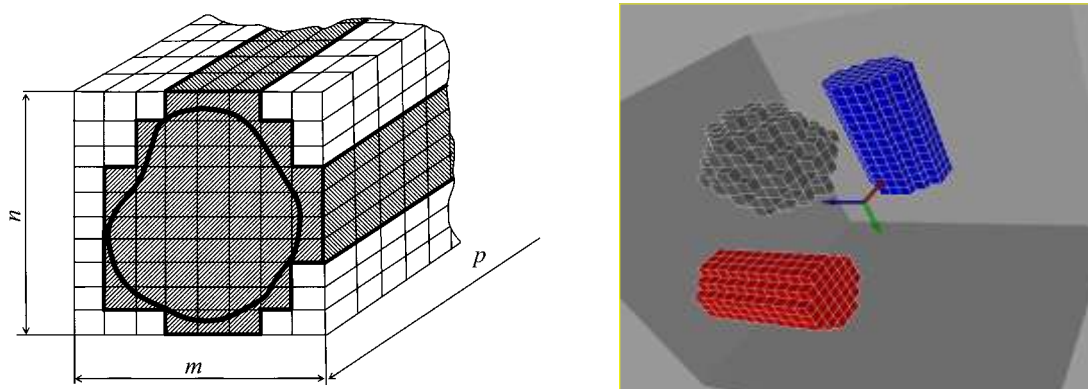


Рисунок 1 - Описание объекта рецепторной матрицей

По своей геометрической сущности рецепторный метод 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» ↔ «Рецепторная модель». Но вопросы такого преобразования решены в работах Г.В.Корн [9].

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 у нас, так и на Западе (там они называются «воксельными» - элемент объема – по аналогии с «пиксельными» - элементами плоскости).

Использование РГМ требует обязательной операции – перевода параметрической геометрической модели в рецепторную. 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. Т.е. если среди скомпонованных объектов имеется незаполненное пространство (рисунок 2 а), то на соответствующем срезе рецепторной матрицы оно сравнительно легко выявляется как «сгустки» нулевых рецепторов (рисунок 2 б). Для этого нами разработан алгоритм, позволяющий определить центр определенной свободной области (плоской!) и ее размеры. На рисунке 3 видно, что на срезе рецепторной матрицы алгоритм обнаружил 4 такие области, которые закрасил разным цветом. При работе алгоритма задается его определенная «чувствительность» - на рис. 3 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.

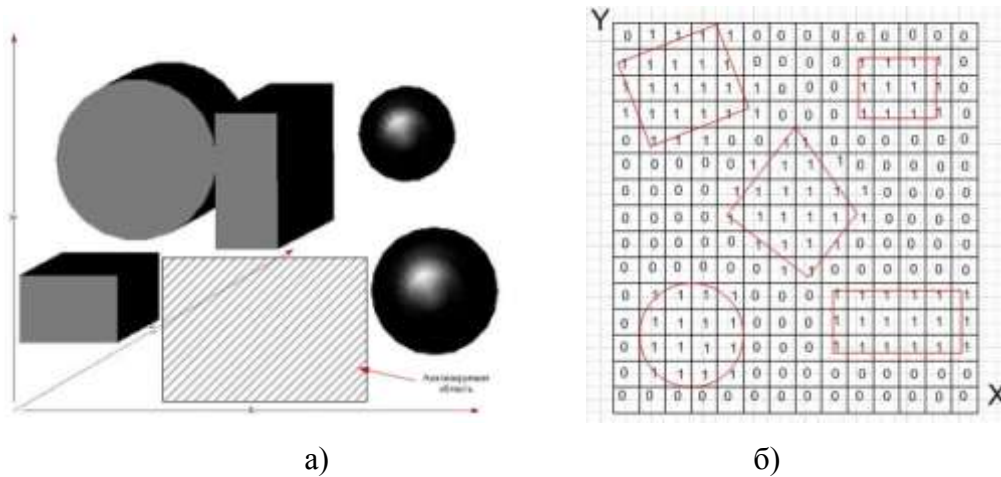


Рисунок 2 – Использование РГМ: а – местоположение тела в пространстве; б – его описание рецепторной матрицей

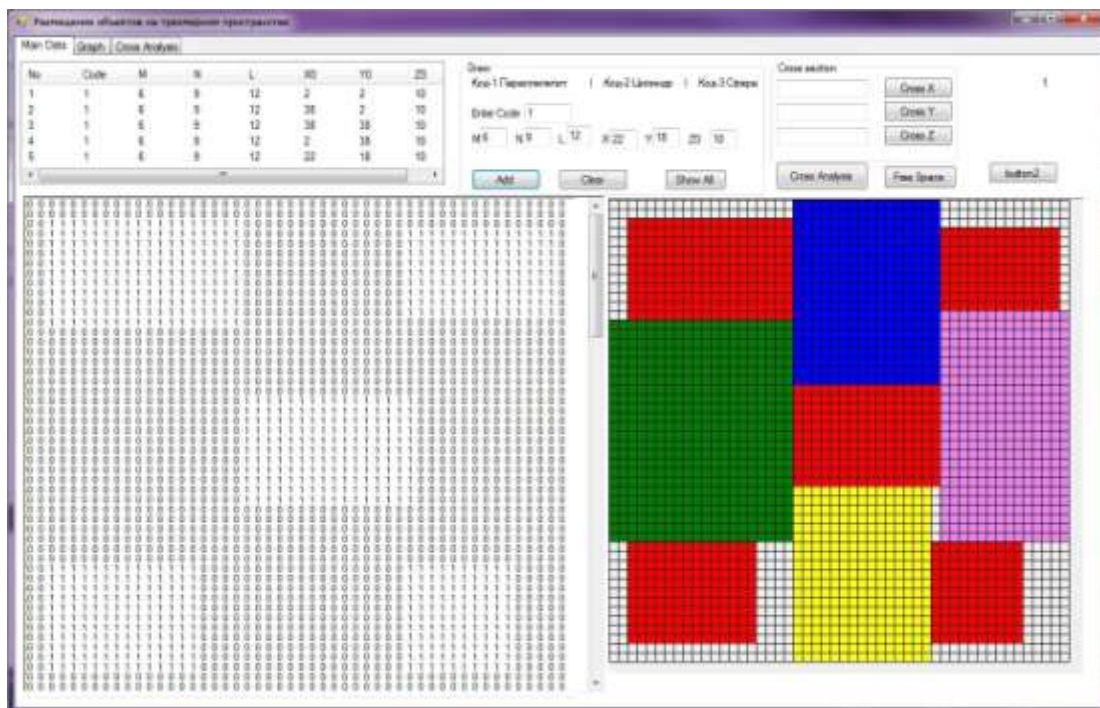


Рисунок 3 – Определение свободных областей в рецепторной матрице

Следующим этапом анализа формы свободной области (пока плоской) – на какой плоский примитив (круг, прямоугольник, многоугольник) она больше всего похожа. Для анализа отдельного сечения объекта используем принятый в теории распознавания образов [9] переход от геометрической формы объекта (в виде дискретного набора рецепторов) к «пространству признаков». Таким пространством признаков для нас станет годограф функции радиуса вектора от центра сечения  $\Gamma = R_i(\varphi_i)$  (рисунок 4)

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

$\varphi_i$ - текущий угол радиуса – вектора для  $i$  – го рецептора.

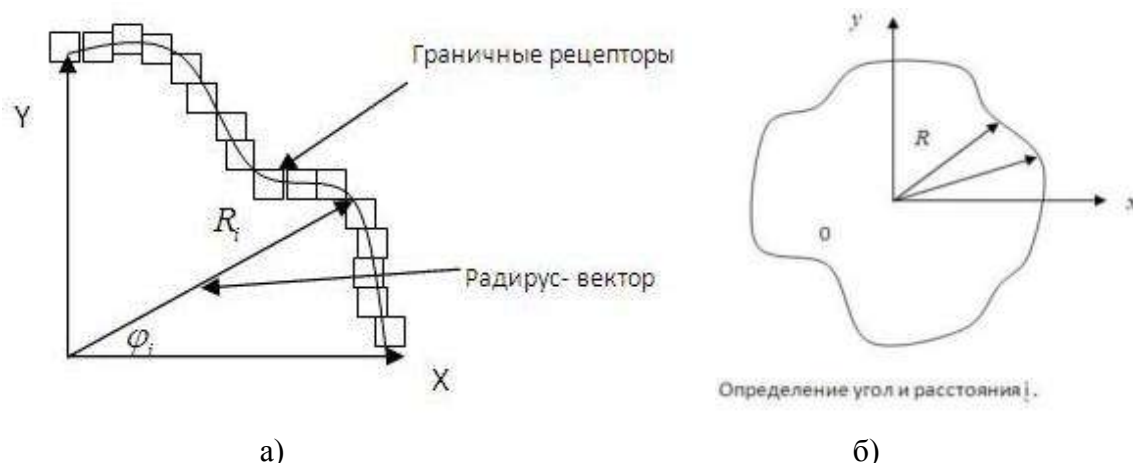


Рисунок 4 – Построение годографа функции радиуса-вектора

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 (рисунок 5), если многоугольник – то «пила» с количеством вершин, равным количеству сторон. Координаты вершин по  $\varphi$  позволят определить соотношения сторон прямоугольника

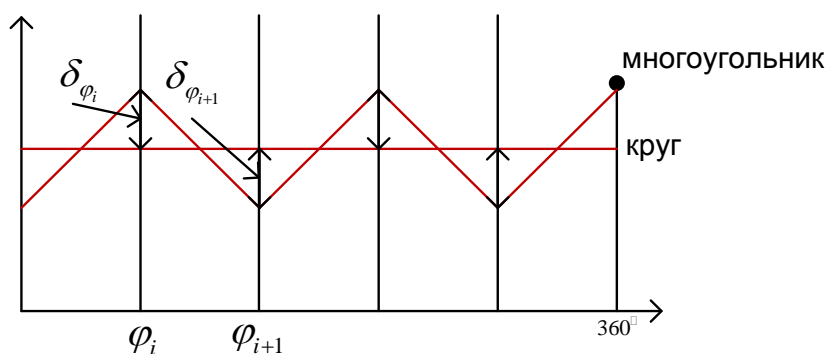


Рисунок 5 – Анализ незаполненной области пространства (случай – многоугольник)

К сожалению, на графике мы никогда не увидим столь идеальной кривой – на ее характер будут влиять как случайные отклонения  $\delta_i$ , обусловленной дискретностью рецепторной модели, так и систематические отклонения, обусловленные тем, что исследуемая область является не идеальным кругом, прямоугольником и т.п. Реальный график функции  $R_i(\varphi_i)$ , сделанный для наглядности на «крупной» рецепторной матрице, представлен на рисунке 6.



Именно этот график и станет объектом анализа, по которому необходимо определить геометрическую форму исследуемой области.

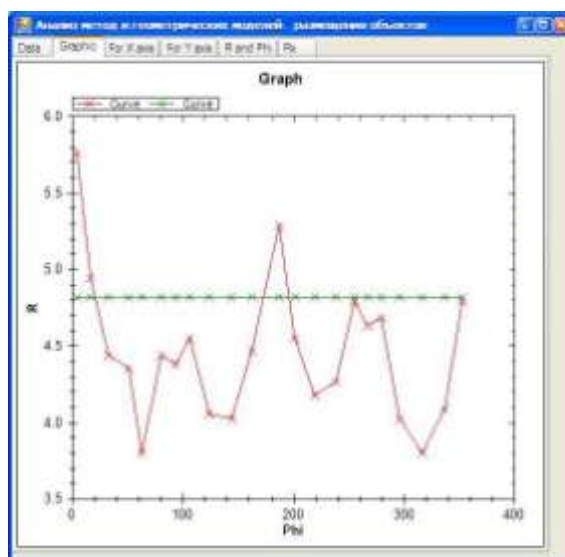


Рисунок 6 – График реальной функции для анализа образа незаполненного пространства

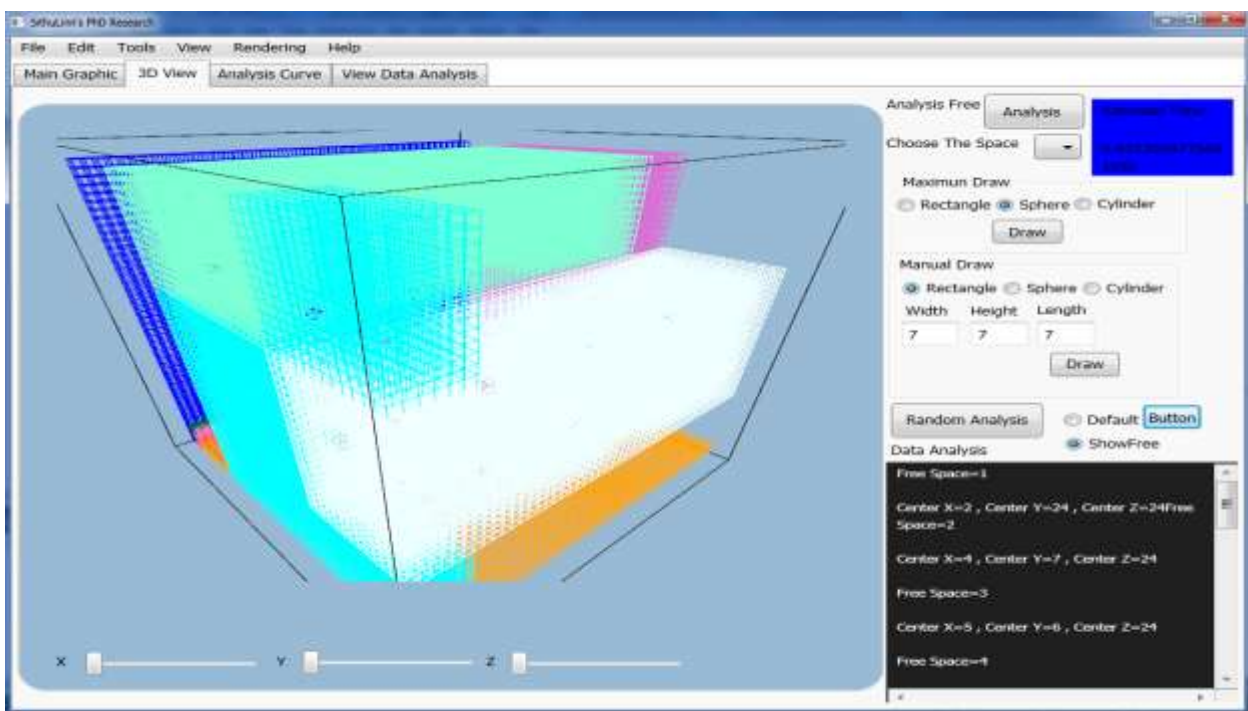
Небольшие колебания графика функции около среднего значения можно рассматривать как «шум эксперимента». Но если в график имеет четко выраженные экстремумы, то это является признаком многоугольника в сечении, причем количество таких экстремумов укажет нам на вид многоугольника в сечении (3-х, 4-х, 6-ти угольник). Для того, чтобы различать экстремумы от многоугольников от шума эксперимента, в нашем исследовании используются статистические методы, т.е. осуществляется проверка, какова вероятность, что данный график описывает окружность, треугольник, прямоугольник или какой-либо другой плоский примитив. Для этого используется известный проверки статистических гипотез [10,11, 12], реализованный как расчетный программный модуль.

Следующий этап – определение формы свободной области, т.е. переход к 3D – случаю. Для этого описанные выше действия проводятся для следующего сечения по рецепторной матрице. Если в следующем сечении с этими же координатами центра также будет опознан круг такого же диаметра(в пределах статистической погрешности), и это же будет продолжаться в следующих сечениях, то можно ожидать, что исследуемая область имеет форму цилиндра или почти цилиндра. Если при тех же условиях радиус уменьшается или увеличивается, то можно ожидать что форма области имеет вид конуса или сферы – конкретный вид 3D – фигуры определится также статистическими методами по закону изменения радиусов рядом стоящих сечений. Таким образом, зная параметры отдельных сечений, производится проверка гипотез о наибольшем соответствии набора сечений какому-либо геометрическому

примитиву – сфере, цилиндру, параллелепипеду и определение его параметров формы и расположения.

Отдельную непростую задачу представляет собой выявление незаполненных пространств как мест возможного «доразмещения» объектов, эта задача выполняется такими статистическими методами как «сгустки» близкорасположенных 0-вых рецепторов. Этот этап анализа незаполненных пространств позволяет не только визуализировать незаполненные области пространства (рисунок 7 а), но оценить их конфигурацию (рисунок 7 б).

Из рисунка 7 а видно, что 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 наилучшим образом заполнил бы это пространство (рисунок 7 в). Например, параллелепипед максимального размера, вписанный в уже расположенные объекты, показан на рисунке 8 синим цветом.



а)

Продолжение рисунка 7

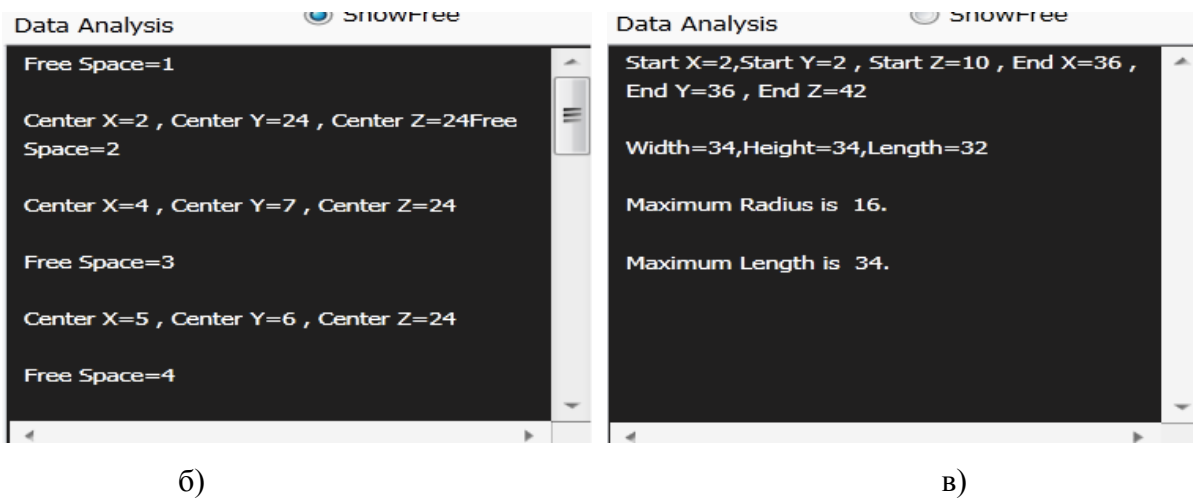


Рисунок 7 – Определение конфигурации незаполненных пространств: а – визуализации пространства; б – вывод данных о размерах и положении свободной области; в – оценка возможности вписывания различных фигур

Если у нас есть желание разместить в этой области не параллелепипед максимального размера, а, например, сферу определенного радиуса (рисунок 9 а), то она становится после этого полноправным участником сцены (рисунок 9 б) и после нажатия кнопки «Analysis» происходит новое определение конфигурации незаполненных пространств.

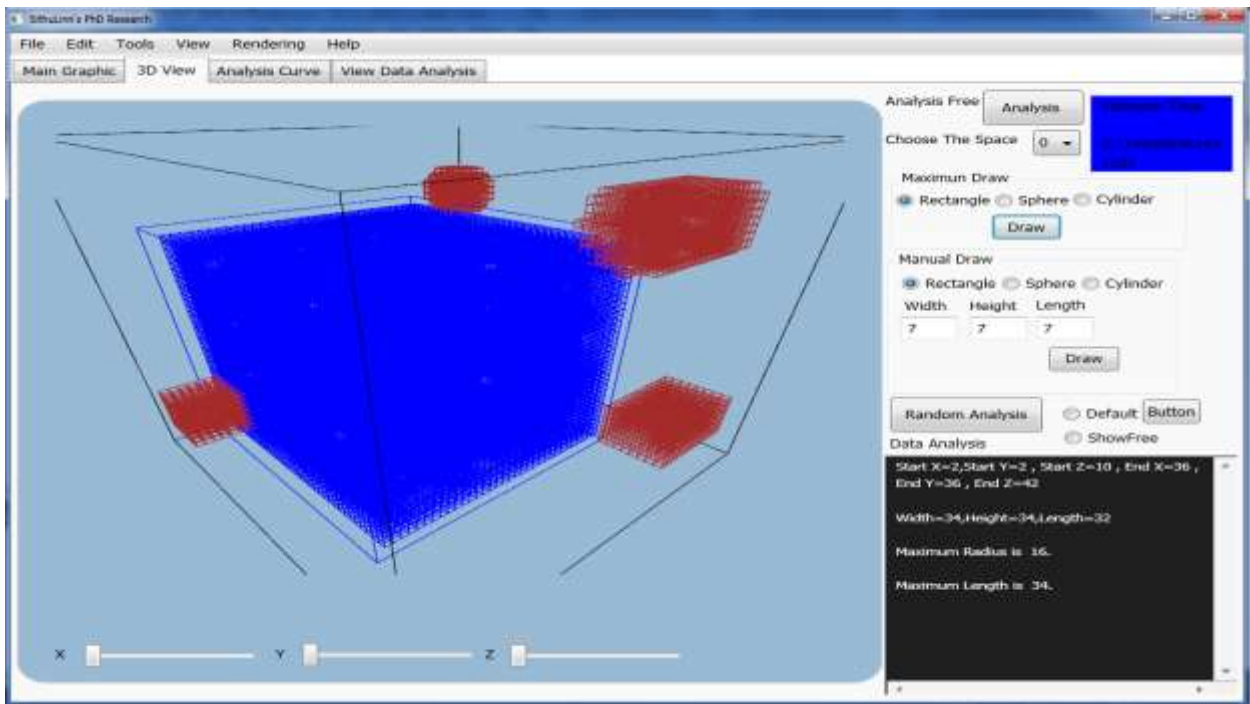
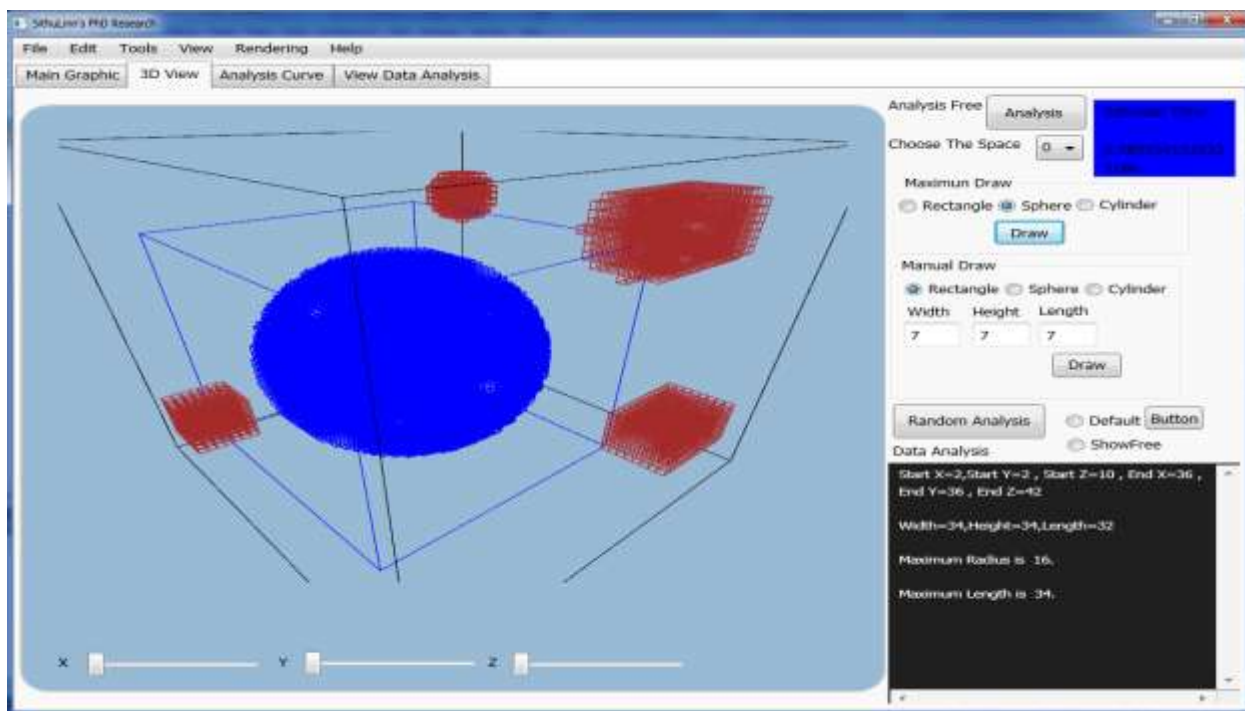
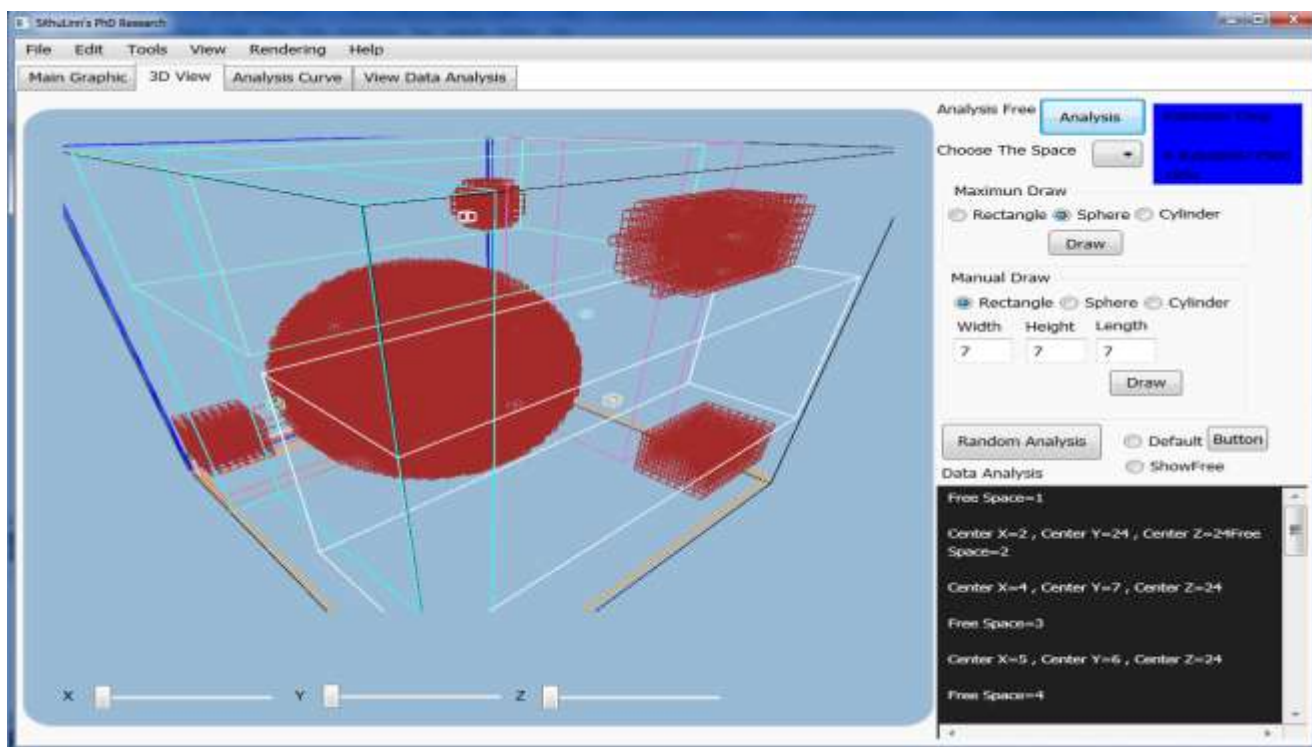


Рисунок 8 – Визуализация вписанного объекта максимально возможных размеров



а)



б)

Рисунок 9 – Добавление скомпонованных объектов в рецепторную модель: а – визуализация сферы максимально возможного радиуса как области возможного размещения; б – размещенный в свободной области объект как полноправный участник сцены

Так как рецепторные модели по определению дискретны, то в процессе обсуждения результатов возникает вопрос о точности их описания и вычислительных ресурсах, необходимых для их реализации. Для оценки точности РГМ была разработана специальная геометрическая модель. Исследование модели показало, для рецепторной матрицы с размерами  $1\text{м} \times 1\text{м}$  значения наиболее вероятной абсолютной погрешности зависят от размера рецептора, который, в свою очередь, определяется количеством рецепторов в конкретной рецепторной матрице. Причем абсолютная погрешность описания формы РГМ не зависит от формы и размеров тела, описываемого этим методом. Результаты расчета приведены в виде графика на рисунке 10. Из этого графика видно, что погрешность описания формы РГМ зависит имеет порог (в нашем случае это примерно 5 тысяч рецепторов), при уменьшении которого абсолютная точность описания формы резко снижается.

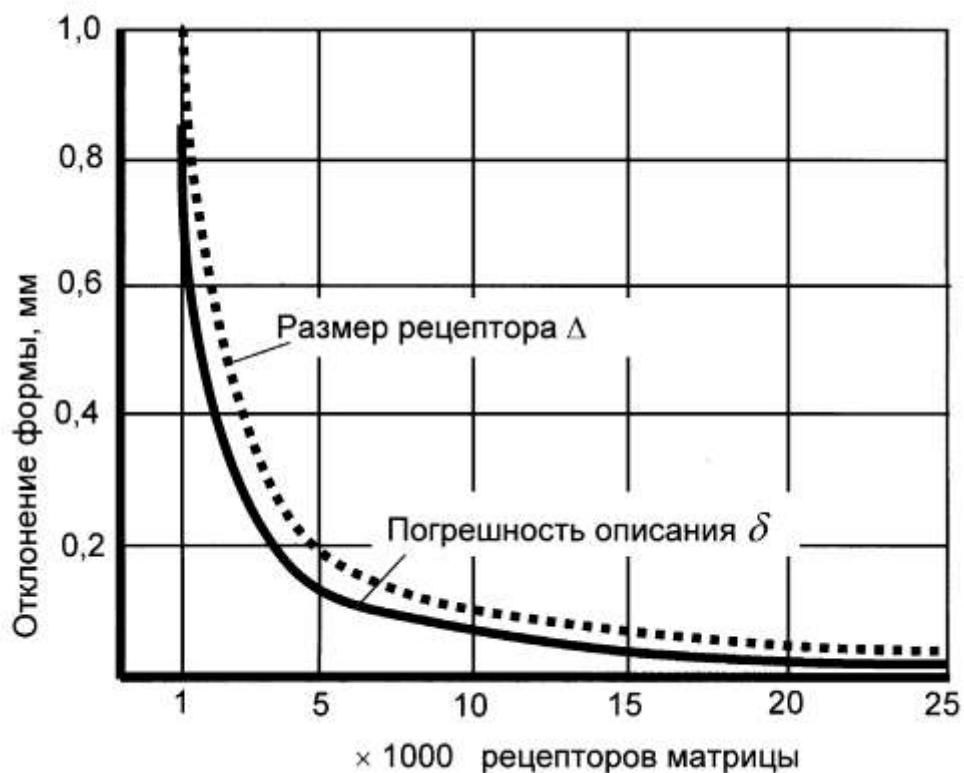


Рисунок 10 - Оценка точности РГМ в зависимости от размеров рецептора

Значение наиболее вероятной относительной погрешности будут определяться размерами описываемого тела. Для описанной РГМ сферы различных радиусов, расположенных в рецепторной матрице размерами  $1\text{м} \times 1\text{м}$ , вычисленные значения относительной погрешности приведены на рисунке 11. Он показывает, что относительная погрешность, как и абсолютная, определяется размерами рецептора и также имеет ярко выраженный порог возрастания. Она

также зависит от абсолютных размеров объекта, описанного РГМ – чем меньше объект, тем ниже относительная точность его описания. Но рисунок 11 также показывает, что для наиболее «ходовых» размеров технических объектов даже при не очень высоком количестве рецепторов (около 5 тысяч), относительная точность описания остается достаточно высокой (ниже 0,05%), что вполне достаточно для большинства технических приложений этого способа геометрического моделирования.

Время компьютерной обработки РГМ определяется как аппаратными возможностями компьютера, так и параметрами конкретной РГМ. В свою очередь время будет определяться количеством рецепторов и количеством уже размещенных объектов. На рис. 12 приведена оценка процессорного времени при решении поставленной задачи распознавания плоской области с фиксированным количеством рецепторов (1000 × 1000). Из рисунка 12 видно, что время работы процессора определяется количеством уже размещенных объектов, но все равно остается сравнительно небольшим (доли секунды) даже для компьютера мощности ниже средней.

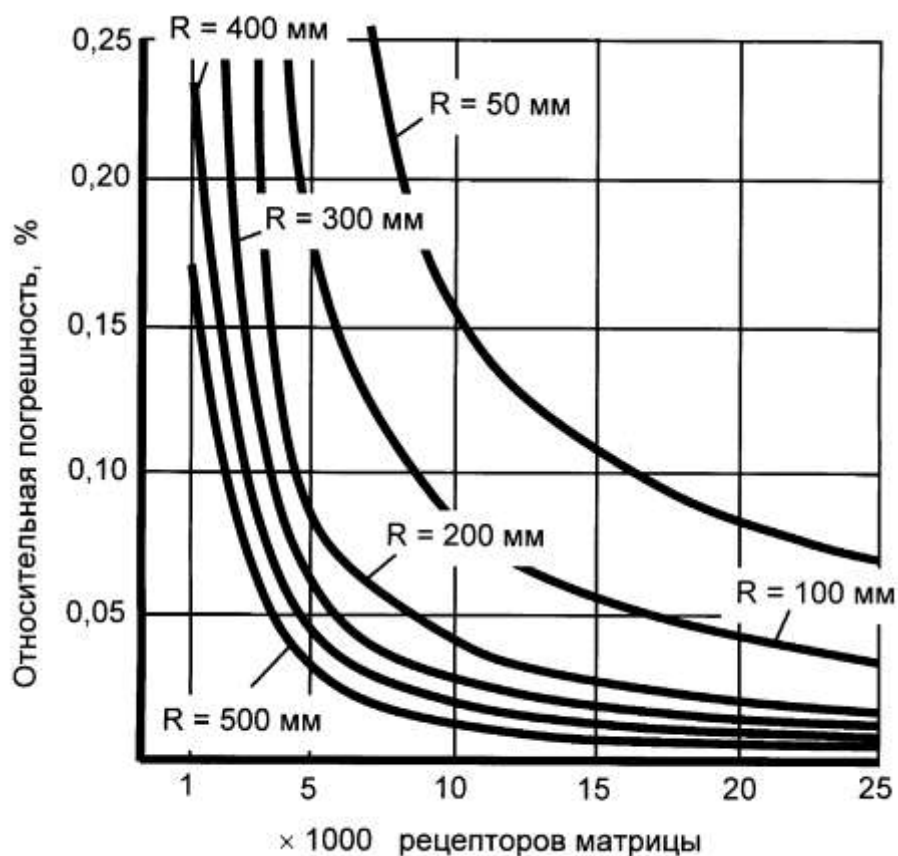


Рисунок 11 – Оценка относительной погрешности РГМ

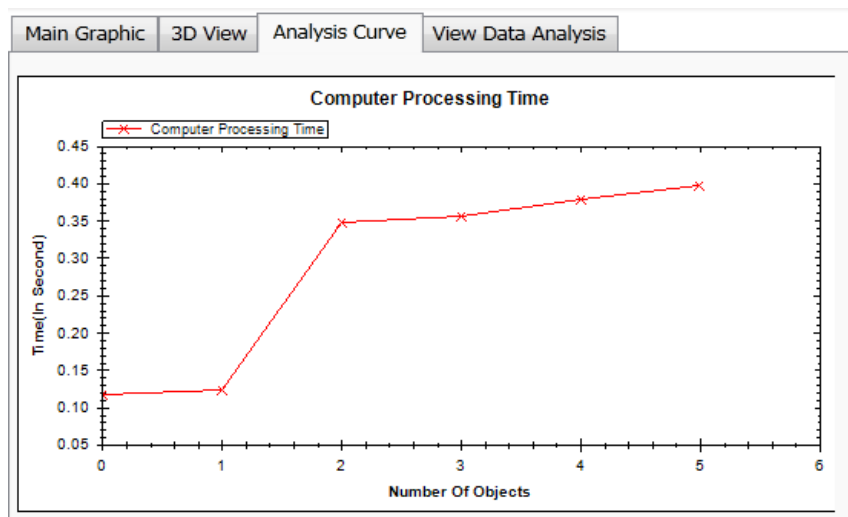


Рисунок 12- Затраты процессорного времени для определения незаполненных пространств в зависимости от числа уже размещенных объектов

Для пространственной сцены время получения решения возрастает примерно на порядок, но все равно остается приемлемым для интерактивного режима работы. Но при этом следует учитывать, для РГМ возможны методы декомпозиции модели и распараллеливания вычислений, которые требуют дальнейшего исследования и в этом исследовании не использовались.

### Библиографический список

1. Стоян Ю.Г., Гиль Н.И. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов.- Киев: Наук. думка, 1976.
2. Гаврилов В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов.- М.:Машиностроение,1988.
3. Мальчевский В.В. Автоматизация процесса компоновки самолета. - М.: Изд-во МАИ, 1987.
4. Куприков М.Ю., Маркин Л.В., Панов В.В. и др. Формирование рационального облика перспективных авиационных ракетных систем и комплексов. – М.: Машиностроение, 2010.
5. Вальков К.И. Основы геометрического моделирования. -Л.: ЛИСИ, 1986.
6. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. - Киев: Наук. думка, 1986.



7. Зозулевич Д. М., Максимова Л. Г. Выполнение на ЭЦВМ некоторых операций с трехмерными кусочно-заданными объектами. - В кн.: Вычислительная техника в машиностроении. Минск, изд. НТК АН БССР, 1970, с. 75-84.

8. Зозулевич Д. М., Ловчев Э. М. Построение с помощью ЭЦВМ изображений трехмерных объектов, заданных кусочно-аналитическими моделями. - В кн.: Вычислительная техника в машиностроении. Минск, изд. НТК АН БССР, 1971, с. 64-76.

9. Корн Г.В., Маркин Л.В. О возможностях математического обеспечения проектирования изделий машиностроения на базе рецепторных моделей // В сб. "Материалы научно-технического семинара "Автоматизация проектирования передач и редукторов" . -Ижевск, 1989, с. 23-24.

10. Закревский А.Д. Логика распознавания.-М.: Едиториал УРСС, 2003.

11. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. - М.: Наука, 1973.

12. Нильсон П. Принципы искусственного интеллекта: Пер с англ. - М.: Радио и связь, 1985.

### **Сведения об авторах**

Ситу Лин аспирант «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)», тел. 8-926-56-54-450 e-mail [sithulinn@gmail.com](mailto:sithulinn@gmail.com)

Ньи Ньи Хтун аспирант «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)», тел. 8-926-066-63-02 e-mail [nyinyihtun@live.com](mailto:nyinyihtun@live.com)

Маркин Леонид Владимирович профессор «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)», к.т.н., доцент, тел. 8-915-138-40-55; e-mail [markinl@list.ru](mailto:markinl@list.ru)