

Подшивалов Алексей Юрьевич

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ
ДЛЯ АНАЛИЗА ВЗАИМОРАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

05.13.11 – математическое и программное обеспечение вычислительных
машин, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2005

Работа выполнена в Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова.

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор Томилин Александр Николаевич
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Михайлюк Михаил Васильевич кандидат физико-математических наук, доцент Баяковский Юрий Матвеевич
Ведущая организация:	Московский Физико-Технический Институт (МФТИ)

Защита состоится “ 10 ” февраля 2006 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 501.001.44 в Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, г. Москва, Воробьевы Горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2-ой учебный корпус, факультет Вычислительной математики и кибернетики, аудитория 685.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ 10 ” января 2006 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, профессор

Трифонов Н.П.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Анализ взаимного расположения объектов является одной из основных задач, решаемых в системах моделирования. В системах реального времени требуется анализировать состояние объектов системы и принимать решение за короткий промежуток времени. В последнее время моделирование широко применяется для технических систем, которые отличаются как сложностью самих систем, так и стоящих перед ними задач. Один из примеров – процесс стыковки космических аппаратов.

Существующие методы, как правило, используют системы технического зрения, основанные на получении и распознавании двумерных изображений физической среды. Такие методы сложны и требуют большого объема вычислений. Приходится выполнять слежение за большим количеством узлов объектов. Кроме того, должна быть решена проблема видимости требуемых узлов.

Актуальной является проблема разработки новых методов определения и анализа взаиморасположения объектов в условиях работы бортовых систем в реальном времени. Эти методы должны быть достаточно просты и должны использовать меньшие объемы вычислительных ресурсов (в частности, оперативной памяти).

Основная идея заключается в активном использовании доступной априорной информации о поверхностях объектов, например конструкторской документации. При совместном использовании оперативной и априорной информации могут быть разработаны и применены принципиально новые методы решения задачи.

Цель работы

1. Исследовать возможности применения индуцированной виртуальной среды в системах управления с обратной связью.

2. Разработать алгоритм определения пространственного положения объектов по оперативно получаемым координатам маркеров, расположенных на объекте.
3. Разработать методы решения задачи взаиморасположения объектов для деформируемых объектов сложной пространственной структуры в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.
4. Разработать программные средства для решения задачи анализа взаиморасположения объектов.

Научная новизна работы

Предложена концепция построения систем управления с обратной связью с использованием индуцированной виртуальной среды (ИВиС). В схему работы системы добавляется стадия реконструкции виртуальной среды. Реконструкция осуществляется на основе двух типов информации: априорной информации о моделях объектов и оперативной информации об объектах. Показано, что ИВиС содержит всю необходимую для принятия решения информацию, а значит, является источником обратной связи. Таким образом, сигнал обратной связи может быть извлечен из виртуальной среды, а не из физической системы, как в традиционных системах с обратной связью.

Разработан новый алгоритм определения пространственного положения объектов по координатам маркеров. Алгоритм позволяет быстро определять положение любой точки объекта в пространстве по координатам маркеров, находящихся на реальном объекте, и априорно известной сеточной модели объекта.

Разработанные методы анализа взаиморасположения объектов, по сравнению с взятым за основу методом ориентированных ограниченных объемов, позволяют:

- ускорить анализ взаиморасположения объектов сложной пространственной структуры;
- сократить используемый для анализа взаиморасположения объектов объем оперативной памяти;

- проводить анализ взаиморасположения для деформируемых объектов.

Практическая значимость

Разработаны и реализованы методы и алгоритмы решения задач определения пространственного положения и анализа взаиморасположения объектов в системах моделирования в реальном времени. Программные реализации предложенных методов анализа взаиморасположения объектов удовлетворяет требованиям и ограничениям, сформулированным при постановке задачи, и используются в системе реального времени GL View.

Разработанные методы и алгоритмы позволяют:

- значительно уменьшить количество информации, передаваемой из физической системы в систему моделирования;
- решать задачи определения и анализа взаиморасположения объектов на бортовых вычислительных комплексах;
- осуществлять наблюдение за физической системой из произвольных точек пространства («виртуальные камеры»).

Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались и обсуждались на:

- научной конференции “Тихоновские чтения” (ф-т ВМиК МГУ);
- семинаре по компьютерной графике и машинному зрению под руководством Ю.М.Баяковского (ф-т ВМиК МГУ);
- семинаре «Научно-техническая визуализация» (ИМВС РАН)
- научно – исследовательском семинаре по автоматизации программирования под руководством проф. М.Р.Шура-Бура (ф-т ВМиК МГУ);

Основные результаты работы изложены в 3-х научных публикациях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включает 12 рисунков и 4 таблицы.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость, описана структура диссертации.

Первая глава посвящена обзору научных достижений в области исследований и классификации существующих систем, методов и алгоритмов анализа взаиморасположения объектов. При моделировании физических систем создается так называемая виртуальная среда (ВиС), которая по возможности точно отражает реальный процесс. Виртуальная среда содержит модель наблюдаемой среды и модели находящихся в ней объектов. С помощью ВиС можно наблюдать и анализировать развитие событий в динамике, и, на основании полученных результатов, делать какие-либо оценки и выводы о поведении системы.

В ряде систем для описания поведения моделей объектов используются заданный сценарий или поток событий, генерируемых самой системой моделирования (тренажеры, виртуальные музеи и др.). Подобные виртуальные среды существуют отдельно от реальных объектов, поведение которых моделируется, и в данной работе не рассматриваются. В других системах реальная и виртуальная среды функционируют одновременно, а состояние объектов в виртуальной среде генерируется по информации, поступающей из физической системы (телеприсутствие, медицинские системы, космические системы).

Виртуальную среду, функционирующую в режиме реального времени и воспроизводящую поведение физической системы на основе поступающего от нее вектора состояния будем называть индуцированной (ИВиС).

Одной из задач данной работы является исследование возможностей использования индуцированной виртуальной среды в системах управления с обратной связью. В традиционной трактовке теории автоматического управления источник обратной связи берется из управляемой системы, а в случае использования индуцированной виртуальной среды, при определенных условиях, сигнал обратной связи может быть извлечен из нее, что дает возможность получить принципиально новые подходы к управлению объектами.

Исходными данными для определения пространственного положения объектов служит информация, извлекаемая из моделируемой физической системы. Для ее получения используют системы технического зрения, которые анализируют набор двумерных изображений среды. Для возможности получения изображения сцены под разными ракурсами камера передвигается в пространстве по определенным правилам. Создание подобных систем трудоемко и требует в той или иной степени решать задачи распознавания образов, а также задачу управления движением самой камеры. Алгоритмы решения таких задач, как правило, сложны и требуют больших вычислительных затрат.

При моделировании поведения орбитальных станций и космических аппаратов сеточные модели объектов содержат порядка 10^6 - 10^7 узлов, а объекты имеют сложную пространственную конфигурацию, что означает еще большее увеличение сложности задачи. Кроме того, задача рассматривается в контексте систем автономного управления, а это означает, что она должна быть решена бортовыми системами. Таким образом, необходимо искать пути как упрощения постановки задачи, так и повышения эффективности используемых алгоритмов.

Метод "перехват движений" (motion capture) технологии "Виртуальная реальность" можно использовать как базу при решении задачи определения положения объектов. В основе метода лежит слежение за относительно небольшим количеством опорных точек (маркеров). В большинстве случаев информация о моделях объектов известна априорно (конструкторская документация). Это означает, что рассмотренные выше подходы обладают высокой избыточностью, поскольку большой процент информации о положении объектов уже содержится в их моделях. Объемы регистрируемой информации и сложность используемых алгоритмов могут быть радикально понижены, поскольку необходимо лишь определить пространственные координаты ограниченного набора маркеров.

Проблема анализа взаимного положения тел различной формы изучается уже достаточно длительное время, и существует широкий круг алгоритмов, посвященных решению этой проблемы. Двоичное разбиение пространства сцены позволяет исключить из рассмотрения пары объектов, принадлежащих разным областям. Чем больше расстояние между объектами сцены, тем лучше удастся выполнить их разделение, однако при малых расстояниях между объектами сложной формы

разделение пространства весьма затруднительно. Воксельные методы делят пространство по принципу октантного дерева - каждый воксель-родитель содержит восемь вокселей-потомков. Узел дерева содержит данные о принадлежности объекту. Задача анализа взаиморасположения эффективно решается при помощи логической операции «и» над узлами дерева. Основным недостатком воксельных методов является необходимость хранения большого объема данных, поскольку зависимость числа узлов дерева от линейных размеров объекта является кубической.

Другой класс алгоритмов основан на использовании ограничивающих объемов. Объект или его часть заключаются внутрь ограничивающего объема простой формы. Пары объектов, ограничивающие объемы которых не пересекаются, исключаются из рассмотрения. Наиболее распространенным типом объемов являются сферы и параллелепипеды, стороны которых параллельны осям координат (AABB - Axis Aligned Bound Box). Их основным преимуществом является простота проверки на перекрывание. Недостаток указанных объемов состоит в том, что возможны большие зазоры между объектом и охватывающим его объемом. Величина зазора для AABB также зависит от начальной ориентации объекта.

Особенностью сцен, рассматриваемых в нашем случае, является возможность плотных контактов и соприкосновений между объектами сложной формы. Использование описанных алгоритмов в таких сценах приводит к резкому увеличению тестов на перекрывание.

Наиболее перспективным в нашем случае видится метод с использованием деревьев на основе ориентированных ограничивающих объемов (Oriented Bound Boxes - OBB). Основные мотивы выбора данного подхода как основы для разрабатываемых методов: достигается плотное облежание объекта, при этом глубина OBB деревьев меньше, чем у сферических или AABB деревьев.

Логически метод можно разделить на две составляющие:

- построение OBB-дерева для объекта;
- проверка пары объектов, погруженных в OBB-деревья, на пересечение.

Построение объема. Для нахождения ориентации объема необходимо вычислить общий центр масс треугольников m и ковариационную матрицу C ,. Пусть

p^i, q^i, r^i – векторы из трех элементов, описывающие вершины i -го треугольника.

Тогда:

$$m = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n (p^i + q^i + r^i)$$

$$C_{jk} = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n (\bar{p}_j^i \bar{p}_k^i + \bar{q}_j^i \bar{q}_k^i + \bar{r}_j^i \bar{r}_k^i), \quad 1 \leq j, k \leq 3$$

где C_{jk} – элементы ковариационной матрицы C , а векторы

$$\bar{p}^i = p^i - m, \quad \bar{q}^i = q^i - m, \quad \bar{r}^i = r^i - m$$

Таким образом, получается симметрическая ковариационная матрица C . В качестве ортонормированного базиса, задающего оси объема в пространстве, используются нормированные собственные векторы полученной матрицы. Размеры параллелепипеда определяются вершинами принадлежащих ему треугольников.

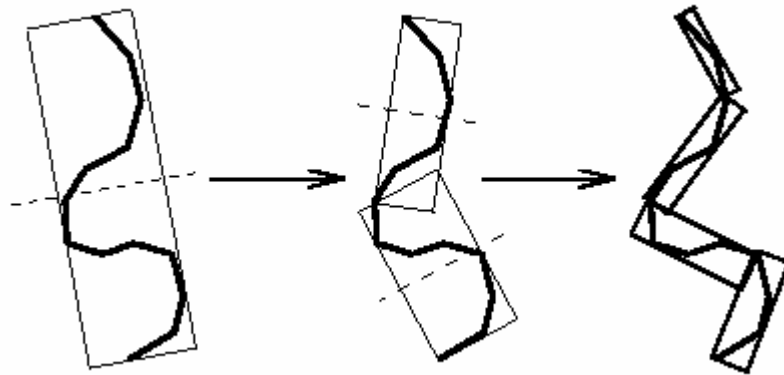


Рис 1. Построение ОВВ-дерева. Двумерная проекция.

Для последующих дроблений объема применяется следующее правило. Упорядочим оси объема по убыванию длины. Деление объема происходит вдоль самой длинной из осей с помощью плоскости, ортогональной самой оси. Треугольники, принадлежащие объему, делятся между объемами-потомками в зависимости от того, по какую сторону от разделяющей плоскости лежит центр масс треугольника. Двумерный аналог такого деления показан на рис.1.

Проверка пары объектов на пересечение. Для того, чтобы определить, пересекаются ли объекты, производится проверка на перекрывание пар объемов,

входящих в ОВВ-деревья объектов, начиная с корневых объемов и далее, вплоть до листьев дерева. Отсутствие пересечения двух объемов заведомо гарантирует отсутствие пересечения самих объектов в узлах сетки, ограниченными этими объемами. В этом случае спуск по дереву прекращается. В случае пересечения двух объемов на данном уровне проводится проверка для всех пар объемов следующего уровня иерархии.

Проверка пары объемов на перекрывание. По теореме о разделяющей плоскости два многоугольника, рассматриваемых в трехмерном пространстве, не пересекаются тогда и только тогда, когда существует разделяющая их плоскость, параллельная двум прямым, каждая из которых проходит через ребро одного из многоугольников. Для двух параллелепипедов получаем 15 плоскостей. Если хотя бы одна из плоскостей является разделяющей, то объемы не пересекаются.

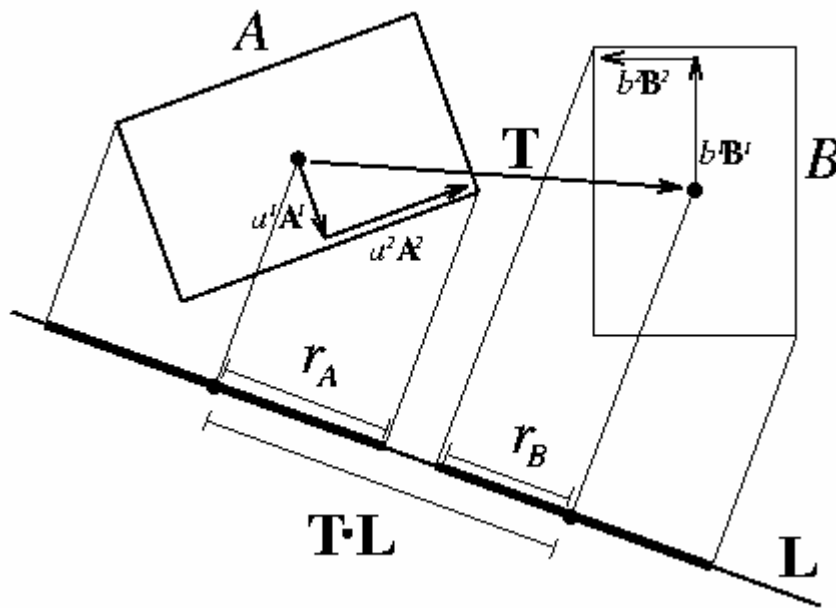


Рис. 2. Проверка прямой на разделение двух объемов

Пусть даны два объема, A и B . Пусть относительно координат объема A объем B задается матрицей поворота R и вектором сдвига T . Пусть полудлины ребер A и B равны соответственно a_1, a_2, a_3 , и b_1, b_2, b_3 , а направления ребер объемов задаются как векторы A^i и B^i , где $i = 1, 2, 3$. Поскольку векторы направлений объемов взаимно ортогональны, то длина проекции объема на прямую равна сумме длин проекций каждого из трех ребер, то есть

$$r_a = \sum_{i=1}^3 a_i |(A^i, L)|$$

Расстояние между проекциями центров объемов равно $|(T, L)|$. Отсюда получаем искомое неравенство:

$$|(T, L)| > \sum_{i=1}^3 a_i |(A^i, L)| + \sum_{i=1}^3 b_i |(B^i, L)|$$

Если оно выполняется, то интервалы, а значит и объемы, не пересекаются.

Во **второй главе** изложены предлагаемые автором подходы к решению поставленных задач. В разделе 2.1 показано, как использование ИВиС позволяет существенно развить концепцию построения систем управления с обратной связью. Рассмотрим определение понятия обратной связи в классической теории систем автоматического управления (САУ). В простейшем случае САУ состоит из объекта управления О и управляющего устройства УУ.

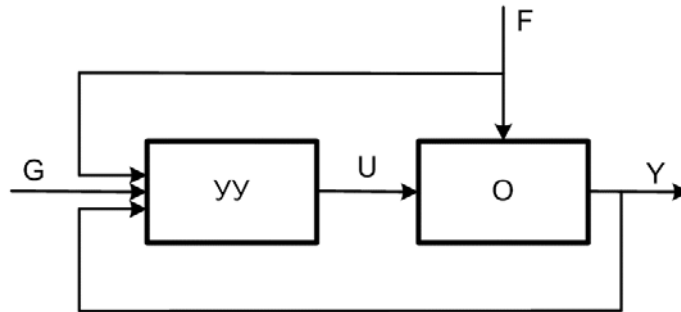


Рис. 3. Управление с обратной связью.

Состояние управляемого объекта характеризуется вектором Y , на вход управляющего устройства подается задающее воздействие G , содержащее информацию об управляемом воздействии U . Кроме того, к объекту приложено возмущающее воздействие F . Выходная величина Y , подаваемая на вход управляющего устройства и являющаяся сигналом обратной связи. Таким образом, носителем обратной связи всегда является объект управления. Другими словами, сигнал обратной связи извлекается из физического пространства.

Покажем, что ИВиС сама по себе может являться носителем обратной связи. Для обеспечения такой возможности в системе моделирования используются два различных пространства – наблюдения и анализа. Первое пространство – физическое, второе – виртуальное. Внутри физического пространства расположены маркеры, за которыми осуществляется наблюдение (регистрируются их координаты). Внутри виртуального пространства реконструируется состояние виртуальных объектов. Такая реконструкция осуществляется на основе априорных данных о поверхностях (3D-моделях) и оперативной информации о координатах маркеров. Таким образом, внутри виртуальной среды может быть получена исчерпывающая информация о координатах вершин моделей объектов. На рис. 4 сравниваются две парадигмы управления с обратной связью.



Рис. 4. Сравнение парадигм управления с обратной связью в классической постановке и с использованием ИВиС.

В классической системе управления сигнал обратной связи должен содержать множество параметров, достаточное для формирования управляющего воздействия, т.е. по каналу обратной связи передается вся необходимая для «принятия решения» информация.

Принципиальным отличием системы управления с ИВиС является наличие звена реконструкции состояния ИВиС. Поэтому по каналу обратной связи

передаются не все параметры, а только те, которые необходимы для реконструкции состояния.

Роль априорной информации – многократно увеличивать «полезность» передаваемой информации. Можно сравнить объемы данных, которые необходимы для передачи набора двумерных изображений объектов и данных о местоположении маркеров. В первом случае каждое изображение будет содержать порядка 10^4 пикселей, во втором случае достаточно координат 4-х маркеров.

В разделе 2.2 изложен метод решения задачи определения пространственного положения объектов по координатам маркеров. Пусть моделируемая сцена описывается в некоторой системе координат (мировой СК). Исходными данными являются: текущие координаты n маркеров, расположенных на объекте (заданы в мировой СК) и априорно построенная модель объекта (задана в локальной СК объекта и содержит координаты узлов сеточной модели и координаты маркеров).

Требуется определить координаты заданного узла объекта в мировой СК. Для этого достаточно отыскать матрицу преобразования A локальной СК объекта в мировую:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Для описания трехмерных преобразований в компьютерной графике часто используют так называемые «однородные координаты». К трем координатам векторов добавляют четвертую, которая всегда равна единице. Тогда с помощью матрицы размерностью 4x4 очень удобно описывать ортогональные преобразования.

Тогда координаты i -го маркера $x_i^{реш}$, $y_i^{реш}$, $z_i^{реш}$, построенные с помощью найденного преобразования, определяются следующим образом:

$$\begin{pmatrix} x_i^{реш} & y_i^{реш} & z_i^{реш} & 1 \end{pmatrix} = A * \begin{pmatrix} x_i^{об} & y_i^{об} & z_i^{об} & 1 \end{pmatrix}$$

где $x_i^{об}$, $y_i^{об}$, $z_i^{об}$ – координаты маркера в СК объекта

Вообще говоря, для построения матрицы преобразования достаточно знать координаты любых трех маркеров, не лежащих на одной прямой. Однако на практике координаты маркеров определяются с некоторой погрешностью, а их количество может быть существенно большим и меняться во времени.

Введем функцию невязки между вычисленными и реальными координатами маркеров как функцию от коэффициентов искомой матрицы:

$$f(a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{31}, a_{32}, a_{33}, a_{34}) = \sum_{i=1}^n \rho_i^2$$

$$\rho_i^2 = (x_i^{пеш} - x_i)^2 + (y_i^{пеш} - y_i)^2 + (z_i^{пеш} - z_i)^2$$

Решение задачи сводится к отысканию коэффициентов матрицы преобразования, которая минимизирует функцию невязки. Для определения точки минимума функции f запишем ее частные производные по всем аргументам (ниже приведены производные по аргументам $a_{11}-a_{14}$, производные по остальным аргументам вычисляются аналогично):

$$f'_{a11} = 2a_{11} \sum_{i=1}^n (x_i^{об})^2 + 2a_{12} \sum_{i=1}^n x_i^{об} y_i^{об} + 2a_{13} \sum_{i=1}^n x_i^{об} z_i^{об} + 2a_{14} \sum_{i=1}^n x_i^{об} - 2 \sum_{i=1}^n x_i^{об} x_i$$

$$f'_{a12} = 2a_{11} \sum_{i=1}^n x_i^{об} y_i^{об} + 2a_{12} \sum_{i=1}^n (y_i^{об})^2 + 2a_{13} \sum_{i=1}^n y_i^{об} z_i^{об} + 2a_{14} \sum_{i=1}^n y_i^{об} - 2 \sum_{i=1}^n y_i^{об} x_i$$

$$f'_{a13} = 2a_{11} \sum_{i=1}^n x_i^{об} z_i^{об} + 2a_{12} \sum_{i=1}^n y_i^{об} z_i^{об} + 2a_{13} \sum_{i=1}^n (z_i^{об})^2 + 2a_{14} \sum_{i=1}^n z_i^{об} - 2 \sum_{i=1}^n z_i^{об} x_i$$

$$f'_{a14} = 2a_{11} \sum_{i=1}^n x_i^{об} + 2a_{12} \sum_{i=1}^n y_i^{об} + 2a_{13} \sum_{i=1}^n z_i^{об} + 2a_{14}n - 2 \sum_{i=1}^n x_i$$

Получаем систему из 12 линейных уравнений с 12-ю неизвестными, которая распадается на 3 независимых системы для коэффициентов $a_{11}-a_{14}$, $a_{21}-a_{24}$, $a_{31}-a_{34}$. Например, для коэффициентов $a_{11}-a_{14}$ система уравнений записывается в следующем виде:

$$a_{11} \sum_{i=1}^n (x_i^{об})^2 + a_{12} \sum_{i=1}^n x_i^{об} y_i^{об} + a_{13} \sum_{i=1}^n x_i^{об} z_i^{об} + a_{14} \sum_{i=1}^n x_i^{об} = \sum_{i=1}^n x_i^{об} x_i \quad (1)$$

$$a_{11} \sum_{i=1}^n x_i^{об} y_i^{об} + a_{12} \sum_{i=1}^n (y_i^{об})^2 + a_{13} \sum_{i=1}^n y_i^{об} z_i^{об} + a_{14} \sum_{i=1}^n y_i^{об} = \sum_{i=1}^n y_i^{об} x_i \quad (2)$$

$$a_{11} \sum_{i=1}^n x_i^{ob} z_i^{ob} + a_{12} \sum_{i=1}^n y_i^{ob} z_i^{ob} + a_{13} \sum_{i=1}^n (z_i^{ob})^2 + a_{14} \sum_{i=1}^n z_i^{ob} = \sum_{i=1}^n z_i^{ob} x_i \quad (3)$$

$$a_{11} \sum_{i=1}^n x_i^{ob} + a_{12} \sum_{i=1}^n y_i^{ob} + a_{13} \sum_{i=1}^n z_i^{ob} + a_{14} n = \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

Если определитель матрицы системы линейных уравнений не равен нулю, существует единственное решение. Это решение и будет точкой минимума функции невязки. Действительно, рассматриваемая функция второго порядка является непрерывной и дифференцируемой во всех точках, и при стремлении аргументов к плюс-минус бесконечности функция невязки стремится к плюс бесконечности. Это значит, что точка, в которой производная равна нулю, является точкой минимума.

Итак, решение системы уравнений позволяет найти коэффициенты матрицы преобразования из локальной СК объекта в мировую СК. Таким образом, для того чтобы получить вектор координат произвольного узла сеточной модели объекта в мировой СК $(x^{мир}, y^{мир}, z^{мир}, 1)$, необходимо умножить найденную матрицу преобразования A на вектор координат этого узла в СК объекта $(x^{ob}, y^{ob}, z^{ob}, 1)$.

Условия существования и единственности решения. Определение коэффициентов матрицы преобразования построено на решении системы линейных уравнений. Для того чтобы система линейных уравнений имела единственное решение, необходимо и достаточно, чтобы определитель матрицы этой системы был отличен от нуля.

Исследуем выражение для определителя матрицы системы (1)–(4). Для упрощения выкладок рассмотрим двумерный случай. Тогда определитель матрицы будет равен:

$$\begin{aligned} \det A = & n \sum_{i=1}^n (x_i^{ob})^2 \sum_{i=1}^n (y_i^{ob})^2 - n \left(\sum_{i=1}^n x_i^{ob} y_i^{ob} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^n x_i^{ob} \sum_{i=1}^n y_i^{ob} \sum_{i=1}^n x_i^{ob} y_i^{ob} - \\ & - \sum_{i=1}^n (x_i^{ob})^2 \left(\sum_{i=1}^n y_i^{ob} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i^{ob} \right)^2 \sum_{i=1}^n (y_i^{ob})^2 \end{aligned} \quad (5)$$

В случае, когда количество маркеров $n=2$ определитель тождественно равен нулю (что очевидно исходя из постановки задачи). Рассмотрим случай, когда $n=3$. Пусть координаты маркеров в системе координат объекта равны (a_i, b_i) , $i = 1..3$.

Подставив координаты маркеров в формулу (5) и проведя преобразования, получим следующее выражение для определителя:

$$\begin{aligned} \det A = & 3(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) - 3(a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3)^2 + \\ & + 2(a_1 + a_2 + a_3)(b_1 + b_2 + b_3)(a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3) - (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)(b_1 + b_2 + b_3)^2 - \\ & - (a_1 + a_2 + a_3)^2(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) = (a_1(b_2 - b_3) + a_2(b_3 - b_1) + a_3(b_1 - b_2))^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Формула (6) представляет собой полный квадрат, а значит, определитель равен нулю только в случае, когда равно нулю выражение в скобках. Если $b_i = b_j$, $i \neq j$, равенство нулю очевидно. Если это не так, выражение в скобках можно представить в виде:

$$\frac{a_2 - a_1}{b_2 - b_1} = \frac{a_3 - a_2}{b_3 - b_2} \quad (7)$$

Равенство (7) выполняется тогда, когда все три маркера лежат на одной прямой. В случае $n > 3$ получим формулы, аналогичные (6), содержащие сумму квадратов. Каждый элемент суммы описывает тройки маркеров, и равен нулю, если эти три маркера лежат на одной прямой. Таким образом, определитель будет равен нулю, если все n маркеров лежат на одной прямой.

В трехмерном случае, проведя аналогичные рассуждения, получим формулы для вычисления определителя, также состоящие из суммы квадратов. При $n \leq 3$ в силу постановки задачи определитель тождественно равен нулю. При $n \geq 4$ каждый член суммы описывает четверки маркеров, а его равенство нулю означает, что все четыре маркера лежат в одной плоскости. Формулы для трехмерного случая опущены из-за их громоздкости.

Таким образом, для того, чтобы решение задачи определения координат объекта с помощью предложенного алгоритма существовало и было единственным, необходимо и достаточно, чтобы количество маркеров было больше или равно четырем, и хотя бы одна четверка маркеров не лежала в одной плоскости.

В разделе 2.3 описан подход к решению задачи анализа взаимного расположения трехмерных объектов на основе метода ориентированных ограничивающих объемов. При моделировании поведения объектов сложной пространственной конфигурации, например, космических станций и их сегментов,

приходится сталкиваться с трехмерными моделями, содержащими существенно невыпуклые поверхности (радиомачты, конструкции большой протяженности и т.п.). Такие поверхности можно сравнить с веткой «обычного» дерева. При построении иерархии ограничивающих объемов для такого объекта не будет достигнуто плотное облегание его поверхности. Это означает, что потребуется большее количество проверок объемов на перекрывание, что, в свою очередь, приведет к потере эффективности.

Для решения данной проблемы будем выделять сложные по форме участки поверхности в отдельные подобъекты. Для каждого из подобъектов будем строить свое ОБВ-дерево. Таким образом, получим иерархию объектов с более простыми поверхностями. Несмотря на увеличение количества используемых в сцене ОБВ-деревьев, решение задачи анализа взаиморасположения потребует меньшее количество проверок объемов на перекрывание.

При поведении моделирования в условиях бортовых вычислительных комплексов становится актуальной проблема использования оперативной памяти. Основным объемом памяти занимают модели объектов и их ОБВ-деревья. Например, сбалансированное двоичное дерева для объекта, состоящего из n треугольников, будет содержать $2n-1$ узлов. При этом каждый узел дерева описывается структурой данных, содержащей, как минимум, ссылки на узлы-потомки и данные об ориентации и размерах объема, что составляет 80 байт. Таким образом, вспомогательные структуры данных занимают значительно больше памяти, чем сами модели объектов (для сцен, на которых проводились испытания, этот коэффициент равен 20-30).

Предлагаемое решение проблемы состоит в выборе компромисса между стремлением достичь высокой производительности при выполнении алгоритмов и уменьшить затраты оперативной памяти. Возможности здесь достаточно велики: при уменьшении глубины дерева на k , число его узлов, а значит и расход памяти, уменьшается в 2^k раз. Например, для $k=3$, дерево будет занимать в 8 раз меньше памяти. С другой стороны, объемы-листья дерева будут содержать по 2^k треугольников, и в случае плотного контакта участков поверхностей с недостроенными деревьями потребуется гораздо больше проверок для пар треугольников. Однако, испытания показали, что увеличение времени вычисления незначительно, а уменьшение затрат оперативной памяти существенно. В

рассматриваемых сценах, при уменьшении объема памяти в 8 раз, время работы метода увеличивалось в 1,4 раза.

Зная характеристики моделей объектов и параметры вычислений, можно заранее вычислить максимальную возможную глубину дерева для каждого из объектов. В некоторых случаях, по-видимому, может быть поставлена задача оптимизации, где, в зависимости от ситуации, в качестве критерия и ограничений могут выступать либо затраты памяти, либо быстродействие.

Далее представляется метод решения задачи анализа взаиморасположения для деформируемых объектов. Суть деформации здесь заключается в изменении координат узлов сеточной модели объекта. Проблема состоит в том, что некоторые узлы сетки могут выйти за пределы ограничивающих их объемов. Поэтому после задания деформации необходима коррекция ОБВ-дерева. Для приведения ОБВ-дерева в соответствие с новой сеткой предлагается следующий алгоритм:

1. Для каждого измененного узла выбирается соответствующий объем нижнего уровня.
2. Проверяется принадлежность узла объему. Если узел не принадлежит объему, границы объема изменяются так, чтобы охватить узел.
3. Если объем является корнем дерева, то выполнение алгоритма завершается. Иначе, происходит переход к объему-родителю и повторение пункта 2.

Производится оценка сложности преобразования дерева. Пусть изменились координаты m узлов сетки. Поскольку глубина дерева оценивается как $O(\lg n)$, необходимо выполнить $O(m \lg n)$ проверок объемов с возможной коррекцией.

Следует отметить, что многократное использование смещений большого количества узлов сетки может в значительной мере уменьшить значение самого главного свойства ОБВ-дерева – обеспечение плотного облегания объекта ограничивающими объемами. Если планируется использовать такие объекты, то следует ограничиться ААВВ-деревьями (поскольку для них тесты на перекрывание требуют меньше вычислений).

Оценим быстродействие метода. Общее количество времени, требуемое для проверки всех объектов сцены на перекрывание описывается следующим выражением:

$$T = N_{obb} T_{obb} + N_{pr} T_{pr} + T_{def}, \text{ где}$$

T – общее время работы алгоритма,

N_{obb} – количество проверок для пар ограничивающих объемов,

T_{obb} – время выполнения одной проверки для пары объемов,

N_{pr} – количество проверок пар треугольник - треугольник,

T_{pr} – время выполнения одной проверки для пары треугольник- треугольник,

T_{def} – время коррекции ОВВ-деревьев после проведения деформаций.

Чем меньше расстояние между объектами, тем больше требуется тестов на перекрывание. С использованием ОВВ-деревьев, обеспечивается получение относительно небольших значений N_{obb} и N_{pr} из-за плотного облегания объекта. Эффективность алгоритма проверки двух объемов на перекрывание также позволяет получить крайне малые величины T_{obb} , T_{pr} . Время T_{def} коррекции ОВВ-деревьев после деформаций зависит от количества деформируемых узлов: при деформации m узлов требуется $O(m \lg n)$ операций.

Из приведенных оценок видно, что общее время, необходимое для проведения анализа столкновений, сильно зависит от конкретной сцены и характера поведения объектов, в первую очередь, от расстояния между объектами и количества деформируемых узлов. Поскольку при рассмотрении сложных сцен, основное время уходит на проверку пересечения двух объемов, достигается высокая общая эффективность работы алгоритма (при проведении испытаний с использованием персонального компьютера Pentium IV 1200 MHz среднее время работы алгоритма составило 0.022 сек).

В **третьей главе** описаны разработанные программные средства для решения задачи анализа взаимного расположения объектов. Для программной реализации был выбран язык C++. Состав средств анализа взаимного расположения объектов включает:

- подсистему хранения трехмерных моделей объектов;
- библиотеку для решения задачи определения положения объектов;
- библиотеку для решения задачи анализа взаиморасположения объектов;

Модели объектов содержат следующую информацию:

- сеточную поверхность;
- ОВВ-дерево;
- список маркеров.

Базовым среди классов C++, спроектированных для описания структуры и поведения объектов, является *CSceneObject* (рис. 5). Этот класс содержит следующие данные: список вершин и треугольников, из которых состоит сеточная поверхность; указатель на ОВВ-дерево объекта; указатель на класс *CDeformation* для описания деформаций; список координат маркеров; вспомогательные структуры данных.

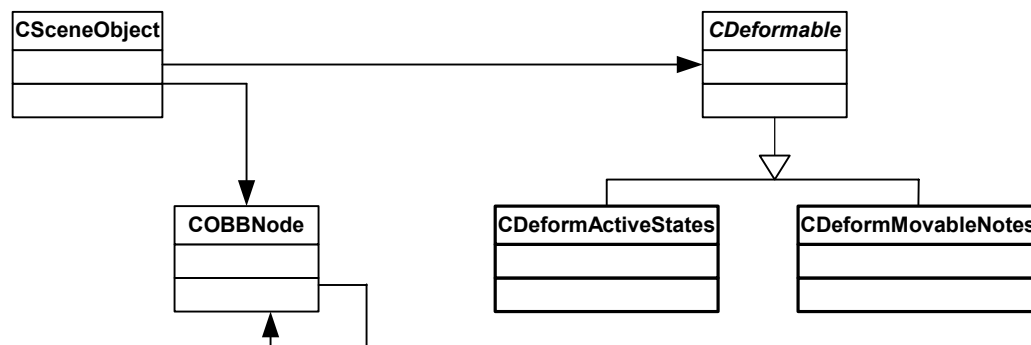


Рис 5. Диаграмма основных классов подсистемы хранения моделей объектов.

Четвертая глава посвящена описанию испытаний разработанных программных средств и интерпретации результатов испытаний. Испытания методов анализа взаиморасположения объектов проводись при внедрении разработанных средств в систему GL View. Сеточные модели подготовлены с помощью пакета 3D Studio Max и представляют элементы Международной Космической Станции.

Испытания проводились по следующему сценарию. Пользователь выбирал файл, описывающий сцену. На этапе инициализации файловый конвертер транслировал содержимое выбранного файла, а модуль воспроизведения загружал библиотеки определения положения объектов и анализа взаиморасположения объектов и с их помощью выполнял инициализацию состояния моделей объектов (в том числе, построение ОВВ деревьев). Во время моделирования пользователь с помощью клавиатуры и мыши задавал движение объектов, модуль воспроизведения для всех пар объектов вызывал функцию анализа их взаимного расположения, а подсистема визуализации выполняла рендеринг сцены.

Были подготовлены модели объектов различных типов:

- жесткий объект, представляющий основной модуль Международной Космической Станции с большим числом узлов (порядка 10 тысяч узлов) и неоднородных элементов поверхности;
- жесткие объекты, представляющие стыкуемые со Станцией космические аппараты;
- деформируемые объекты с различными типами деформации (солнечные батареи, специальные «ворота» с изменяемой геометрии и др.).

Объекты выполняли маневры вблизи друг друга. Для еще большего увеличения количества точек пересечения рассматривались «прозрачные» объекты, то есть объекты, которые могли «проходить» друг через друга.

В процессе испытаний исследовались быстродействие и точность методов анализа взаиморасположения объектов (в том числе, по сравнению с другими методами); зависимость быстродействия методов от объема доступной оперативной памяти.

Название показателя	Результат
Количество итераций работы системы	1557
Среднее время анализа сцены на каждой итерации	0.022 сек
Количество зафиксированных точек пересечения объектов	12782
Общее количество проверок пар объемов	221050
Общее количество проверок пар треугольников	36512
Среднее время коррекции ОВВ-деревьев	0.005 сек

Таблица 1. Быстродействие методов анализа взаиморасположения объектов без ограничений по затратам оперативной памяти.

Из таблицы видно, что среднее время анализа взаиморасположения для всех объектов сцены занимает примерно 1/50 секунды, а значит, позволяет применять предложенные методы в системах реального времени. Сравнение быстродействия различных методов приведено на рис. 6.

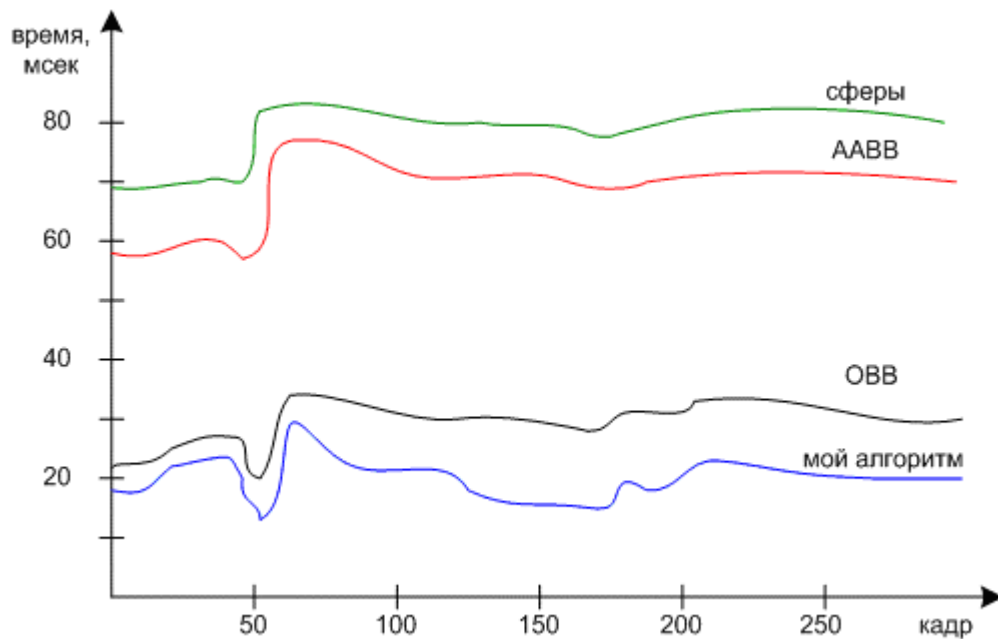


Рис. 6. Быстродействие методов анализа взаиморасположения объектов.

Зависимость быстродействия методов от ограничения по объему оперативной памяти приведена в таблице 2.

Ограничения по оперативной памяти	Среднее время работы (сек)
Без ограничения	0.022
10 Mb	0.023
3 Mb	0.027
1 Mb	0.032

Таблица 2. Зависимость быстродействия методов анализа взаиморасположения объектов от объема используемой оперативной памяти.

Из таблицы видно, что предложенные методы позволяют эффективно решать задачу даже при очень серьезных ограничениях по использованию оперативной памяти.

Результаты испытаний подтвердили описанные выше свойства методов и показали, что предложенные методы могут быть успешно применены в системах

моделирования реального времени и в условиях бортовых вычислительных комплексов.

В заключении сформулированы основные результаты работы

Основные результаты работы

1. Предложена концепция построения систем управления с обратной связью с использованием индуцированной виртуальной среды (за счет добавления стадии реконструкции виртуальной среды с совместным использованием априорной и оперативной информации об объектах).
2. Разработан новый алгоритм определения пространственного положения объектов по координатам маркеров.
3. Предложены эффективные в условиях ограниченных ресурсов методы решения задачи анализа взаиморасположения объектов, в том числе для деформируемых объектов. За основу взят метод ориентированных ограниченных объемов.
4. Созданы программные средства для решения задачи анализа взаиморасположения объектов. Проведены испытания на моделях элементов космических станций в системе реального времени GL View. По результатам испытаний даны оценки быстродействия и точности применяемых методов.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность А.Н.Томилину за постоянную поддержку и внимание к работе, В.О.Афанасьеву за поддержку, ценные советы и замечания и М.А.Торгашеву за полезные замечания по программной реализации.

Публикации по теме диссертации

[1] Подшивалов А.Ю. Определение пространственного расположения 3D объектов по маркерам. "Программные системы и инструменты №4", издательство МГУ, Москва, 2003.

[2] Подшивалов А.Ю. Эффективные алгоритмы анализа взаимного расположения сильно разветвленных пространственных объектов. "Программные системы и инструменты №3", издательство МГУ, Москва, 2003.

[3] Подшивалов А.Ю. Использование индуцированной виртуальной среды для развития концепции управления с обратной связью. Электронный журнал "Исследовано в России", 38, стр. 411-418, 2005.



Рис. 7. Проведение испытаний по анализу взаиморасположения объектов на моделях элементов космических станций.