

© А. Г. Смирнов, 2010 г.
УДК 616.314-07:61.001.57

А. Г. Смирнов

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ДИ- АГНОСТИЧЕСКОЙ ВИРТУАЛЬ- НОЙ МОДЕЛИ ЗУБОЧЕЛЮСТ- НОЙ СИСТЕМЫ

Институт компьютерного моделирования биологических объектов, Санкт-Петербург; Московский физико-технический институт (государственный университет)

Разработка систем виртуальной имитации биомеханики зубочелюстной системы является перспективным направлением в развитии цифровых лечебно-диагностических стоматологических комплексов. Подобные комплексы построены на общих технологических принципах, в основе которых лежат методы реконструкции сложных высокодетализированных трехмерных сцен за счет обработки потоков данных, получаемых от сенсоров, регистрирующих

различные физические феномены. Такие методы имеют общее название «Image Based Rendering» (IBR) [3, 12].

Целью работы является освещение принципиальных биомеханических и программных аспектов, влияющих на качественные характеристики аналитической цифровой модели зубочелюстной системы.

Основной задачей любого диагностического цифрового комплекса для зубочелюстной системы является проведение расчетных экспериментов на компьютерной модели, цель которых – анализ жевательной функции, исследование отклика моделируемой системы на изменение ее параметров и начальных условий, сопоставление результатов моделирования с реальным поведением объекта-оригинала [7].

Поскольку в компьютерной системе изучается не сам интересующий объект, а вспомогательная искусственная модель, находящаяся в некотором объективном соответствии с познаваемым объектом [4], важно, чтобы такая модель удовлетворяла следующим требованиям:

– точно воспроизводила гнатологические показатели и положения в динамике артикуляционного цикла, присущие объекту-оригиналу;

– была интерактивной;
– предоставляла потребителю информацию в удобном виде;
– обладала потенциалом развития (совершенствования).

В этом контексте большой интерес представляют виртуальные интерактивные динамические модели зубочелюстной системы. Для создания таких моделей используются цифровые потоки данных, содержащие сведения о физических объектах. Необходимые цифровые данные можно получить с помощью компьютерной техники, цифровых сканирующих устройств.

Комплексы, реализующие возможности оптического сканирования исследуемого объекта, способны обеспечивать быструю, точную и относительно дешевую, с точки зрения вычислительных затрат, генерацию компьютерной модели физического объекта и ее визуализацию в форме интерактивной трехмерной графики. К числу таких решений относятся, например, система «Cerec» (Германия), «Программно-аппаратная система функционального анализа окклюзии и артикуляции» (РФ) [6].

Общим для лечебно-диагностических систем, разработанных на методах оптического сканирования, является

наличие интегрированной информационно-моделирующей среды, объединяющей все процессы жизненного цикла системы. Средствами информационно-моделирующей среды являются вычислитель (ПК определенной конфигурации) и программное обеспечение, выполняющее основную функцию по генерации виртуальной модели.

В табл. 1 приведены отдельные стадии генерации виртуальной модели зубочелюстной системы в двух аналогичных системах.

Таблица 1

Стадии генерации виртуальной модели	
Виртуальная модель	Стадии генерации
"Cerec"	Адаптация данных сканирования; пространственное позиционирование моделей челюстей; моделирование артикуляционного цикла
Программно-аппаратная система функционального анализа окклюзии и артикуляции	Адаптация данных сканирования; пространственное позиционирование моделей челюстей; моделирование артикуляционного цикла; моделирование ответных реакций зубов при окклюзии

Каждая из стадий складывается из промежуточных действий. Рассмотрим такие действия на примере среды «Occlusion Navigator» (программное обеспечение к «Программно-аппаратной системе функционального анализа окклюзии и артикуляции», свидетельство о государственной регистрации № 2009616626) (табл. 2).

Функцию воспроизведения размеров (геометрических параметров) объекта-оригинала в виртуальном пространстве выполняют сканирующие устройства. Диапазон точности оптических 3D-сканеров, например, в линейке приборов одного из лидеров оптических технологий *Konica Minolta* (Япония), составляет от $\pm 0,38$ мм до ± 40 микрон. Помимо конструктивных характеристик приборов, на точность результатов также влияют условия, при которых выполняется сканирование: температура, дистанция,

влажность.

Отсканированные элементы имеют вид облака точек и полигонов. Для дальнейшей работы файлы сканирования экспортируются в пакеты, поддерживающие трехмерную графику.

Важной задачей виртуальной имитации зубочелюстной системы является воспроизведение гнатологических параметров и положений.

В большинстве случаев компьютерная модель зубочелюстной системы ограничивается алгоритмом вычис-

Таблица 2

Основные события на стадиях генерации модели		
Стадия генерации модели (моделирование)	Основные события	Компоненты среды "Occlusion Navigator", участвующие в событии
Адаптация данных сканирования	Конвертация формата сканирования STL в индексированный формат	Подсистема адаптации данных сканирования (модуль визуализации)
Пространственное позиционирование моделей челюстей	Ручная маркировка точек соответствия на сетке сканирования и на фототекстуре; вычисление проекционной матрицы методом ресекции; наложение фототекстуры на сетку сканирования; идентификация точек окклюзии на трехмерной модели; совмещение челюстей по точкам окклюзии в положении центральной окклюзии	Инструментарий пользовательского интерфейса; компонент пространственного позиционирования челюстей (модуль визуализации)
Моделирование артикуляционного цикла	Расчет подводящих и отводящих движений н/ч по математической модели, описывающей траекторию по фигурам Posselt; расчет окклюзионных движений н/ч методом интерполяции между контрольными точками окклюзии; визуализация сцен артикуляционного цикла	Подсистема численного моделирования жевательных движений н/ч, реакций зубов на силы, прилагаемые при окклюзии; графическая библиотека OpenGL (модуль визуализации)

Моделирование ответных реакций зубов при окклюзии

Сегментация трехмерной сетки на потоки цифровых данных, соответствующие отдельным зубам; расчет ответных реакций зубов по математической модели Шварца [11]; визуализация сцен экскурсий зубов

Компонент пространственного позиционирования челюстей (модуль визуализации); подсистема численного моделирования жевательных движений и/ч, реакций зубов на силы, прилагаемые при окклюзии; графическая библиотека OpenGL (модуль визуализации)

Таблица 3

Зависимость расстояния смещения зубов от нагрузки		
Тип зубов	Диапазон нормы силы нагрузки, при которой возникает горизонтальное смещение, Н	Расстояние смещения от оси горизонтально, мм
Резцы	5 100	0,12
Клыки	5 150	0,09
Премоляры	5 180	0,1
Моляры	5 270	0,08

жения зубов в положение максимального смыкания (скольжение к центру) происходит поступательное смещение центра вращения из центра сопротивления к верхушке корня [11].

В целом методика моделирования реакций зубов на окклюзионные силы построена на:

- а) вычислении центра сопротивления зуба;
- б) данных о точке приложения силы в каждый момент

Таблица 4

Нормы силы нагрузки для разных типов зубов	
Тип зубов	Диапазон нормы силы нагрузки при жевании, Н
Резцы	5 50 100
Клыки	5 100 150
Премоляры	5 130 180
Моляры	5 200 270

ления пространственных положений нижней челюсти в разные фазы артикуляции.

Справедливо утверждать, что, выбрав любую точку нижней челюсти, можно проецировать ее перемещение на одну или другую плоскость и моделировать таким образом характер индивидуальных движений максимальной амплитуды, т. е. характер «пограничных» движений [8].

В результате геометрической интерпретации преобразования объекта окажется, что каждая изображающая точка при изменении геометрии объекта (системы) совершает перемещение в пространстве по определенной траектории, при этом фазовые координаты могут изменяться в некоторых ограниченных пределах [1].

По мнению разработчиков «Occlusion Navigator», расчет артикуляционных движений нижней челюсти – это только часть задачи, которую можно решать на виртуаль-

окулярной среде, а именно:

- а) вычислении центра сопротивления зуба;
- б) данных о точке приложения силы в каждый момент окклюзии;
- в) разложении вектора силы, развиваемой жевательными мышцами при окклюзии на составляющие;
- г) значениях нормальных перемещений зубов в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- д) вычислении центра вращения зуба в каждый момент окклюзии [9].

Из вышеизложенного следует, что для реализации алгоритмов расчета экскурсий зубов необходимо, чтобы база данных содержала показатели, устанавливающие зависимость расстояния перемещения зуба от величины прилагаемой силы. В табл. 3 приведены значения физиологически нормальных сил нагрузок для разных групп зубов и расстояния горизонтальных смещений от оси [5]. Эта зависимость заложена в математический аппарат «Occlusion Navigator».

Представляется, что включение в систему расчетов показателей экскурсий зубов в при различных направлениях и силе нагрузок в каждый момент окклюзии повышает точность расчетов на виртуальной модели.

Взаимодействие пользователя с компьютерной моделью является непременным условием возможности исследований, проведения расчетов на модели. Функция интерактивности реализуется через пользовательский интерфейс, который предлагает определенный набор опций.

ной модели. Следующий шаг – это вычисление экскурсивных зубов относительно челюстей при окклюзии.

Решение такой задачи стало возможным благодаря успешному выполнению ряда программных процедур, связанных с сегментацией трехмерной сетки моделей челюстей на потоки цифровых данных, соответствующие отдельным зубам.

С точки зрения механики, зуб имеет шесть степеней свободы. Описывать движения зуба следует относительно центра сопротивления зуба (точка, через которую проходит равнодействующая всех сил реакции корня зуба) и относительно центра вращения, причем по мере сколь-

Таблица 5

Условные виды нагрузок				
Номер зуба	Процент нагрузки, %	Норма силы нагрузки, Н	Компенсаторная норма силы, Н	Запретительные силы нагрузки, Н
1	3	50	100	>150
2	3	50	100	>150
3	9	100	150	>200
4	5	130	180	>250
5	5	130	180	>250
6	14	200	270	>300
7	8	200	270	>300

32

ОРИГИНАЛЬНЫЕ РАБОТЫ



момент времени, можно описать с помощью некоторого множества характеризующего систему величин-параметров. Первоначально такие величины импортированы в среду моделирования в виде данных сканирования – облаков точек, характеризующих геометрию поверхностей объекта, где каждая точка имеет координаты. Координаты точки можно рассматривать как элементы матрицы. Положением этих точек управляют путем преобразования матрицы: сдвиг, вращение, изменение масштаба, перенос, преобразование в пространстве.

Удобство расчетов на виртуальной модели состоит в том, что потребитель воспринимает основную информацию в виде привычных визуальных образов и сцен на экране монитора, кроме того, возможны различные дополнительные аудио- или графические возможности.

Для изображения математической трехмерной модели сцены необходимо построение геометрической проекции этой сцены на экране компьютера. Процесс построения такой проекции в соответствии с выбранной физической моделью (рендеринг) заключается в превращении математической (векторной) пространственной модели в плоскую картинку.

Для рисования сложных трехмерных сцен из простых примитивов применяют графические библиотеки. В среде «Occlusion Navigator» для обрисовки сцен применяет-

Выполнение команд, связанных с изменением табличных данных, расчеты, построенные на них, не вызывают большой сложности или вычислительных затрат. Например, в программе «Occlusion Navigator» заложена возможность расчета нагрузок на зубы, включаемые в несъемную ортопедическую конструкцию. В основе этой опции лежат данные, представленные в табл. 4.

Промежуточные цифры характеризуют норму силы нагрузки во время жевания. Максимальные цифры характеризуют «компенсаторную норму», т. е. на аналитическом уровне допускается, что при перераспределении нагрузки, за счет отсутствующих зубов, нормальная физиология зубов, которые принимают на себя дополнительную нагрузку, сохраняется.

Команды, связанные с графическими преобразованиями, требуют больших вычислительных мощностей, задействуют ресурсы процессора, графической карты, оперативной памяти. На программном уровне такие задачи означают возможность пользователя получать доступ к вершинам составляющих модель полигонов и изменять их координаты.

Математическое представление об объекте и его преобразованиях, т. е. состояние объекта в каждый данный

Разработчики «Occlusion Navigator» заложили опцию, позволяющую любому исследователю самостоятельно вносить уточнения в гнатологические показатели, содержащиеся в базе данных, исходя из результатов собственных наблюдений. Представляется, что открытый доступ для внесения изменений в значения гнатологических параметров сохраняет перспективу совершенствования виртуальной модели зубочелюстной системы.

Конечной целью компьютерного или физического моделирования зубочелюстной системы является планирование и выполнение рациональных восстановительных (реставрационных) ортодонтических конструкций. Достижение успешного практического результата на цифровых лечебно-диагностических системах выдвигает ряд условий для аналитических компьютерных моделей. Главными из таких условий представляются относительно дешевая, с точки зрения вычислительных затрат, генерация компьютерной модели, точное воспроизведение на модели основных параметров и функций объекта-оригинала, удобство для пользователя, потенциал дальнейшего развития (возможность расширения и уточнения значений базы гнатологических данных).

ся открытая графическая библиотека OpenGL.

Основным принципом работы OpenGL является получение наборов векторных графических примитивов в виде точек, линий и многоугольников с последующей математической обработкой полученных данных и построением rasterной картинки на экране и/или в памяти [8].

Дополнительная информация оказывает значительную помощь исследователю, проводящему расчетные эксперименты на виртуальной модели.

В среде «Occlusion Navigator» дополнительная информация предлагается в отдельном поле в виде графических символов, сигнализирующих о норме силы нагрузки или превышении нормы силы нагрузки на зуб и направлении горизонтального смещения каждого зуба в любой момент артикуляционного цикла. Для реализации такой задачи была проведена условная классификация сил нагрузок (табл. 5).

Распределение жевательной нагрузки по зубному ряду в процентах (табл. 5) выведена на основании биомеханических расчетов при центральной окклюзии [2].

Под «запретительной нагрузкой» принимается, что даже кратковременное (до 1-го года) воздействие соответствующих сил ведет к патологии, о чем программа будет сигнализировать. Однако в аналитической модели введено допущение, что кратковременное применение «сверхнормативных» сил нагрузок (более высоких, чем «запретительные») может не вызывать развития патологических процессов в тканях пародонта. Такое решение было вызвано тем, что физиологические свойства пародонта у различных пациентов варьируют, не может также учитываться и качество употребляемой пищи (твердая или мягкая).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андерсон Джеймс*. Дискретная математика и комбинаторика = Discrete Mathematics with Combinatorics / Андерсон Джеймс. – М.: Вильямс, 2006. – С. 960.
2. *Дударь, О. И.* Распределение жевательной нагрузки по зубному ряду при центральной окклюзии / О. И. Дударь [и др.] // Рос. журн. биомеханики. – 2009. – Т. 13. – № 3 (45). – С. 56–62.
3. *Клименко, С. В.* АВАНГО: система разработки виртуальных окружений / С. В. Клименко, И. Н. Никитин, Л. Д. Никитина. – М.: Ин-т физико-техн. информатики, 2006. – 252 с.
4. *Новик, И. Б.* О философских вопросах кибернетического моделирования / И. Б. Новик. – М.: Знание, 1964.
5. Окклюзия и клиническая практика / под ред. И. Клинеберга, Р. Джагера; пер. с англ.; под общ. ред. М. М. Антоника. – М., 2006.
6. Пат. 80111 РФ, МПК А61С 7/00. Программно-аппаратная система функционального анализа окклюзии и артикуляции № 2008138078/22 / А. Г. Смирнов. – заявл. 24.09.08; опубл. 27.01.09. – Бюл. № 3.
7. Программно-аппаратный способ построения виртуальной имитации зубочелюстной системы пациента / А. П. Бобров [и др.] // Пародонтология. – 2009. – № 4 (53). – С. 57–62.
8. *Рэнди, Дж.* Рост. OpenGL. Трехмерная графика и язык программирования шейдеров: для профессионалов / Дж. Рост Рэнди. – СПб.: Питер, 2005.
9. *Смирнов, А. Г.* Комплекс виртуальной имитации зубочелюстной системы / А. Г. Смирнов, С. В. Клименко, Д. А. Ростков // Труды 20-й междунар. конф. по компьютерной графике и зрению GraphCon – 2010. ИТМО – 2010. – С. 292–299.
10. *Хватова, В. А.* Клиническая гнатология / В. А. Хватова. – М.: Медицина, 2005. – 296 с.
11. *Шварц, А. Д.* Биомеханика и окклюзия зубов / А. Д. Шварц. – М.: Медицина, 1994. – 208 с.
12. *Миллан, Л. Мс.* An Image-Based Approach to Three-Dimensional Computer Graphics, Ph.D. Dissertation / L. Mc. Millan // UNC Computer Science Technical Report TR97-013. University of North Carolina, Chapel Hill. – 1997.

РЕЗЮМЕ

А. Г. Смирнов

Вопросы разработки диагностической виртуальной модели зубочелюстной системы

Излагаются некоторые принципиальные аспекты, касающиеся вопросов разработки аналитической компьютерной модели зубочелюстной системы. Материал основывается на результатах оригинальных исследований и разработок.

Ключевые слова: гнатология, окклюзия, артикуляция, имитация, виртуальная модель.

SUMMARY

A. G. Smirnov

Diagnostic virtual model of the dentomaxillary system

The paper deals with some basic aspects in development of an analytical computer model of the dentomaxillary system. The conclusions are based on the results of original researches and elaborations.

Key words: gnathology, occlusion, articulation, imitation, virtual model.