

Математические модели, используемые в CAS системах, при проектировании МТП в хирургии

11, ноябрь 2014

Жук Д. М., Маничев В. Б., Родионов С. В.

УДК: 004.92; 616-07

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

zhuk@bmstu.ru

Введение

В работе [1] была предложена новая структура медицинского технологического процесса (МТП) хирургического лечения пациента для челюстно-лицевой хирургии на базе использования CAS систем. CAS (Computer Aided Surgery) системы являются проблемно-ориентированными, то есть их структура и задачи, решаемые на каждом этапе, в значительной мере определяются видом хирургических процессов, для которых они предназначены. Тем не менее предлагаемую структуру МТП можно рассматривать как обобщенную для всех видов хирургических процессов, поскольку она ориентирована на процессы челюстно-лицевой хирургии, относящиеся к наиболее сложным с точки зрения использования современных информационных технологий.

Для реализации предлагаемого варианта технологического процесса требуется разработка ряда математических моделей пациента. Эти модели используются на различных этапах процесса реабилитации пациента, что обусловлено широким использованием в предлагаемом МТП 3D информационных технологий и методов верификации проектных решений при планировании процесса оперативного вмешательства. Главной проблемой при создании требуемых математических моделей является необходимость моделирования поведения различных тканей человеческого тела, к тому же важнейшую роль при проектировании хирургической операции играет точная 3D геометрическая модель требуемых анатомических сегментов человеческого тела.

Можно выделить следующие виды математических моделей, необходимых для реализации CAS системы МТП челюстно-лицевой хирургии:

1. Диагностическая модель пациента.
2. Послеоперационная 3D модель пациента.
3. Проектная модель пациента.
4. Расчетная модель пациента.

5. Модель медицинского технологического процесса для выбора технологического маршрута хирургической операции.

Перечисленные модели отличаются назначением и решаемыми задачами и базируются на известных подходах к математическим моделям, используемых в других областях. Рассмотрим более подробно каждый вид моделей.

1. Диагностическая модель

Назначение модели – предоставление специалисту наиболее полной информации для диагностики состояния пациента при принятии решения о путях, методах и средствах лечения пациента.

Диагностическая модель должна содержать всю информацию о текущем состоянии пациента, которая дополняется заключениями специалистов по результатам лучевой и функциональной диагностики и позволяет хирургу исследовать и оценить патологию, имеющуюся у пациента, принять решение о методах лечения пациента. Диагностическая модель должна в первую очередь базироваться на результатах лучевой диагностики, включая рентгеновскую, магнитно-резонансную и другие виды томографии, поскольку они наиболее адекватно отображают в 3D пространстве физические нарушения анатомических сегментов человеческого тела, связанные с патологией.

Модель должна включать в себя информацию следующих типов: результаты общей диагностики; данные различных методов лучевой диагностики, требуемых для диагностики данного пациента; результаты функциональной диагностики; заключения специалистов по различным методам диагностики. Это очень большой объем информации, имеющей следующие особенности: опосредованность получаемых данных, наличие артефактов, сложность установления связей между результатами различных исследований, невозможность отобразить некоторые анатомические структуры и др.

Данные лучевой диагностики должны быть представлены в 3D пространстве и приведены к единой системе координат пациента (процедура регистрации изображений [2]), чтобы можно было совмещать и накладывать результаты различных методов для более точной локализации патологии, определения ее геометрических параметров, формы и ориентации. Такие модели часто называют мультимодальными (multimodal), так как они создаются на основе совмещения изображений, полученных различными методами томографии. К анатомическим сегментам геометрической модели могут быть также привязаны результаты функциональной диагностики и заключения специалистов.

Помимо мультимодальной диагностической модели в предлагаемой структуре МТП предполагается также использование унимодальной [2] диагностической модели для мониторинга состояния пациента на этапе выздоровления пациента и заживления последствий хирургического вмешательства. Унимодальная модель создается на основе совмещения изображений, полученных одним и тем же методом томографии, но в разное время.

Для удобства хирургов и других медицинских специалистов диагностическая геометрическая модель может визуализироваться в 3D и/или в 2D в исходном воксельном

формате (обычно это формат DICOM), представляющем собой растровое описание объема, включающего требуемые анатомические сегменты тела пациента. Для визуализации могут использоваться различные методы затенения, в зависимости от желания пользователя.

Помимо растрового представления геометрической диагностической модели в диагностической модели также достаточно часто требуется и векторное (поверхностное) представление, что позволяет более просто выполнять визуализацию анатомии пациента и в некоторых, достаточно сложных, ситуациях может выполняться изучение анатомии пациента хирургом и специалистами с помощью средств виртуальной реальности или 3D принтинга (стереолитография) [3].

В процессе реализации медицинского технологического процесса как части реконструктивно-восстановительного лечения пациента происходит изменение состояния пациента как с точки зрения изменения анатомического так и физиологического состояния различных тканей организма. Все эти изменения должны также отражаться в диагностической модели, что приводит к генерации новых версий диагностической модели пациента, которые должны сохраняться в базе данных пациента. Создание новых версий диагностической модели может выполняться с использованием методов лучевой диагностики при существенных и сложных изменениях или на основе моделирования при незначительных или достаточно простых изменениях.

2. Послеоперационная 3D модель пациента

Данная модель предназначена для оценки степени отклонения скелета лица пациента от скелета без патологии и принятия концептуального решения о дальнейшем ходе МТП. Послеоперационная модель должна удовлетворять как критериям восстановления функциональности всех органов связанных со скелетом лица пациента так и эстетическим критериям, учитывающим требования пациента. Если оценка восстановления функциональности на уровне скелета лица достаточно успешно может быть выполнена специалистами с ее уточнением после последующего наложения на скелет мягких тканей лица, то при оценке степени удовлетворения лица пациента после операции эстетическим критериям обязательно должен участвовать сам пациент. Кроме того для выполнения оценки необходимо на восстановленный скелет лица наложить мягкие ткани и учесть возможности последующей пластической операции.

При синтезе послеоперационной 3D модели пациента могут использоваться различные методы [4] от зеркального отражения, если какая-либо половина лица не имеет патологии, до синтеза скелета на основе фотографии или лица близкого родственника по цефалометрическим точкам. Синтезированная геометрическая модель должна быть векторной (поверхностной или твердотельной), поскольку только в этом случае можно выполнить сравнение послеоперационной модели с текущим состоянием скелета лица, в виде соответствующей геометрической модели, созданной на основе диагностической модели.

3. Проектная модель

Проектная геометрическая 3D модель пациента должна использоваться при решении следующих задач проектирования МТП в челюстно-лицевой хирургии: сопоставление послеоперационной и проектной модели для оценки степени повреждения скелета лица и выбора путей лечения патологии; выбор смещенных частей скелета, которые могут быть репозиционированы в требуемое место с требуемой ориентацией; синтез траекторий репозиции; конструирование трансплантатов и имплантатов, определение способов их крепления; определение способов забора и формообразования ауто трансплантатов; конструирование требуемой технологической оснастки; выбор способа доступа хирурга к операционной области; определение общего объема работ и числа этапных операций и т.д. При решении перечисленных задач обязательна оценка состояния костных тканей с позиций приживления трансплантатов, заживления рубцов и др.

Таким образом к проектным моделям предъявляется ряд противоречивых требований. С одной стороны необходима достаточно точная геометрическая 3D модель для проектно-конструкторских работ, позиционирования трансплантатов, оснастки и инструмента и т.п., что возможно только при использовании векторных поверхностных или твердотельных моделей анатомических сегментов. С другой стороны различные ткани человеческого тела имеют высокую анизотропию свойств и для корректной оценки их состояния необходимо исходное воксельное представление (например в формате DICOM) по результатам лучевой диагностики, содержащееся в диагностической модели пациента. При этом на этапе принятия концептуальных решений не требуется точное и детальное описание внутреннего состояния анатомических сегментов, что необходимо для моделирования поведения тканей тела пациента, вполне достаточно визуальной оценки медицинским персоналом на основе данных лучевой и функциональной диагностики.

В результате анализа существующих подходов к решению поставленных задач принято решение о создании нового класса моделей, предназначенных для биологических объектов, в том числе и тканей тела человека. Эти модели описывают тело человека на уровне отдельных анатомических сегментов, при этом внешняя граница сегмента описывается векторной поверхностной геометрической моделью, а внутреннее пространство – воксельной, растровой, сеточной или другой распределенной геометрической моделью. Данная структура геометрической модели позволяет использовать ее как для проектно-конструкторских работ так и для оценки состояния тканей пациента в любом сечении анатомического сегмента. Следовательно геометрическая 3D модель, имеющая такую комбинированную растрово-векторную структуру и являющаяся развитием понятия твердотельной 3D модели, наилучшим образом удовлетворяет сформулированным требованиям. Назовем ее *гибридной мультимодальной проектной моделью*, в которой внешние границы геометрической 3D модели анатомического сегмента тела пациента описываются полигональной поверхностной моделью (например, в формате STL), а внутренний объем описывается воксельной мультимодальной моделью в формате DICOM. Таким образом, такая проектная модель отвечает требованиям точного описания поверхности анатомического

сегмента для конструирования трансплантатов, имплантатов и технологической оснастки и обеспечивает возможность оценки состояния тканей внутри анатомического сегмента.

4. Расчетная модель

Для решения задач верификации проектных решений при планировании медицинского технологического процесса оперативного вмешательства в челюстно-лицевой хирургии необходимо использование различных методов моделирования поведения различных тканей тела пациента в процессе оперативного вмешательства и после него. Эти методы по-видимому должны базироваться на методе конечных элементов или каких-либо его модификациях. Однако для метода конечного элемента представление анатомических сегментов в виде проектной модели в общем случае не пригодно. Необходимо для внутреннего представления использовать сеть конечных элементов, наиболее эффективную для конкретной задачи моделирования. То есть в результате получаем для каждого анатомического сегмента геометрическую модель, содержащую точное векторное поверхностное описание внешних границ сегмента и распределенную сеть внутренних конечных элементов, учитывающих анизотропию свойств внутренних тканей сегмента, построенную на основе воксельного представления.

Геометрические модели, имеющие описанную структуру, будем называть гибридными мультимодальными *расчетными моделями*. Данные модели предназначены для решения следующих задач:

- расчеты на прочность реконструируемых анатомических структур;
- расчеты на прочность привносимых имплантатов и трансплантатов;
- расчеты изменения формы реконструируемых анатомических структур под нагрузкой (в том числе циклической);
- расчеты изменения формы сопряженных и взаимосвязанных анатомических структур во времени;
- расчеты динамических характеристик анатомических структур при функционировании;
- расчеты динамики изменения объема тканей во времени;
- моделирование сопутствующих изменений тканей во время лечения и др.

5. Заключение

Помимо рассмотренных математических моделей в разрабатываемой CAS системе должны использоваться и другие модели: модель медицинского технологического процесса для синтеза технологического маршрута хирургической операции [6], биомеханическая модель верхних конечностей хирурга с детальной моделью кистей рук и др. Особенности этих моделей будут рассмотрены в последующих публикациях.

Список литературы

1. Жук Д.М., Перфильев С.А. CAS системы - системы автоматизированного проектирования в хирургии. // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование. – М, 2011.
2. Medha V. Wyawahare, Dr. Pradeep M. Patil, and Hemant K. Abhyankar Image Registration Techniques: An overview – International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition Vol. 2, No.3, September 2009, pp 11-28.
3. С.Б. Буцан, С.Б. Хохлачев, С.А. Перфильев, Ш.Н. Йигиталиев Хирургическое лечение больных с дефектами и деформациями скуло-глазничной области с применением трехмерного компьютерного моделирования при планировании оперативного вмешательства. // «Институт стоматологии» — Санкт-Петербург, № 47, июнь 2010.
4. Демина А.И. Разработка общей схемы синтеза предпроектной антропометрической 3D-модели пациента для челюстно-лицевой хирургии. // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование. – М, 2010.
5. Давыденко Е.А., Жук Д.М. Особенности задач проектирования хирургических операций в челюстно-лицевой хирургии. // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование. – М, 2010.