

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра математической теории
упругости и биомеханики

Автоматизация построения твердотельных моделей костных систем

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 431 группы
направления 01.03.03 – Механика и математическое моделирование
механико-математического факультета

Бу Хай Ань

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

Р.А. Сафонов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой,

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

Л. Ю. Коссович

инициалы, фамилия

Саратов 2017

Введение

Повреждения и заболевания позвоночно-тазового комплекса являются одной из главных проблем в современной хирургии. Оказание качественной и своевременной помощи пациентам с заболеваниями и повреждениями костных структур является сложной и актуальной задачей. Большинство современных операций проводятся субъективно, основываясь на личном опыте и знании врача. Как показывает практика, такой способ планирования лечения не всегда позволяет принять однозначно правильное решение для проведения успешной операции, либо отдать предпочтение в пользу того или иного имплантата. Таким образом, возникает актуальность разработки некой автоматизированной системы (АС), позволяющей помогать врачам в предоперационном планировании с использованием методик компьютерного биомеханического моделирования.

Актуальность. Для проведения такого моделирования необходима твердотельная трёхмерная модель, как исследуемого объекта, так и конечной структуры после операционного вмешательства. Таким образом, существует актуальность разработки программного комплекса, позволяющего в полуавтоматическом режиме выделять интересующую нас область в растровом изображении с последующим применением данного контура для построения 3D модели. Данная процедура носит название сегментация.

Новизна. В настоящее время не существует программного продукта, позволяющего проводить автоматизированное построение твердотельной трехмерной модели костной структуры по результатам компьютерной томографии, что оставляет данную проблему открытой.

Цель. Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка подхода для автоматизации построения твердотельной модели костных структур.

Были рассмотрены несколько математических методов сегментации изображения. Более подробно был рассмотрен метод с активным контуром (МАК) и применен к растровым изображениям файла DICOM [1]. МАК

имеет два подхода к реализации сегментирования изображения – морфологический и параметрический. Оба этих подхода основываются на поиске контура, на котором функционал E – «энергия» - достигает минимума. Морфологические модели с активным контуром обладают рядом достоинств, в частности, они легко обрабатывают многосвязные модели и не зависят от числа начальных элементов модели.

При использовании параметрической модели активный контур определяется как параметризованная кривая, которая движется к границе объекта и при этом минимизирует функционал энергии внутренних и внешних сил, действующих на кривую.

Положительные качества моделей с активным контуром:

1. Универсальность рабочего объема.
2. Возможность учета многосвязных областей.
3. Возможность построения триангулированной модели.
4. Возможность управления качеством модели путем изменения параметров с четким механическим смыслом.
5. Теоретически возможна работа не только с компьютерной томограммой (КТ), но и с магнитно-резонансной томограммой (МРТ).
6. Построенная модель может иметь твердотельный тип.

Исходя из выше изложенных побуждений, был реализован один из методов сегментации изображения, а именно математический метод моделей с активным контуром, в виде пакета прикладных программ и проведен вычислительный эксперимент по апробации созданного пакета прикладных программ, с последующей его оптимизацией. Этот метод разрабатывается в рамках создания программного обеспечения, позволяющего автоматизировать построение твердотельных моделей. На сегодняшний день аналоги разрабатываемого программного обеспечения не реализованы.

Структура и объем работы. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников, включающего 29 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 48

листах машинописного текста без приложений, содержит 12 рисунков и 1 таблицу.

Основное содержание работы

Во введение приводятся аргументы в пользу актуальности рассматриваемой задачи. Для решения проблемы по построению твердотельных моделей костных систем необходимо решить две задачи: наладить автоматизацию работы с результатами компьютерной томографии [2, 3], а также качественно и целостно выделить рассматриваемую костную структуру. Если для первой задачи имеются готовые программные библиотеки, то вторая задача остается открытой.

В первой главе рассмотрены математические методы сегментирования с их достоинствами и недостатками. На данный момент существует множество математических методов сегментирования растровых изображений. В данном пункте были рассмотрены и описаны 7 наиболее эффективных методов [4–9] (методы порогового значения, методы статистического моделирования, метод кригинга, метод растущих объемов, метод шагающих кубов, метод моделей с активным контуром, клеточный автомат).

Исходя из особенностей и положительных сторон моделей с активным контуром, можно сделать выбор в пользу метода МАК в качестве математической основы системы для создания трехмерных моделей в полуавтоматическом режиме.

Вторая глава посвящена более подробному обзору модели с активным контуром. Приведено определение метода МАК, а также описана математическая модель данного метода. Суть метода можно рассмотреть на основе тонкостенной модели упругого тела, помещенной в поле действия трех сил:

1. Сила внутреннего давления, стремящаяся растянуть модель по всем направлениям.

2. Сила упругости, стремящаяся минимизировать энергию упругой деформации модели.

3. Сила притяжения к границам на изображении, определяющая приближение формы модели к искомому объему.

Под действием указанных сил модель будет деформироваться и постепенно эволюционировать до тех пор, пока форма не станет близка к границе искомого объема.

В численных вычислениях внутреннее давление считается как сила, направленная по нормали к элементу модели, и пропорциональная площади (длине в двумерном случае) элемента.

Силу упругости можно разделить на две составляющие силы. Первая составляющая, которую можно условно назвать мембранной, характеризует изменение внутренней энергии модели за счет ее растяжения и пропорциональна площади поверхности элементам модели. Вторая составляющая (изгибная) определяется гладкостью поверхности модели. Величина этой составляющей определяется различием ориентации двух соседних элементов (углом между ними). Эти составляющие могут считаться независимо друг от друга, и коэффициенты, определяющие их масштаб, могут быть разными.

Вопрос построения функции притяжения модели к границам изображения также требует дополнительного рассмотрения. Граница может рассматриваться как перепад значения оттенка серого при переходе от одной точки к другой. Этот перепад представляет собой численно определенный градиент оттенка серого. В зависимости от реализации, может использоваться все поле градиента, его изолинии, наиболее интенсивные участки, а также более сложные операторные конструкции.

Существует две разновидности метода моделей с активным контуром: параметрическая и морфологическая.

В первом параграфе первой главы описывается морфологическая МАК. Эволюция данной модели происходит в виде применения к ней фильтра в

том смысле, как он понимается в компьютерном зрении. Каждый фильтр соответствует некоторому оператору, и поэтому результат применения к изоповерхности набора фильтров аналогичен эволюции этой фигуры под действием системы сил.

Так же в данном параграфе приводится морфологический метод решения дифференциального уравнения, использованный в работе [10]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = g(I) |\nabla u| \left(\operatorname{div} \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) + \nu \right) + \nabla g(I) \nabla u \quad (1)$$

Данный метод позволяет избежать проблем, связанных со скоростью и сходимостью численного решения. Эволюция кривой будет происходить за счет сочетания бинарных операторов, имеющих бесконечно малое влияние и эквивалентных полю действия сил, определяющийся выражением (1).

Уравнение морфологического активного контура (1) состоит из трёх различных компонентов: силы внутреннего давления («шаровой» силы), силы упругости и силы притяжения к границам изображения. Две из этих компонент разрешаются с помощью морфологических операторов. Третья компонента является дискретной. Морфологический метод решения поставленного уравнения представляет собой совмещение вышеприведенных дискретных компонент: на каждой итерации будет применяться оператор «морфологический шар» (2), морфологическое сглаживание (3) и дискретная сила притяжения.

$$\frac{\partial u_{ball}}{\partial t} = g(I) * \nu * |\nabla u_{ball}|, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_{smt}}{\partial t} = g(I) * |\nabla u_{smt}| \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u_{smt}}{|\nabla u_{smt}|} \right). \quad (3)$$

Морфологические модели с активным контуром обладают рядом достоинств, в частности, они легко обрабатывают многосвязные модели и не зависят от числа начальных элементов модели. С другой стороны, морфологические модели не позволяют получить сглаженную и разбитую на малые элементы модель, а дают только область, занятую искомым объемом.

Второй параграф описывает параметрическую разновидность МАК. На плоскости активный контур данной модели определяется как

параметризованная кривая, которая движется к границе объекта и при этом минимизирует функционал энергии внутренних и внешних сил, действующих на кривую. Внутренние силы зависят от первой и второй производных радиуса - вектора точки кривой $r[x(s), y(s)]$ по параметру s и определяют форму кривой, а внешние силы характеризуются полутонным рельефом изображения и заставляют кривую смещаться в направлении границ объекта.

Если контур представлен в параметрическом виде

$$v(s)=[x(s), y(s)]: [0;1] \rightarrow V \subset R^2,$$

его энергия описывается выражением:

$$\begin{aligned} E_{snake} &= \int_0^1 E_{snake}(v(s))ds = \\ &= \int_0^1 [E_{int}(v(s)) + E_{image}(v(s)) + E_{ext}(v(s))]ds \quad (4), \end{aligned}$$

где E_{int} – энергия внутреннего давления, E_{image} – энергия сил притяжения к границам изображения, E_{ext} – энергия сил упругости.

Таким образом, модель находится под действием трех сил одного порядка. Внутреннее давление стремится растянуть модель, силы упругости направлены на сглаживание и сжатие модели, а сила притяжения к контурам рисунка придает модели искомую форму. Баланс этих компонент определяет эволюцию модели.

Третий параграф в данной главе служит обобщением положительных сторон обоих методов МАК. Делается вывод о том, что для оптимального построения метода автоматизации создания твердотельных моделей следует на первом этапе строить морфологическую модель, разбивающую весь объем на отдельные области, а затем для каждой области с учетом ее размеров и сложности границы строить твердотельную модель параметрическим методом.

Третья глава содержит в себе описание формата, с которым работают медицинские аппараты (DICOM) [1], а также тестовые программы по

реализации морфологической и параметрической модели с активным контуром.

В первом параграфе рассматриваемой главы представлен пример работы морфологической МАК.

Примером использования морфологический змеек послужила библиотека Marquez–Neila [10]. Данный пакет программы был реализован в виде библиотеки на языке программирования python. Суть метода заключается в решении дифференциальных уравнений в частных производных с помощью морфологических операторов. Рассматриваемая библиотека предусматривает 2 варианта численного расчета дифференциальных уравнений в частных производных – Geodesic Active Contour (GAC) и Active contours without Edges (ACWE), которые представлены соответственно в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = g(I)|\nabla u| \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) + g(I)|\nabla u|v + \nabla g(I)\nabla u, \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = |\nabla u|(\mu \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) - v - \lambda_1(I - c_1)^2 - \lambda_2(I - c_2)^2). \quad (6)$$

В данном подходе морфологические операторы определяются как операторы перемещения и контрастно-инвариантные, которые зависят от начальных форм множества уровня.

Решение уравнения 5 и 6 представляет собой сумму трёх составляющих, а именно упругой, «шаровой» и компоненты, зависящей от изображения.

Применение морфологических МАК к исследуемой задаче рассматривается во втором параграфе. В нем также представлен код, использующий морфологический оператор и позволяющий выделить контуры позвонка по компьютерной томограмме. Результат работы программы можно наблюдать на рисунке 1.

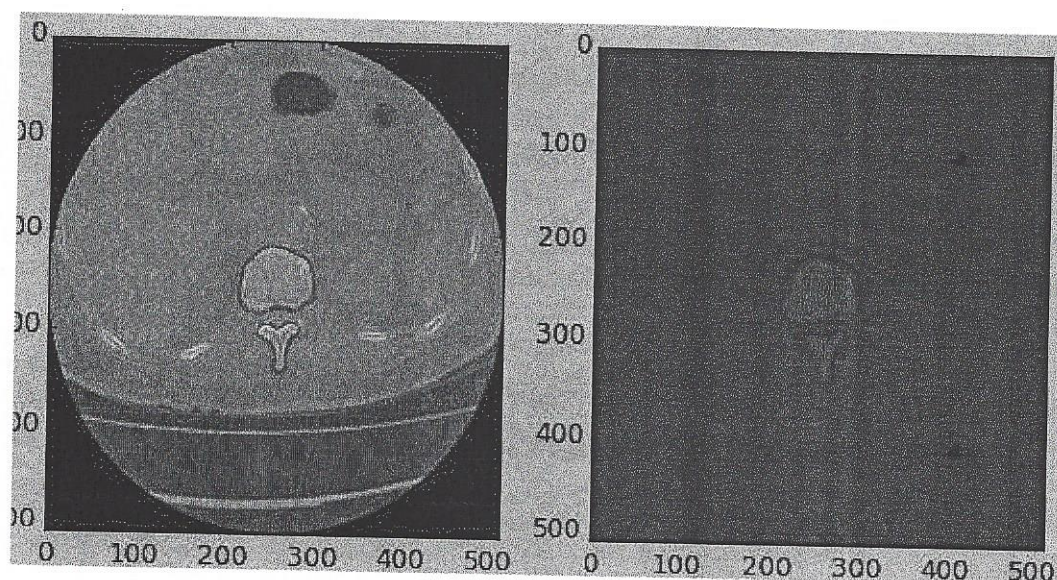


Рисунок 1 – Результат работы морфологической МАК.

Третья глава содержит реализацию параметрических моделей с активным контуром. В данном методе в качестве силовых компонент, характеризующих энергию контура, выступают «шаровая» составляющая, упругость и сила, имеющая привязку к изображению.

В тестовой программе «шаровая» сила интерпретируется как сумма воздействий векторов, направленных по нормали к отрезкам, соединяющие соседние точки. В роли количественной характеристики выступает длина вектора.

Сила упругости представляется в виде суммы двух составляющих, определенных через их энергию: энергию растяжения и энергию изгиба. Энергию растяжения можно охарактеризовать с помощью изменения размеров модели, например, суммарным изменением площади поверхности. Энергию изгиба вычислили, как сумму квадратов синусов углов между внешними нормальными к соседним граням.

Сила притяжения к контурам рисунка так же определяется через значения энергии. Данную величину вычислили как сумму квадратов лапласиана от сглаженного изображения.

Начальная форма модели строилась в виде круга и эллипса. Результат работы программы продемонстрированы на рисунке 2.

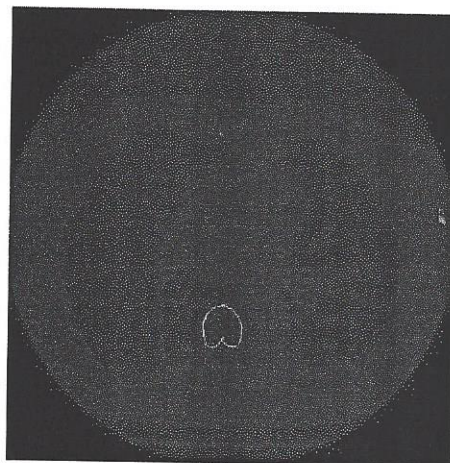


Рисунок 2 – Результат работы программы с использованием параметрической МАК.

Четвертый параграф подытоживает результаты проведенных численных экспериментов:

1. Начальная форма модели имеет большое значение при её эволюции.
2. Для успешной работы параметрических моделей с активным контуром важное место занимает подбор весовых параметров.
3. Морфологическая МАК позволяет получить модель, гладкость которой определяется размером пикселя томограммы.
4. Параметрическая МАК обладает большей гладкостью, благодаря вещественным координатам модели и аппроксимации для вычисления энергетических и силовых функций.
5. Время, затраченное морфологическим МАК на несколько порядков меньше, чем параметрического МАК.
6. Морфологическая модель может быть использована как начальное приближение для дальнейшей работы параметрическим методом.

Заключение

Одним из наиболее эффективных математических алгоритмов сегментации растровых изображений является модель с активным контуром. Рассмотренный в данной работе метод предполагает 2 пути решения задачи выделения контуров – морфологический и параметрический. Если первый

метод быстр и затрачивает мало ресурсов, то второй предполагает использование больших ресурсов и достаточно продолжителен (в текущей реализации), зато по сравнению с первым имеет более точное решение и, следовательно, более гладкие контуры. Гладкость является основополагающим фактором при построении твердотельной модели, поэтому использование параметрического метода целесообразно только в том случае если в дальнейшем полученные результаты будут использоваться для построения 3D модели.

Экспериментальная часть показывает, что морфологический способ решения сегментации изображения мало зависит от начального контура. Параметрический - в свою очередь более зависим от начального приближения и чувствителен к подбору параметров.

Таким образом, на основе вычислительных экспериментов предлагается использовать положительные стороны 2 методов, а именно начальное приближение находить с помощью морфологического подхода, а затем полученную модель использовать для начального приближения параметрического подхода.

Список используемых источников

1. Information Object Definitions [Электронный ресурс] // DICOM PS3.3 2016 - Information Object Definitions [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: <http://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/pdf/part03.pdf>. (дата обращения: 02.12.2016).

2. Википедия [Электронный ресурс]: свободная энциклопедия / текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution–Share Alike; Wikimedia Foundation, Inc, некоммерческой организации. Wikipedia®, 2001- . URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитно-резонансная_томография (дата обращения: 02.12.2016). Загл. с экрана. Яз. рус.

3. Википедия [Электронный ресурс]: свободная энциклопедия / текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution – Share Alike; Wikimedia Foundation, Inc, некоммерческой организации. Wikipedia®, 2001- .

- URL:https://ru.wikipedia.org/wiki/Компьютерная_томография (дата обращения: 07.03.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.
4. Adams, R. Seeded region growing/ R. Adams, L. Bischof // IEEE Transactions on pattern analytics and machine intelligence. 1994. V.16. P.641-647.
 5. Википедия [Электронный ресурс]: свободная энциклопедия / текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution – Share Alike; Wikimedia Foundation, Inc, некоммерческой организации. Wikipedia®, 2001- . URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Шкала_Хаунсфильда (дата обращения: 14.02.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.
 6. Cressie, N. The origin of kriging / N. Cressie // Mathematic Geology. 1990. V.22. P. 239-252.
 7. Newman, T.S. A survey of the marching cubes algorithm / T.S. Newman, H. Yi. // Computer & Graphics. 2006. V.30. P. 854-879.
 8. Cohen, L. D. On Active Contour Models and Balloons/ L. D. Cohen // Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding. 1991. V. 52. P. 211-218.
 9. Википедия [Электронный ресурс]: свободная энциклопедия / текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution – Share Alike; Wikimedia Foundation, Inc, некоммерческой организации. Wikipedia®, 2001- . URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Клеточный_автомат (дата обращения: 14.02.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.
 10. Marquez-Neila, P. Morphological Snakes / P. Marquez-Neila, L. Alvarez, L. Baumela, P. Henriquez // Dep. Inteligencia Artifical Facultad Informatica / Universidad Politecnica de Madrid. 2010. P. 1-6.