

УДК 531/534: [57+61]

АЛГОРИТМ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ОБРАЗОВ ОРГАНОВ ЧЕЛОВЕКА ПО ТОМОГРАФИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В.П. Матвеенко, И.Н. Шардаков, А.П. Шестаков

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1, e-mail: shar@icmm.ru

Аннотация. В последнее время в медицине интенсивно развивается математическое моделирование процессов, определяющих функциональность органов тела человека. Важным этапом моделирования является создание геометрического образа. Одним из современных средств, отражающих трехмерную структуру органов, является томография. В работе описан эффективный алгоритм, позволяющий создавать геометрический образ органов человека на основе томограммы. Дается описание программной реализации алгоритма фронтального роста. Приведены примеры построения трехмерных образов костей таза, черепа и мышц сердца.

Ключевые слова: моделирование, трехмерный образ органов человека, алгоритм, томограмма, сегментация, метод фронтального роста, визуализация образа сердца, костей таза и черепа.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в науке и технике широко распространен метод математического моделирования физических процессов, протекающих в исследуемых объектах. Такой подход позволяет наиболее полно изучить объект исследования, осуществлять над ним контроль и прогнозировать его поведение при заданных воздействиях.

В медицине моделирование отдельных органов и организма в целом является важной задачей, успешное решение которой позволит быстро, точно и своевременно выявлять патологии, а также определять оптимальное медицинское воздействие и прогнозировать его последствия.

Первым и неотъемлемым этапом моделирования является создание геометрического образа. Следует отметить, что надежность, точность и скорость создания образа во многом определяет успешное математическое моделирование в медицинской практике.

Эффективным, неинвазивным способом получения изображения структуры органов тела человека является томография. Томограмма, полученная в результате сканирования, представляет собой совокупность плоских сечений, которые формируют трехмерный массив данных. Схематично процесс получения томографического образа представлен на рис. 1.

© Матвеенко В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П., 2011

Матвеенко Валерий Павлович, д.т.н., академик РАН, директор Института механики сплошных сред, Пермь
Шардаков Игорь Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института механики сплошных сред, Пермь

Шестаков Алексей Петрович, аспирант лаб. № 12 Института механики сплошных сред, Пермь

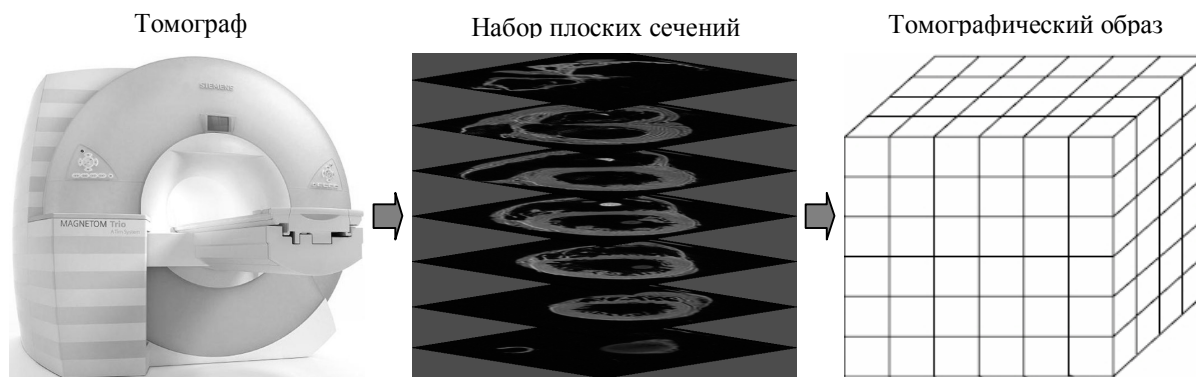


Рис. 1. Схема создания изображения с помощью магнитно-резонансной томографии (МРТ)

Эти данные обычно используют для просмотра объекта в трех взаимно ортогональных направлениях, измерения линейных и угловых размеров, а также визуального определения патологий. Такие возможности, как правило, заложены в программном обеспечении, поставляемом с томографом, но существуют и отдельные программные продукты, такие как *Seg3D*, которые также позволяют осуществлять визуализацию.

Для построения трехмерного геометрического образа используются различные подходы. Среди них можно выделить метод ручного построения контуров отдельных сечений с последующим автоматическим объединением в трехмерный образ [4], метод деформируемых поверхностей [3], метод фронтального роста [1].

Первый подход реализован в программе *Mimics*. К его достоинствам относится возможность доопределения сильно зашумленных областей сканируемого объекта на основе априорных знаний опытного врача. Эта возможность особенно актуальна, когда томограмма плохого качества. Недостатками подхода являются: зависимость качества геометрического образа от опыта врача, большие временные затраты и, как следствие, невозможность применения в повседневной медицинской практике.

В методе деформируемых поверхностей организуется итерационная процедура, на каждом шаге которой поверхность деформируется так, чтобы доставлять минимум функционалу, зависящему от первых, вторых производных поверхности и внешнего поля. Преимущества данного метода следующие: возможность построения автоматического алгоритма, получение сглаженной поверхности, ограничивающей тело, возможность идентификации прерывистой границы. Однако при применении данного метода стартовая поверхность должна быть достаточно близкой к истинной, и для идентификации многосвязных областей необходимо рассматривать дополнительные алгоритмы.

Метод фронтального роста является итерационным. Для его использования исследуемая область представляется как совокупность подобластей. На каждой итерации к текущей области роста добавляются соседние подобласти, удовлетворяющие заданному критерию подобия. Процесс выполняется до тех пор, пока количество элементов, добавленных за итерацию, не станет равным нулю. Метод позволяет: построить автоматический алгоритм, получить замкнутую область, обладает высокой скоростью, применим для односвязных и многосвязных восстанавливаемых областей.

В данной работе приведен вариант разработанного алгоритма построения трехмерных образов органов человека, в основе которого использован метод фронтального роста. Для этого алгоритма создана программная реализация на языке *Delphi*.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ОБРАЗОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ФРОНТАЛЬНОГО РОСТА

Опишем исходные данные, получаемые в результате МРТ-сканирования. Результатом сканирования является поле концентрации ядер водорода [2], заданное сеточной функцией в декартовой системе координат:

$$F_{ijk}(x_i, y_j, z_k) = \left\{ \begin{array}{l} x_i = dx \cdot i, \quad i = 0, 1, \dots, N \\ y_j = dy \cdot j, \quad j = 0, 1, \dots, M \\ z_k = dz \cdot k, \quad k = 0, 1, \dots, P \end{array} \right\},$$

где i, j, k – индексы сеточной функции; dx, dy, dz – пространственные шаги сеточной функции; N, M, P – размерности сеточной функции.

Определим область в декартовой системе координат:

$$\Omega = \{x \in [0, dx \cdot N], y \in [0, dy \cdot M], z \in [0, dz \cdot P]\}.$$

Поставим в соответствие каждой точке сеточной функции некоторую подобласть Π_{ijk} таким образом, чтобы любая точка из Ω принадлежала хотя бы одной подобласти Π_{ijk} :

$$\Pi_{ijk} = \left\{ x \in [i \cdot dx - \frac{dx}{2}, i \cdot dx + \frac{dx}{2}], y \in [j \cdot dy - \frac{dy}{2}, j \cdot dy + \frac{dy}{2}], z \in [k \cdot dz - \frac{dz}{2}, k \cdot dz + \frac{dz}{2}] \right\}.$$

Таким образом, получаем, что функция определена на множестве параллелограммов Π_{ijk} с концентрацией F_{ijk} . На рис. 2 представлена иллюстрация процесса определения подобластей в двумерном пространстве.

Рассмотрим процесс объединения двух подобластей. В двумерном пространстве две подобласти можно объединить только при условии существования общей линии. Таким образом, рост возможен в четырех направлениях $\{(-1, 0), (+1, 0), (0, -1), (0, +1)\}$. На рис. 3 приведена иллюстрация направлений роста для случая двумерного пространства. Множество подобластей, имеющих общую линию с Π_{ij} , соответственно равно $\{\Pi_{i-1,j}, \Pi_{i+1,j}, \Pi_{i,j-1}, \Pi_{i,j+1}\}$.

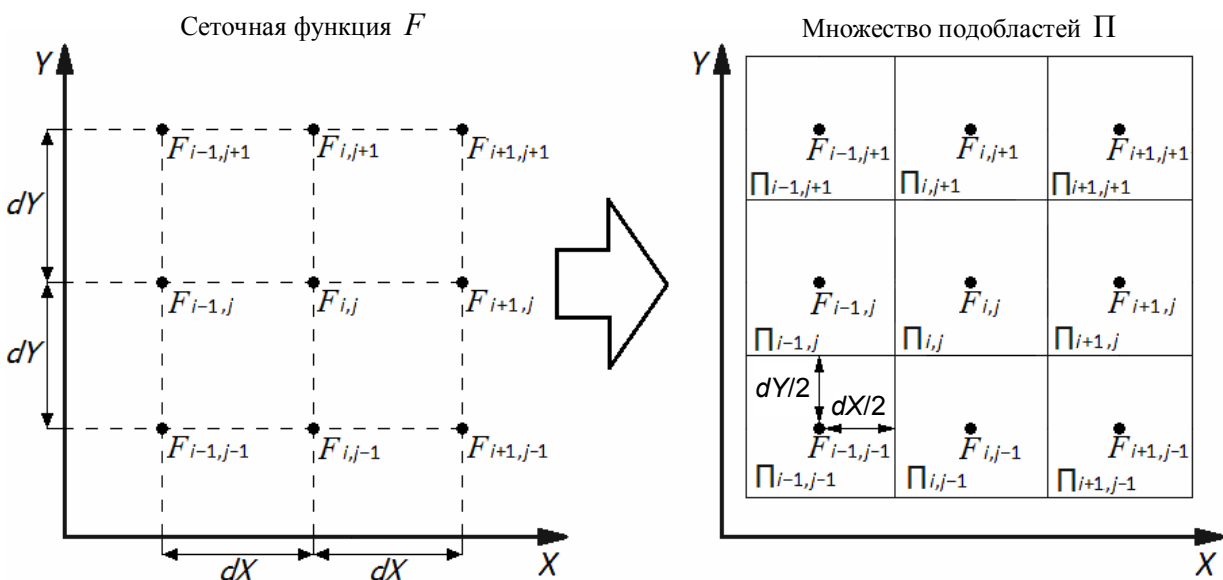


Рис. 2. Иллюстрация создания подобластей

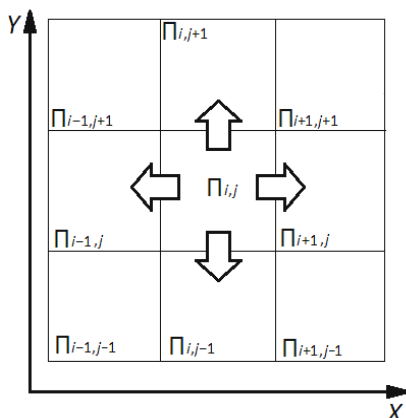


Рис. 3. Направления роста в двумерном пространстве

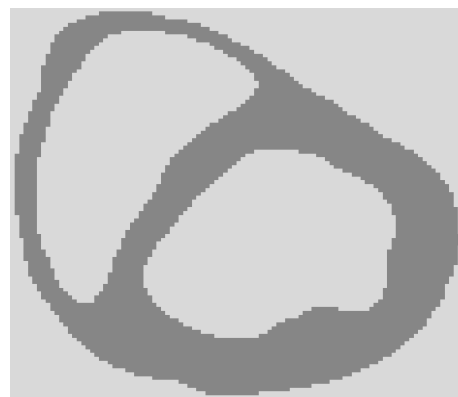


Рис. 4. Область поиска (Оп)

По аналогии с двумерным пространством рассмотрим процесс объединения областей в трехмерном пространстве. Две подобласти можно объединить только при условии существования общей поверхности. При этом рост возможен в шести направлениях:

$$\{(-1, 0, 0), (+1, 0, 0), (0, -1, 0), (0, +1, 0), (0, 0, -1), (0, 0, +1)\}.$$

Множество подобластей, имеющих общую поверхность с Π_{ijk} , будем называть граничащими. Это множество, соответственно, равно:

$$\{\Pi_{i-1,j,k}, \Pi_{i+1,j,k}, \Pi_{i,j-1,k}, \Pi_{i,j+1,k}, \Pi_{i,j,k-1}, \Pi_{i,j,k+1}\}.$$

Для описания алгоритма фронтального роста введем необходимые понятия:

Π^* – подобласть, из которой выполняется рост;

Оп – множество Π , на котором выполняется поиск искомой подобласти;

Ор – множество Π , принадлежащих области роста;

МПГОр – множество Π , принадлежащих границе области роста;

МАПГОр – множество активных Π границы Ор;

МНАПГОр – множество неактивных Π границы Ор;

МПГП* – множество Π , граничащих с Π^* , $\Pi^* \in \text{МПГП}^*$;

КрП(Π, Π^*) – критерий подобия двух Π ;

Сп – стартовая Π , задается вручную или с помощью вспомогательного алгоритма.

Проиллюстрируем введенные обозначения на примере двумерного пространства. На рис. 4 темным цветом изображена область, подлежащая заполнению, светлым цветом – окружающее ее пространство. Совокупность темных и светлых областей определяет область поиска Оп алгоритма роста.

На рис. 5 показаны: область роста Ор, множество активных и неактивных подобластей границы области роста. В нижней части рисунка увеличен фрагмент области поиска, на котором изображены: подобласть роста Π^* , направления роста и множество подобластей, соответствующих этим направлениям МПГП*.

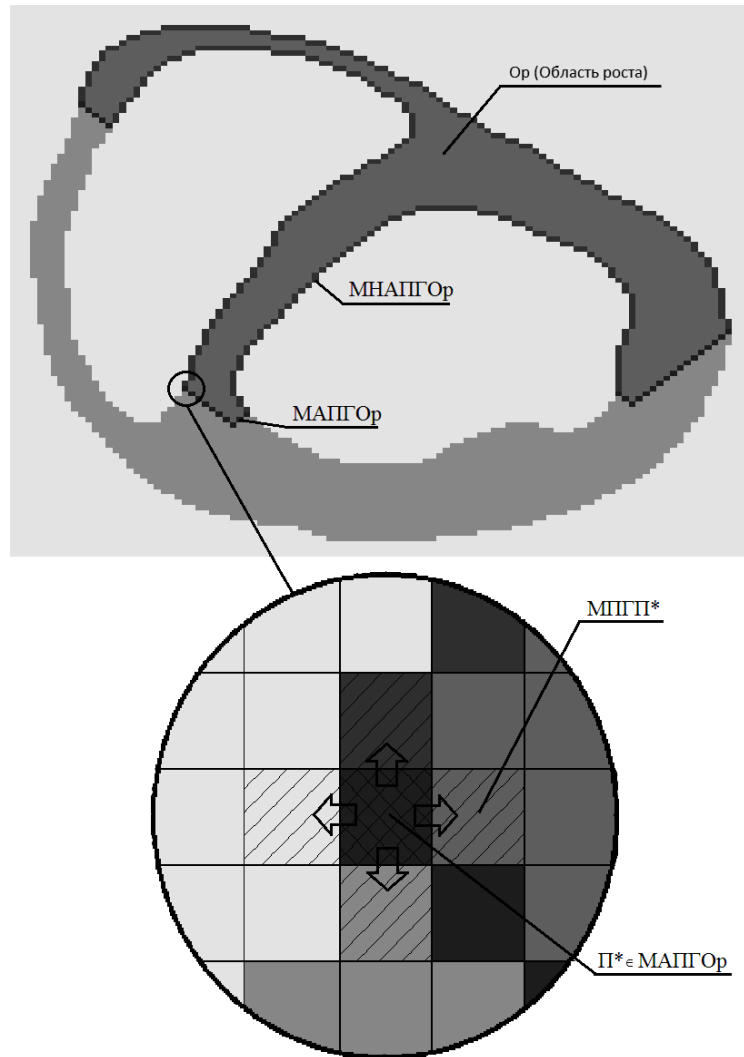


Рис. 5. Область роста

Запишем алгоритм с помощью введенных обозначений:

```

МАПГОр := Сп;                                     (присваиваем подобласть)
Ор := Сп;                                           (присваиваем подобласть)
цикл по  $\Pi^* \in \text{МАПГОр}$ 
  цикл по  $\Pi \in \text{МПГП}^*$ 
    если  $\Pi \notin \text{Ор}$ , то
      если  $\text{КрП}(\Pi, \Pi^*)$ , то
         $\text{Ор} := \text{Ор} + \Pi$ ;                          (добавляем элемент в множество)
         $\text{МАПГОр} := \text{МАПГОр} + \Pi$ ;                (добавляем элемент в множество)
      конец если
    конец если
  цикл конец
   $\text{МАПГОр} := \text{МАПГОр} - \Pi^*$ ;                    (исключаем элемент из множества)
цикл конец
  
```

В данной записи символ « $\Leftarrow$ » означает операцию присваивания.

Результатом алгоритма является множество подобластей Ор, принадлежащих восстанавливаемой области.

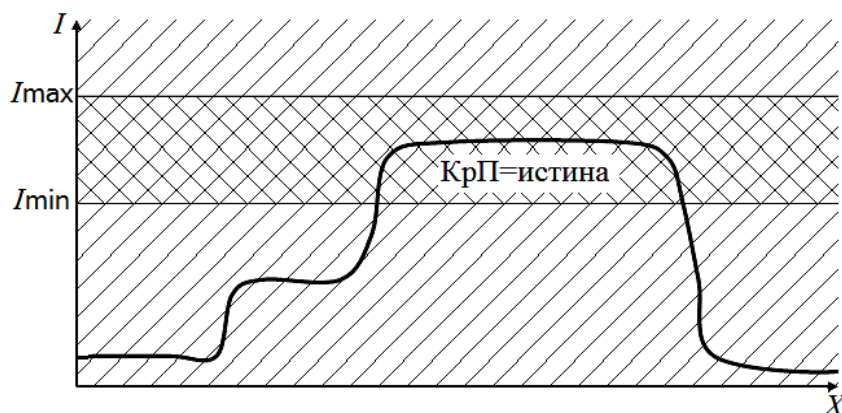


Рис. 6. Иллюстрация критерия на одномерном пространстве

Оценка временных затрат может быть выполнена следующим образом. Если область, подлежащая заполнению, содержит N подобластей Π , то количество обращений к подобластям за все время работы алгоритма составляет $4N$ для двумерного пространства и $6N$ для трехмерного пространства. Это количество обращений достигается за счет того, что рост из элемента выполняется один раз, после этого элемент исключается из списка активных подобластей границы.

В рассматриваемом алгоритме необходимо определить критерий подобия $\text{КрП}(\Pi, \Pi^*)$ как правило, которое ставит в соответствие двум элементарным подобластям Π и Π^* истинность или ложность их однородности. Однородность определяется в соответствии с интенсивностью поля, заданного на множестве подобластей. Существует несколько способов определения этого правила.

В том случае, если известен диапазон интенсивности $[I_{\min}, I_{\max}]$, определяющий восстанавливаемую область, критерий подобия записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{если } I_n \in [I_{\min}, I_{\max}], \text{ то } \text{КрП}(\Pi, \Pi^*) = \text{истина}, \\ \text{иначе } \text{КрП}(\Pi, \Pi^*) = \text{ложь}, \end{aligned} \quad (*)$$

здесь I_n – интенсивность элементарной подобласти Π .

Для использования этого критерия необходимо, чтобы стартовая элементарная подобласть принадлежала заданному интервалу $S_{\Pi} \in [I_{\min}, I_{\max}]$. Иллюстрация описанного критерия на примере одномерного пространства приведена на рис. 6.

В том случае, если не известен диапазон интенсивности, определяющий восстанавливаемую область, то критерий подобия записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{если } |I_n - I_n^*| < Eps, \text{ то } \text{КрП}(\Pi, \Pi^*) = \text{истина}, \\ \text{иначе } \text{КрП}(\Pi, \Pi^*) = \text{ложь}, \end{aligned}$$

здесь Eps – максимальное отклонение интенсивности между элементарными подобластями.

Также применим критерий, ограничивающий максимальное отклонение между проверяемой Π и средней интенсивностью области роста Op .

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ФРОНТАЛЬНОГО РОСТА

Множество подобластей, определяющих область поиска Op , удобно хранить в виде матрицы:

$Op[n \times m]$ – для двумерного пространства;

$Op[n \times m \times k]$ – для трехмерного пространства.

При этом индексы сеточной функции совпадают с индексами матрицы.

Для хранения МАПГОр (множества активных подобластей П границы области роста Ор) будем использовать список, поскольку для этой структуры хранения наиболее выгодно выполняются процедуры вставки и удаления элемента. Аналогичным способом будем хранить множество внутренних и граничных подобластей области роста Ор.

Для того чтобы в процессе алгоритма роста не выделять и не освобождать память под элементы списка, так как она занимает много времени по сравнению с другими операциями, зададим элементы матрицы Оп в виде записей, что позволит одновременно выделить память и под область поиска, и под список области роста, и под список активных элементов границы.

Описание записи элемента матрицы Оп:

- И – интенсивность, величина, характеризующая исследуемое пространство;
- i,j,k – индексы элемента матрицы Оп;
- УСлед – указатель на следующий элемент матрицы;
- ПринадлОр – определяет, принадлежит подобласть области роста или нет.

Проиллюстрируем список активных подобластей границы на примере двумерного пространства (рис. 7). Здесь элементами списка являются ячейки матрицы области роста Ор.

Таким образом, МАПГОр и Ор – это указатели на первый элемент списка. С помощью предложенной структуры хранения множеств можно реализовать алгоритм в любой среде программирования, позволяющей работать с динамической памятью.

Используя описанную структуру хранения, запишем алгоритм в виде блок-схемы, приведенной на рис. 8. Для его описания необходимо ввести дополнительные переменные и обозначения:

ВПОр – внутренние подобласти Ор;

ГПОр – граничные подобласти Ор;

ППринадлГ – определяет, принадлежит ли подобласть границе Ор;

КолАПГОр – количество активных подобластей границы области роста;

ПредП* – элемент списка МАПГОр, стоящий перед элементом П*;

Напр – массив векторов направлений роста, компонентами вектора являются (i, j, k) соответственно $[(-1, 0, 0), (+1, 0, 0), (0, -1, 0), (0, +1, 0), (0, 0, -1), (0, 0, +1)]$;

$:=$ – операция присвоения; $=$ – операция сравнения.

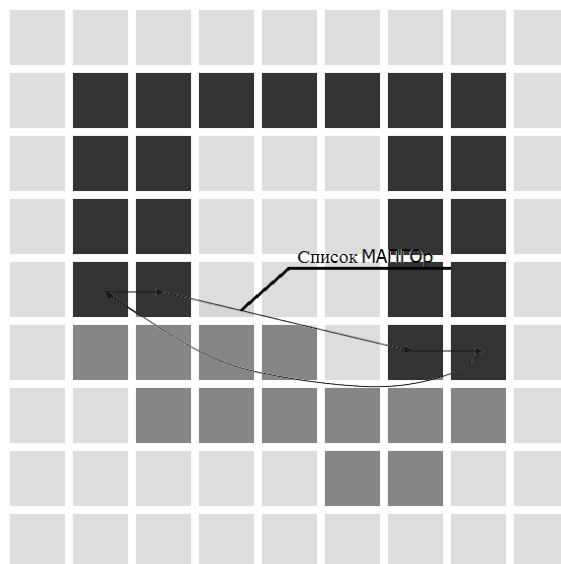


Рис. 7. Иллюстрация списка МАПГОр

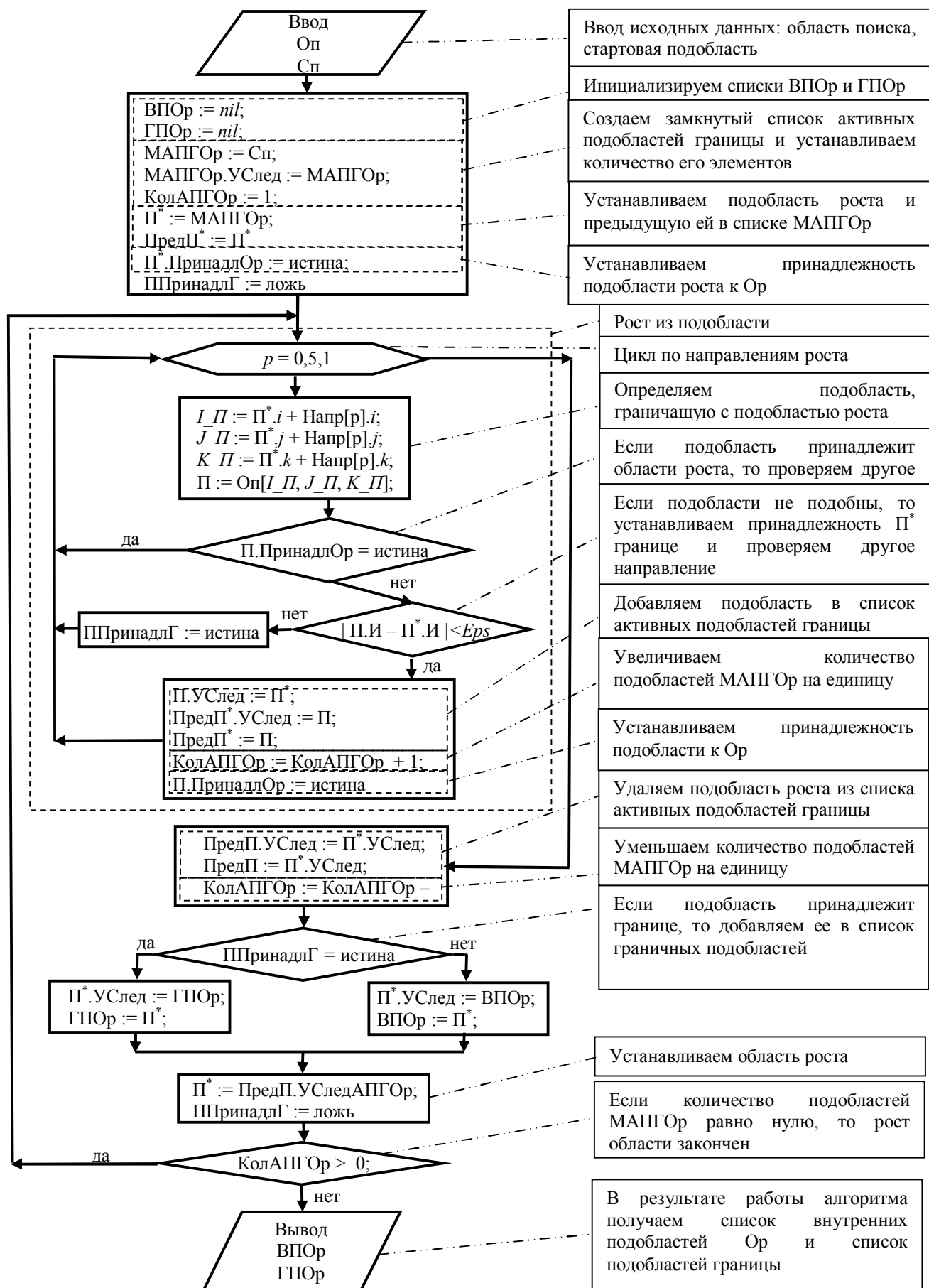
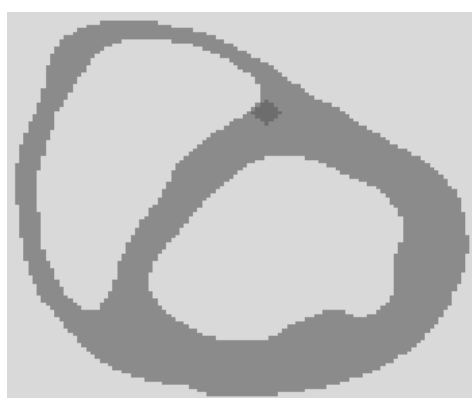


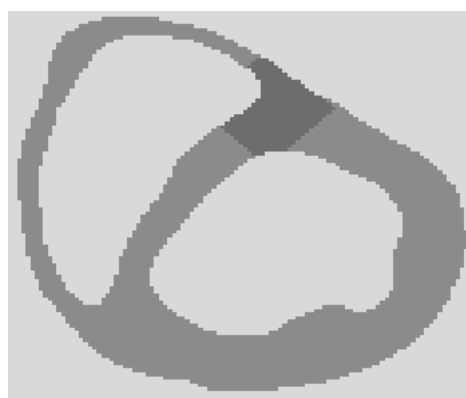
Рис. 8. Блок-схема алгоритма фронтального роста

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ ОБРАЗОВ

Для демонстрации использования разработанного алгоритма применительно к томограммам сердца человека на рис. 9 приведена последовательность реализаций, соответствующих различному числу итераций метода фронтального роста (от 3 итераций до 135). На рисунках темным цветом определена заполненная область (растущая область), серым цветом – область, подлежащая заполнению, светлым цветом соответственно, область, не подлежащая заполнению. Количество итераций, соответствующее полному заполнению, составило 135.



3 итерации



15 итераций



35 итераций



75 итераций



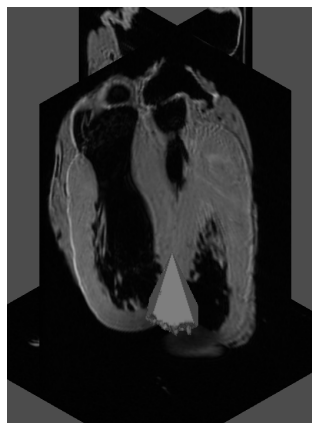
105 итераций



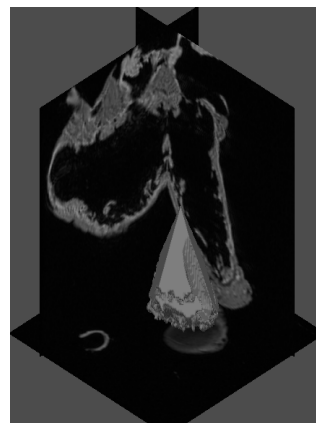
135 итераций

Рис. 9. Рост области в двумерном пространстве

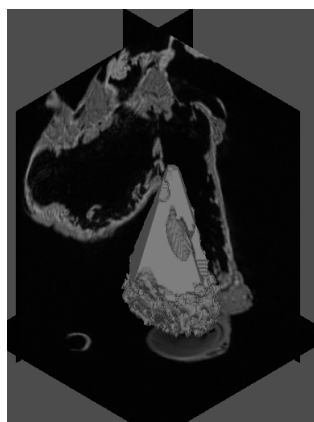
Последовательность изображений на рис. 10 демонстрирует процесс формирования геометрии пространственного образа полости левого желудочка сердца человека на различных этапах реализации метода фронтального роста. На каждом этапе реализации метода легко вычисляется объем заполненного пространства, что позволяет устанавливать объем сложных по геометрии элементов сердца. В частности, объем левого желудочка сердца человека, представленного на рис. 10, составил 71,4 мл. Количество итераций, соответствующее полному заполнению, было равно 180.



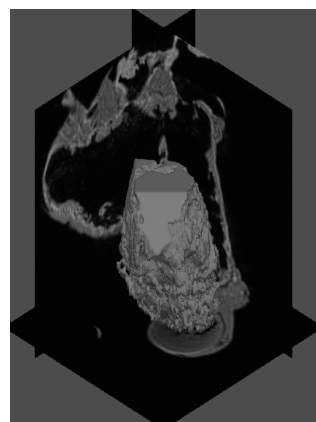
30 итераций



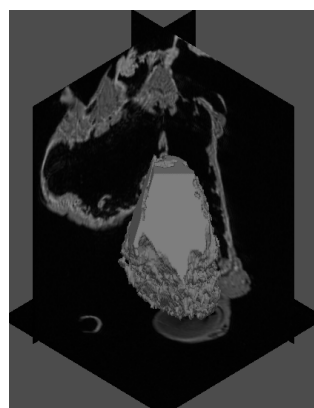
60 итераций



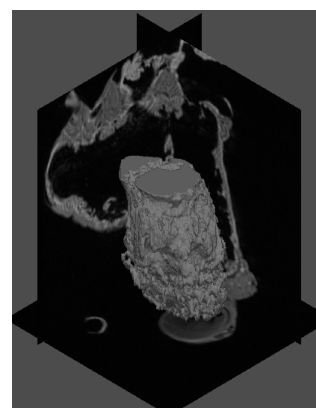
90 итераций



120 итераций



150 итераций



180 итераций

Рис. 10. Рост области в трехмерном пространстве

На рис. 11–15 приведены примеры построения геометрических образов органов тела человека. На рис. 11 представлен геометрический образ сердца.

На рис. 12, *а*, *б* изображены трехмерные геометрические образы фрагмента тела человека: *а* – исходный образ на основе совокупности томографических данных; *б* – образ костей таза человека, сформированный путем обработки исходного образа разработанным алгоритмом.

На рис. 13 приведен геометрический образ головы человека, включающий в себя мягкие ткани и кости черепа, полученный на основе исходных томографических измерений.

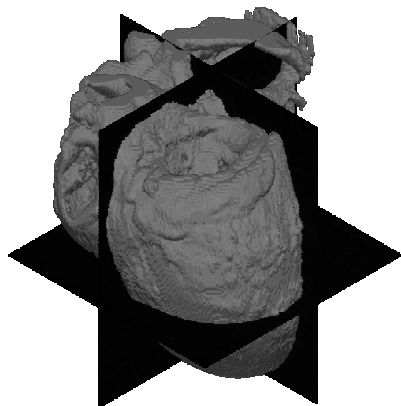
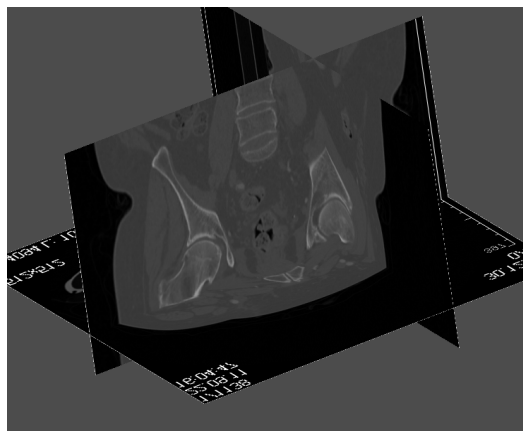


Рис. 11. Геометрия сердца человека



а



б

Рис. 12. Геометрические образы фрагмента тела человека: *а* – исходный образ тазовой кости; *б* – геометрический образ тазовой кости

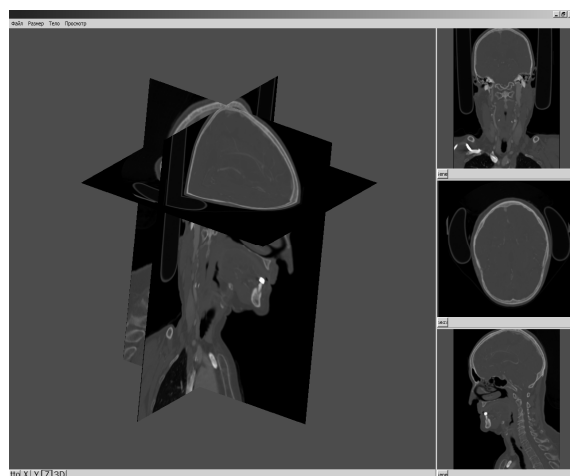


Рис. 13. Визуализация образа черепа



Рис. 14. Визуализация геометрии тела

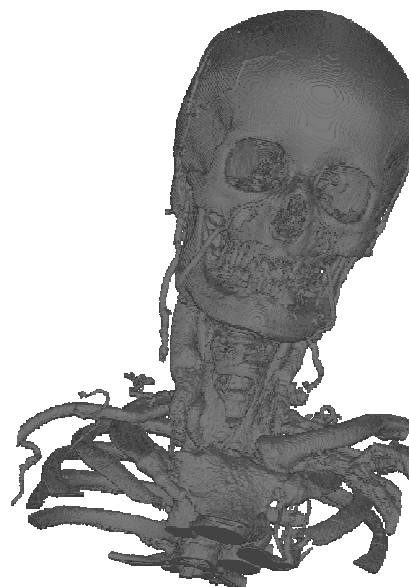


Рис. 15. Визуализация геометрии черепа

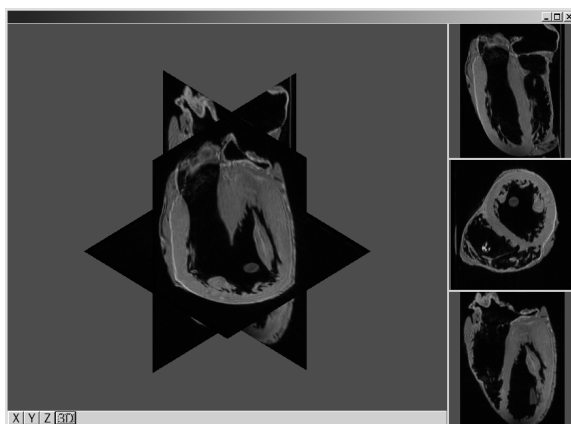


Рис. 16. Визуализация образа сердца

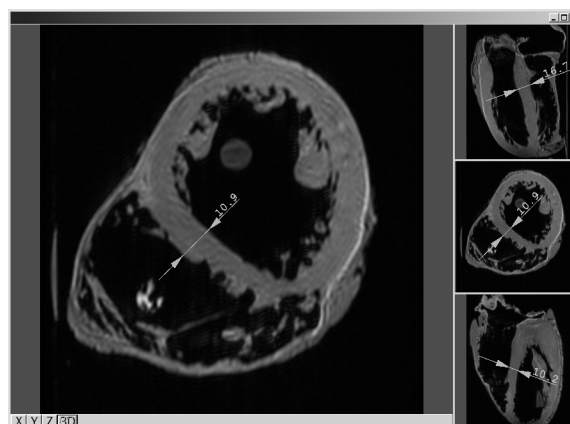


Рис. 17. Измерение линейных размеров

На рис. 14–15 отражены результаты обработки исходных данных, соответствующих различным тканям органов человека. Следует отметить, что каждой ткани соответствует определенный интервал изменения томографического сигнала. Возможность такой обработки заложена в созданный алгоритм за счет выбора параметров $[I_{\min}, I_{\max}]$ в критерии подобия (*).

На рис. 14 приведены результаты восстановления геометрии тела пациента при использовании диапазона интенсивностей, соответствующего мягким тканям, а на рис. 15 изображены кости черепа этого пациента при использовании диапазона интенсивностей, соответствующего костям.

На рис. 16 представлены результаты трехмерной визуализации томографического образа сердца на основе трех взаимно ортогональных сечений и двумерное изображение каждого сечения, а на рис. 17 – измерения линейных размеров (в данном случае толщины стенок желудочков).

Выводы

1. Разработан алгоритм, позволяющий восстанавливать трехмерную структуру внутренних органов человека на основе томографических данных, полученных в результате сканирования. В основе алгоритма заложен метод фронтального роста [3].

2. Разработан вариант численной реализации алгоритма на псевдокоде. Написана программа на языке программирования *Delphi*, которая позволяет: просматривать томограммы; измерять линейные размеры; выполнять построение геометрического образа органов тела человека; вычислять объем, занимаемый геометрическим образом.

3. Получаемые с использованием разработанного алгоритма геометрические образы органов человека являются основой для математического моделирования физико-механических процессов в них.

4. Приведены примеры построения геометрических образов костей таза, черепа и миокарда сердца человека.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-01-96016-р_урал_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Del Fresno M., Vénere M., Clausse A. A combined region growing and deformable model method for extraction of closed surfaces in 3D CT and MRI scans // *Computerized Medical Imaging and Graphics*. – 2009. – Vol. 9, No. 3. – P. 182–199.
2. Hornak J.P. The Basics of MRI [электронный ресурс]. – URL: <http://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/> (дата обращения: 23.06.11).
3. Li B., Acton S. Active contour external force using vector field convolution for image segmentation // *Transaction on Medical Imaging*. – 2007. – Vol. 16, No. 8. – P. 38–44.
4. Treece G.M., Prager R.W., Gee A.H., Berman L. Surface interpolation from sparse cross sections using region correspondence // *Transaction on Medical Imaging*. – 2000. – Vol. 19, No. 11. – P. 23–29.

ALGORITHM FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL IMAGES OF HUMAN ORGANS USING TOMOGRAPHY DATA

V.P. Matveenko, I.N. Shardakov, A.P. Shestakov (Perm, Russia)

In recent years, advances in medical technology have generated much interest in mathematical modelling of processes responsible for functionality of human organs. An important step towards modelling is to create a geometric image. One of the contemporary methods for determining the three-dimensional structure of human organs is tomography. In this paper, we present an algorithm allowing us to create the geometric images of human organs using tomography data. A software-based implementation of the frontal growth algorithm is described. Examples that illustrate the construction of three-dimensional images of hip bones, skull bones, and heart muscles are given.

Key words: modelling, three-dimensional image of human organs, algorithm, tomogram, segmentation, frontal growth method, visualization of images of heart muscles, hip bones, and skull bones.

Получено 16 ноября 2011