

ВОЗМОЖНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЧЕРЕПНЫХ ДЕФЕКТОВ ПО ДАННЫМ КРАНИОГРАФИИ

О.Г. Аврунин, А.И. Бых, Е.О. Шамраева
Харьковский национальный университет радиозлектроники
Кафедра БМЭ, ХНУРЭ, пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166, Украина
тел. (057) 7021-364, e-mail: gavrun@list.ru

Annotation – Possibilities of X-ray and CT-imaging for diagnostic of cranial traumas and reconstruction of cranial defects are discussed. The method of cosmetic reconstruction of cranial defects with using X-ray visualization is described. 3D model of cranial implant is developed. Perspectives of this method X-ray cranial registration are discussed.

Key words – X-ray imaging, CT-imaging, 3D model of cranial implantation, image-guided surgery.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы пластического закрытия дефектов костей черепа, несмотря на долгую историю их развития, актуальны и в настоящее время. Это связано, в первую очередь, с ростом травматизма среди наиболее работоспособного контингента населения. Тяжелая черепно-мозговая травма (ЧМТ) часто является причиной развития тяжелых органических и функциональных расстройств нервной системы. Опасность повреждения незащищенного мозга извне вследствие неспособности дефектов черепа самопроизвольно замещаться костной тканью, а также косметические аспекты травмы приводят к необходимости проведения реконструктивных нейрохирургических вмешательств для закрытия черепных дефектов [1-4].

Результаты исхода таких хирургических операций во многом зависят от методов диагностики посттравматических дефектов черепа (ПТДЧ), а также возможностей предварительного планирования вмешательства. Немаловажной является и возможность быстрого получения черепного имплантата высокого качества [4].

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На сегодняшний день диагностика ПТДЧ производится с помощью методов краниографии (рентгенографии черепа), рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) и его более совершенной модификации - спиральной компьютерной томографии (СКТ). Каждый из этих методов диагностики имеет свои достоинства и недостатки. РГ-обследование - обязательное при любой черепно-мозговой травме - является наиболее простым и доступным методом. Однако краниограммы недостаточно информативны для непосредственного планирования операции и построения имплантата, так как являются двухмерными проекциями головы пациента с наложением теней анатомических объектов. Методы рентгеновской компьютерной томографии (РКТ, СКТ), напротив, позволяют получить послойные изображения диагностируемой области, а так же выполнить объемные реконструкции данной зоны с отображением деформации структур черепа. Эти методы так же позволяют проводить виртуальное моделирование трехмерных моделей имплантатов, максимально соответствующих области повреждения, и выполнять планирование реконструктивных

вмешательств [4-7]. Основным недостатком томографических методов визуализации является крайне высокая стоимость оборудования и программного обеспечения: далеко не каждый областной центр в Украине может позволить приобретение аппарата СКТ.

Поэтому актуальной является разработка методов и средств для моделирования нейрохирургических реконструктивных вмешательств (получения объемных моделей черепа и имплантата), которые были бы доступны в районных лечебных учреждениях Украины и при этом по основным показателям (информативности точности реконструкции) не уступали бы их аналогам, полученным при помощи спиральной компьютерной томографии. В работе предлагается метод построения поверхности черепного имплантата по краниографическим данным на основе усредненных моделей черепа, полученных с помощью компьютерной томографии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходными данными для проведения разработки являются оцифрованные с разрешением порядка 300 dpi обзорные краниограммы, выполненные во фронтальной и сагиттальной плоскостях черепа с использованием стандартных рентгенологических укладок для максимального уменьшения геометрических искажений [3]. Данные изображения $B(j,k)$, при $j \in [0..j_{max}]$, $k \in [0..k_{max}]$ сохраняются в формате windows bitmap (bmp) с 8-битовым представлением интенсивности (256 градаций).

Специфичность исходных данных обуславливается принципом рентгенографии, основанном на ослаблении рентгеновского излучения при его прохождении через различные ткани. В результате на регистрирующем устройстве получается двухмерное изображение всех тканей, наложенных друг на друга. При этом из-за наложения теней от различных объектов непосредственное определение поверхности имплантата по данным двухпроекционной рентгенографии практически невозможно. Поэтому необходимо разработать метод, позволяющий по обзорным рентгенограммам определить пространственную локализацию дефекта и антропометрические показатели черепа, а затем, по данным эталонных компьютерных моделей черепа, соответствующих основным антропологическим типам, выполнить трехмерную реконструкцию поврежденного участка кости.

Разрабатываемый метод должен позволять определение геометрических параметров поврежденной области черепа и выполнять построение объемной модели соответствующего имплантата. Выходные данные для построения имплантата должны содержать информацию обо всех его сечениях и могут быть представлены в формате STL, общепринятом для установок лазерной стереолитографии, с помощью которых возможно получить натурные копии моделей черепа и черепного имплантата для непосредственного моделирования хирургического вмешательства [4, 7, 8].

Процесс проведения реконструкции черепных дефектов по данным краниографии делится на три основных этапа: определения анатомических параметров черепа, сегментации костного дефекта, построения модели имплантата. Рассмотрим реализацию данных этапов.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНАТОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕРЕПА

Целью первого этапа метода реконструкции черепных дефектов является определение соответствия формы черепа пациента одному из анатомических типов с характерной конфигурацией [9]. Череп имеет достаточно сложный рельеф внутренней и наружной поверхностей, обусловленный расположением в его костных образованиях структур головного мозга, органов чувств, нервных узлов, а так же наличием многочисленных отверстий и каналов для прохождения нервов и сосудов, воздухоносных полостей. Иллюстрации обзорных рентгенограмм черепа во фронтальной и сагиттальной проекциях приведены на рисунках 1,а и 1,б соответственно (D_f – область костного дефекта).

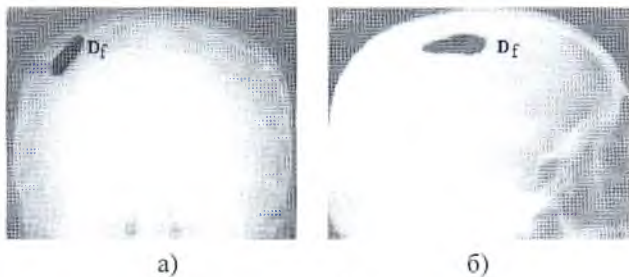


Рис. 1

Для характеристики размеров и формы мозгового черепа наиболее часто используют абсолютные величины трех основных диаметров – продольного d_l , поперечного d_t и высотного d_h , а так же их соотношения (индексы) [9].

Продольный диаметр d_l показывает наибольшую длину черепа и измеряется по краниограмме, выполненной в сагиттальной проекции (см. рис. 2,б), как расстояние от передней, наиболее выступающей точкой лобной кости, до наиболее удаленной точки затылочной кости. Так же в сагиттальной проекции определяется высотный диаметр d_h , измеряемый как длина перпендикуляра, проведенного к продольному

диаметру от верхней точки теменной кости (см. рис. 2,б). Во фронтальной проекции определяется поперечный диаметр d_t черепа, измеряемый как расстояние между наиболее удаленными от срединной плоскости точками на латеральной поверхности черепа (см. рис. 2,а).

Анатомическая форма черепа характеризуется индексами, которые представляют собой процентное отношение между его размерами. При этом основными являются следующие три индекса:

– высотно-продольный индекс, определяемый как отношение высотного диаметра мозгового черепа к его продольному диаметру:

$$i_{hl} = \frac{d_h}{d_l} \cdot 100\%; \quad (1)$$

– высотно-широтный индекс, определяемый как отношение высотного диаметра мозгового черепа к его поперечному диаметру:

$$i_{ht} = \frac{d_h}{d_t} \cdot 100\%; \quad (2)$$

– поперечно-продольный индекс, определяемый как процентное отношение поперечного диаметра мозгового черепа к его продольному диаметру:

$$i_{lt} = \frac{d_t}{d_l} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Рассмотрим алгоритм автоматизированного определения данных показателей по обзорным краниограммам, состоящий из блоков предварительной обработки входных изображений, сегментации костных структур и постобработки сегментированных данных.

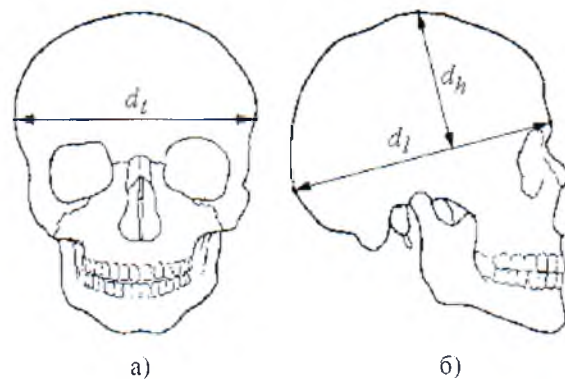


Рис. 2

Предварительная обработка исходных краниограмм направлена на устранение мелкозернистого (импульсного) шума, связанного с особенностями процесса регистрации рентгеновских изображений, и реализуется на основе нелинейного метода медианной фильтрации. При адаптивном выборе параметра p апертуры фильтра в соответствие с размером помехи [10-11], происходит существенное подавление импульсного шума на результирующем изображении $C(j,k) = med\{B(j,k)\}_p$ при несущественном размытии границ костных структур.

Сегментация костных структур внешней поверхности черепа, необходимых для расчета анатомических индексов, проводится с учетом особенностей их визуализации на краниограммах (области с наибольшей интенсивностью на рис. 1) и выполняется путем построения градиентных изображений краниограмм. Согласно определению модуль градиента двумерной скалярной функции $\Phi(x,y)$ равен:

$$|\nabla\Phi| = \sqrt{\left(\frac{\partial\Phi(x,y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi(x,y)}{\partial y}\right)^2}. \quad (4)$$

Переходя к дискретным координатам цифровых изображений $C(j,k)$, вычисляем модуль градиента (4) в каждой точке раstra согласно выражению:

$$|G(j,k)| = \sqrt{(C(j,k+1) - C(j,k))^2 + (C(j+1,k) - C(j,k))^2}.$$

На этапе постобработки полученных градиентных изображений краниограмм выполняется логическая фильтрация ложных контуров по геометрическим признакам и морфологическая обработка для создания замкнутых контуров костных структур, относящихся к внешней поверхности черепа. Результаты контурной сегментации структур внешней поверхности черепа по краниограммам, изображенным на рис. 1,а и 1,б, приводятся на рис. 3,а и 3,б для фронтальной и сагитальной проекций соответственно.

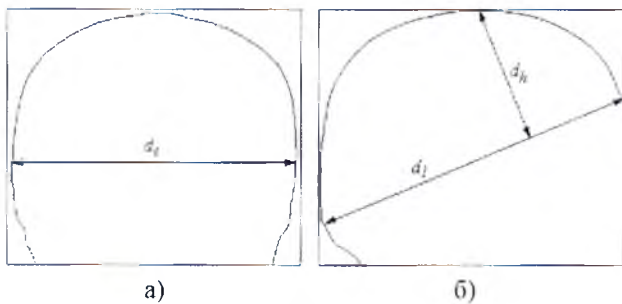


Рис. 3

При вычислении анатомических размеров черепа необходимо только интерактивное указание наиболее выступающей точки лобной кости (по сагитальной проекции), остальные опорные точки, расстояния между ними, а так же черепные индексы (1-3) определяются автоматически.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СЕГМЕНТАЦИИ КОСТНОГО ДЕФЕКТА

Для точного определения локализации костного дефекта и его конфигурации необходимо выполнить процедуру сегментации краниографических изображений. Априорными сведениями и допущениями при этом являются: области костного дефекта соответствуют наиболее темные уровни интенсивности, области костного дефекта, анатомических структур черепа и фона не пересекаются. Результатом выполнения процедуры сегментации костного дефекта является построение в автоматическом режиме бинарной характеристической функции:

$$D(j,k) = \begin{cases} 1; & \text{при } C(j,k) < T; \\ 0; & \text{при } C(j,k) \geq T, \end{cases}$$

где T – пороговое значение уровня интенсивности, определяемое по гистограмме изображения и соответствующее минимуму между двумя наиболее значимыми максимумами. Заключительным этапом сегментации является применение морфологических операций для формирования сглаженных границ черепного дефекта и выделение его контуров с помощью дифференциальных операторов. Иллюстрация процедуры сегментации костного дефекта для краниограмм, изображенных на рис. 1,а и 1,б, приводится на рис. 4,а и 4,б для фронтальной и сагитальной проекций соответственно (D_f – область костного дефекта).

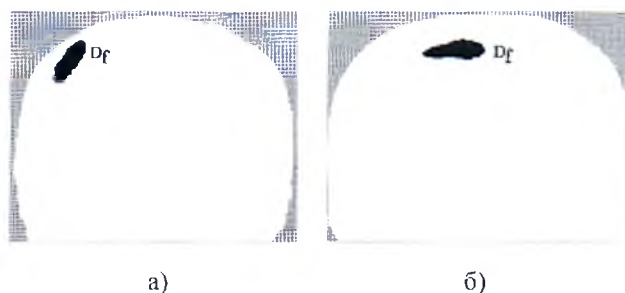


Рис. 4

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ЧЕРЕПНОГО ИМПЛАНТАТА

В основе построения объемной модели имплантата лежит соотнесение формы черепа пациента, индексы которого рассчитываются по формулам (1-3), к одному из базовых анатомических типов: доликотран, мезокран, брахикран, хамекран, ортокран, гипсикран, тапейнокран, метриокран, акрокран. Усредненные трехмерные полигональные модели поверхностей черепов вышеперечисленных анатомических типов получены на основе триангуляции данных спиральной компьютерной томографии. Далее выполняется масштабирование выбранной усредненной модели черепа соответствующего типа к размерам черепа пациента и определяются пространственные координаты точек, принадлежащих области черепного дефекта по сегментированным изображениям краниограмм.

Затем, путем сопоставления найденных координат черепного дефекта с координатами всех точек, принадлежащих соответствующей усредненной модели черепа, выделяется искомая область на черепе. Условно данный процесс можно представить как наложение обработанного рентгеновского снимка черепа (показаны только контуры черепа и дефекта в сагитальной проекции) на соответствующую полигональную усредненную модель черепа (см. рис. 5). Следует отметить, что для адекватного нахождения искомого дефекта, необходимо в интерактивном режиме указать дополнительные сведения о расположении черепного дефекта. На рис. 6. представлен результат моделирования поверхности черепного имплантата.

Область реконструкции

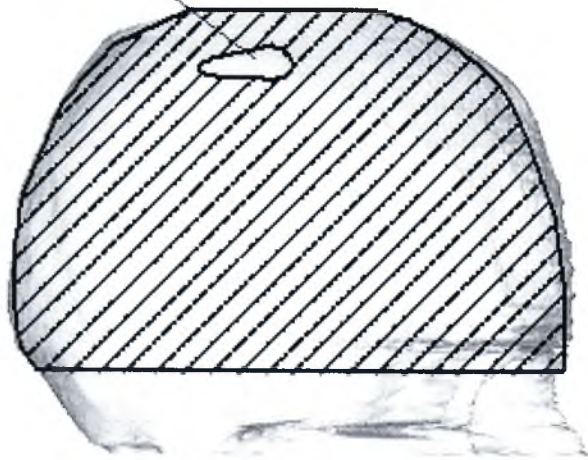


Рис. 5

Модель имплантата (см. рис. 6) построена по данным краниографии и усредненной полигональной модели черепа соответствующего анатомического типа, полученной на основе триангуляции СКТ-данных.



Рис. 6

ВЫВОДЫ

Для систем нейрохирургического планирования реконструктивных вмешательств по поводу дефектов черепа актуальными являются задачи разработки и совершенствования методов пространственной визуализации, а так же моделирования поверхностей черепных дефектов. Основным недостатком современных методов визуализации и реконструкции черепных дефектов на основе СКТ данных является чрезвычайно высокая стоимость оборудования, что ограничивает их широкое применение в клинике.

Предложенный в работе метод реконструкции черепного дефекта по краниографическим данным позволяет на основе усредненных моделей черепа выполнять построение поверхности имплантата. Данный метод фактически позволяет выполнить замену поврежденного участка черепа пациента имплантатом – копией поверхности черепа соответствующего анатомического типа. По результатам работы разработан расчетно-графический пакет программ, позволяющий по данным краниографического обследования с высокой степенью автоматизации выполнять определение анатомических параметров и типа черепа, сегментацию костных дефектов и построение модели

поверхности имплантата с представлением данных в STL-формате для создания вещественной копии имплантата с помощью лазерной стереолитографии.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАБОТЫ

Перспективой работы является исследование вопросов точности реконструкции черепа по усредненным моделям, разработка методик максимального учета индивидуальной анатомической variability, а так же проведение клинических испытаний.

Предоперационное редактирование трехмерных компьютерных моделей черепа с восстановлением недостающих фрагментов полностью не решает проблем, связанных с непосредственным изготовлением имплантатов, особенно при обширных дефектах сложной конфигурации. Поэтому необходима разработка методов и средств для ускоренного вещественного прототипирования анатомических объектов и моделирования оперативного вмешательства на полномасштабных трехмерных копиях черепа пациента и имплантатов.

[1] *Клиническое руководство по черепно-мозговой травме* / Под ред. А.Н. Коновалова, Л.Б. Лихтермана, А.А. Потапова. – М.:АНТИДОР, 1998. – Т 1. – 547 с.

[2] Сипитый В.И., Пятикоп В.А., Посохов Н.Ф. *Ортопедическая пластика дефектов костей свода черепа и твердой мозговой оболочки.* - Харьков: Основа, 1995.- 70 с.

[3] *Рентгенодиагностика заболеваний и повреждений черепа* /Коваль Г.Ю., Даниленко Г.С., Нестеровская и др.- К.: Здоров'я, 1984.- 376 с.

[4] *Доказательная нейротравматология* / Под ред. А.А. Потапова, Л.Б. Лихтермана.- М.: Внешторгиздат, 2003.– С. 221–226.

[5] Федоров В.Д., Кармазановский Г.Г., Цвиркун В.В. *Новые возможности спиральной компьютерной томографии – виртуальная хирургия* // Медицинская визуализация. – 2000.- №2.- с. 15-18.

[6] Шамраева Е.О., Шамраев А.А., Аврунин О.Г. *Реконструкция объемных моделей черепа и имплантата по томографическим снимкам*// Системы обработки информации. – Харьков, 2007. – Вып. 9(67).– С. 137-140;

[7] Кравчук А.Д., Потапов А.А., Корниенко В.Н. и др. *Реконструкция посттравматических костных дефектов с использованием компьютерного моделирования* // Материалы 3-го съезда нейрохирургов России, СПб.- 2002.- С. 637.

[8] Абрамов С.С., Болдырев Н.Н., Евсеев А.А. и др. *Изготовление пластиковых копий трехмерных объектов по томографическим данным* // Оптическая техника, 1998, №1 (13), С. 45–49.;

[9] Сперанский В.С., Зайченко А.И. *Форма и конструкция черепа.* М.: Медицина, 1980.- 280. с.

[10]Путятин Е.П., Аверин С.И. *Обработка изображений в робототехнике.* М.: Машиностроение, 1990.- 330 с.

[11] Форсайт Д.А., Понс Ж. *Компьютерное зрение. Современный подход:* Пер. с англ.- М.: Изд. дом «Вильямс», 2004.- 928 с.