

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ТРЕПАНАЦИИ ЧЕРЕПА

Приводятся принципы проектирования автоматизированных систем для трепанации черепа. Предлагается структурная схема данной системы. Рассматриваются вопросы, связанные с планированием начального этапа нейрохирургических операций с проведением трепанации черепа. Приводятся основные соотношения для определения параметров сверления кости в автоматическом режиме. Рассматривается комплексный подход, позволяющий сформировать основные медико-технические требования к системе для трепанации черепа.

1. Актуальность исследований

При проведении большинства нейрохирургических оперативных вмешательств проводится процедура трепанации черепа – хирургическая операция вскрытия полости черепа для обеспечения доступа к внутричерепным образованиям. В современной нейрохирургии для трепанации черепа используют специальный инструмент – *трепан* (от греч. *τραπανο* – бурав), рабочей частью которого является сверло или фреза [1-3]. Современный трепан представляет собой практически не модифицированную на протяжении последних десятилетий конструкцию, включающую в себя коловорот с металлической ручкой и головкой с набором различных фрез и сверл, выбираемых в зависимости от параметров трепанации.

На современном этапе бурное развитием научно-технического прогресса и его внедрение в медицинскую технику позволило существенно повысить уровень оснащенности хирургических операционных и сформулировать новые стандарты к проведению нейрохирургических операций. Основным требованием при этом является малая инвазивность (травматизм) хирургического вмешательства, достигаемая за счет применения высокоточного оборудования и методов хирургического планирования [1-4].

При выполнении стандартной трепанации черепа (краниотомии) нейрохирург вручную управляет хирургическим коловоротом [1-3]. Недостатком данной процедуры является наличие субъективных факторов, таких как выполнение однообразных рутинных действий, сложность визуального контроля при проведении сверления, неравномерность прикладываемого усилия и распределения давления, опасность повреждения внутричерепных сосудистых образований, которые могут быть снижены только при выполнении трепанации опытным хирургом, но полностью не устранены. Поэтому актуальными являются вопросы, связанные с устранением данных недостатков путем разработки высокоточной автоматизированной системы для проведения трепанации черепа.

Целью исследования является разработка автоматизированной системы для проведения трепанации черепа и формирование основных медико-технических требований к подсистеме планирования трепанации, автоматическому трепану и хирургическому трепанирующему сверлу. Для этого необходимо изучить структурную организацию системы, выделить ее основные модули и рассмотреть принципиальные вопросы их функционирования. Основными этапами планирования трепанации черепа являются: определение локализации трепанационного отверстия, исходя из возможностей обеспечения хирургического доступа к пораженной области, выбор диаметра трепанационного отверстия, который определяется типом и объемом операции, а также конструктивными особенностями применяемого хирургического оборудования, расчет параметров управления автоматизированным трепаном [1-4]. Исходя из этого, разрабатываемая система должна проводить обоснованный выбор геометрических характеристик трепанационного отверстия, определение параметров управления автоматическим трепаном и выполнять сверление черепа в автоматическом режиме.

2. Разработка структурной схемы системы

В соответствии с поставленной задачей и реализацией этапов хирургического планирования структурная схема автоматизированной системы для проведения трепанации черепа (рис. 1) содержит подсистему интраскопии, подсистему планирования трепанации, состоящую из модулей визуализации, анализа изображений, определения параметров трепанации и формирования управляющих воздействий, интерфейсный блок и автоматический трепан с трепанирующим сверлом.

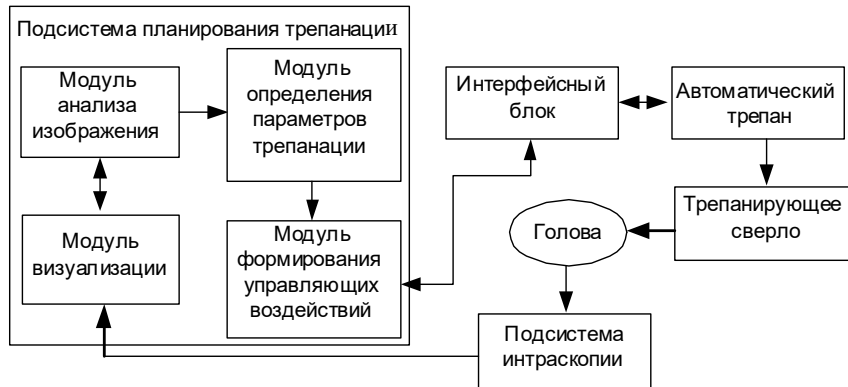


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы для проведения трепанации черепа

Подсистема интраскопии должна обеспечивать получение изображений костных структур черепа с максимально-возможной точностью. При этом основной целью исследования является возможность определения толщины костных стенок в области трепанации. В настоящее время наиболее полную диагностическую информацию о черепных структурах получают с помощью метода рентгеновской спиральной компьютерной томографии (СКТ) [1, 2-4]. Набор аксиальных томографических СКТ-срезов поступает в систему планирования трепанации, реализованную на основе высокопроизводительной графической рабочей станции. В модуле визуализации проводится отображение исходных томографических срезов и результатов их обработки, которая выполняется в модуле анализа изображений. В модуле определения параметров трепанации делается расчет основных показателей, необходимых для управления автоматическим трепаном. По полученным параметрам модуль формирования управляющих воздействий вырабатывает сигналы управления, которые через интерфейсный блок поступают на автоматический трепан с установленным трепанирующим сверлом. Рассмотрим подробно организацию и принципы функционирования подсистемы планирования трепанации, которая является определяющей при обосновании медико-технических характеристик системы.

3. Реализация модулей визуализации и анализа изображений

Модуль визуализации должен обеспечивать наглядное отображение костных структур в двумерных (2D) режимах визуализации исходных аксиальных томографических срезов и результатов выполнения мультипланарных реконструкций. Дополнительно в режиме 2,5D необходимо предусмотреть отображение характеристической функции костных структур, для хранения значений которой необходимо выделить специальный H (characteristic) буфер. При этом достигаются возможности избирательного или совмещенного отображения костных структур с использованием псевдоокрашивания. Поверхностная трехмерная (3D) визуализация может быть представлена для расширения возможностей отображения при выборе области трепанации и не является определяющей при расчете ее параметров.

В модуле анализа изображений проводится предварительная обработка и сегментация исходных томографических изображений, представляющих собой наборы, состоящие из n полутоновых 8-битовых изображений $F_n(i, j)$ томографических срезов стандартного размера 512×512 элементов. В результате работы данного модуля исходный набор из n изображений СКТ-срезов $F_n(i, j)$ преобразуется следующим образом:

$$F_n(i, j) \rightarrow F'_n(i, j) \rightarrow H_n(i, j),$$

где $F'_n(i, j)$ и $H_n(i, j)$ – изображение n-го СКТ-среза после проведения предварительной цифровой обработки; $H_n(i, j)$ – характеристическая функция костных структур изображения n-го СКТ-среза.

Количество n СКТ-срезов определяется видом патологии. В областях возможной трепанации сканирование должно выполняться с шагом 1-2 мм. Предварительная обработка изображений включает в себя методы гистограммной коррекции уровней интенсивности для повышения возможностей визуального восприятия анатомической картины черепа и прилегающих объектов. Для устранения импульсных помех и артефактов используются алгоритмы медианной фильтрации, не приводящие к существенноному размытию границ костных структур на изображениях СКТ-срезов. Для обострения контуров костных структур в интерактивном режиме можно выполнить процедуры высокочастотной фильтрации изображения с помощью наборов обостряющих масок [5-6].

Сегментация костных структур на предварительно обработанном изображении СКТ-среза заключается в построении бинарной характеристической функции вида:

$$H(i, j) = \begin{cases} 1; \text{при } (i, j) \in D_K; \\ 0; \text{при } (i, j) \notin D_K, \end{cases} \quad (1)$$

где D_K – область изображения, соответствующая костным структурам.

Процесс автоматизированной сегментации основывается на факте, который заключается в том, что костные структуры, являющиеся максимально плотными анатомическими образованиями, представляются в виде протяженных объектов с высокой интенсивностью на фоне мягких тканей, обладающих значительно более низкой интенсивностью (рис. 2, а). Поэтому процедуру сегментации целесообразно выполнять путем анализа гистограммы изображения СКТ-среза и определения порогового уровня T_K , соответствующего границе интенсивностей между костными объектами и внутримозговой тканью. Согласно формуле (1) характеристическая функция костных структур будет определяться следующим образом:

$$H(i, j) = \begin{cases} 1; \text{при } F'(i, j) \geq T_K; \\ 0; \text{при } F'(i, j) < T_K. \end{cases} \quad (2)$$

Методика определения порогового уровня в задачах, аналогичных данной, приводится в литературе [5-6] и не рассматривается в рамках данной работы. Для придания гладкости контурам костных образований на заключительном этапе сегментации необходимо выполнить логическую фильтрацию характеристической функции. Результат проведения процедуры автоматической пороговой сегментации костных структур (в инверсном режиме отображения) приводится на рис. 2,б.

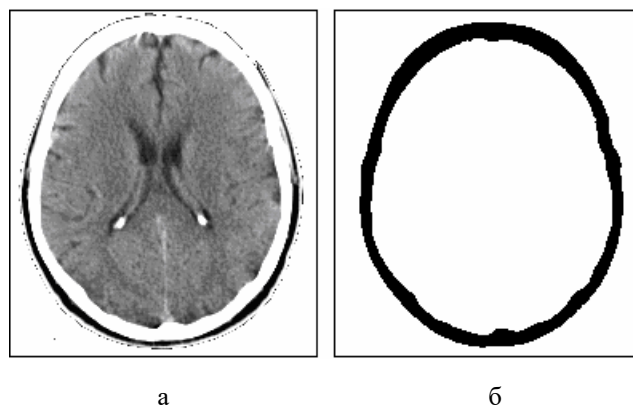


Рис. 2. Иллюстрация проведения автоматической сегментации костных структур на изображении СКТ-среза: а – исходное изображение; б – инверсная характеристическая функция костных структур

4. Реализация модуля определения параметров трепанации

В данном модуле выполняется определение геометрических характеристик трепанации, а также параметров управления автоматическим трепаном. Координаты расположения центра трепанационного отверстия и его диаметр выбираются специалистом интерактивно исходя из возможностей хирургического доступа. Для повышения наглядности процедуры выбора параметров трепанационного отверстия целесообразно использовать мультипланарные реконструкции в плоскостях, перпендикулярных к плоскости томографического сканирования. Диаметр трепанационного отверстия при современных малоинвазивных оперативных вмешательствах составляет не более 25 мм. Толщина костной стенки L_T определяется как минимальная в указанном участке черепа:

$$L_T = \min\{L_m\}, \text{ при } m = 1..M,$$

где M – количество томографических срезов, используемых для расчетов параметров трепанации.

Параметры управления и характеристики автоматического трепана выбираются исходя из приблизительного равенства плотностей костной ткани и твердых пород дерева (бакаут), составляющих в среднем порядка 1400 кг/м^3 [7-9]. В соответствии с этим можно применить следующие формулы для расчета параметров автоматического трепана: при непрерывном сверлении с постоянной толщиной стружки подачу сверла на один оборот определяют по формуле [10, 11]

$$U_n = \frac{10^3 U}{n}, \text{ мм/об}, \quad (3)$$

где U – скорость подачи сверла, м/мин; n – частота вращения сверла, мин^{-1} (об/мин). В соответствии с формулой (3) скорость подачи сверла определяется как:

$$U = \frac{n U_n}{10^3}, \text{ м/мин}. \quad (4)$$

Окружное усилие резания вычисляют по формуле:

$$F = 2,5KdU_n, \text{ Н}, \quad (5)$$

здесь d – диаметр сверла; K – коэффициент удельной работы при сверлении, определяемый по формуле:

$$K = 10(K_n + \frac{P_3}{U_n}), \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{см}^3, \quad (6)$$

где K_n и P_3 – безразмерные коэффициенты, зависящие от диаметра сверла (в частности, при изменении диаметра сверла от 5 до 30 мм значение K_n снижается от 75 до 3,5, а значение P_n от 25 до 1,5).

Крутящий момент определяется по формуле:

$$M = F \cdot \frac{d}{2} = 1,25Kd^2U_n, \text{ Н.м}. \quad (7)$$

Мощность сверления при распространенной размерности частоты вращения в мин^{-1} (об/мин) вычисляется согласно формуле:

$$P = M\omega = \frac{M2\pi n}{60} = \frac{Mn}{9,550}, \text{ Вт}. \quad (8)$$

Усилие подачи сверла определяют по формуле:

$$P_n \approx (1..1,6)F, \text{ Н}. \quad (9)$$

Рекомендуемые параметры режима сверления при использовании трепанирующего сверла диаметром $d=25$ мм, изображенного на рис. 3, вычисляются по формулам (3)-(9): подача сверла на один оборот U_n должна составлять 0,1 мм/об при частоте вращения сверла

порядка 1000 об/мин, скорость подачи сверла U составляет при этом 100 мм/мин, мощность сверления составляет около 400 Вт. Материал режущей части сверла – сталь 9ХС, Х12Ф1 или Х5ВФ по ГОСТ 5950-73 с твердостью режущей части $HRC_3 = 52...56$ [11].



Рис. 3. Хирургическое трепанирующее сверло

5. Реализация модуля формирования управляющих воздействий

Данный модуль может быть выполнен как самостоятельным, так и совмещенным с общим модулем управления при использовании многозвенного хирургического роботоманипулятора. Модуль формирования управляющих воздействий целесообразно выполнить по принципу децентрализованного управления с разделением на два процедурных блока: вычислительного, реализующего стратегический и тактический уровни управления, и исполнительного, в котором проводится управление автоматическим трепаном на уровне сигналов. При этом вычислительный блок, являющийся аппаратно-независимым, целесообразно реализовать на основной графической рабочей станции, а исполнительный – на микроконтроллере, непосредственно формирующем необходимые параметры сигналов управления автоматическим трепаном. Такая организация модуля формирования управляющих воздействий позволяет рационально использовать вычислительные ресурсы системы, реализовать принцип распараллеливания операций и разгрузить графическую рабочую станцию от выполнения рутинных операций. Основными требованиями к интерфейсному блоку являются обеспечение гальванической развязки, надежность обмена данными и простота подключения, так как скоростные характеристики канала, из-за малого объема передаваемых данных (порядка 1 кБайта/с), являются второстепенными.

Выводы

Научная новизна заключается в подробном рассмотрении вопросов проектирования систем для проведения трепанации черепа в автоматическом режиме. Впервые предложен метод хирургического планирования трепанации, основанный на соответствии плотностей костной ткани и плотных пород дерева, позволяющий определять параметры трепанации и характеристики автоматизированного трепана. В результате проведенных исследований были определены функциональные и структурные особенности каждого модуля данной подсистемы, возможности вычисления основных параметров для выполнения трепанации и проведен обоснованный выбор оптимального режима сверления с использованием автоматического трепана.

Практическая значимость заключается в формировании медико-технических характеристик для проектирования компьютерных автоматизированных систем при выполнении трепанации черепа.

При проведении трепанации черепа в автоматическом или полуавтоматическом режиме необходимо применить систему, содержащую подсистемы интраскопии, планирования трепанации, интерфейсный блок и автоматический трепан с трепанирующим сверлом. Основным модулем данной системы является подсистема планирования трепанации, состоящая из модулей визуализации, анализа изображений, определения параметров трепанации и формирования управляющих воздействий. Тестирование работы системы операционного планирования проводилось с использованием исходных томографических срезов СКТ Siemens Somatom+ на базе диагностического центра Харьковской областной клинической больницы. Перспективой является разработка полной конструкторской документации и изготовление опытного образца системы для проведения исчерпывающих тестовых, а затем и клинических испытаний.

Список литературы: 1. Сакович В. П., Колотвинов В. С., Шамов А. Ю. Хирургическое лечение интракраниальных аневризм из птерионального доступа с применением малых трепанационных отверстий // Вопросы нейрохирургии. 2000. №1. С. 3-7. 2. Олешкевич Ф.В., Олешкевич А.Ф. Нейрохирургия. Операции на головном мозге. Минск: Высшая школа, 1993. 294 с. 3. Хирургия опухолей основания черепа / Под ред. А.Н. Коновалова. М.: ОАО Можайский полигр. комбинат, 2004. 372 с. 4. Федоров В.Д., Кармазановский Г.Г., Цвиркун В.В. и др. Новые возможности спиральной компьютерной томографии – виртуальная хирургия // Медицинская визуализация. 2000. № 2. С. 15-18. 5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с. 6. Путьтин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. М.: Машиностроение, 1990. 330 с. 7. Осипов Л.В. Ультразвуковые диагностические приборы. М.: Видар, 1999. 256 с. 8. Gonzalez-Reimers E., Mas-Pascual M., Arnay-de-la-Rosa M. Noninvasive estimation of bone mass in ancient vertebrae // Am. J. Phys. Anthropol. 2004. Т. 125, № 2. Р. 121-131. 9. Справочник по конструкционным материалам / Под ред. Арзамасова Б.Н., Соловьевой Т.В. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 637 с. 10. Манжос Ф.М. Деревообрабатывающие станки (конструкция, эксплуатация и технологические расчеты). М.: Гослемуиздат, 1963. 674 с. 11. Станочный дереворезающий инструмент. Каталог-справочник, М. НИИмаш, 1976. 416с.

Поступила в редколлегию 12.03.2007

Аврунин Олег Григорьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры биомедицинских электронных устройств и систем ХНУРЭ. Научные интересы: медицинское приборостроение, разработка новых методов и аппаратных средств. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-64, e-mail: bykh@kture.kharkov.ua.

Носова Татьяна Витальевна, канд. техн. наук, младший научный сотрудник кафедры биомедицинских электронных устройств и систем ХНУРЭ. Научные интересы: медицинское приборостроение, разработка новых методов и аппаратных средств. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-64, e-mail: bykh@kture.kharkov.ua.

УДК 519.246.8

А.Н. ОДЕЙЧУК, Б.В. ШАМША, Е.Г. ФЕДОРОВ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ РЯДОВ В УСЛОВИЯХ ГЕТЕРОСКЕДАСТИЧНОСТИ

Описывается проблема выбора оптимального метода прогнозирования стохастических рядов в условиях гетероскедастичности. Для этого разрабатывается интеллектуальная система, приводится ее обобщенная структура. Основное внимание уделяется проблеме выбора метода оценивания моделей прогнозирования в условиях гетероскедастичности. Вычисляются параметры, влияющие на качество методов оценивания. Для определения оптимального метода оценивания впервые предлагается использовать дерево решений. Построенное дерево решений является основой интеллектуальной системы. В качестве апробации полученных результатов строится модель прогноза официального курса гривны по отношению к доллару США.

1. Постановка проблемы

Прогнозирование финансовых временных рядов – необходимый элемент любой инвестиционной деятельности. Решение задач прогнозирования позволяет банкам, пенсионным и инвестиционным фондам эффективно осуществлять финансовые операции, рассчитывать эффективность принимаемых решений для повышения экономического потенциала. Таким образом, решение задач, связанных с прогнозированием финансовых показателей современных организаций с использованием современных информационных технологий, является актуальным.

Цель данного исследования состоит в разработке интеллектуальной системы выбора метода прогнозирования стохастических временных рядов в условиях гетероскедастичности.

Для этого необходимо решить следующие *задачи*: разработать схему интеллектуальной системы, определить показатели, влияющие на выбор метода прогнозирования, а также предложить механизм классификации временных рядов по методам их обработки.