

УДК 615.47

О. Г. Аврунин¹, М. Ю. Тымкович², Х. И. Фарук³¹ ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, gavrun@list.ru² ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, maxim_tymkovich@ukr.net³ ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, husamfarouk@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ИНВАЗИВНОСТИ ХИРУРГИЧЕСКОГО ДОСТУПА ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ ПЛАНИРОВАНИИ ОПЕРАТИВНЫХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ

Статья посвящена разработке метода оценки степени инвазивности хирургического доступа в хирургии головного мозга. Предложена шкала индексов инвазивности анатомо-функциональных структур головного мозга исходя из их значимости. Разработан алгоритм определения минимально травматичной траектории оперативного доступа с использованием предложенных индексов инвазивности анатомо-функциональных структур головного мозга.

СТЕРЕОТАКСИС, НЕЙРОХИРУРГИЯ, ТРАЕКТОРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ, ИНВАЗИВНОСТЬ ХИРУРГИЧЕСКОГО ДОСТУПА, ИНДЕКС ИНВАЗИВНОСТИ, ВОКСЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ, МИНИМАЛЬНО ТРАВМАТИЧНАЯ ТРАЕКТОРИЯ

Введение

Последние достижения мировой медицины неразрывно связаны с техническим прогрессом и внедрением новых информационных технологий, которые дают возможность клиницисту опираться не на традиционные эмпирическо-описательные подходы, а на количественные инструментальные методы диагностики и лечения. Этому способствуют вводимые четкие стандарты диагностики и терапии, основанные на критериях доказательной медицины. Одним из наиболее сложных направлений в современной компьютеризированной медицине является стереотаксическая нейрохирургия, позволяющая с помощью средств интроскопии, навигационного оборудования и специальной хирургической аппаратуры обеспечить локализованный доступ к глубоко расположенным структурам головного мозга для удаления труднодоступных новообразований или стимуляции функционально-значимых областей. Широкое использование стереотаксического метода, в первую очередь, объясняется малой травматичностью вмешательств, а также развитием интроскопического оборудования (компьютерной рентгеновской и магниторезонансной томографии) и высокопроизводительных рабочих станций, обеспечивающих навигацию хирургического инструмента на основе согласования внутримозговых ориентиров по данным мультимодальной интроскопической визуализации.

Актуальность темы. Одной из основных задач стереотаксического метода является выбор оптимального (по критерию минимальной травматичности) хирургического доступа — проведение компьютерного планирования и виртуального моделирования оперативного вмешательства [1]. Это приводит к появлению специализированных систем компьютерного планирования, направленных на принятие решения о траектории хирургического доступа по исходным данным

интроскопической диагностики. Такие системы становятся неотъемлемой частью современных хирургических комплексов, а разработка методов траекторного компьютерного планирования хирургических вмешательств остается актуальной задачей с учетом совершенствования и появления новых средств диагностики и функционального контроля.

1. Анализ основных достижений и литературы

В отечественных и зарубежных публикациях, посвященных разработке и усовершенствованию стереотаксического метода, значительная часть работ посвящена увеличению точности путем улучшения совмещения систем координат [2–4].

В работе [5] для определения риска доступа применяется шестиуровневая градация степеней инвазивности (avoid, dangerous, warning, careful, common, accessible). В материалах работ [6, 7] рассмотрена возможность использования мультимодальных данных для улучшения качества определения структур головного мозга, которые впоследствии используются для расчета оптимального хирургического доступа.

Этапы хирургического планирования по данным литературы [2–4] заключаются в выборе хирургического доступа, основанном, как правило, на эмпирическом подходе и опыте специалиста и рассмотрении технических приемов на этапах проведения операции. При этом, как правило, не проводится анализ эффективности самой процедуры хирургического планирования, а также отсутствуют четкие количественные критерии и методики прогнозирования и оценки достигнутого лечебного эффекта.

2. Цель исследований и постановка задачи

Целью работы является формирование теоретических основ метода траекторного компьютерного хирургического планирования и, в частности,

этапа определения степени травматичности хирургического доступа.

Метод траекторного компьютерного планирования позволяет определить степень травматичности (инвазивности) хирургического доступа, которая связана с риском возникновения послеоперационных осложнений из-за травматизма окружающих стереотаксическую мишень функционально-важных структур.

Поэтому целью данного этапа является формализация определения минимально травматичной траектории хирургического доступа к оперируемой структуре. С этой целью поставлены такие задачи, как определение индексов травматичности каждой из структур головного мозга, разработка алгоритма определения минимально-инвазивной траектории нейрохирургического вмешательства, с помощью которой возможно достижение оперируемой структуры с наименьшим риском возникновения осложнений.

3. Материалы исследований

Задача определения степени инвазивности хирургического доступа решается на основе информационной модели операционного планирования, и, в частности, по данным коэффициентов (индексов) инвазивности ID_S , которые содержатся в идентификационной воксельной модели головы пациента, получаемой по данным компьютерной томографии.

Анатомо-функциональным структурам головы человека в соответствии с их физиологической значимостью присваиваются индексы инвазивности [8], приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Значения индексов инвазивности
анатомо-функциональных структур

Анатомо-функциональная структура или область	Индекс инвазивности, ID_{SE}
Внешние объекты области сканирования (воздух, навигационные метки, элементы фиксации головы)	0
Воздух в придаточных пазухах	1
Желудочки, спинномозговая жидкость	2
Костные структуры	3
Серое и белое вещество больших полушарий	4
Ядра промежуточного мозга	5
Внутренняя капсула	6
Ядра гипоталамуса и ствола мозга	7
Кровеносные сосуды	8

Воксельная модель, на основании которой будет производиться расчет риска вмешательства, может формироваться из обобщенной воксельной модели на основе автоматизированной сегментации анатомических структур и последующей

интерактивной обработки, заключающейся в обозначении каждой функционально-значимой области и присвоении ей соответствующего коэффициента (индекса) инвазивности. В качестве примера на рис. 1 приводится результат проведения интерактивной процедуры разметки структур среднего мозга с использованием псевдоокрашивания при визуализации в режимах 2,5 D (см. рис. 1, а) и 3,5 D (см. рис. 1, б).

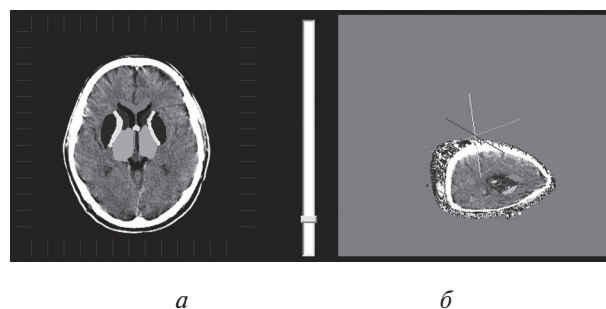


Рис. 1. Иллюстрация построения идентификационной модели компьютерного планирования:
а — визуализация аксиального КТ- среза в 2,5 D режиме; б — частичный разрез объемного представления идентификационной модели компьютерного планирования в 3,5 D режиме

Также в настоящее время используют персонализированные — обобщенные воксельные модели, на основании которых определяют риск вмешательства. Их построение основано на использовании специализированных медицинских атласов [9–11], но они обладают главным недостатком — обобщенное воксельное представление не учитывает индивидуальные особенности строения головного мозга. В качестве примера на рис. 2 приведена обобщенная модель рисков вмешательства.

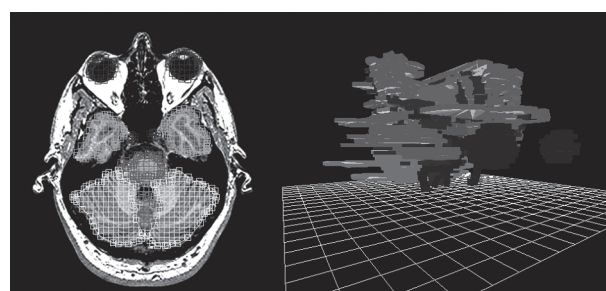


Рис. 2. Иллюстрация обобщенной модели рисков вмешательства

4. Результаты исследований

Первым этапом компьютерного планирования является приближенный выбор области нахождения трепанационного отверстия, которая для операций на структурах таламуса, в общем случае, задается в виде верхней полусферы в сферической системе координат (см. рис. 3) с центром в точке мишени М азимутальным α и полярным β углами ($\alpha, \beta \in [-90^\circ; 90^\circ]$) и шагом их изменения в 1° . Это

соответствует числу анализируемых траекторий, равному 32400.

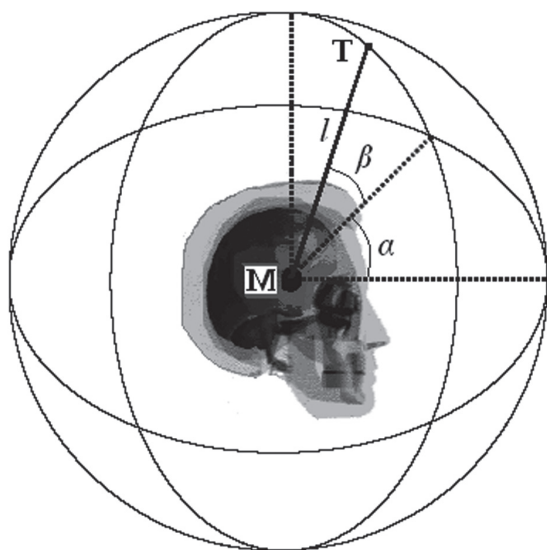


Рис. 3. Построение сферической системы координат при компьютерном планировании траектории хирургического доступа

Первой (внутренней, дистальной) точкой траектории является центр стереотаксической мишени $M(x_M, y_M, z_M)$. Координаты второй (внешней, интактной) точки траектории $T(x_T, y_T, z_T)$ определяются соответственно как

$$\begin{cases} x_T = l \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha; \\ y_T = l \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha; \\ z_T = l \cdot \cos \beta, \end{cases} \quad (1)$$

где l — длина траектории (см. рис. 3).

Для этого необходимо итеративно изменять азимутальный α и полярный β углы с учетом вышеотмеченного диапазона.

Также задаются начальная длина траектории l , (как правило, не превышает 100 мм), пределы и шаг изменения азимутального α и полярного β углов, которыми определяется общее количество I анализируемых траекторий, а также количество N интервалов разбиения траектории. Соответственно длина интервала разбиения траектории определяется как

$$\Delta l = \frac{l}{N}. \quad (2)$$

Координаты конечной (интактной) точки $T(x_T, y_T, z_T)$ для каждой траектории модифицируются с изменением азимутального и полярного углов согласно формуле (1).

Текущие координаты точек каждой траектории, представляемой параметрически, определяются соответственно

$$\begin{cases} x(n) = x_M + (x_T - x_M)n \cdot \Delta t; \\ y(n) = y_M + (y_T - y_M)n \cdot \Delta t; \\ z(n) = z_M + (z_T - z_M)n \cdot \Delta t, \end{cases} \quad (3)$$

где $\Delta t = \frac{1}{N}$, $n = 0; 1 \dots N-1$ — счетчик интервалов траектории, причем значению $n=0$ соответствуют координаты точки-мишени $M(x_M, y_M, z_M)$.

В процессе анализа интервалов вдоль каждой траектории выполняется определение функции инвазивности каждой m -й траектории согласно формуле

$$F(m) = \sum_{n=1}^N N^{ID_{S_{\Sigma}}(x(n), y(n), z(n))}, \quad (4)$$

где координаты соответствующих траектории коэффициентов инвазивности определяются по формуле (3).

Логарифмический коэффициент максимальной инвазивности m -й траектории определяется как

$$K_T(m) = [\log_N (F(m) - 1)]. \quad (5)$$

Введение показательной функции инвазивности траектории и, соответственно, логарифмического коэффициента максимальной инвазивности траектории позволяет избежать ошибок, связанных с влиянием длины траектории хирургического доступа, и только учитывать предельную степень риска при повреждении пересекаемых траекторией анатомических структур.

Оптимальной по критерию малой травматичности (инвазивности) будет траектория (F_T) из I анализируемых, обладающая минимальным значением функции инвазивности

$$F_T = \min(F(m)), \quad (6)$$

где $m = 0, 1, \dots, I-1$.

Результатом процедуры компьютерного планирования является траектория, определяющая наименее инвазивный путь нейрохирургического вмешательства.

Визуализация траектории может осуществляться как по трехмерным реконструированным данным головы пациента, так и непосредственно по данным компьютерной томографии.

Выводы

В работе рассмотрен этап компьютерного планирования стереотаксических вмешательств, позволяющий определить степень травматичности хирургического доступа к глубинным структурам головного мозга.

Исходя из анализа функционально-анатомической структуры головного мозга предложена девятиуровневая шкала степеней инвазивности (опасности повреждения) каждой структуры. Разработан алгоритм определения степени инвазивности траектории хирургического доступа по данным воксельной модели.

Дальнейшее совершенствование предложенного метода направлено на оптимизацию реализаций разрабатываемых алгоритмов с использованием

существующих современных технологий параллельных вычислений, что позволит существенно ускорить процесс определения степени инвазивности траектории нейрохирургического доступа на относительно недорогом вычислительном оборудовании.

Кроме того, последующая работа по совершенствованию выбора оптимальной траектории будет нацелена на введение в функцию выбора траектории параметра, который учитывал бы набор традиционных нейрохирургических доступов. В случае равенства инвазивности хирургических доступов приоритетным должен быть выбран стандартный хирургический доступ. Это объясняется типичностью такого доступа для нейрохирурга, а следовательно становится меньшей опасностью такого хирургического вмешательства, нежели с использованием нестандартного доступа. Поэтому необходимо разработать базу стандартных хирургических доступов.

Использование такого подхода наглядно показывает инвазивность конкретного хирургического доступа, что может быть использовано для обучения молодых нейрохирургов. Поэтому внедрение симуляторов-тренажеров, одним из компонентов которых является блок определения инвазивности хирургического доступа, позволит повысить качество обучения студентов-медиков.

Перспективой работы является тестирование работы на виртуальных и материальных фантомах и предварительная клиническая апробация разработанных программных средств для их внедрения в медицинскую практику в качестве одной из компонентов системы планирования нейрохирургических вмешательств.

Список литературы: 1. Аврунин О.Г. Принципы компьютерного планирования функциональных оперативных вмешательств / О. Г. Аврунин // Технічна електродинаміка, тем. випуск «Силові електроніка та енергоефективність». — Ч. 2. — 2011. — С. 293-298. 2. Patil A. A. A modified stereotactic frame as an instrument holder for frameless stereotaxis: Technical note / A. A. Patil // Surgical Neurology International. — 2010. — Vol. 1 — P. 62-66. 3. Сипитый В. И. Опыт проведения стереотаксических расчетов с использованием интраоперационной компьютерной томографии / В. И. Сипитый, В. А. Пятикоп, И. А. Кутовой, О. Г. Аврунин // Український нейрохірургічний журнал. — 2006. — № 3. — С. 58-62. 4. Богданова Ю. В. Проблемы разработки стереотаксических систем наведения хирур-

гического инструмента на примере биопсии головного мозга / Ю. В. Богданова, А. М. Гуськов, И. В. Жидких, О. С. Нарайкин, В. А. Шурхай // Наука и образование. — 2012. — № 12. — С. 15-28. 5. Falatehan K. Advanced Path Planning for a Neurosurgical Flexible Catheter. Improving the performance of sampling-based motion planning / K. Falatehan. — Delft, 2012. — 79 p. 6. Beriault S. Multi-modal MRI analysis for automatic trajectory planning of deep brain stimulation neurosurgery / S. Beriault, F. A. Subaie, K. Mok, A. F. Sadikot, G. B. Pike // Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med. — 2011. — Vol. 19. — P. 2577. 7. Beriault S. Automatic Trajectory Planning of DBS Neurosurgery from Multi-modal MRI Datasets / S. Beriault, F. A. Subaie, K. Mok, A. F. Sadikot, G. B. Pike // MICCAI — 2011. — Part 1. — P 259-266. 8. Essert C. Automatic Computation of Electrodes Trajectories for Deep Brain Stimulation / C. Essert, C. Haegelen, F. Lallys, A. Abadie, P. Jannin // IJCARS — 2007. — Vol. 1. — P 483-490. 9. Damasio H. Human Brain Anatomy in Computerized Images. Second edition / H. Damasio. — New York, 2005. — 558 p. 10. Mai J. K. Atlas of the Human Brain. Third edition / J. K. Mai, G. Paxinos, T. Voss. — New York, 2008. — 271 p. 11. Morel A. Stereotactic Atlas of the Human Thalamus and Basal Ganglia / A. Morel. — New York, 2007. — 160 p.

Поступила в редколлегию 16.05.2013

УДК 615.47

Визначення ступеня інвазивності хірургічного доступу при комп'ютерному плануванні оперативних втручань / О.Г. Аврунін, М.Ю. Тимкович, Х.І. Фарук // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2013. — № 2 (81). — С. 101-104.

У статті запропонована дев'ятирівнева шкала інвазивності анатомо-функціональних структур головного мозку людини. Запропоновано і описано алгоритм розрахунку найменш інвазивної траєкторії. Застосування розробленого алгоритму в нейрохірургічних системах планування втручань сприятиме зменшенню ризику хірургічного втручання і, як наслідок, зменшенню смертності.

Л. 3. Бібліогр.: 11 найм.

UDC 615.47

Determining the degree of invasiveness of surgical access for planning surgery / O.G. Avrunin, M.Y. Tymkovych, H.I. Farouk // Bionics of Intelligence: Sci. Mag. — 2013. — № 2 (81). — P. 101-104.

In the article proposed the invasivity levels of anatomical and functional structures of the human brain. Proposed and described algorithm for calculating the least invasive path. Application of the algorithm in neurosurgical systems of planning interventions will reduce the risk of surgery and consequently reduce mortality.

Fig. 3. Ref.: 11 items.