

УДК 615.47

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.02

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ КРОВЕНОСНОЙ СИСТЕМЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА ДЛЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ И ТРЕНИРОВКИ ПРОВЕДЕНИЯ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ

О. Г. АВРУНИН, М. Ю. ТЫМКОВИЧ*, А. И. БЫХ

Кафедра биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА
*email: maxim_tymkovich@ukr.net

АННОТАЦИЯ Работа посвящена построению трехмерной модели кровеносной системы головного мозга человека, применительно к задачам планирования и тренировки проведения нейрохирургических вмешательств. Предложены основные этапы обеспечивающие построение трехмерной модели на основании параметрических данных, а также её математического описания. Показана возможность использования разработанного подхода для обеспечения обучения проведения нейрохирургического виртуального вмешательства, а в последующем, с использованием быстрого 3d прототипирования, и реального.

Ключевые слова: кровеносная система, моделирование, мозг, операция, нейрохирургия, планирование

CONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL MODEL OF CIRCULATORY SYSTEM OF THE BRAIN FOR PLANNING AND TRAINING OF NEUROSURGICAL INTERVENTIONS

O. AVRUNIN*, M. TYMKOVYCH*, A. BYKH

Department of biomedical engineering, Kharkiv national university of radio electronics, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Currently, functional surgery on the human brain are closely linked to the planning stage. One of the most dangerous during surgery, are excision of a brain blood vessels, this can be fatal. Therefore, the main objective of this work was to develop a method for constructing a three-dimensional model of the brain circulatory system for planning tasks and training tasks for neurosurgery. The study examined the anatomical structure of the vascular system of the brain, from the point of view of the possibility of its three-dimensional parametric reconstruction; formed principles describe a model using the graph, as well as a three-dimensional mathematical formalism; defined stages of building such a model. The developed method for constructing a three-dimensional model of the brain circulatory system is an important component in providing training neurosurgeons. Construction of three-dimensional model of the vascular system of the brain is carried by the following steps: initialization parameters, build a skeleton, detalization of the skeleton; construction of the volume of model and rasterization. This approach, in addition the possibility of simulating different structural variations of the circulatory system does not require real tomographic data, and thus meets the requirements of medical ethics. The next step is to obtain the data for the full three-dimensional model of the bloodstream. For a more accurate reproduction of the models, we should use the data of digital subtraction angiography, together with methods of machine learning. In the future, this approach, together with the pre-planning, as well as three-dimensional printing technology should provide substantive training of the surgery.

Keywords: circulatory system, modeling, brain, intervention, neurosurgery, planning,

Введение

В настоящее время, проведение функциональных хирургических вмешательств на головном мозге человека основано на этапе компьютерного планирования [1-3]. Это в первую очередь объясняется сложностью непосредственного хирургического доступа применительно к функциональным структурам, в особенности к глубинным структурам мозга, к примеру, передние ядра таламуса, хвостатые ядра, вентрально-латеральные ядра таламуса, педунклопонтинное ядро и т.п. [4-7].

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Проблеме разработки методов и средств планирования нейрохирургических вмешательств посвящено огромное количество работ, например [8-12]. Так, необходимость использования программных методов, при выборе траектории хирургического вмешательства, показана в исследовании [8], кроме того, произведена оценка рисков хирургического вмешательства, выбранного вручную (нейрохирургом), а также автоматически.

Результативность использования методов компьютерного планирования при стимуляции глубинных структур головного мозга показано в работе [9] на примере 166 пациентов.

Использованию данных цифровой вычитательной ангиографии при хирургическом планировании оперативного вмешательства посвящено исследование [10], в нем доказана эффективность метода путем анализа 191 случая.

В работе [11] разработан оригинальный подход к поиску нелинейной траектории хирургического доступа с учетом положения кровеносных сосудов. Для сокращения времени расчета алгоритм был распараллелен и исполнен на кластере Beowulf.

Также, в исследовании [12] рассматривается оригинальный метод выбора риска хирургического вмешательства и его оптимизация.

В то же время, другим направлением исследователей, является использование технологий 3d печати для натурального планирования нейрохирургического вмешательства, и тренировки [13-16].

Так показана эффективность использования 3d прототипирования сложных объектов для задач нейрохирургии, а именно построение моделей обеспечивающих симуляцию проведения реального оперативного вмешательства [13].

Построение моделей осуществлялось по данным КТ и МРТ, а проведение тренинга, в исследовании, осуществлялось с использованием Medtronic S7 и BrainLAB Kolibri [14].

Как видно из рассмотренных источников, важным элементом проведения хирургического вмешательства является этап планирования. Одновременно, следует принять во внимание, что наиболее опасным, при проведении хирургического вмешательства, является иссечение кровеносных сосудов головного мозга [17-18], что может привести к летальному исходу.

Цель и задачи исследования

Поэтому основной целью данной работы являлось разработать метод построения трехмерной модели кровеносной системы головного мозга для задач планирования и тренировки проведения нейрохирургических вмешательств.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть анатомическое строение сосудистой системы головного мозга человека;
- сформировать математическое описание структуры головного мозга с использованием подходящего математического аппарата;
- определить основные этапы построения трехмерной модели кровеносной системы головного мозга;
- изучить возможности использования разработанного подхода для обучения нейрохирургов.

Анализ структуры кровеносной системы головного мозга

Наибольший интерес представляет артериальная система. Как известно, компонентный состав артериальной системы головного мозга состоит из следующих кровеносных сосудов табл. 1 [19-20].

Таблица 1 – Артерии головного мозга

№	Артерия	№	Артерия
1	Аорта	11	Поверхностно-височная артерия
2	Плечеголовной ствол	12	Внутренняя сонная артерия
3	Подключичная артерия	13	Позвоночная артерия
4	Общая сонная артерия	14	Базиллярная артерия
5	Наружная сонная артерия	15	Задняя мозговая артерия
6	Верхняя щитовидная артерия	16	Глазная артерия
7	Язычная артерия	17	Задняя соединяющая артерия
8	Лицевая артерия	18	Средняя мозговая артерия
9	Затылочная артерия	19	Передняя мозговая артерия
10	Верхнечелюстная артерия		

В табл. 1 большинство артерий являются парными, некоторые только питают другие артерии, а ткани головы непосредственно не питают.

Исходя из соединения кровеносных сосудов, был сформирован граф (рис. 1). Наибольший интерес, при симуляции нейрохирургического вмешательства представляет верхняя центральная часть графа, содержащая Виллизиев круг. В свою очередь, данный граф не является достаточно детализированным представлением кровеносной системы, так как в нем не представлены сегменты данных кровеносных сосудов.

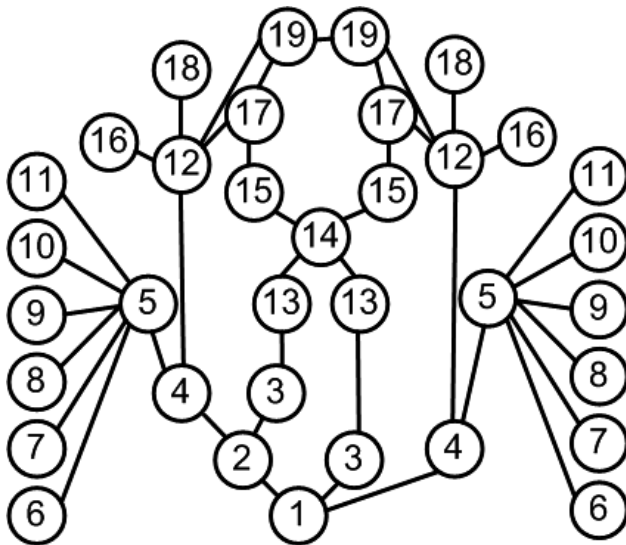


Рис. 1 – Граф соединения кровеносных сосудов

Построение трехмерной модели сосудистой системы головного мозга

Построение трехмерной модели сосудистой системы головного мозга осуществляется следующим образом (рис. 2).

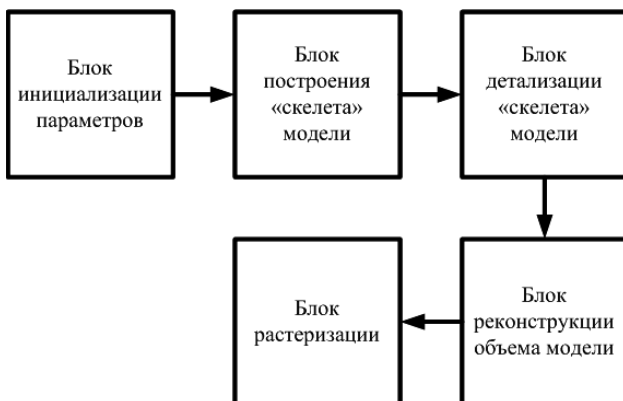


Рис. 2 – Схема построения трехмерной модели сосудистой системы головного мозга

На первом этапе, осуществляется инициализация исходных параметров. Исходными параметрами являются типичные значения диаметров кровеносных сосудов, длины сегментов, ориентация и т.п. Выбор осуществляется случайным образом на основе нормального распределения (1):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где μ – среднее значение параметра;
 σ – дисперсия параметра.

Исходя из графа (рис. 1) производится построение «скелета» модели (рис. 3). В качестве базовой структуры удобно использовать базиллярную

артерию. Таким образом, расчет точек скелета (p) осуществляется путем расчета всех сегментов артерии по длине (l) и ориентации (θ, φ):

$$\begin{cases} p_{i+1}^x = p_i^x + l \cdot \sin \varphi \cos \theta; \\ p_{i+1}^y = p_i^y + l \cdot \sin \varphi \sin \theta; \\ p_{i+1}^z = p_i^z + l \cdot \cos \theta, \end{cases} \quad (2)$$

В свою очередь, параметры l, θ, φ выбираются исходя из (1).

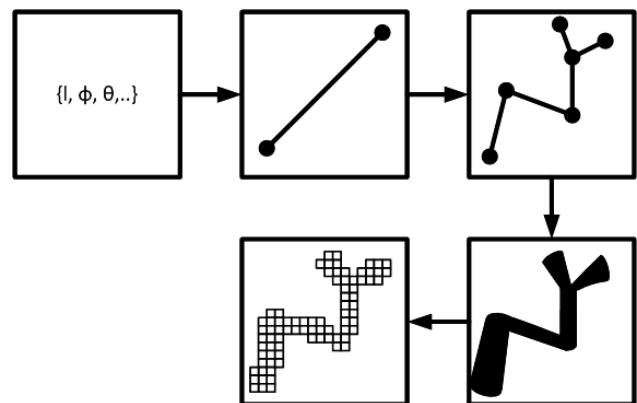


Рис. 3 – Результаты на разных этапах построения трехмерной модели

Детализация осуществляется путем использования рекурсивной функции, с глубиной исполнения D . Параметр глубины исполнения является специфичным для конкретной артерии. Сама функция работает следующим образом (рис. 4), в плоскости перпендикулярной двум исходным точкам (p_1, p_2) строится точка на расстоянии r_{12} , которое выбирается случайно (1). Положение самой плоскости также случайно относительно середины отрезка $p_2 p_1$. Далее происходит рекурсия с точками (p_1, p_{12} и p_{12}, p_2).

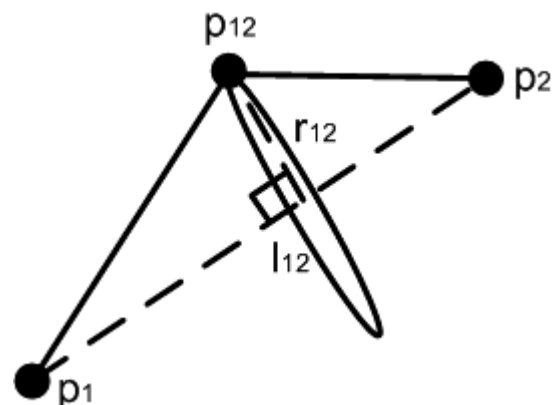


Рис. 4 – Иллюстрация рекурсивной процедуры разбиения

К каждому сегменту сосуда присваивается определенное значение диаметра (d), путем случайного выбора из типичных для сосуда диаметров (1). Вдоль сегмента сосуда, строится объем путем аппроксимации сегмента сосуда цилиндром (3):

$$V = \pi \int_0^l \frac{d^2}{4} dx. \quad (2)$$

На заключительном этапе, осуществляется rasterization пространственной модели в набор вокселей, благодаря чему полученные данные можно использовать в качестве исходного объема для тренировки нейрохирургов.

Обсуждение результатов

В результате, с участием используемого метода построен участок сосуда с малой рекурсией (рис. 5 а) и большей (рис. 5 б).

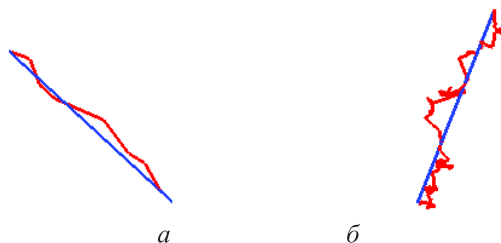


Рис. 5 – Иллюстрация построения «скелета» с использованием процедуры рекурсивного разбиения

Как видно из рис.5, используемые параметры ориентации, а также мест разбиения являются не подходящими, ввиду разного количества пересечения исходного сегмента поддающегося разбиению. Поэтому для более точного воспроизведения моделей, следует использовать данные цифровой вычитательной ангиографии, совместно с методами машинного обучения.

В то же время, используемый подход позволяет использовать данный скелет при тестировании как системы планирования нейрохирургических вмешательств.

В последующем, следует осуществить реконструкцию не одного участка сосуда, а всего графа кровеносного русла головного мозга.

Выводы

В ходе исследования рассмотрено анатомическое строение сосудистой системы головного мозга, с точки зрения возможности её трехмерной параметрической реконструкции; сформированы принципы описания такой модели с использованием графа, а также трехмерного математического аппарата; определены этапы построения такой модели.

Разработанный метод построения трехмерной модели кровеносной системы головного мозга является важной составляющей при обеспечении тренинга нейрохирургов. Этот подход, кроме возможности симулирования различных отклонений строения кровеносной системы, не требует реальных томографических данных, а, следовательно, полностью соответствует требованиям медицинской этики.

Следующим шагом является получение данных для построения полной трехмерной модели кровеносного русла.

В будущем, данный подход, вместе с предоперационным планированием, а также технологиями трехмерной печати должен обеспечить виртуальное обучение проведения хирургического вмешательства.

Список литературы

- 1 **Hou, B. L.** Quantitative comparisons on hand motor functional areas determined by resting state and task BOLD fMRI and anatomical MRI for pre-surgical planning of patients with brain tumors / **B. L. Hou, S. Bhatia, J. S. Carpenter** // *NeuroImage: Clinical.* – 2016. – № 11. – P. 378-387. – doi: 10.1016/j.nicl.2016.03.003.
- 2 **Тымкович, М. Ю.** Способ реконструкции интактной поверхности хирургических доступов / **М. Ю. Тымкович, О. Г. Аврунин, Х. И. Фарук** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2014. – В. 4. – №9 (70). – С. 37-41.
- 3 **Kettenbach, J.** Computer-based imaging and interventional MRI applications for neurosurgery / **J. Kettenbach, T. Wong, D. Kacher, N. Hata, R. B. Schwartz, P. Black, R. Kikinis, F. A. Jolesz** // *Computerized Medical Imaging and Graphics.* – 1999. – № 23. – P. 245-258.
- 4 **Martinez-Ramirez, D.** Update on deep brain stimulation in Parkinson's disease / **D. Martinez-Ramirez, W. Hu, A. R. Bona, M. S. Okun, A. W. Shukla** // *Translational Neurodegeneration.* – 2015. – P. 4-12. – doi: 10.1186/s40035-015-0034-0.
- 5 **Gee, L. E.** Subthalamic deep brain stimulation alters neuronal firing in canonical pain nuclei in a 6-hydroxydopamine lesioned rat model of Parkinson's disease / **L. E. Gee, I. Walling, A. Ramirez-Zamora, D. S. Shin, J. G. Pilitsis** // *Experimental Neurology.* – V. 283. – 2016. – P. 298-307. – doi: 10.1016/j.expneurol.2016.06.031.
- 6 **Qiu, M. H.** Deep brain stimulation in the globus pallidus externa promotes sleep / **M. H. Qiu, M. C. Chen, J. Wu, D. Nelson, J. Lu** // *Neuroscience.* – V. 322. – 2016. – P. 115-120. – doi: 10.1016/j.neuroscience.2016.02.032.
- 7 **Ramirez-Zamora, A.** Hyperhidrosis associated with subthalamic deep brain stimulation in Parkinson's disease: Insights into central autonomic functional anatomy / **A. Ramirez-Zamora, H. Smith, Y. Youn, J. Durphy, D. S. Shin, J. G. Pilitsis** // *Journal of the Neurosurgical Sciences.* – V. 366. – 2016. – P. 59-64. – doi: 10.1016/j.jns.2016.04.045.
- 8 **Trope, M.** The role of automatic computer-aided surgical trajectory planning in improving the expected safety of stereotactic neurosurgery / **M. Trope, R. R. Shamir, L. Joskowicz, Z. Medress, G. Rosenthal, A. Mayer, N. Levin, A. Bick, Y. Shoshan** // *Int J CARS.* – 2014. – P. 1127-1140. – doi: 10.1007/s11548-014-1126-5.

- 9 **Nowell, M.** Comparison of computer-assisted and manual planning for depth electrode implantations in epilepsy / **M. Nowell, R. Sparks, G. Zombori, A. Miserocchi, R. Rodionov, B. Diehl, T. Wehner, G. Baio, G. Trevisi, M. Tisdall, S. Ourselin, A. W. McEvoy, J. Duncan** // *J Neurosurg.* – 2015. – 124(6). – P. 1-9. – doi: 10.3171/2015.6.JNS15487.
- 10 **Cardinale, F.** Cerebral Angiography for Multimodal Surgical Planning in Epilepsy Surgery: Description of a New Three-Dimensional Technique and Literature Review / **F. Cardinale, G. Pero, L. Quilici, M. Piano, P. Colombo, A. Moscato, L. Castana, G. Casaceli, D. Fushillo, L. Gennari, M. Cenzato, G. L. Russo, M. Cossu** // *World Neurosurgery.* – 2015. – 84(2). – P. 1-10. – doi: 10.1016/j.wneu.2015.03.028.
- 11 **Fujii, T.** Neuropath planner-automatic path searching for neurosurgery / **T. Fujii, H. Emoto, N. Sugou, T. Mito, I. Shibata** // *International Congress Series.* – 2003. – V. 1256. – P. 587-596. – doi: 10.1016/S0531-5131(03)00363-7.
- 12 **Zelmann, R.** Improving recorded volume in mesial temporal lobe by optimizing stereotactic intracranial electrode implantation planning / **R. Zelmann, S. Beriault, M. M. Marinho, K. Mok, J. A. Hall, N. Guizard, C. Haegelen, A. Olivier, G. B. Pike, D. L. Collins** // *Int J CARS.* – 2015. – 10(10). – 1599-615. – doi: 10.1007/s11548-015-1165-6.
- 13 **Tomasello, F.** 3D printing in Neurosurgery / **F. Tomasello, A. Conti, D. L. Torre** // *World Neurosurgery.* – 2016. – 91. – P. 633-634. – doi: 10.1016/j.wneu.2016.04.034.
- 14 **Waran, V.** Injecting Realism in Surgical Training – Initial Simulation Experience With Custom 3D Models / **V. Waran, V. Narayanan, R. Karuppiah, D. Pancharatnam, H. Chandran, R. Raman, Z. Ariff, A. Rahman, S. L. F. Owen, T. Z. Aziz** // *Journal of Surgical Education.* – 2013. – 71(2). – P. 193-197. – doi:10.1016/j.jsurg.2013.08.010.
- 15 **Lan, Q.** Development of 3D Printed Craniocerebral Models for Simulated Neurosurgery / **Q. Lan, A. Chen, T. Zhang, G. Li, Q. Zhu, X. Fan, C. Ma, T. Xu** // *World Neurosurgery.* – 2016. – 91. – P. 434-442. – doi:10.1016/j.wneu.2016.04.069.
- 16 **Malik, H. H.** Three-Dimensional Printing In Surgery: A Review Of Current Surgical Applications / **H. H. Malik, A. R. J. Darwood, S. Shaunak, P. Kulatilake, A. A. El-Hilly, O. Mulki, A. Baskaradas** // *Journal of Surgical Research.* – 2015. – 199(2). – 512-522. – doi:10.1016/j.jss.2015.06.051.
- 17 **Аврунин, О. Г.** Определение степени инвазивности хирургического доступа при компьютерном планировании оперативных вмешательств / **О. Г. Аврунин, М. Ю. Тымкович, Х. И. Фарук** // *Бионика интеллекта.* – 2013. – Вып. 2 (81). – С. 101-104.
- 18 **Аврунин, О. Г.** Оптимизация нейрохирургических доступов с использованием цифрового атласа внутримозговых структур / **О. Г. Аврунин, М. Ю. Тымкович** // *Вестник НТУ "ХПИ" Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 39 (1148). – С. 63-67.
- 19 **Gutierrez, J.** A quantitative perspective to the study of brain arterial remodeling of donors with and without HIV in the Brain Arterial Remodeling Study (BARS) / **J. Gutierrez, G. Rosoklija, J. Murray, C. Chon, M. S. V. Elkind, J. Goldman, L. S. Honig, A. J. Dwork, S. Morgello, R. S. Marshall** // *Frontiers in physiology.* – 2014. – V. 5. – P. 1-11. – doi:10.3389/fphys.2014.00056.
- 20 **Srinivasan, V. M.** Application of 4D-DSA for Dural Arteriovenous Fistulas / **V. M. Srinivasan, G. Chintalapani, E. A. M. Duckworth, P. Kan** // *World Neurosurgery.* – 2016. – doi:10.1016/j.wneu.2016.05.021.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Hou, B. L., Bhatia, S., Carpenter, J. S.** Quantitative comparisons on hand motor functional areas determined by resting state and task BOLD fMRI and anatomical MRI for pre-surgical planning of patients with brain tumors. *NeuroImage: Clinical*, 2016, **11**, 378-387, doi: 10.1016/j.nicl.2016.03.003.
- 2 **Тымкович, М. Ю., Аврунин, О. Г., Фарук, Х. И.** Reconstruction method of the intact surface of surgical accesses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, **9(70)**, 37-41.
- 3 **Kettenbach, J., Wong, T., Kacher, D., Hata, N., Schwartz, R. B., Black, P., Kikinis, R., Jolesz, F. A.** Computer-based imaging and interventional MRI applications for neurosurgery. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 1999, **23**, 245-258.
- 4 **Martinez-Ramirez, D., Hu, W., Bona, A. R., Okun, M. S., Shukla, A. W.** Update on deep brain stimulation in Parkinson's disease. *Translational Neurodegeneration*, 2015, **4**-12, doi: 10.1186/s40035-015-0034-0.
- 5 **Gee, L. E., Walling, I., Ramirez-Zamora, A., Shin, D. S., Pilitsis, J. G.** Subthalamic deep brain stimulation alters neuronal firing in canonical pain nuclei in a 6-hydroxydopamine lesioned rat model of Parkinson's disease. *Experimental Neurology*, 2016, **283**, 298-307, doi: 10.1016/j.expneurol.2016.06.031.
- 6 **Qiu, M. H., Chen, M. C., Wu, J., Nelson, D., Lu, J.** Deep brain stimulation in the globus pallidus externa promotes sleep. *Neuroscience*, 2016, **322**, 115-120, doi: 10.1016/j.neuroscience.2016.02.032.
- 7 **Ramirez-Zamora, A., Smith, H., Youn, Y., Durphy, J., Shin, D. S., Pilitsis, J. G.** Hyperhidrosis associated with subthalamic deep brain stimulation in Parkinson's disease: Insights into central autonomic functional anatomy. *Journal of the Neurosurgical Sciences*, **366**, 59-64, doi: 10.1016/j.jns.2016.04.045.
- 8 **Trope, M., Shamir, R. R., Joscowicz, L., Medress, Z., Rosenthal, G., Mayer, A., Levin, N., Bick, A., Shoshan, Y.** The role of automatic computer-aided surgical trajectory planning in improving the expected safety of stereotactic neurosurgery. *Int J CARS*, 1127-1140, doi: 10.1007/s11548-014-1126-5.
- 9 **Nowell, M., Sparks, R., Zombori, G., Miserocchi, A., Rodionov, R., Diehl, B., Wehner, T., Baio, G., Trevisi, G., Tisdall, M., Ourselin, S., McEvoy, A. W., Duncan, J.** Comparison of computer-assisted and manual planning for depth electrode implantations in epilepsy. *J Neurosurg*, 2015, **124(6)**, 1-9, doi: 10.3171/2015.6.JNS15487.
- 10 **Cardinale, F., Pero, G., Quilici, L., Piano, M., Colombo, P., Moscato, A., Castana, L., Casaceli, G., Fushillo, D., Gennari, A., Cenzato, M., Russo, G. L., Cossu, M.** Cerebral Angiography for Multimodal Surgical Planning in Epilepsy Surgery: Description of a New Three-Dimensional Technique and Literature Review. *World Neurosurgery*, 2015, **84(2)**, 1-10, doi: 10.1016/j.wneu.2015.03.028.
- 11 **Fujii, T., Emoto, H., Sugou, N., Mito, T., Shibata, I.** Neuropath planner-automatic path searching for neurosurgery. *International Congress Series*, 2003, **1256**, 587-596, doi: 10.1016/S0531-5131(03)00363-7.

- 12 **Zelmann, R., Berialt, S., Marinho, M. M., Mok, K., Hall, J. A., Guizard, N., Haegelen, C., Olivier, A., Pike, G. B., Collins, D. L.** Improving recorded volume in mesial temporal lobe by optimizing stereotactic intracranial electrode implantation planning. *Int J CARS*, 2015, **10**(10), 1599-615, doi: 10.1007/s11548-015-1165-6..
- 13 **Tomasello, F., Conti, A., Torre, D. L.** 3D printing in Neurosurgery. *World Neurosurgery*, 2016, **91**, 633-634, doi: 10.1016/j.wneu.2016.04.034.
- 14 **Waran, V., Narayanan, V., Karuppiah, R., Pancharatnam, D., Chandran, H., Raman, R., Ariff, Z., Rahman, A., Owen, S. L. F., Aziz, T. Z.** Injecting Realism in Surgical Training – Initial Simulation Experience With Custom 3D Models. *Journal of Surgical Education*, 2013, **71**(2), 193-197, doi:10.1016/j.jsurg.2013.08.010.
- 15 **Lan, Q., Chen, A., Zhang, T., Li, G., Zhu, Q., Fan, X., Ma, C., Xu, T.** Development of 3D Printed Craniocerebral Models for Simulated Neurosurgery. *World Neurosurgery*, 2016, **91**, 434-442, doi:10.1016/j.wneu.2016.04.069.
- 16 **Malik, H. H., Darwood, A. R. J., Shaunak, S., Kulatilake, P., El-Hilly, A. A., Mulki, O., Baskaradas, A.** Three-Dimensional Printing In Surgery: A Review Of Current Surgical Applications. *Journal of Surgical Research*, 2015, **199**(2), 512-522, doi:10.1016/j.jss.2015.06.051.
- 17 **Avrunin, O. G., Tymkovych, M. Y., Farouk, H. I.** Determining the degree of invasiveness of surgical access for planning surgery. *Bionics of Intelligence*, 2013, **2**(81), 101-104.
- 18 **Avrunin, O. G., Tymkovych, M. Y.** Optimization of Neurosurgical Access Using the Digital Atlas of Intracerebral Structures. *Vesnik NTU "KhPI": New solutions in modern technologies*, 2015, **39**(1148), 63-67.
- 19 **Gutierrez, J., Rosoklija, G., Murray, J., Chon, C., Elkind, M. S. V., Goldman, J., Honig, L. S., Dwork, A. J., Morgello, S., Marshall, R. S.** A quantitative perspective to the study of brain arterial remodeling of donors with and without HIV in the Brain Arterial Remodeling Study (BARS). *Frontiers in physiology*, 2014, **5**, 1-11, doi:10.3389/fphys.2014.00056.
- 20 **Srinivasan, V. M., Chintalapani, G., Duckworth, E. A. M., Kan, P.** Application of 4D-DSA for Dural Arteriovenous Fistulas. *World Neurosurgery*, 2016, doi:10.1016/j.wneu.2016.05.021.

Сведения об авторах (About authors)

Аврунин Олег Григорьевич – д.т.н., проф., кафедра Биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков; e-mail: gavrun@list.ru.

Avrunin Oleg – Doctor of Science (Dr. Sc.), Professor, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: gavrun@list.ru.

Тымкович Максим Юрьевич – асс, кафедра Биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков; e-mail: maxim_tymkovich@ukr.net.

Tymkovych Maksym – Teaching Assistant, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: maxim_tymkovich@ukr.net.

Бых Анатолий Иванович – д.ф.-м.н., проф., зав. каф. кафедра Биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков; e-mail: bykh@kture.kharkov.ua.

Bykh Anatoliy – Doctor of Science (Dr. Sc.), Professor, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: bykh@kture.kharkov.ua.

Пожадуйте ссылаться на эту статью следующим образом:

Аврунин, О. Г. Построение трехмерной модели кровеносной системы головного мозга для задач планирования и тренировки проведения нейрохирургических вмешательств / **О. Г. Аврунин, М. Ю. Тымкович, А. И. Бых** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 11-17. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.02.

Please cite this article as:

Avrunin, O., Tymkovych, M., Bykh, A. Construction of Three-Dimensional Model of Circulatory System of the brain for Planning and Training of Neurosurgical Interventions. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 11-17, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.02.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Аврунін О. Г. Побудова тривимірної моделі кровеносної системи головного мозку для задач планування і тренування проведення нейрохірургічних втручань / **О. Г. Аврунін, М. Ю. Тимкович, А. І. Бых** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 11-17. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.02.

АНОТАЦІЯ Робота присвячена побудові тривимірної моделі кровеносної системи головного мозку людини, для задач планування і тренування проведення нейрохірургічних втручань. Запропоновано основні етапи, що забезпечують побудову тривимірної моделі на основі параметричних даних, а також її математичного опису. Показана можливість використання розробленого підходу для забезпечення навчання проведення нейрохірургічного віртуального втручання, а в майбутньому, з використанням швидкого 3d прототипування, і реального.

Ключові слова: кровеносна система, моделювання, мозок, операція, нейрохірургія, планування.

Поступила (received) 04.07.2016