

Оригинальная статья

## Применение томографических изображений для создания трехмерных индивидуальных реалистичных моделей биологических объектов

Иванов Д.В., Доль А.В.

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» Минобрнауки РФ, Саратов, Россия

### Резюме

*Цель работы* заключается в разработке оригинальной методики создания трехмерных реалистичных индивидуальных геометрических моделей биологических объектов на основе данных компьютерной и магнитно-резонансной томографии.

*Материал и методы* — В качестве исходных данных используются томографические изображения сосудов виллизиевого круга и бедренной кости человека. Изображения обрабатываются в специализированном программном обеспечении — системе автоматизированного проектирования.

*Результаты* — Подробно описана оригинальная методика построения трехмерных реалистичных индивидуальных моделей элементов сердечно-сосудистой системы и опорно-двигательного аппарата человека. Представлены построенные с помощью описанной методики трехмерные модели рассматриваемых объектов.

*Заключение* — Предложенная методика позволяет строить качественные трехмерные модели, не требующие дополнительной обработки и пригодные для использования в конечно-элементных расчетах.

**Ключевые слова:** биомеханика, компьютерное моделирование, 3D модель, бедренная кость, артерия, виллизиев круг

*Библиографическая ссылка:* Иванов Д.В., Доль А.В. Применение томографических изображений для создания трехмерных индивидуальных реалистичных моделей биологических объектов. *Кардио-ИТ* 2015; 2(4): e0402.

Поступила в редакцию 8 декабря 2015. Принята в печать 21 декабря 2015.

© 2015, Иванов Д.В., Доль А.В.

**Ответственный автор:** Иванов Дмитрий Валерьевич. Адрес для переписки: отдел компьютерного моделирования в биомедицине и материаловедении, образовательно-научный институт наноструктур и биосистем, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 83, ул. Астраханская, г. Саратов, 410012, Россия. Тел.: +7 (8452) 210754. E-mail: ivanovdv@gmail.com

Original article

## The use of tomographic images for three-dimensional individual realistic models of biological objects creation

Ivanov D.V., Dol A.V.

Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia

### Abstract

*The purpose* of this work is to develop an original method of creating realistic three-dimensional individual geometric models of biological objects based on computer and magnetic resonance imaging data.

*Material and Methods* — Tomographic images of the circle of Willis vessels and a human femur were used as initial data. Images were processed in specialized computer-aided design software SolidWorks.

*Results* — The original method of constructing realistic individual 3D models of the components of the human cardiovascular and the musculoskeletal system are described in detail. Realistic 3D models of the human femur and Willis circle arteries are presented in the article.

*Conclusion* — The proposed method allows building high-quality 3D models that do not require additional processing and are suitable for use in finite element calculations.

**Keywords:** biomechanics, computer modeling, 3D model, femur, artery, circle of Willis

*Cite as* Ivanov DV, Dol AV. The use of tomographic images for three-dimensional individual realistic models of biological objects creation. *Cardio-IT* 2015; 2(4): e0402.

Received 8 December 2015. Accepted 21 December 2015.

© 2015, Ivanov D.V., Dol A.V.

**Corresponding author:** Dmitriy V. Ivanov. Address: Department of Computer Modelling in Biomedicine and Materials, Educational-Research Institute of Nanostructures and Biosystems, Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky, 83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia. Tel: +7 (8452) 210754. E-mail: ivanovdv@gmail.com

### Введение

Для исследования костей и мягких тканей человека в последние десятилетия все чаще применяются методы компьютерного моделирования и конечно-элементных расчетов.

Кроме того, от простых трехмерных моделей различных органов исследователи все чаще пытаются перейти к более сложным, построенным индивидуально для каждого пациента [1]. Такие индивидуальные модели могут создаваться на основе данных компьютерной томографии (КТ) и магнитно-резонансной

томографии (МРТ) [2-4]. Как правило, полученные в результате модели хорошо повторяют геометрию исследуемых объектов, но совершенно не пригодны для численных расчетов, ввиду их низкого качества и несовместимости форматов данных. В этом случае необходимо использовать дополнительные методы исправления и оптимизации геометрии [5]. В связи с этим необходимо разрабатывать и совершенствовать методики создания высокоточных индивидуальных моделей органов человека, которые в дальнейшем могут использоваться в специализированных программных продуктах для конечно-элементных расчетов.

### Материал и методы

Очевидно, что для создания пациент-ориентированных моделей костей и мягких тканей человека необходимо применять наименее травматичные методы диагностики. В этом случае МРТ и КТ являются наиболее предпочтительными. Именно на основе этих способов диагностики строится предлагаемая в статье методика трехмерного проектирования.

МРТ – один из наименее травматичных способов диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы человека. Во время процедуры пациент не подвергается рентгеновскому излучению. При этом большая часть патологий довольно четко просматриваются на снимках. Таким образом, МРТ является идеальным методом для изучения как любого участка сердечно-сосудистой системы человека, так и других мягких тканей.

КТ является так же, как и МРТ, неинвазивным и не травматичным методом диагностики. Единственным недостатком этого метода для компьютерного моделирования является то, что на снимках, полученных при КТ, достаточно сложно выделить мягкие ткани и жидкости. Однако более жесткая костная ткань на таких томограммах просматривается очень четко, что позволяет использовать их для создания качественных пациент-ориентированных моделей.

Для восстановления геометрии кровеносных сосудов может использоваться программное обеспечение «Mimics» [6], которое применяется для обработки данных КТ и МРТ и последующего их преобразования в 3D-модели [7]. Также с помощью инструментов «Mimics» возможно определение плотностей тканей, которые могут быть использованы в численных расчетах.

Кроме того, существуют бесплатные программные пакеты, такие как «3D Slicer», которые также позволяют обрабатывать томограммы.

Дальнейшая обработка полученных изображений может проводиться в системах автоматизированного проектирования (САПР) типа «SolidWorks». В САПР проводится выделение поперечных сечений создаваемого объекта, которые затем объединяются в твердотельную трехмерную модель. Получающаяся на выходе модель оказывается пригодной для выполнения численных расчетов, может быть легко отредактирована и/или совмещена с имплантатами, протезами и др. К примеру, можно смоделировать стеноз сосуда, аневризму и установить стент.

В данной работе приведены результаты трехмерного моделирования артерий головного мозга человека, а также бедренной кости человека. В качестве исходных данных брались МРТ (виллизиев круг) и КТ (бедро) исследуемых объектов. Для обработки томографических изображений использовались лицензионные программные продукты «Mimics 13.1» и «SolidWorks 2008».

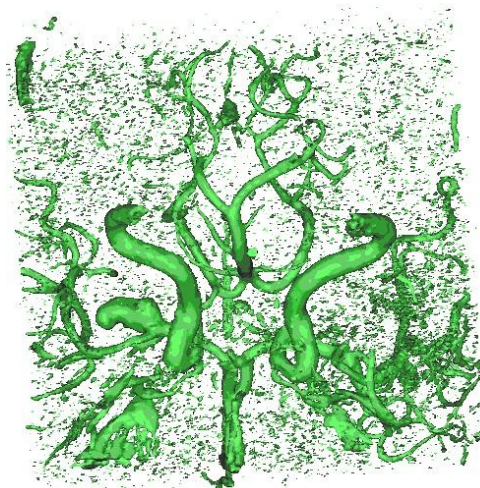


Рисунок 1. Трехмерное изображение сосудов в «Mimics»

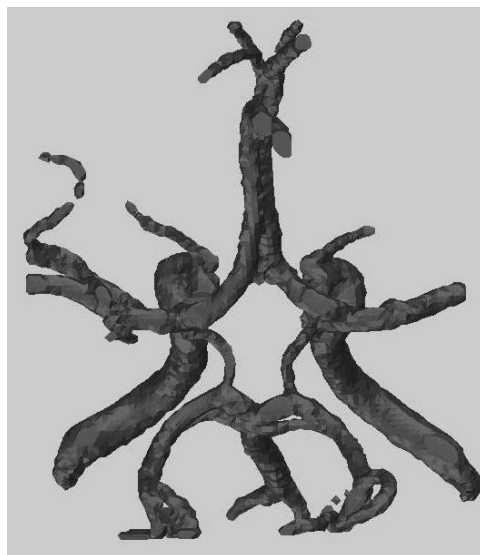


Рисунок 2. Геометрическая модель сосудов, полученная из «Mimics»

### Результаты

#### Создание трехмерной модели сосудов виллизиевого круга

На первом этапе создания 3D-модели кровеносных сосудов в программный продукт «Mimics 13.1» были загружены снимки МРТ в формате DICOM. После этого был выбран диапазон оттенков серого цвета, соответствующий плотности крови, и на основе этих данных была воспроизведена геометрическая модель сосудов виллизиевого круга. На рисунке 1 показано изображение полученной в «Mimics» модели виллизиевого круга человека [8].

В полученном изображении с помощью программных средств «Mimics» были удалены все элементы сосудистого русла, которые не планируется использовать в дальнейших расчетах, а также незначительные элементы, плотность которых близка к плотности крови, что и позволило им попасть в интересующий нас диапазон.

Полученная таким образом модель была сохранена в формате STL (рисунк 2), что позволило ее импортировать в САПР «SolidWorks» для выполнения сглаживания и исправления геометрии сосудов виллизиевого круга.

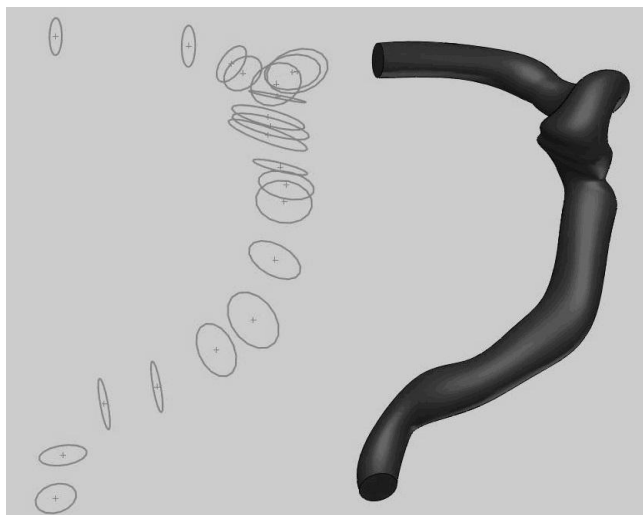


Рисунок 3. Окружности, использовавшиеся для создания модели внутренней сонной артерии (слева), трехмерная модель внутренней сонной артерии (справа)

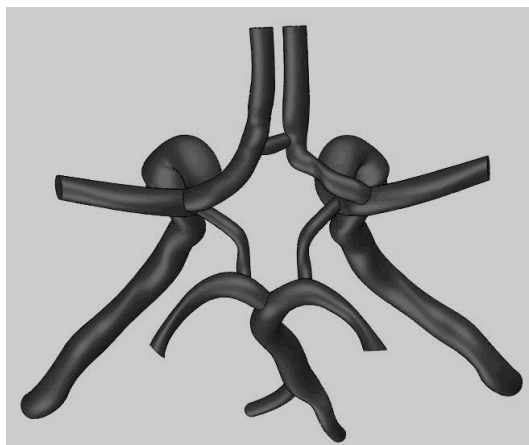


Рисунок 4. Восстановленная модель виллизиевого круга

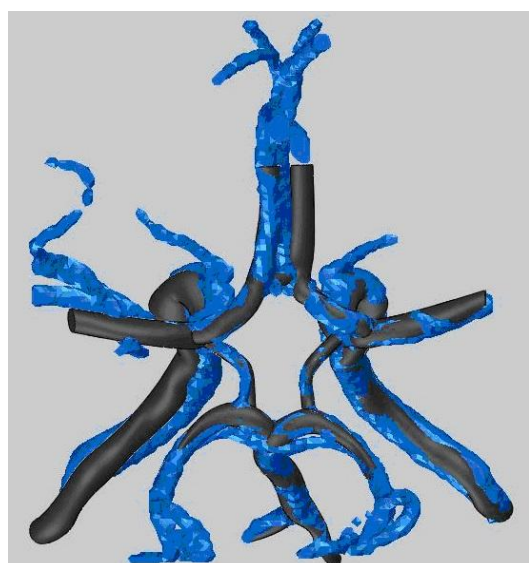


Рисунок 5. Совпадение моделей из «Mimics» и «SolidWorks»

Этот этап обработки полученной из «Mimics» геометрии необходим, так как множественные дефекты, вызванные методикой восстановления 3D-объектов по снимкам в данном программном продукте (аналогичная картина наблюдается и в других подобных программах), не позволили бы впоследствии выполнять конечно-элементные расчеты.

В САПР «SolidWorks» создается набор эскизов, в каждом из которых содержится замкнутая кривая (сплайн или окружность), описывающая поперечное сечение сосуда. Эти кривые получают с помощью обрисовки импортированной из «Mimics» геометрии в каждой построенной плоскости. Пример такого набора сечений для сонной артерии представлен на *рисунке 3*. Количество необходимых сечений и расстояние между плоскостями, в которых происходит обрисовка, выбираются исходя из сложности исходной геометрии.

На *рисунке 3* показаны окружности, на основе которых был построен участок внутренней сонной артерии с помощью инструмента «вытягивание по сечениям».

Таким образом, с помощью создания сечений во всех необходимых плоскостях, была получена полная геометрия интересующего нас участка сосудистого русла. Трехмерная модель сосудов виллизиевого круга показана на *рисунке 4*.

Совпадение построенной модели с изображением, полученным с помощью программы «Mimics», представлено на *рисунке 5*. Из рисунка видно, что на большинстве участков достигнуто максимальное сходство.

Следует отметить, что стенки сосудов в импортированной из «Mimics» геометрии отсутствовали, так как их плотность выше плотности крови, а значит, на томограмме им соответствует другой диапазон серого цвета. В связи с этим стенки сосудов были достроены в пакете «SolidWorks». Толщину стенок на каждом участке сосудистого русла определяли на основе морфологических данных, предоставленных кафедрой анатомии Саратовского ГМУ им. В.И. Разумовского.

#### Создание трехмерной модели бедренной кости

В рамках разработанной методики существует несколько иной подход к обработке данных КТ и МРТ. Как правило, его целесообразно применять при построении трехмерных моделей костной ткани [9], так как в этом случае границы нужной нам области хорошо просматриваются на снимках. В этом случае данные не загружаются в «Mimics» или подобные программные пакеты, а обрабатываются вручную. Поперечные снимки томограммы интересующего объекта открываются встроенным редактором (как правило, такой редактор поставляется вместе с оборудованием и записывается на диск вместе со снимками). Затем срезы сохраняются в виде графических изображений стандартного формата JPEG, PNG и др.

Сохраненные срезы поочередно загружаются в САПР «SolidWorks», где располагаются на параллельных плоскостях, расстояние между которыми соответствует расстоянию между срезами. Каждый из срезов обрабатывается вручную, создаются сечения в виде сплайнов или других замкнутых кривых, которые затем преобразуются в трехмерный объект (*рисунке 6*).

Таким образом, получается сглаженная и реалистичная трехмерная модель кости, которая показана на *рисунке 7* вместе с одним из поперечных срезов КТ. Размеры такой модели соответствуют размерам исходного объекта.





Рисунок 6. Сечения модели бедра

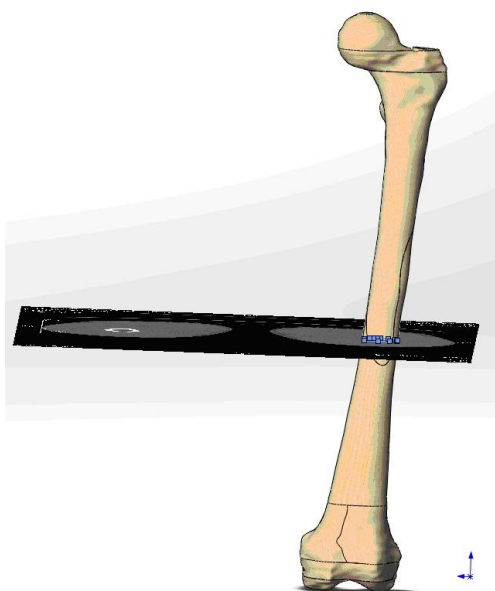


Рисунок 7. Трехмерная модель бедренной кости с одним из поперечных срезов КТ

### Обсуждение

В данной работе представлена универсальная методика создания трехмерных реалистичных моделей биологических объектов. В качестве исходных данных используются изображения КТ или МРТ. В первую очередь, представленная методика применима к построению моделей сосудов человека и длинных костей.

Получающиеся с помощью представленной методики модели имеют гладкие поверхности, число которых является ограниченным. Последний факт позволяет успешно использовать такие модели в численном моделировании. Гладкость поверхностей и их ограниченное число позволяют легко ставить граничные условия, обрабатывать результаты расчетов при математическом моделировании и создавать качественную вычислительную сетку. Более того, такие модели легко редактируются: исследователь может смоделировать патологию и/или совместить модель с имплантатом.

Безусловно, такой подход к созданию геометрических моделей в «ручном» режиме требует существенных временных затрат, однако модели, построенные автоматически [4] (например, в программном пакете «Mimics»), в подавляющем большинстве случаев пригодны лишь для наглядной демонстрации интересующего биологического объекта, а без дополнительных доработок для расчетов в конечно-элементных пакетах не подходят. Это вызвано наличием в них большого количества так называемых «артефактов» – лишних или неверно сгенерированных объемов, а также существенных неровностей на поверхностях, не позволяющих строить конечно-элементную сетку. Автоматически сгенерированные модели покрыты большим числом треугольников, что существенно усложняет и постановку граничных условий, и создание вычислительной. Это также создает сложности для выполнения булевых операций, необходимость в которых часто возникает при работе с конечно-элементными пакетами и системами автоматизированного проектирования.

Следует добавить, что стенки сосудов в импортированной из «Mimics» модели сосудов виллизиевого круга отсутствовали по причине отличия их плотности от плотности крови. Поэтому они были достроены в пакете «SolidWorks» на основе морфологических данных, предоставленных кафедрой анатомии Саратовского ГМУ им. В.И. Разумовского.

### Заключение

Создаваемая с помощью представленной методики геометрия не имеет дефектов и так называемых «артефактов», то есть случайных областей, оказавшихся в модели только потому, что их плотность близка к плотности интересующей биологической ткани. Таким образом, гладкая и точная 3D-модель, построенная по предлагаемой методике, не требует дополнительной обработки, легко разбивается конечно-элементной сеткой и готова для выполнения численных расчетов методом конечных элементов.

**Конфликт интересов:** не заявляется.

### Литература

1. Torii R., Oshima M., Kobayashi T., et al. Fluid-structure interaction modeling of aneurysmal conditions with high and normal blood pressures. *Computational Mechanics* 2006; 38(4): 482-490. (doi 10.1007/s00466-006-0065-6)
2. Fu W., Qiao A. Fluid structure interaction of patient specific internal carotid aneurysms: a comparison with solid stress models. *IFMBE Proceedings* 2010; 31: 422-425. (doi: 10.1007/978-3-642-14515-5\_108)
3. Torii R., Oshima M. An integrated geometric modelling framework for patient-specific computational haemodynamic study on wide-ranged vascular network. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2011; 15(6): 615-625. (doi 10.1080/10255842.2011.554407) (PMID: 21736445)
4. Wang X.H., Li X.Y., Zhang X.J.. A Computational study on biomechanical differences between cerebral aneurysm and normal cerebral artery employing fluid-structure interaction analysis. *IFMBE Proceedings* 2010; 31: 1503-1506. (doi 10.1007/978-3-642-14515-5\_383)
5. Kim C.S., Kiris C., Kwak D., David T. Numerical simulation of local blood flow in the carotid and cerebral arteries under altered gravity. *J Biomech Eng* 2006; 128(2): 194-203. (doi: 10.1115/1.2165691) (PMID: 16524330)
6. Auricchio F., Conti M., De Beule M., et al. Carotid artery stenting simulation from patient-specific images to finite element analysis. *Med*

- Eng Phys* 2011; 33(3): 281-289. (PMID: 21067964) (doi: 10.1016/j.medengphy.2010.10.011)
7. Ivanov D., Dol A., Pavlova O., Aristambekova A. Modeling of human circle of Willis with and without aneurisms. *Acta Bioeng Biomech* 2014; 16(2): 121-129. (doi: 10.5277/abb140214) (PMID: 25088007)
8. Иванов Д.В., Доль А.В., Павлова О.Е., Аристамбекова А.В. Моделирование виллизиевого круга человека в норме и при патологии. *Российский журнал биомеханики* 2013; 17(3): 36-49.
9. Мельцер Р.И., Иванов Д.В., Лозовик И.П. и др. Послеоперационное ведение больных с неопорными переломами костей голени в условиях контролируемой осевой нагрузки. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки* 2013; 8(137): 37-39.

#### References

1. Torii R, Oshima M, Kobayashi T, et al. Fluid-structure interaction modeling of aneurismal conditions with high and normal blood pressures. *Computational Mechanics* 2006; 38(4): 482-490. (doi 10.1007/s00466-006-0065-6)
2. Fu W, Qiao A. Fluid Structure Interaction of patient specific internal carotid aneurysms: a comparison with solid stress models. *IFMBE Proceedings* 2010; 31: 422-425. (doi 10.1007/978-3-642-14515-5\_108)
3. Torii R, Oshima M. An integrated geometric modelling framework for patient-specific computational haemodynamic study on wide-ranged vascular network. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2011; 15(6): 615-625. (doi 10.1080/10255842.2011.554407) (PMID: 21736445)
4. Wang XH, Li XY, Zhang XJ. A Computational study on biomechanical differences between cerebral aneurysm and normal cerebral artery employing fluid-structure interaction analysis. *IFMBE Proceedings* 2010; 31: 1503-1506. (doi 10.1007/978-3-642-14515-5\_383)
5. Kim CS, Kiris C, Kwak D, David T. Numerical simulation of local blood flow in the carotid and cerebral arteries under altered gravity. *J Biomech Eng* 2006; 128(2): 194-203. (doi: 10.1115/1.2165691) (PMID: 16524330)
6. Auricchio F, Conti M, De Beule M, et al. Carotid artery stenting simulation from patient-specific images to finite element analysis. *Med Eng Phys* 2011; 33(3): 281-289. (PMID: 21067964) (doi: 10.1016/j.medengphy.2010.10.011)
7. Ivanov D, Dol A, Pavlova O, Aristambekova A. Modeling of human circle of Willis with and without aneurisms. *Acta Bioeng Biomech* 2014; 16(2): 121-129. (doi: 10.5277/abb140214) (PMID: 25088007).
8. Ivanov DV, Dol AV, Pavlova OE, Aristambekova AV. Modeling of human circle of Willis in norm and with pathologies. *Russian Journal of Biomechanics* 2013; 17(3):36-49. Russian
9. Mel'cer RI, Ivanov DV, Lozovik IP, et al. The postoperative management of patients with musculoskeletal tibia fractures in a controlled axial load. *Science Letters of Petrozavodsk State University. Natural and technical Sciences* 2013; 8(137): 37-39. Russian

#### Информация об авторах:

**Иванов Дмитрий Валерьевич** – кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отдела компьютерного моделирования в биомедицине и материаловедении, образовательно-научный институт наноструктур и биосистем, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» Минобрнауки РФ, г. Саратов, Россия.

**Доль Александр Викторович** – кандидат физико-математических наук, ведущий программист, отдел компьютерного моделирования в биомедицине и материаловедении, образовательно-научный институт наноструктур и биосистем, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» Минобрнауки РФ, г. Саратов, Россия.

#### Authors:

**Dmitriy V. Ivanov** – PhD, Deputy Chief of Department of Computer Modelling in Biomedicine and Materials, Educational-Research Institute of

Nanostructures and Biosystems, Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia.

**Aleksandr V. Dol** – PhD, Leading Programmer, Department of Computer Modelling in Biomedicine and Materials, Educational-Research Institute of Nanostructures and Biosystems, Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia.