

Реверсивный инжиниринг палеоантропологических объектов для визуализации и исследований

М.М. Новиков¹, В.А. Князь², Р.М. Галеев³
novikov@rambler.ru | knyaz@gosniias.ru | ravil.galeev@gmail.com

¹Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», г.Шатура Московской обл., РФ;

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва, РФ;

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт этнологии и антропологии им. Н.Н. Миклухо-Маклая Российской академии наук, Москва, РФ

Возможности компьютерной графики для визуализации сложных структур и процессов позволяют с успехом применять их для решения сложных задач в широком спектре приложений. Использование их потенциала для решения задач палеоантропологических исследований позволяет разрабатывать и применять новые методы для обработки, анализа, визуализации и обмена уникальными данными. Представлены результаты разработки и применения методов точной фотореалистичной 3D реконструкции и обратного инжиниринга для создания цифровых трёхмерных моделей палеоантропологических объектов и их твёрдых копий. Приведено сравнение точности измерения антропологических параметров разработанными методами с результатами стандартных ручных измерений.

Ключевые слова: палеоантропологические материалы, бесконтактные методы измерений, цифровая модель, аддитивные технологии, компьютерная томография, фотограмметрия.

Reverse engineering of paleoanthropological objects for visualization and research

M.M. Novikov¹, V.A. Knyaz², R.M. Galeev³
novikov@rambler.ru | knyaz@gosniias.ru | ravil.galeev@gmail.com

¹Research Center Crystallography and Photonics RAS, Shatura, Russia;

²State Research Institute of Aviation System (GosNIIAS), 125319 Moscow, Russia;

³Institute of Ethnology and Anthropology RAS, Moscow, Russia

The possibilities of computer graphics for visualization of complex structures and processes make it possible to successfully apply them to solve complex problems in a wide range of applications. Using their potential in paleoanthropological research allows to develop and apply new methods for processing, analyzing, visualizing and exchanging unique paleoanthropological data. The results of development and application of methods of accurate photorealistic 3D reconstruction and reverse engineering for creation of digital 3D models of paleoanthropological objects and their hard 3D copies are presented. Comparison of the accuracy of measurement of anthropological parameters by the developed methods with the results of standard manual measurements is given.

Keywords: palaeoanthropology, non-contact measurements, digital model, additive technologies, computed tomography, photogrammetry.

1. Введение

Инженерная графика и её современное цифровое воплощение – компьютерная графика – служат универсальным языком общения инженеров и учёных. Возможности компьютерной графики для визуализации сложных структур и процессов позволяют ставить и решать новые задачи в различных областях знаний, в том числе, гуманитарных, таких как палеоантропология.

Особенность исследований в палеоантропологии связана с уникальностью и сложностью объектов исследований, существующих в единичных экземплярах, имеющих сложную структуру и обычно требующих очень бережного обращения при выполнении исследований. Данные факторы существенно затрудняют и

замедляют процесс исследований, ограничивают возможности доступа к объектам и обмена информацией между исследователями, сдерживают применение новых методов обработки данных. Создание геометрически точных и визуально адекватных цифровых компьютерных моделей методами обратного инжиниринга позволяют в значительной степени решить указанные проблемы.

Настоящая работа представляет результаты исследований по разработке методов и программно-аппаратных средств обратного инжиниринга для создания точных и визуально корректных цифровых моделей палеоантропологических объектов и их твёрдых копий для задач исследований и обучения.

Одной из основных задач палеоантропологии является морфологическое описание костных останков с

использованием ряда измерительных методов (краниометрия, остеометрия и т.д.), позволяющих проводить широкие сравнительные исследования, цель которых описать разнообразие антропологических типов, как в древности, так и в современности.

В современной физической антропологии, несмотря на значительное развитие современной измерительной техники, используется ручной инструментальный рис. 1. Отчасти, это связано с тем, что разработанные измерительные методики палеоантропологических объектов могут быть использованы с конкретным набором измерительного инструмента – толстотного, координатного, скользящего циркуля и других инструментов.



Рис. 1. Механические инструменты для измерения антропологических объектов.

Кроме того, достоверность ручных замеров в полной мере соответствует необходимой точности (точность измерений проводится до 0,1 см). При этом у ручного измерения есть ряд очевидных недостатков – это, прежде всего, трудоемкость, времязатратность, нередко повреждения объекта исследования, и, как ни удивительно, крайне высокая стоимость антропологических измерительных инструментов.

2. Требования к цифровым моделям палеоантропологических объектов

Палеоантропология предъявляет особые требования к создаваемым цифровым моделям [4]. К основным требованиям следует отнести:

1. высокая геометрическая точность (выше точности стандартных ручных измерений) на уровне 0.01 ... 0.05 мм;
2. высокий уровень детализации на уровне 0.05 ... 0.1 мм, обеспечивающий возможность локализации заданных антропологических ориентиров [3];
3. высокая степень визуального соответствия, позволяющая исследователю получать достоверную информацию о визуальных параметрах объекта (цвет объекта, заданные контуры и т.п.);
4. высокая точность нанесения фотореалистичной текстуры, обеспечивающая возможность проведения

измерений с использованием координат измеряемых точек на текстуре [2];

5. представление 3D модели в форме, пригодной для изготовления на установке быстрого прототипирования.

Сформулированные требования не могут быть комплексно реализованы с помощью коммерческих продуктов. Поэтому для исследований разработана оригинальная система бесконтактных оптических измерений и построения 3D моделей, отвечающая сформулированным требованиям. Она создана на основе имеющихся технических решений и оригинальных программных библиотек и обеспечивает возможность развития новых методов обработки данных на основе расширения функций системы.

3. Система построения фотореалистичных 3D моделей

Для решения специфических задач палеоантропологических исследований создана специализированная система 3D сканирования, основанная на фотограмметрических принципах трёхмерных измерений. Она является развитием существующей системы [1] и дополнена аппаратными и программными средствами для работы с палеоантропологическими объектами.

Система включает 2 цифровых камеры высокого разрешения, программно-управляемый проектор структурированного света для подсветки образца и цифровую камеру для получения текстуры высокого разрешения. Оригинальное программное обеспечение позволяет выполнять 3D сканирование объекта и получение геометрических данных в автоматизированном режиме (рис. 2). Также система обеспечивает оперативное изменение конфигурации для сканирования в требуемом рабочем пространстве с целью обеспечения заданных требований по точности и подробности измерений.



Рис. 2. Фотограмметрическая система.

Оригинальная процедура калибровки обеспечивает точность сгенерированных 3D моделей на уровне 0.01 ... 0.05 мм в зависимости от размеров рабочей области сканирования, что соответствует требованиям по точности для задач антропологического анализа.

Текстурированная цифровая модель предоставляет эксперту больше информации (рис. 3), так как некоторые особенности могут быть найдены только на цветном изображении объекта. Так как калибровка фотограмметрической системы выполняется одновременно для всех трех камер с использованием одного калибровочного поля, то это обеспечивает точное нанесение текстуры (соответствие координат изображения трёхмерным точкам поверхности объекта).



Рис. 3. Изображение объекта (слева) и его текстурированная цифровая модель (справа).

Качество получаемых моделей позволяет их использовать для палеоантропологических исследований и решения таких задач, как:

1. измерение морфометрических антропологических параметров (расстояния, углы, путь вдоль поверхности для заданных антропометрических точек объекта);
2. виртуальная реставрация (восстановление утраченных фрагментов) палеоантропологических объектов;
3. виртуальная реконструкция внешнего облика;
4. создание специализированных баз данных цифровых компьютерных моделей палеоантропологических объектов, предоставляющих возможность работы с ценными находками широкому кругу исследователей;
5. создание точных твёрдых копий палеоантропологических объектов для целей обучения, для физической реставрации и реконструкции внешнего облика.

В качестве альтернативы традиционной методике предложен комплекс алгоритмов автоматического обнаружения и распознавания ориентиров. Они используют как цифровую модель объекта, так и текстуры высокого разрешения для распознавания набора необходимых ориентиров.

4. Автоматизированные измерения антропологических параметров

Оценка точности и удобства применения разработанных методов автоматических морфометрических измерений проводилась на 3D-моделях палеоантропологических объектов, полученных с помощью разработанной системы построения моделей. Ряд стандартных морфометрических измерений был выполнен с помо-

щью традиционных (ручных) и автоматизированных методов (рис. 4).

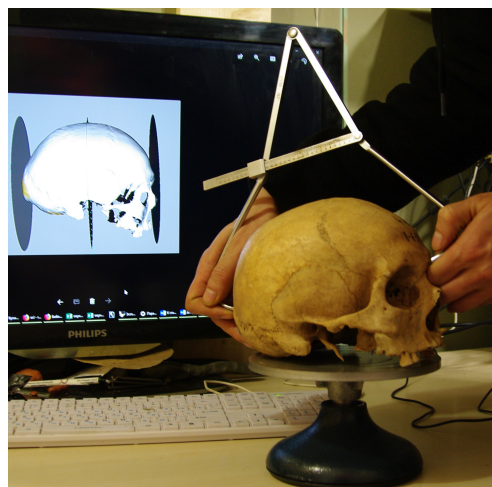


Рис. 4. Измерение антропологических параметров

Результаты измерений заданных антропологических параметров приведены в таблице ниже.

| # | Параметр | Ручн. | 3D ручн. | 3D авт. |
|----|-----------------------------|-------|----------|---------|
| 1 | d_{long}, mm | 197 | 197.3 | 197.2 |
| 8 | d_{tr}, mm | 154 | 154.1 | 154.5 |
| 9 | $w_{min}^{forehead}, mm$ | 131 | 131.3 | 131.0 |
| 10 | $w_{max}^{forehead}, mm$ | 136 | 136.2 | 135.9 |
| 17 | d_{height}, mm | 119 | 119.2 | 118.9 |
| 32 | $\alpha_{forehead}, ^\circ$ | 82 | 82.4 | 81.6 |
| 72 | $\alpha_{profile}, ^\circ$ | 95 | 94.7 | 95.3 |
| 75 | $\alpha_{nose}, ^\circ$ | 53 | 52.5 | 52.9 |

Сравнение результатов измерений подтверждает высокую точность 3D реконструкции палеоантропологических объектов и возможность применения интеллектуальных методов обработки данных в палеоантропологических исследованиях.

5. Реконструкция с применением аддитивных технологий

Важным преимуществом применения цифровых моделей в практике палеоантропологических исследований является возможность получения их точных твёрдых копий с помощью аддитивных технологий [5]. Такие копии палеоантропологических объектов могут быть использованы для художественной реконструкции внешнего облика, для создания справочных коллекций в целях обучения.

Аддитивные технологии создания твёрдых копий цифровых моделей задают к ним специальное требование – требование «водонепроницаемости» или «твердотельности» трёхмерной модели. Другими словами, для изготовления твёрдой копии цифровой модели требуется, чтобы её любое сечение было замкнуто. Для

выполнения данного требования разработаны методы преобразования 3D моделей, полученных фотограмметрической системой, в «твердотельную» форму.

Пластиковые копии палеоантропологических (рис. 5, слева) объектов по преобразованным в «твердотельную» форму цифровым моделям были изготовлены на лазерном стереолитографе LC250, разработанным в ИПЛИТ РАН.

Также были исследованы качество и точность 3D-печати с точки зрения возможности применения таких копий в палеоантропологических исследованиях. Для оценки точности стереолитографическая модель сканировалась фотограмметрической системой, и полученная цифровая модель сравнивалась с исходной моделью. Результаты сравнения этих двух моделей показаны на (рис. 5, справа). Стандартное отклонение для разности поверхностей составило 1.76 мм.

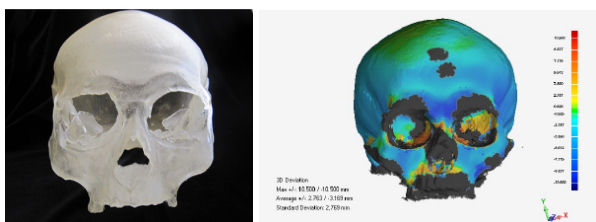


Рис. 5. Твёрдая копия палеоантропологического объекта (слева) и сравнение с исходной моделью (справа).

Результаты оценок точности реконструкции стереолитографии показывают, что модели, созданные методом стереолитографии, могут быть использованы для решения таких антропологических задач, как реконструкция внешнего вида человека и восстановление объекта.

6. Заключение

Разработана замкнутая технология построения точных фотореалистичных цифровых моделей палеоантропологических объектов, обеспечивающая геометрическую точность и визуальную адекватность моделей, необходимые для проведения на них палеоантропологических исследований. Технология основана на фотограмметрических методах измерений, обеспечивающих требуемую точность 3D реконструкции и фотореалистичное текстурирование модели, и базируется на оригинальных аппаратно-программных средствах бесконтактных измерений и обработки данных.

Разработаны методы автоматических измерений ряда антропологических параметров по цифровым компьютерным моделям и проведено сравнение результатов автоматических и ручных измерений заданных параметров. Сравнение показало высокую точность разработанных методов и их применимость для палеоантропологических исследований.

Изучена применимость использования стереолитографических копий палеоантропологических объектов

для исследований и обмена редкими данными. Оценка точности полученных стереолитографических копий показывает, что их можно успешно использовать в образовательных целях и для задач реконструкции внешнего вида.

7. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-29-04509 офи-м.

8. Литература

- [1] V. A. Knyaz. Image-based 3d reconstruction and analysis for orthodontia. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B3:585–589, 2012.
- [2] V. A. Knyaz, S. Y. Zheltov, and A. Chibunichev. Photogrammetric techniques for analysis and visualization of changes in 2d and 3d data: Plastic surgery application. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W4:109–114, 2017.
- [3] Gérard Subsol, Bertrand Mafart, Alain Silvestre, and M.A. De Lumley. 3D Image Processing for the Study of the Evolution of the Shape of the Human Skull: Presentation of the Tools and Preliminary Results. In Bertrand Mafart, Hervé Delingette, and Gérard Subsol, editors, *Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology*, pages 37–45. BAR International Series 1049, 2002.
- [4] Gerhard W. Weber. *Virtual Anthropology and Biomechanics*, pages 937–968. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [5] С.С. Абрамов, Н.И. Болдырев, М.М. Новиков, А.В. Евсеев, Е.В. Коцюба, В.Я. Панченко, Н.М. Семешин, and В.П. Якунин. О возможности применения метода лазерной стереолитографии в судебной медицине. *Судебно-медицинская экспертиза*, 41(3):13–17, 1998.

Об авторах

Новиков Михаил Михайлович, заведующий лабораторией ЛСОИ, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН», ул. Святоозерская, д. 1, г. Шатура, Московская область, РФ, novikov@ Rambler.ru тел.: (49645) 22200 доб.459.

Князь Владимир Александрович, кандидат технических наук, зам. руководителя отдела, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва, РФ.

Галеев Равиль Марветович, младший научный сотрудник, ФГБУН Институт этнологии и антропологии им. Н.Н. Миклухо-Маклая РАН, г. Москва, РФ.