

3D-РЕКОНСТРУКЦИЯ АНАТОМИЧЕСКИХ СТРУКТУР В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Аннотация. Рассматривается кибернетический подход при реконструкции анатомических структур на примере черепа человека. На его основе была разработана технология интерактивной 3D-реконструкции сложных форм археологической керамики по их фрагментам. Реализация предложенных алгоритмов интерактивного моделирования различных форм с реалистичным представлением позволяет использовать полученные решения в археологической антропологии, криминалистике, в черепно-лицевой, ортопедической хирургии, в учебно-образовательном процессе и т.д.

Ключевые слова: виртуальные системы, программные системы и модели, информационно-измерительные системы, физиология и медицинская наука.

Abstract. We consider the cybernetic approach to the reconstruction of anatomical structures, taking for example of the human skull. On this basis, we developed the technology for interactive 3D reconstruction of complex shapes of archaeological ceramics by their fragments. Implementation of the proposed algorithms for interactive simulation of various forms with a realistic representation allows us to use the obtained results in archaeological anthropology, criminology, in cranio-facial, orthopedic surgery, in the teaching-learning process, etc.

Keywords: virtual environments, programming systems and models, information-measuring systems, physiology and medical science.

Проблема достоверности и верификации восстановленных пространственных форм по ее фрагментам является достаточно актуальной задачей современных информационных технологий в области медико-биологических приложений. В настоящее время существует большое количество подходов для реализации трехмерного моделирования различных анатомических структур. Но вместе с тем большинство из предложенных методов основываются на геометрических особенностях объектов исследований, и в памяти компьютера такие модели обычно хранятся в векторной форме, т.е. в виде координат совокупности точек, задающих элементы модели. Например, восстановление черепа по фрагментам традиционно производится по геометрическим характеристикам: размерам, форме и изгибу фрагментов костей. В более сложных моделях, например в задачах черепно-лицевой реконструкции [1], ряд подходов определяется способами задания поверхностей: сплайновые [2], сеточные [3], NURBS [4], используют расчленение поверхности на составные части [5], либо представляют отдельные в функциональном отношении геометрические элементы [6] и др.

Вместе с тем следует указать на один существенный недостаток перечисленных подходов: несвязанность модели с реальным объектом. Заложенная программная аппроксимация модели реконструкции нередко несет в себе элементы индивидуальной художественной доработки реставратора, искажающей результаты исследований. В некоторой степени эта проблема решается в последние годы. Так, в опубликованной в 2005 г. статье в журнале «Forensic Science International» приводится разработка лабораторией FBI (US)

принципиально новой системы реконструкции лица по целому черепу или его фрагментам [7]. Система получила название RE/FACE (reality enhancement/facial approximation by computational estimation – увеличение реалистичности/реконструкция лица методом компьютерной оценки). RE/FACE позволяет с высокой точностью реконструировать лица при наличии только части черепа или в случае его сильного повреждения. Разработанная система работает только с компьютерными томограммами и не требует проведения ручных измерений, так как использованный в системе алгоритм исключает влияние реставратора на конечный результат. К сожалению, предложенная система направлена на решение узкоспециализированных криминалистических задач. В ситуациях, когда имеется массовый фрагментированный антропологический материал, такая система не способна его обработать.

Представленный ниже подход предполагает более тривиальное решение при реконструкции анатомических структур на примере черепа человека.

Традиционно в краниологии череп восстанавливают по данным о горизонтальных сечениях. Наиболее информативные горизонтальные сечения строятся по девяти антропометрическим точкам: верхушечная (vertex, ve), надпереносье (glabella, gl), затылочная (opisthokranion, op), теменная (eurion, eu), ушная (porion, po), подносовая (subnasale, sn), ротовая (stomion, st), энтокантион (entocantion, en), подбородочная (gnathion, gn). Однако для построения верификационной модели черепа этих сечений явно недостаточно, но и избыточное число построений ведет к неоправданной сложности. Поэтому нужны только необходимые априорные сечения.

При реконструкции черепа основную сложность представляет, прежде всего, отсутствие необходимых частей (фрагментов), посмертная деформация черепа (расхождение стреловидного шва), а также всевозможные деформации и разрушения, связанные с внешними воздействиями (термические, химические, механические и др.). Учесть при этом все многообразие связей внешней формы черепа с его внутренним строением [8] и условиями его функционирования (реакция на внешние и внутренние воздействия) достаточно сложно, но необходимо. В то же время возникает парадоксальная ситуация, когда высокая раздробленность и массовая фрагментарность антропологического материала приводит не к усложнению проблемы, а к обратному эффекту, связанному с решением задачи хорошо апробированными методами смежных наук – методом конечных элементов (рис. 1).

Метод конечных элементов на основе матричных расчетов механических конструкций, рассматриваемый сегодня как универсальное средство решения различных модельных представлений, описываемых уравнениями математической физики в частных производных, широко используется в системах автоматизированного проектирования (САПР) [9]. Одна из особенностей данного метода заключается в том, что акцент смещен скорее на интегральной формулировке анализируемого явления, чем на дифференциальной форме, которую представляют уравнения в частных производных в граничных условиях. В основе метода заложен базис в определении способа разбиения области на подобласти (конечные элементы) без перекрытия и пересечения, как для плоских, так и для объемных тел. Аналогия в случае фрагментированного антропологического материала на примере черепа человека вполне очевидна. Однако геометрическая реконструкция методом конечных элементов, осуществляемая с помощью кусочно-непрерывной функции, носит при-

ближенный характер. Вместе с тем механизм таких решений достаточно прост и надежен, полностью поддается автоматизации как в двумерном (в случае селекции фрагментов), так и в трехмерном случаях (при верификации модели). Автоматизация, как необходимый фактор исследовательского процесса в случаях обработки массового фрагментированного материала здесь очень важна.

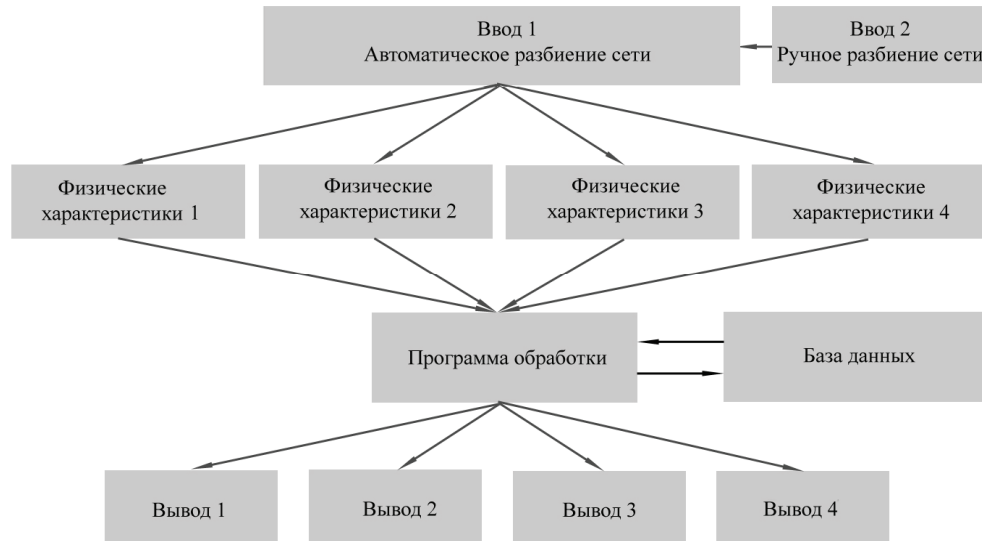


Рис. 1. Схема междисциплинарной обработки фрагментированного антропологического материала по методу конечных элементов

Внешние оптико-геометрические характеристики фрагментов черепа приносят достаточную информацию, которая определяется геометрическими особенностями фрагмента. При анализе границ парные фрагменты подбираются по совпадающим длинам сторон полигонов, аппроксимирующих границы. Используемая при этом система оптико-геометрического синтеза основывается на иерархическом упорядочении эвристик поиска комплементарных пар [10]. Физические размеры материала фрагментов (такие как толщина) должны совпадать у парных фрагментов. Ограничения на оптико-геометрическую обработку могут быть связаны с размерами фрагмента. По результатам предварительного исследования антропологического материала, проведенного в конце мая 2010 г., размеры фрагментов при стереофотограмметрической съемке не должны быть пространственной структурой менее $3 \times 3 \times 3$ мм. Дополнительными диагностическими критериями, которые могут быть использованы на этапе селекции и определения принадлежности фрагментов к конкретному объекту (черепу), может выступать информация о микротекстуре поверхности костного материала и внутренние особенности сложения рельефа или «рисунок» черепа. Здесь наблюдается очевидная параллель с системой оптико-геометрического синтеза, используемого при обработке фрагментов археологической керамики [11]. Там в качестве атрибутивной информации для восстановления формы сосуда по его фрагментам использовался декор и трасологический след, оставленный инструментом при обработке поверхности гончарного изделия. Для восстановления формы гончар-

ной посуды по ее фрагментам в такой системе использовалась формализация некоторых эвристик, относящихся к качественному анализу формы трасологических образований с помощью виброакустических методов, которые позволили добиться превосходных результатов [12].

Вместе с тем в случае многочисленности и многоуровности исследуемого антропологического материала с высокой частотой фрагментации (что в последние годы стало нормой при исследованиях групповых могильников и братских захоронений), работа системы оптико-геометрической обработки значительно затруднена. Существенной проблемой становится селективный отбор фрагментов и их принадлежность к конкретному объекту, а также отсутствие ключевых фрагментов, приводящее к невозможности просчета всех вариантов комбинаций, образующих исходную модель. В таких случаях наиболее действенным решением является введение дополнительной априорной информации – мультиспектральных характеристик.

Мультиспектральные характеристики фрагментов дают большую часть атрибутивной информации, и при сопоставлении фрагментов выборка производится на основе измерения коэффициентов излучения и коэффициентов отражения (для спектрального распределения при температуре T_0) исследуемого объекта [13]. Для измерения теплофизических характеристик различных объектов обычно применяется мультиспектральная стереокамера. Мультиспектральная стереокамера, как правило, представляет собой стереофотограмметрическую информационно-измерительную систему, оснащенную двумя ПЗС-матрицами (прибор с зарядовой связью – ПЗС), которая позволяет вести наблюдение одновременно в видимой и ближней части инфракрасного спектра и предоставляет ощутимые преимущества во многих сферах, где используется техническое зрение. Неоспоримость применения данной технологии при решении экспертных задач идентификации антропологического материала вполне очевидна: решается не только проблема индивидуальной селекции отдельного фрагмента, его принадлежности к тому или иному черепу, но и производится стереофотограмметрическая съемка атрибутивных признаков фрагмента для последующего использования в реконструкционной модели (рис. 2).

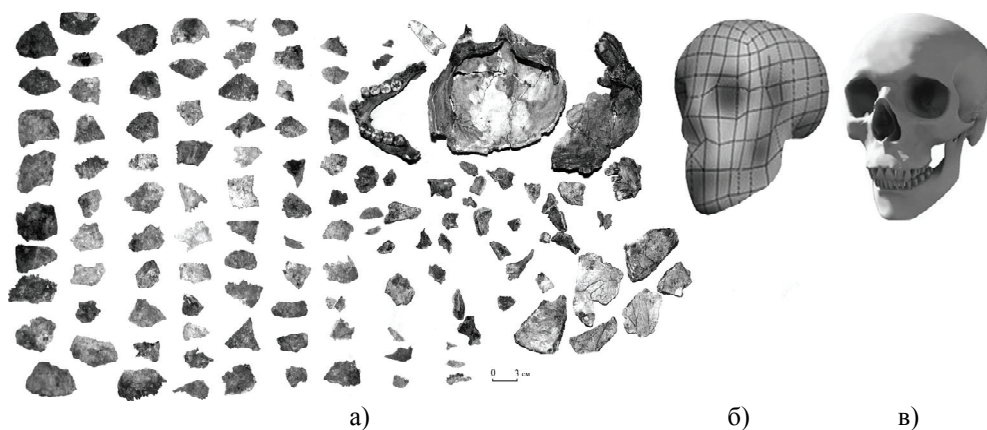


Рис. 2. Реконструкция черепа человека по его фрагментам:

а – фрагментированный антропологический материал; б – сеточная виртуальная модель черепа; в – полная реконструкция черепа (компьютерная модель)

Использование мультиспектральной информационно-измерительной системы способствует более точному опознаванию оптико-геометрических, теплофизических и иных характеристик, позволяет получать синхронные изображения антропологических объектов в различных зонах спектра. Результатом сегментации стереоизображения исследуемых фрагментов является получение последовательности образов. При этом на этапе построения аналитического описания для каждого образа рассчитывается свой набор классификационных признаков. В рассматриваемом подходе к пространственным признакам относятся значения коэффициентов формы объекта, его характеристики внутренней конфигурации, характеристики контура и поверхностного рельефа. К спектральным признакам классификации относятся значения средней яркости объекта распознавания и его гистограммные спектральные характеристики.

Рассмотренный подход реализован с помощью программного инструментария 3D VIA Virtools, имеющего в своем составе ряд модулей, которые позволяют использовать его в качестве инструментария и среды разработки для создания виртуальных миров и real-time интерактивной графики: систем виртуальной реальности и тренажеров, для сценарного моделирования и планирования, виртуального тестирования, в научных и образовательных приложениях и т.д. Дополнительно для обработки стереофотограмметрической информации использовался программный комплекс PHOTOMOD фирмы «Ракурс».

Работа осуществляется следующим образом: предварительно очищенные фрагменты черепа раскладывают на ровной поверхности так, чтобы они не затеняли друг друга при проведении стереосъемки. С помощью мультиспектральной стереокамеры производится съемка в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитных волн. Полученные стереопары вводятся в компьютер для обработки, редактирования и преобразования в трехмерные данные. Производится селекция фрагментов, определяются местоположения характеристических точек. На следующем этапе решается оптимизационная задача – адаптация базовой модели, согласно выделенным точкам и с учетом антропометрических ограничений и геометрии фрагментов. На заключительном этапе программа сравнивает полученную трехмерную модель с моделями из базы данных, которые соответствуют определенным категориям, а также степень верификации данного события.

Базовый состав информационно-измерительного комплекса выглядит следующим образом: мультиспектральная стереокамера; персональный компьютер; интерактивная доска; виртуальный шлем или мультимедийный проектор; устройство ввода стереокадров в компьютер (стереофрейм-граббер); программное обеспечение.

Таким образом, предложенный подход при 3D-реконструкциях антропологического материала на примере восстановления черепа человека с помощью междисциплинарных технологий касается не всех аспектов решения проблемы, тем не менее отражает реальную динамику и перспективу развития данного направления в области медико-биологических приложений.

Список литературы

1. **Гришин, А. А.** Пластическая реконструкция внешности по черепам из погребений Пензенской области / А. А. Гришин, О. А. Калмина // Археология восточ-

- ноевропейской лесостепи : материалы II Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения М. Р. Полесских. – Пенза, 2008. – Вып. 2. – Т. 2. – С. 192–203.
2. Моделирование лица с использованием Patch. – URL: <http://render.ru/tutor/max>
 2. Моделирование головы в REAL 3D. – URL: www.real3d.ru
 3. Хейз, Д. Моделирование головы с использованием NURMS / Д. Хейз. – 1999. – URL: <http://ilimax.narod.ru>
 4. Козлов, Л. А. Подходы к моделированию лица человека / Л. А. Козлов // Антропологическая реконструкция : сборник статей. – М. : АН СССР, 1991. – С. 129–147.
 5. Ratner, P. Face Animation / P. Ratner, 1999. – URL: www.highend3d.com/maya/tutorials/peter
 6. Turner, W. D. A novel method of automated skull registration for forensic facial approximation / W. D. Turner [et al.] // Forensic Science International. – 2005. – V. 154. – P. 149–158.
 7. Николенко, В. Н. Соразмерность большого затылочного и позвоночных отверстий C1-C2 как проявление моделирующего эффекта биомеханики вертебробазилярной области / В. Н. Николенко, В. С. Сперанский, О. В. Калмин, С. В. Капралов, Е. А. Анисимова // Проблемы современной краниологии : материалы научной конференции, посвященной 50-летию создания краниологической коллекции имени проф. Б. А. Долго-Сабунова. – СПб., 1993. – С. 37–38.
 8. Быков, В. П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении / В. П. Быков. – Л. : Машиностроение, 1992. – 255 с.
 9. Грибов, Ю. Д. Система синтеза мозаичных изображений в классе систем, основанных на знаниях / Ю. Д. Грибов // Материалы научно-технич. конф. МГИЭМ. 2005. – URL: www.miem.edu.ru/conf/sdud/2005-1.php
 10. Гаврилова, Е. А. Музейные технологии: информационные подходы при реконструкции сосудов / Е. А. Гаврилова, Р. А. Сингатулин // Археология восточно-европейской лесостепи : сборник материалов. – Пенза : ПГПУ, 2008. – Вып. 2. – Т. 1. – С. 241–245.
 11. Сингатулин, Р. А. Практическая палеофонография. Технологии и результаты применения / Р. А. Сингатулин. – Саратов : ПКИ, 2007. – 96 с.
 12. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Ж. Госсорг. – М. : Мир, 1988. – 416 с.

Калмина Ольга Анатольевна

кандидат медицинских наук, доцент,
кафедра анатомии человека,
Медицинский институт, Пензенский
государственный университет

E-mail: okalmina@gmail.com

Kalina Olga Anatolievna

Candidate of medical sciences, associate
professor, sub-department of human
anatomy, Medical Institute,
Penza State university

Калмин Олег Витальевич

доктор медицинских наук, профессор,
заведующий кафедрой анатомии
человека, Медицинский институт,
Пензенский государственный
университет

E-mail: ovkalmin@gmail.com

Kalmin Oleg Vitalyevich

Doctor of medical sciences, professor,
head of sub-department of human anatomy,
Medical Institute, Penza State university

Сингатулин Рустам Адыгамович

кандидат исторических наук, доцент,
кафедра информационных систем
и технологий в обучении, заведующий
лабораторией информационных
технологий в гуманитарных
и естественно-научных исследованиях,
Педагогический институт, Саратовский
государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского

E-mail: sarch@yandex.ru

Singatulin Rustam Adygamovich

Candidate of historical sciences, associate
professor, sub-department of information
systems and technology of education, head
of laboratory of information technologies in
humanitarian and fundamental research,
Pedagogical Institute, Saratov State Univer-
sity named after N. G. Chernyshevsky

УДК 61:007; 004.9

Калмина, О. А.

3D-реконструкция анатомических структур в системах виртуальной реальности / О. А. Калмина, О. В. Калмин, Р. А. Сингатулин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 22–28.