

## Электронная геометрическая модель при 3D-сканировании сегментов тела человека в практике протезирования и ортезирования. Причины появления дефектов и способы их устранения

### Аннотация

3D-сканирование широко используется во всем мире в практике протезирования и ортезирования конечностей. Непроизвольные движения объекта съемки, вариативность условий съемки, человеческий фактор (ошибки оператора) приводят к снижению точности и нарушению структуры поверхности регистрируемой электронной геометрической модели – появлению артефактов и дефектов. В статье рассмотрены основные причины их возникновения, приводится попытка их систематизировать. Приведены способы устранения артефактов в процессе мобильного лазерного бесконтактного 3D-сканирования и при обработке в САПР «Meshmixer», «Autodesk Inc.».

### Введение

Для взаимодействия с цифровой копией материального объекта в программном обеспечении (ПО) персональных электронных вычислительных машин необходимо зарегистрировать его форму с необходимой точностью [1]. Этот процесс называется реверс-инжиниринг и заключается в определении геометрических характеристик объекта и передаче информации в ПО. При увеличении количества поверхностей и росте порядка полигонов, которые их описывают, снижается точность реверс-инжиниринга. Биологические объекты (сегменты тела человека) обладают относительно более сложной фор-

мой поверхности. Одним из способов точной передачи информации о биологическом объекте в ПО компьютера является 3D-сканирование. 3D-сканирование заключается в регистрации координат точек поверхности [2] электронной геометрической модели (ЭлГМ) с использованием 3D-сканера или устройства съемки. После этого производится постобработка [1].

По классификации 3D-сканеры делятся на 2 типа: контактные и бесконтактные (мобильные и стационарные). Технологии работы сканеров различаются, как и требования к условиям съемки [3]-[5]. Требования к внешним условиям съемки зависят от принципа работы используемого оборудования. Например, жесткие требования к освещению у некоторых



Рис. 1. Блок-схема технологического процесса 3D-сканирования при протезировании верхних конечностей

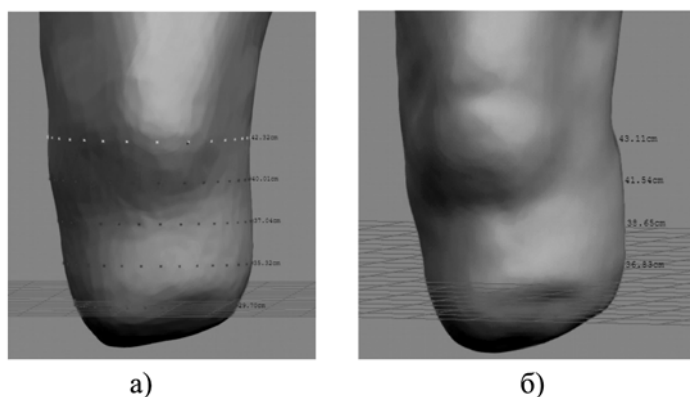


Рис. 2. ЭлГМ культы голени в верхней трети пациента Н., 55 лет, повреждение конечности вследствие минно-взрывной травмы с результатами обмера по сечениям: а) культя не зафиксирована; б) культя зафиксирована

оптических сканеров не предъявляют к работе лазерных сканеров и времяпролетных камер [3].

Артефакт дословно переводится с латыни как «искусственно сделанный». Применительно к съемке, артефакт – то, чего нет в оригинале. Артефакты могут возникать при первичной обработке и формировании ЭлГМ и приводят к дефектам ЭлГМ.

В современных системах автоматизированного проектирования реализованы математические алгоритмы для автоматизированного устранения дефектов поверхности с возможностью тонкой настройки. При этом существенные изменения поверхности ЭлГМ устраняются оператором.

В условиях съемки подвижных объектов применяют их локальную фиксацию. Средства фиксации вносят изменения в ЭлГМ регистрируемого объекта. Если фиксация затруднена, применяют итерационные методики съемки. Другим способом решения задачи является сокращение времени съемки [6].

Наиболее доступными и широко распространенными технологиями 3D-сканирования являются оптическая фотограмметрия и лазерное 3D-сканирование [7]. К преимуществам лазерного 3D-сканирования относятся: малое время процедуры, сокращение трудоемкости, возможность записи информации о цветовых характеристиках поверхности (текстура).

Исследование дефектов ЭлГМ, возникающих при ее реконструкции, и способов их устранения является неотъемлемым этапом разработки методического обеспечения для подготовки специалистов протезно-ортопедической отрасли к более

широкому использованию цифровых технологий в практической работе.

**Цель работы:** разработать методы устранения артефактов при 3D-сканировании части тела человека.

### Материалы и методы

Проведено 3D-сканирование 37 пациентов в возрасте от 40 до 64 лет с ампутационными дефектами голени и бедра, позитивов и негативов гипсовых слепков культей этих пациентов; 74 пациентов в возрасте от 7 до 17 лет при изготовлении ортопедических функционально-корректирующих корсетов, 101 стандартизированной формы посадочного кольца приемных гильз протезов голени и бедра. При сканировании использовался 3D-сканер «iSense» компании «Occipital Structure Sensor», США. Обработка полученных электронных геометрических моделей производилась в ПО «Meshmixer» («Autodesk Inc.»).

Базовый алгоритм реконструкции поверхности – радиометрический метод получения электронной-геометрической модели, при котором измеряют параметры излучения, отраженного от поверхности объекта. В качестве сенсора применяют фоточувствительные элементы камер. Далее получают полигональную модель, составленную из треугольников. В исследовании применяли 3D-сканер с пространственным разрешением  $x / y$  на расстоянии 0,5 м – 0,9 м и глубиной разрешения на расстоянии 0,5 м – 1 мм.

Для преобразования модели в исследовании были применены алгоритмы котангентной дискретизации [8]. Она вклю-

Таблица 1

### Классификация артефактов

№ п/п	Артефакт	Характер проявления	Вероятные причины возникновения	Рекомендации, действия, принимаемые меры
1	Дублирование полигонов	Дублирование координат зарегистрированных точек поверхности со смещением к центру модели, формирующие полигоны с противоположенными нормальными. От 3 до 70 % от общего количества полигонов	1. Несоблюдение фокусного расстояния. 2. Прозрачность объекта. 3. Подвижность объекта во время съемки (в том числе тремор)	1. Отрегулировать освещение. 2. Изменить фактуру поверхности (тон): использовать мелкодисперсные порошки, чулки, маркеры. 3. Зафиксировать объект
2	Разрывы поверхности	Отсутствие зарегистрированных координат точек области поверхности объекта сканирования, в результате которого не производится построение полигонов. От 1 до 15 % площади поверхности	1. Несоблюдение фокусного расстояния. 2. Прозрачность объекта. 3. Подвижность объекта во время съемки (в том числе тремор)	1. Отрегулировать освещение. 2. Изменить фактуру поверхности (тон). 3. Использовать алгоритмы построения полигонов по профилю ЭлГМ: функции <i>Bridge</i> , <i>Inspector</i>
3	Искажение текстур	Текстуры, применяемые к ЭлГМ, не соответствуют текстурам сканируемого объекта по цвету, интенсивности либо полностью отсутствуют. До 90 % площади поверхности	1. Несоответствие ТТ освещенности сканируемого объекта. 2. Зеркальная фактура областей сканирования	1. Отрегулировать освещение. 2. Изменить фактуру поверхности (тон). 3. Уменьшить угловую скорость перемещения 3D-сканера
4	Шероховатость поверхности (увеличение расстояния центров полигонов от среднего профиля поверхности)	Зарегистрированные координаты точек поверхности имеют разнонаправленные векторы нормалей соседних полигонов, построенных по зарегистрированным координатам точек поверхности. До 60 % площади поверхности	1. Несоблюдение ТТ скорости сканирования. 2. Ограничение на максимальное количество регистрируемых точек	1. Проверить настройки 3D-сканера. 2. Уменьшить угловую скорость перемещения 3D-сканера. 3. Изменить количество полигонов ( <i>Remesh</i> , <i>Reduce</i> ). 4. Сгладить модель ( <i>Smooth</i> )
5	Пересечение наружной и внутренней поверхностей изделия	При сканировании тонкостенного объекта происходит разрыв во внутренней и внешней поверхностях ЭлГМ и соединение поверхностей по краям разрыва. До 35 % площади поверхности	1. Прозрачность объекта. 2. Наличие на поверхности объекта областей с резко контрастируемыми текстурами	1. Изменить фактуру поверхности (тон). 2. Построить полигоны по профилю поверхности ЭлГМ: функции <i>Bridge</i> , <i>Inspector</i>
6	Искажение ЭлГМ в области замыкания поверхности (шов)	Искажение значений зарегистрированных координат точек поверхности, возникающее в результате подвижности сканируемого объекта в пространстве в процессе перемещения объекта относительно 3D-сканера	1. Сканирование в один проход. 2. Подвижность объекта (в том числе тремор)	1. Фиксация объекта. 2. Съемка в несколько проходов. 3. Уменьшение угловой скорости сканирования и периодическое изменение зоны съемки. 4. Съемка объекта с разных ракурсов. 5. Адаптация формы ( <i>ShrinkSmooth</i> )

чает в себя нормализацию по вершинам треугольников полигональной модели.

## Результаты

На рис. 1 приведен вариант блок-схемы технологического процесса 3D-сканирования в практике протезирования нижних конечностей. Вариативность объектов съемки (объектов) предоставляет возможность использования различных методик сбора исходных данных о пациенте для цели моделирования оснстки или деталей протезно-ортопедических изделий (ПОИ).

**Артефакты при сканировании.** Основные внешние факторы, влияющие на качество съемки при использовании бесконтактных ручных 3D-сканеров: освещенность; текстура поверхностей деталей объекта; форма объекта; подвижность объекта; соблюдение технических требований (ТТ) к 3D-сканеру: скорость перемещения, фокусное расстояние.

**Освещенность.** Основное техническое требование к помещению, в котором осуществляется сканирование, заключается в отсутствии прямых солнечных лучей. Методики съемки пациентов с культями конечностей включают в себя нанесение разметки на кожные покровы культя: проекции мышечков, гребней, головок костей, проекции костных опилов; отдельно отмечают зоны повышенной чувствительности, потертости и др. Специфика съемки пациентов с культями конечностей заключается в необходимости освещения торца культя.

**Текстуры.** Неоднородность цветовой гаммы объекта, например наличие родимых пятен, и высокий коэффициент отражения сканируемой поверхности приводя к появлению артефактов.

**Форма поверхности.** Артефакты появляются при наличии поверхностей, от которых не произошло отражения. К появлению таких областей приводят избыток мягких тканей или

рубцы. Потертости, выстояние костного опила, выраженная атрофия приводят к появлению очерченных граней. Подвижность объекта и инструментальная погрешность приводят к сглаживанию граней цифровой копии. В результате точность моделирования ПОИ снижается.

**Подвижность объекта.** Тремор частей тела является вариантом физиологической нормы человека. При 3D-сканировании колебания приводят к увеличению объемных размеров ЭлГМ. На рис. 2 показаны изображения ЭлГМ культя левой голени пациента Н., 55 лет, с результатами обмера по сечениям. В примере на рис. 2а при 3D-сканировании культя находилась в положении сгибания на 5 град, мышцы ненапряженные. На рис. 2б показан результат с применением трикотажного чулка, что привело к стабилизации культя.

Классификация артефактов, характер их проявления и меры по предотвращению и устранению приведены в табл. 1.

Примеры возможных дефектов по табл. 1 и результаты их устранения представлены на рис. 3.

Применение на практике сведений из табл. 1 проверено эмпирически. Группа сканирование в которой производилось с учетом влияния внешних факторов, включала в себя 5 из 37 пациентов с ампутационными дефектами на уровне голени, 20 из 74 пациентов при изготовлении ортопедических функционально-корректирующих корсетов, и 20 из 101 стандартизованных форм посадочного кольца приемных гильз протезов бедра. Частота возникновения артефактов, с учетом минимизации влияния внешних факторов, снизилась с 18 до 2 %, при этом: 75 % составило дублирование полигонов на ЭлГМ культя голени, 15 % – шероховатость поверхности ЭлГМ тела человека при изготовлении ортопедических функционально-корректирующих корсетов, 10 % – отсутствие текстур на ЭлГМ культя голени. Дефекты возникали при съемке пациентов обеих возрастных групп: в возрасте от 7 до 17 лет и от 40 до 64 лет.

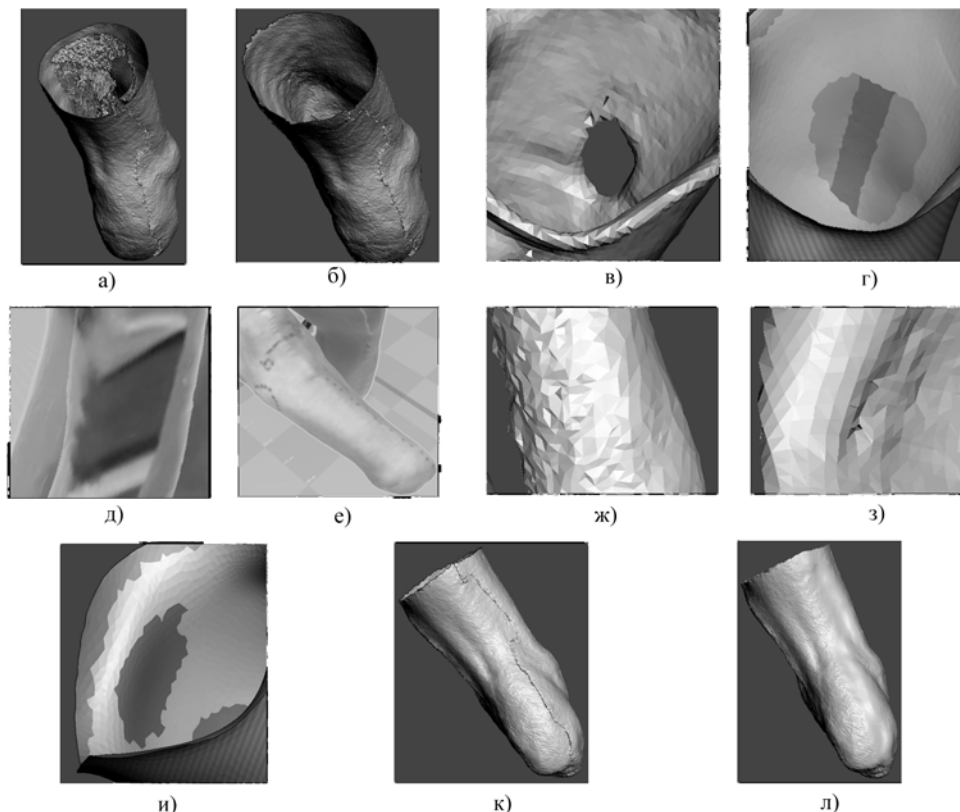


Рис. 3. Примеры дефектов и результатов их устранения для различных объектов 3D-сканирования: дублирование полигонов ЭлГМ культя голени: а) исходная модель; б) после обработки; разрывы поверхности посадочного кольца приемной гильзы протеза бедра: в) исходная модель; г) после обработки; отсутствие текстур ЭлГМ конечности: д) наложение на ЭлГМ руки текстуры другого объекта; е) ЭлГМ культя голени по Пирогову с корректно зарегистрированной текстурой; ж) шероховатость поверхности ЭлГМ руки, в процессе съемки левой части угловая скорость перемещения 3D-сканера в 2 раза выше; самопересечение поверхности ЭлГМ посадочного кольца приемной гильзы протеза бедра: з) исходная модель; и) после обработки; искажение ЭлГМ культя голени в области замыкания поверхности (шов): к) исходная модель; л) после обработки

Остальные дефекты не проявлялись. Время постобработки моделей сократилось с 5 до 2 мин.

## Выводы

Даже при условии соблюдения требований к условиям съемки могут возникать артефакты поверхности электронной геометрической модели при 3D-сканировании сегментов тела человека. Использование приемов в работе с 3D-сканером, знание основных принципов используемой технологии съемки, умение применять инструменты ПО для ручной и полуавтоматической обработки ЭлГМ позволяют качественно и количественно повысить точность регистрируемых моделей. Тщательность подготовки объекта к съемке сокращает время обработки ЭлГМ.

### Список литературы:

1. Тишкин В.О. Методика сборки и обработки данных, полученных в процессе 3D-сканирования // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1 (71). С. 87-92.
2. ГОСТ Р 57558–2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения.
3. Zanuttigh P., Marin G., Dal Mutto C., Dominio F., Minto L., Cortelazzo G.M. Time-of-Flight and Structured Light Depth Cameras Technology and Applications. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG.2016, XII. P. 355.
4. Ryniewicz A., Ryniewicz A., Bojko L., Gołębiewska W., Cichoński M., Madej T. The use of laser scanning in the procedures replacing lower limbs with prosthesis // Measurement. 2017. Vol. 112. PP. 9-15.
5. Mak A.F.-T., Zhang M., Leung A.K.-L., Prado da Silva M.H. Artificial Limbs. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2017. PP. 1-34.
6. Herr H.M., Moerman K.M., Sengeh D.M. Method and system for designing a biomechanical interface contacting a biological body segment / Заявка на патент US20190021880A1 (дата посещения: 2019).
7. Colombo P. et al. Development of a virtual testing laboratory for lower limb prosthesis / Scuola di dottorato di ricerca in ingegneria industriale. Indirizzo: ingegneria chimica, dei materiali e della produzione. Ciclo XXVI. 2014. P. 133.
8. Botsch M., Sorkine O. On Linear Variational Surface Deformation Methods // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2008. Vol. 14 (1). PP. 213-230.

Константин Константинович Щербина,  
д-р мед. наук, директор,  
Институт протезирования и ортезирования,  
ФГБУ ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта  
Минтруда России,  
Михаил Андреевич Головин,  
аспирант, руководитель отдела,  
Вадим Геннадьевич Суслев,  
канд. мед. наук, руководитель отдела,  
Никита Владимирович Марусин,  
магистр, научный сотрудник,  
Владимир Михайлович Янковский,  
канд. мед. наук, ст. научный сотрудник,  
Марина Владимировна Золотухина,  
специалист, мл. научный сотрудник,  
ФГБУ ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта  
Минтруда России,  
г. С.-Петербург,  
e-mail: golovin@center-albreht.ru

## Р.Ш. Хабилов

### Разработка облачной базы данных для хранения и обработки медицинских изображений

#### Аннотация

Представлена разработка облачного решения для хранения и обработки медицинских данных, полученных на томографах ТМР-КФТИ, разработанных в КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, и других устройствах. Исследована концепция облачных технологий, приведены их преимущества по сравнению с традиционными способами хранения данных. Исследованы виды облачных хранилищ, приведены примеры из мировой практики и обоснована необходимость создания собственного решения. Представлены перспективы развития облачных технологий в медицине.

#### Введение

Облачные технологии прочно входят в нашу жизнь, получая повсеместное распространение во всех областях, в том числе и в медицине. Облако можно определить как набор сервисов, реализация которых скрыта от пользователя [1]. Эти сервисы могут работать на одном или нескольких компьютерах, обеспечивать сохранность собственных данных, управлять доступом к ним. Пользователю не нужно знать всех этих технических деталей, он просто пользуется услугой.

Облачные технологии позволяют минимизировать затраты на оборудование, настройку программного обеспечения. У облачных сервисов гибкая инфраструктура, они могут быть масштабированы при необходимости, т. е. если аппаратных ресурсов не хватает, можно их добавить, не переустанавливая сервис. Также у облачных сервисов большой запас отказоустойчивости, они могут работать без перебоев, даже если вышла из строя часть оборудования.

Для исследования преимуществ облачных технологий рассмотрим традиционные способы хранения и обработки данных. Самый простой, но наименее удобный и надежный способ – сохранять и обрабатывать все данные на одном компьютере, например хранить все томографические изображения на компьютере оператора. Во-первых, обычно такой компьютер маломощный и поиск данных в нем может происходить долго. Во-вторых, данные никак не защищены от сбоя, в случае отказа компьютера все актуальные данные теряются, может сохраниться лишь часть, которая попала в резервные копии (которые далеко не всегда делают). Для того чтобы показать свои медицинские изображения врачу в другой клинике, пациент вынужден их сбрасывать на носитель (CD-диск или флэшку). Все это создает массу неудобств и порождает уязвимости в надежности системы.

Более эффективный способ – это клиент-серверная архитектура, когда данные автоматически загружаются на сервер, откуда доступны с любой точки сети (локальной или глобаль-