

DOI:

## ТЕХНОЛОГИИ ОЦИФРОВКИ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

**Веретехина С.В.**

*Российский государственный социальный университет, Россия, г. Москва ул. В. Пика д.4  
veretehinas@mail.ru*

*Аннотация: рассматриваются процессы реверсивного инжиниринга, аппроксимации и триангуляции. Предлагается метод комбинированного реверсивного инжиниринга для реставрировать 3D-модели объекта культуры в цифровом пространстве. Нормативно-законодательные документы реставрации выставляют требования неприкосновенности к объекту культуры. Описанный подход является оптимальным с точки зрения сокращения временных затрат.*

Ключевые слова: реверсивный инжиниринг объектов культуры, неприкосновенность подлинника, цифровое моделирование, аппроксимация, триангулирование поверхности.

### **Введение**

Цифровая трансформация – это изменения, связанные с применением цифровых технологий. Цифровая трансформация способствует перенесению объектов реального материального мира в цифровую форму. Трансформация нацеленная на представление информации в 3D–пространстве. Свободная энциклопедия <https://ru.wikipedia.org/wiki> дает следующее определение: трёхмерное пространство - модель материального мира, в котором мы находимся. Это пространство называется трёхмерным, так как оно имеет три однородных измерения — длину, ширину и высоту, то есть трёхмерное пространство описывается тремя единичными ортогональными векторами. Визуальная способность воспринимать окружающий мир органами чувств в трёх измерениях называется восприятием глубины. 3D–пространство – это перенесенная модель материального мира в цифровое пространство с использованием компьютерной техники. Человечество получает достоверную информацию в 3D–пространстве. Достоверность информации достигается высоким качеством оцифровки объектов. Все, что мы хотим поместить в 3D–пространство, требуется представить как 3D–образ. Из 3D–образов формируются 3D–виртуальные миры. Особенно популярным становится посещение 3D–виртуальных музеев, выставок, панорам, библиотек. Каждый объект должен содержать достоверную информацию. Например, посещение виртуальной выставки скульптуры, должно отображать 3D–образ скульптуры, предоставлять возможность рассмотреть скульптуру со всех сторон в виртуальном мире. Для создания 3D–образа скульптуры используют методы оцифровки образов. Технология оцифровки начинается с определения размера объекта - скульптура малой формы или монументальная скульптура. В зависимости от размера объекта оцифровки проводится выбор оборудования и программного обеспечения по оцифровке. Оборудование по оцифровке может быть стационарным или переносным. В зависимости от сложности оцифровки используют различные виды сканеров. Технология оцифровки начинается со сканирования. Для оцифровки объекта требуется использовать 3D–сканеры. В исследовании проводятся обзор современных технологий оцифровки сложных объектов культуры. Дополнительным преимуществом исследования является описание технологических процессов оцифровки с соблюдением требований Российского законодательства.

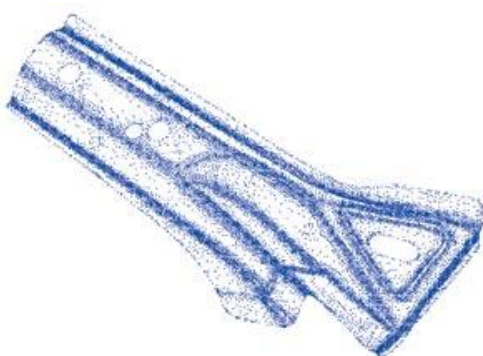
### **1 Методология работы**

К практическим методам исследования относятся: сравнение, наблюдение, измерение, описание, эксперимент, моделирование, анкетирование, опрос, тестирование, интервьюирование. При написании данного исследования использовались следующие методы: измерение, описание, моделирование, оцифровка. При проведении исследований, авторов использовал данные - Сведения из Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации. Сведения из Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации представляют данные зарегистрированных объектов культурного наследия, подлежащие оцифровке. Сведения включают таблицы, включающие наименования объектов, номер в реестре, регион нахождения объекта культуры, физический адрес, категория историко-культурного значения, вид объекта, принадлежность к ЮНЕСКО, категория – особо- ценный объект культуры или нет, ГИС расположения на карте. Рассмотрим, в качестве примере, правила поиска объектов культурного наследия по данным из Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры)

народов Российской Федерации.. Сведения об объекте из Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации. Метаданные объекта - Номер в реестре, учетный номер, категория историко-культурного значения- Id и т.д. Описание объекта - градостроительная характеристика, объемно-пространственная композиция, применяемый материал, текстовое описание границ объекта, обще-видовая принадлежность, признаки объекта, паспорт объекта, 3D-прототип оцифрованного объекта и др.

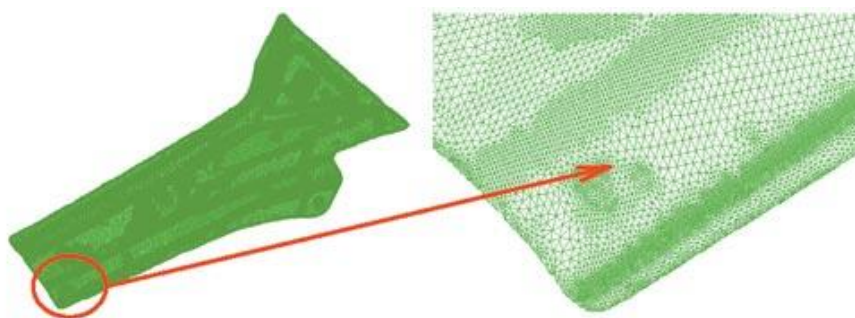
## 2 Методы математического реверсивного инжиниринга

В исследовании рассматриваются способы лазерного сканирования, оптического сканирования и технологический процесс реверсивного инжиниринга. К практическим методам исследования относится технологический процесс реверсивного инжиниринга оцифрованного объекта, с целью построения реальной модели из облака точек. В процессе оцифровки оптической установкой на поверхность детали проецируются интерференционные изображения. Полученное изображение захватывается цифровыми камерами. Трехмерные координаты для каждой полученной точки вычисляются при помощи цифровой обработки изображения. Точечные маркеры позволяют системе ATOS трансформировать вид в систему координат.



*Рис. 1. Облако точек оптического сканирования*

На основе полученного облака точек, устанавливается точность аппроксимации генерируется триангулированная модель. Применяемый математический инструментарий триангуляции позволяет аппроксимировать появившиеся пустоты. С учетом расчетов геометрии кривизна модели геометрически достраивается.



*Рис. 2. Триангуляция модели*

Для полученного облака точек, устанавливается точность аппроксимации, далее генерируется триангулированная модель. Применяемый математический инструментарий триангуляции позволяет аппроксимировать появившуюся неопределенность. Сгенерированные кривые позволяют построить поверхности, которые строятся последовательным обходом каждого из полигонов, образованного набором кривых. Геометрия построенной модели в точности повторяет геометрию триангулированной модели в заданном поле допуска. Построение реальной математической модели происходит в системах проектирования SolidCAD. После сканирования в системе ATOS, облако точек передается в формате ACS1. Далее продолжается работа трехмерного моделирования с облаком точек триангулированной

---

<sup>1</sup> *формате ACS- это расширение файла, обычно связанное с файлами Agent Character Format. Спецификация Agent Character Format была создана Microsoft. ACS файлы поддерживаются*

модели (редактирование треугольников и создание поверхностей). Триангулированная модель "выглаживается".



Рис. 3. Триангуляция модель (слева) и "выглаженная" (справа).  
Для округления поверхностей используется программное обеспечение PowerSHAPE.



Рис. 4. Триангуляция модель (слева) и сопряженная (справа).

Анализируя процедуры выполнения процессов оцифровки и реверсивного инжиниринга, требуется отметить, что

1. точность аппроксимации<sup>2</sup> зависит от увеличения количества членов аппроксимации;

2. триангулирование, с точки зрения геометрии пространства - это разбиение топологического пространства на симплексы (треугольники), у которого измеряются все углы и длины базисных сторон треугольника. Симплекс или n-мерный тетраэдр (от лат. simplex 'простой') — геометрическая фигура, являющаяся n-мерным обобщением треугольника. Для повышения триангуляции исследуемой области (отсутствующей определенности), требуется разбиение экспериментальных данных на несколько частей. Определение коэффициентов аппроксимации связано с требуемой точностью.

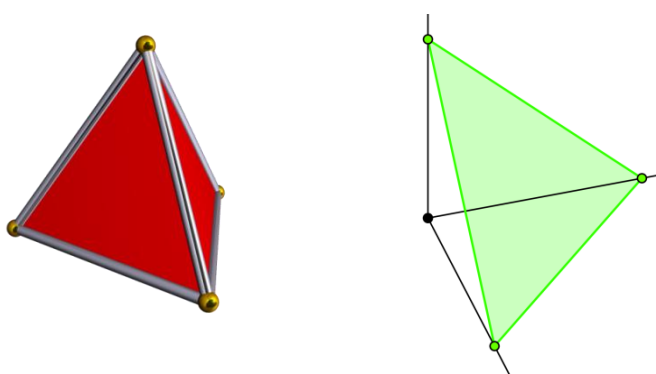


Рис. 5. Слева- 3-х мерная триангуляция, справа - 2-х мерная триангуляция.

программными приложениями, доступными для устройств под управлением Windows. Пользователям рекомендуется использовать **Microsoft Agent** программное обеспечение для управления ACS файлами.

<sup>2</sup> Аппроксимация (от лат. proxima — ближайшая) или приближение — научный метод, состоящий в замене одних объектов другими, в каком-то смысле близкими к исходным, но более простыми. Аппроксимация позволяет исследовать числовые характеристики и качественные свойства объекта, сводя задачу к изучению более простых или более удобных объектов (например, таких, характеристики которых легко вычисляются или свойства которых уже известны).. В геометрии рассматриваются аппроксимации кривых ломаными.

Для высокой точности аппроксимации целесообразно применять метод наименьших квадратов, при котором среднеквадратическая ошибка минимальна. Метод наименьших квадратов обеспечивает наименьшую сумму квадратов отклонений значений аппроксимируемой функции от значений исходной функции в произвольном числе точек, не связанном с числом неизвестных коэффициентов. Метод наименьших квадратов (МНК) — математический метод, применяемый для решения различных задач, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомых переменных. Он может использоваться для «решения» переопределенных систем уравнений (когда количество уравнений превышает количество неизвестных), для поиска решения в случае обычных (не переопределенных) нелинейных систем уравнений, для аппроксимации точечных значений некоторой функции. МНК является одним из базовых методов регрессионного анализа для оценки неизвестных параметров регрессионных моделей по выборочным данным.

## Результаты исследований

В работах советского ученого М.В.Плотникова (1956) в издании "Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им С.М. Кирова" в публикации "Графо-аналитический способ предвычисления точности сторон триангуляции" по кафедре майкшердейского дела и геодезии, описано применение обратных весов каждой фигуры, т.е  $1/\text{вес}$ . Далее все величины суммируются по всему звену триангуляции. Полученная величина характеризует точность определения конечной стороны звена. Такое предвычисление достоинства триангуляции в отношении точности передачи длин сторон носит приближенный характер. Величина обратного веса какого либо элемента триангуляции (дирекционного угла или стороны) строгим способом может быть вычислена из выражения:  $1/\text{вес}$ . [1]

Современное программное обеспечение проводится построение аппроксимированной модели методом комбинированного обратного инжиниринга с использованием программных продуктов Delcam plc, измерительной руки ROMER и лазерной сканирующей головки G-Scan.

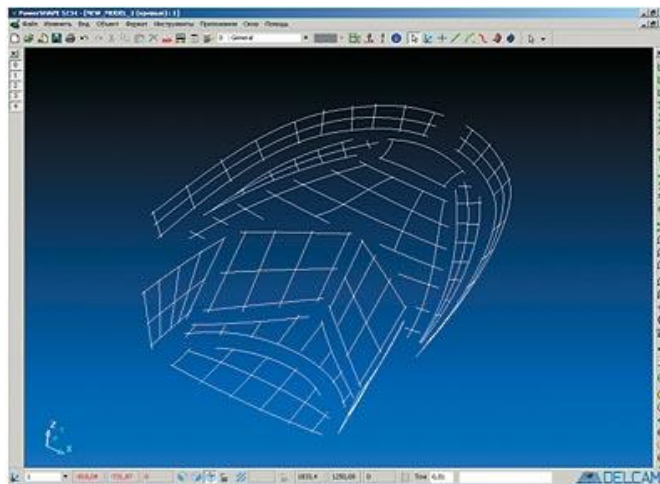


Рис. 7. Измерительная рука (слева) и лазерная сканирующая головка (справа).

7-осевые измерительные руки совместимы с лазерными сканерами, применяются для контроля по облаку точек и с целью обратного инжиниринга. Одним из критериев конкурентоспособности предприятия является применение технологии обратного инжиниринга, прототипирования и 3D-дизайна. Метод реверсивного инжиниринга позволяет сократить время на разработку математической модели. Успех изделия, его покупная способность, зависят от нового дизайна. 3D-дизайн при реверсивном инжиниринге возникает тогда, когда техническая документация на изделие отсутствует. Новые возможности реверсивного инжиниринга представляют собой бесконтактный способ оцифровки - лазерное сканирование и оптические системы трехмерной оцифровки. Математический инструментальный программное обеспечения включает простое разбиение исследуемой модели на группы:

1. примитивные поверхности, правильные геометрические фигуры (плоскости, цилиндры, конусы, сферы и т.д.)
2. сложные поверхности описываются наборами кривых;
3. сложные элементы исследуемой модели, которые сложно описать математическим инструментарием, сканируются лазерной головкой измерительной руки.

Совмещение сканированных данных производят в одной системе координат, разные фрагменты модели импортируются в один файл. Сложные и простые геометрические совмещаются различными стратегиями. Сложный элемент исследуемой модели сканируется в программе G-Scan и триангулируется в высокой точности. Математическое моделирование проводится в CoreCAD. Экспортированный макет трехмерного моделирования проводится в PowerSHAPE. Полученные кривые аппроксимируются (рис. 8).



*Рис. 8. Аппроксимация кривых.*

Оптимизация процесса возможно при наличии симметрии, для одной из сторон, которая признается более правильной. Далее применяется функция "выглаживания". Построение аппроксимированной модели с радиусами приводит к округлению углов. Таким образом, применение комбинированного инжиниринга, с применение перечисленного программного обеспечения и оборудования, позволяет сократить временные затраты на проектирование.

## **Заключение**

В исследовании "Технологии оцифровки объектов культурного наследия" доказано, что целесообразно применять технологии реверсивного инжиниринга систем проектирования. Для оцифровки объектов культуры, на которых технической документации и быть не может, целесообразно сразу применять технологию комбинированного реверсивного инжиниринга, что позволит создать 3D - модель объекта культуры. И проводить его 3D-реставрацию и математическое моделирование в программном обеспечении. Например: восстановить утерянные симметричные стороны элементов деревянного зодчества или создать сборочный чертеж для дальнейшего создания копии утерянного элемента деревянного зодчества для станка с ЧПУ. Дополнительно, технологии контроля за состояние удаленно-расположенных объектов культуры возможно вести по данным спутников [2]. Математический инструментарий экономической эффективности описан в исследованиях ученых, в т.ч. при экспортных поставках наукоемких изделий на экспорт [3].

Восстановление утрат на монументальной скульптуре проводится математическим моделирование 3D-образа, посредством аппроксимации. Нормативно-законодательные документы СПР-2007.4.1. "Рекомендации по ведению реставрационных работ на объектах культурного наследия - памятниках монументальной скульптуры, часть 4.1., проводятся в рамках научно-исследовательских работ. Восполнение утраченных фрагментов возможно только при соблюдении НЕПРИКРСНОВЕННОСТИ к подлиннику [3]. Отсюда следует, что 3D- сканирование и обратный реверс позволят провести моделирование в 3D- пространстве.

В заключении требуется отметить, что системы проектирования в CAD, проведение обратного реверсивного инжиниринга, с целью восстановления объектов культуры, требуется производить методами, применяемыми на предприятиях промышленности. Метод комбинированного инжиниринга для технологии оцифровки и реверса объектов культурного наследия является оптимальным в соотношении качества и стоимости выполняемых работ по оцифровке, реверсу, математическому моделированию в 3D-пространстве. Данное исследование подводит к необходимости введения ИТ-технологий специалистам художественных направлений. В компетенции будущих специалистов должны добавляться компетенции проектирования в CAD-системах, обратного реверсивного инжиниринга, математического моделирования в 3D- пространстве, умение применять программное

обеспечение по применению технологий реверсивного инжиниринга для восстановления утраченных частей объектов культуры.

## Литература

1. *Плотников Д.В.* Графо-аналитический способ предвычисления точности сторон триангуляции. – Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им С.М. Кирова, 1956. Т.84 – С.112-120. <https://cyberleninka.ru/article/n/grafo-analiticheskiy-sposob-predvychisleniya-tochnosti-storon-triangulyatsii/viewer>
2. *Veretekhina S.V., Karyagina T.V., Korniyushko V.F., Burlyayeva E.V., Kolybanov K.Yu., Potekhina E.V., Shmakova E.G.* – Informational system for monitoring the state of the natural environment according to the Russian satellite // *Ekoloji*. 2018. Vol. 27(106) – P. 461-469.
3. *Veretekhina S.V., Kudryavtsev M.A., Simonov V.L., Makushkin S.A., Karyagina T.V.n J.K.* Mathematical and instrumental methods for assessing the economic efficiency of science product for export // *Journal of environmental treatment techniques*. Vol. 7(3). 2019, – P.370-376.
4. СПР-2007.4.1. Рекомендации по ведению реставрационных работ на объектах культурного наследия - памятниках монументальной скульптуры, часть 4.1. <http://docs.cntd.ru/document/1200089671>