

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Руденко Мария Павловна

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ
СРЕДСТВА СИНТЕЗА МОДЕЛЕЙ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО
ИХ ИЗОБРАЖЕНИЮ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Донецк – 2021

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Карабчевский Виталий Владиславович,
ГОУВПО «ДОННТУ» (г. Донецк),
заведующий кафедрой «Компьютерное
моделирование и дизайн»

Официальные оппоненты: **Замятин Александр Витальевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУВО «Донской государственный
технический университет» (г. Ростов-на-Дону),
заведующий кафедрой «Инженерная геометрия
и компьютерная графика»

Чернышева Оксана Александровна
кандидат технических наук, ГОУВПО
«ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И
АРХИТЕКТУРЫ» (г. Макеевка), доцент
кафедры «Специализированные
информационные технологии и системы»

Ведущая организация: **ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА»
(ГУ ИПИИ) (г.Донецк)**

Защита состоится «12» октября 2021 г. в 12.00 час. на заседании диссертационного совета Д 01.024.04 в ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО «ДОННУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 1, ауд. 203.
Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchenovet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ»
по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 2.
Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
кандидат технических наук, доцент

Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Процесс восстановления трехмерной модели по изображениям является прямой задачей компьютерного зрения, исследованием проблем которой (данные AOAC International – Международной Ассоциации аналитических сообществ) в настоящий момент посвящено около 10% всех публикуемых современных мировых научно-исследовательских работ в области информационных и интеллектуальных систем автоматизированной обработки данных и моделирования.

Одной из значимых практических областей применения реконструкции трехмерной модели по изображениям являются прикладные задачи моделирования в архитектуре и археологии при проектировании интерьера и экстерьера, виртуальной реконструкции утраченных памятников архитектуры, создании виртуальных музеев и пр., где фотоизображения, либо другие иконографические материалы (рисунки, зарисовки) являются единственными источниками информации об утраченном архитектурном сооружении.

Ниша компьютерных средств синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, при малом количестве иконографического материала, до сих пор не заполнена в полной мере. Несмотря на многообразие методов и алгоритмов реконструкции, существующие средства, способные воссоздать трехмерную модель по достаточному числу фотографий без участия человека, генерируют модели, содержащие шумы и требующие, в связи с этим, их уточнения для обеспечения геометрической адекватности; известные в литературе средства, позволяющие произвести частичную реконструкцию трехмерной модели архитектурного сооружения по одному перспективному изображению (в силу недоступности других входных данных), являются закрытыми и не предусматривают возможность моделирования кривых линий и поверхностей.

Поэтому, разработка и реализация новых эффективных вычислительных алгоритмов и компьютерных средств синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям является актуальной и востребованной для решения задач трехмерной реконструкции архитектурных сооружений в целях сохранения культурного и архитектурного наследия в таких сферах, как архитектурное проектирование, архитектурная реконструкция и археология.

Степень разработанности темы исследования.

Теоретической базой для проведения исследований стали работы ведущих отечественных и зарубежных учёных и их учеников:

- в области фотограмметрического моделирования: Меженина А.В., Захарова А.А., Тужилкина А.Ю., Важенцевой, Н. В., Павельевой Е.А., Дижевского А.Ю., Ситу Лина, Лукиной О.В., Дебевека П., Камилло Джей Тейлора и Стивена Кригмена, Стивена Смита, Зори С.А., Кривовязя Г.Р., Астахова Ю.С. и др.;
- в области прикладной геометрии и компьютерной графики: Цветкова

В.Я., Маркова Б.Г., Маркова О.Б., Рачкиной Н.Г., Барышева Д.Г., Иванова Г.С., Калантарова А.А., Климухина А.Г., Коня А.А., Метелкина А.И., Крейдуна Ю.А., Осипова М.П. и др.;

- в области моделирования кривых поверхностей: Хоанга Т.Х., Короткого В.А., Романовой В.А., Кривошапко Н.Н., Иванова В.Н. и др.

Целью исследования является совершенствование математического аппарата и программного обеспечения компьютерных систем в области трехмерного моделирования архитектурных сооружений на основе новых вычислительных алгоритмов и средств реконструкции трехмерных моделей по их изображениям.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- провести исследование и анализ существующих алгоритмов и компьютерных средств реконструкции моделей трехмерных объектов по их изображениям;
- обосновать возможность разработки нового вычислительного алгоритма, основанного на методе перспективных масштабов, и позволяющего построить трехмерную модель видимой части объекта по одному перспективному изображению;
- разработать алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, основанный на методе перспективных масштабов, состоящем в отыскании относительных натуральных величин отрезков, заданных на перспективном изображении;
- выполнить компьютерную реализацию алгоритма синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям;
- верифицировать результаты моделирования путём вычислительного эксперимента с использованием разработанного комплекса программ.

Объект исследования – процесс реконструкции моделей трехмерных объектов по их изображениям.

Предмет исследования – вычислительные алгоритмы и компьютерные средства синтеза моделей трехмерных архитектурных объектов по их изображениям.

Научная новизна полученных результатов:

- 1 Разработан новый эффективный вычислительный алгоритм синтеза моделей трехмерных архитектурных объектов по их изображениям, позволяющий проводить реконструкцию объекта с ограниченным количеством иконографического материала на основе предложенного усовершенствованного способа синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям.
- 2 Усовершенствован способ синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, основанный на методах проективной геометрии, путем добавления функции построения кривой как формообразующего элемента.

3 Разработан комплекс программ, позволяющий автоматизировать трехмерную реконструкцию объекта по его изображениям, основанный на предложенном вычислительном алгоритме синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям.

Теоретическая значимость работы. Получено математическое обоснование нового вычислительного алгоритма синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, основанного на методе перспективных масштабов и использующего интерполяционный метод построения кривых линий. Работа выполнена в соответствии с тематическим планом ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности использования разработанных алгоритмов и комплексов программ на практике в таких областях как: архитектурное проектирование, цифровая археология, разработка виртуальных краеведческих музеев.

В работе получены компьютерные средства решения задач трехмерной реконструкции архитектурных сооружений по их изображениям, позволяющие построить трехмерную модель и базу для создания архитектурных чертежей.

Практическая ценность исследований подтверждается внедрением в научно-методическом отделе по охране памятников истории и культуры Государственного учреждения культуры «Донецкий республиканский краеведческий музей» при выполнении работ по созданию виртуальной реконструкции Старой Юзовки, в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (справка №29-22/16 от 26.12.19) при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по дисциплине «Графическое и геометрическое моделирование» для бакалавриата кафедры «Компьютерное моделирование и дизайн» по направлению подготовки 09.03.02 «Информационные системы и технологии», а также в научно-исследовательскую госбюджетную работу кафедры компьютерного моделирования и дизайна Н8-16 «Методы и средства компьютерного моделирования объектов, систем и процессов» (справка №29-4/16 от 04.03.21).

Методология и методы исследования. Предложенные в работе вычислительные алгоритмы синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям основываются на использовании проективной, аналитической и начертательной геометрии, теории численных методов, а также теории измерительной перспективы.

Компьютерная реализация вычислительного алгоритма выполнена с помощью системы AutoCAD и встроенного в нее функционального языка AutoLISP. Расчеты координат точек для интерполяции производятся в программе Openoffice Calc, позволяющей экспортить и импортировать данные из AutoCAD.

Положения, выносимые на защиту:

- установлено, что предложенный вычислительный алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, основанный на

методе перспективных масштабов и использующий интерполяционный метод построения кривых линий, позволяет построить сложные трехмерные модели, используя ограниченное количество иконографического материала;

- показано, что компьютерная реализация вычислительного алгоритма синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, основанного на методе перспективных масштабов, позволяет с высокой геометрической точностью выполнять трехмерную реконструкцию архитектурных сооружений при небольших вычислительных затратах, а также создавать базовые линии для альбома архитектурных чертежей.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата для разработанных средств и проверкой на погрешность результатов моделирования эталонного архитектурного сооружения. Полученные результаты, положения и выводы отвечают соответствующим требованиям паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), в частности: п.3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»; п.4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов»; п.5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на семи научных конференциях, в том числе: VII Международной научно-технической конференции в рамках II Международного Научного форума Донецкой Народной Республики «Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование», 26 мая 2016 г. ДонНТУ, Донецк; IX Международной научно-технической конференции «Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование - 2018», 22 мая 2018г. ДонНТУ; Донецк; X Международной научно-технической конференции «Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование - 2019», 23 мая 2019 г. ДонНТУ; Донецк, II Республиканской с международным участием научно-практической конференции «Информационное пространство Донбасса: проблемы и перспективы», 31 октября 2019 г.; VII Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей (студенты, магистранты, аспиранты) «Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности», 20-25 апреля 2020 г. ФГБОУ ГО ВолгГТУ, Волгоград; Международной научно-практической конференции «Геометрическое компьютерное моделирование в подготовке специалистов для

цифровой экономики», 20-22 мая 2020 г., СГТУ, Саратов; заседании Донецкого Международного Круглого стола «Искусственный интеллект: теоретические аспекты и практическое применение» в рамках VI Международного научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие», 27 мая 2020г., ГУ ИПИИ, Донецк.

Личный вклад соискателя состоит в формулировании цели, задач исследований, основных научных положений и выводов, разработке вычислительных алгоритмов и комплекса программ для их компьютерной реализации, разработке рекомендаций по практическому применению результатов. Основные научные результаты диссертации, которые включают вычислительные алгоритмы синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, а также комплекс программ, сформированный на основе этих алгоритмов, позволяющий с высокой точностью выполнять трехмерную реконструкцию архитектурных сооружений и создавать базу для альбома чертежей, получены автором лично. Текст диссертации написан автором самостоятельно.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 14 научных изданиях, 7 из них – в рецензируемых научных изданиях: в том числе 4 – в рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук в ДНР, 3 – в научных изданиях; 7 – публикации по материалам научных конференций.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов с выводами, заключения и списка литературы. Общий объем текста диссертации – 179 страниц, включая 75 рисунков, 17 таблиц, библиографический список из 100 наименований и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику работы. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований. Показана научная новизна и практическое значение полученных результатов.

В первом разделе «Анализ вычислительных алгоритмов реконструкции моделей трехмерных объектов по их изображениям» представлена общая постановка задачи реконструкции моделей трехмерных объектов по их изображениям, а также выполнен обзор известных методов синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, таких как: вероятностный метод, предполагающий итеративное определение параметров примитивов, подтверждающих или опровергающих правильность выбранных моделей; метод с набором изображений, предполагающий обработку данных фотоизображений для выявления и описания локальных признаков в изображениях; а также метод перспективных масштабов, предполагающий

определение относительных натуральных величин элементов объекта по его проекционному изображению. Проанализирована их пригодность к решению задачи трехмерной реконструкции полностью или частично утраченных архитектурных объектов. Сформулированы основные особенности и требования к решению задачи трехмерной реконструкции модели по фотоизображению для архитектурных объектов, такие как: возможность реконструкции при одиночном изображении; возможность генерации качественной трехмерной модели объекта, не требующей дальнейшей доработки; возможность быстрых вычислений при генерации модели; возможность управления экспертом процессом генерации модели.

Выполнен анализ эффективности наиболее популярных фотограмметрических систем, проведены эксперименты с системами Autodesk ReCap Photo, Agisoft Photoscan, Meshlab, Photomodeller, которые заключались в получении фотоизображений эталонного объекта по периметру для последующей генерации его трехмерной модели. В результате сделаны выводы о недостатках фотограмметрических систем, таких как: работа только с набором изображений (от 20 фотографий); предварительная обработка фотоизображений; длительный процесс генерации трехмерной модели объекта; дальнейшее редактирование полученной трехмерной модели в графических редакторах, так как первоначальная модель содержит в себе множество шумов и искажений.

На основе проведенного анализа аргументирована необходимость в разработке нового вычислительного алгоритма, основанного на методе перспективных масштабов, и программного комплекса синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям на его основе, отличающегося высокой точностью построений при ограниченном количестве изображений, возможностью реконструкции кривых линий и поверхностей, а также умеренными потребностями в вычислительных ресурсах.

Второй раздел «Вычислительный алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям с использованием метода перспективных масштабов» посвящен решению задачи отыскания относительных натуральных величин элементов объекта, заданного перспективным изображением, и построению его трехмерной модели на их основе.

Обосновано решение задачи методом перспективных масштабов, позволяющего определить соотношение между относительными натуральными и перспективными размерами элементов объекта. При этом, необходимо определить параметры, на основе которых будет выполняться построение: точки схода (точки на линии горизонта, в которые уходят перспективные линии объекта, изображенного на фотографии); а также точка зрения (точка, из которой проводится линия через опорные точки для определения относительных натуральных величин).

Разработанный на основе этого метода вычислительный алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов, состоит из следующих этапов.

1. Импорт изображения в рабочую среду.
2. Определение количества точек схода для реконструкции архитектурного сооружения (одна точка схода, две точки схода, три точки схода).
3. Определение точки зрения для отыскания относительных натуральных величин перспективных линий архитектурного сооружения.
4. Указание опорных точек на архитектурном элементе.
5. Отыскание относительных натуральных величин перспективных линий выбранного элемента архитектурного сооружения.
6. Построение трехмерного представления выбранного элемента архитектурного сооружения на основе найденных величин, состоящее из следующих этапов:
 - указание вида элемента (параллелепипед, куб, цилиндр, призма и т.д.);
 - указание базовой точки;
 - построение элемента.
7. Если построение модели не закончено – возврат к пункту 4;
8. Визуализация результатов моделирования.

Этапы 2–5 более подробно описаны ниже на примере задачи отыскания относительных натуральных величин архитектурного сооружения по его изображению при двух точках схода.

Отыскание относительных натуральных величин архитектурного сооружения по его изображению при одной и трех точках схода производится аналогичным образом.

Задача отыскания относительных натуральных величин при двух точках схода. Первоначально экспертом на фотографии указываются опорные точки A, B, C, D, E, M для дальнейшего отыскания точек схода. Таким образом, намечаются основные отрезки (AC, BD, AE, BM), прямые линии которых будут уходить в перспективу. Точки пересечения этих прямых и есть точки схода ($O_1=AC\cap BD, O_2=AE\cap BM$).

С помощью точек схода O_1 и O_2 в дальнейшем будут находиться другие величины для реконструкции сооружения (Рисунок 1).

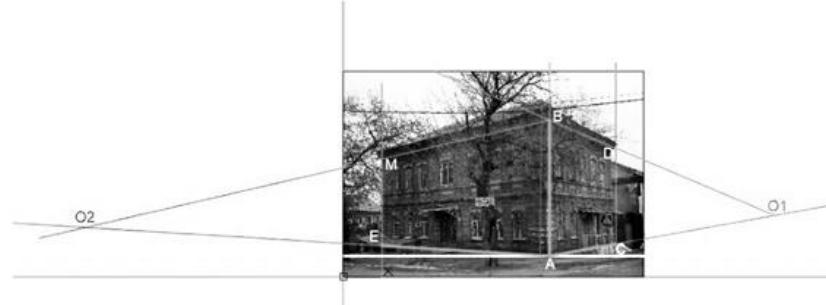


Рисунок 1 – Построение точек схода

Далее для отыскания двух точек схода, их следует выровнять так, чтобы они лежали на одной линии (линии горизонта). Алгоритм отыскания линии

горизонта имеет следующий вид:

- 1) проводится линия основания картины k_1 из точки A параллельно оси x , аналитически прямая k_1 будет задана уравнением:

$$y = y_A. \quad (1)$$

- 2) находится среднее арифметическое h длин высот h_1 и h_2 (Рисунок 2):

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2}. \quad (2)$$

- 3) проводится линия горизонта, уравнение которой имеет вид: $y = h$;
- 4) находятся новые точки O_1 и O_2 : O_1 – является точкой пересечения AC с линией горизонта, O_2 – является точкой пересечения AE с линией горизонта, из соответствующих систем уравнений находим их координаты:

$$\begin{aligned} O_1 &\left(x_A + \frac{(h - y_A)(x_C - x_A)}{y_C - y_A}; h \right); \\ O_2 &\left(x_A + \frac{(h - y_A)(x_E - x_A)}{y_E - y_A}; h \right). \end{aligned} \quad (3)$$

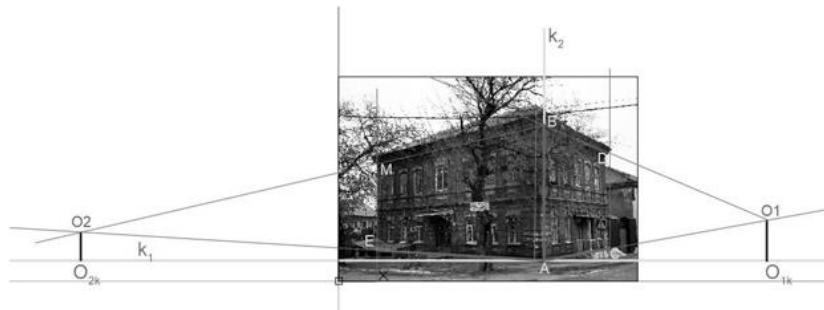


Рисунок 2 – Выравнивание точек схода по линии горизонта

Определение точки зрения. Точка зрения S – это точка, определяющая расстояния от уровня зрения до картинной плоскости. Она находится в точке пересечения двух окружностей. Построим первую окружность через точки O_1 и O_2 с диаметром равным O_1O_2 .

Для того, чтобы построить вторую окружность, из точки O_1 проводится прямая f параллельная прямой AB . Из точки A проводится прямая через точку D до пересечения с прямой f . Точку пересечения назовем F . Построим окружность в центре O_1 радиусом O_1F .

Таким образом, $S = O_1O_2 \cap O_1F$. Из точки S опускаем перпендикуляр на прямую h , и находим высоту точки зрения (высота горизонта) равную SP (Рисунок 3).

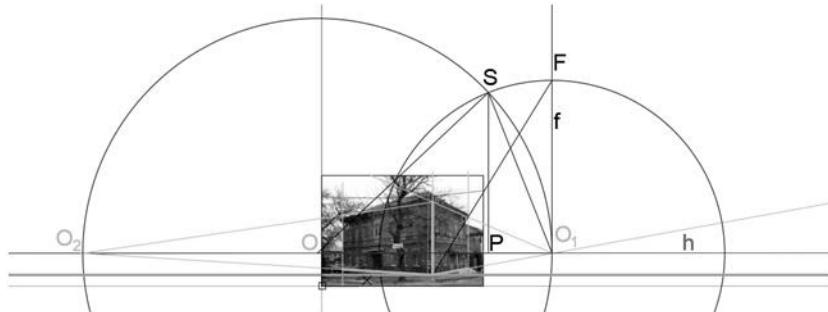


Рисунок 3 – Отыскание точки зрения S

Отыскание относительных натуральных величин. Точки схода O_1 и O_2 , а также точка зрения S являются основными точками, помогающими определить относительные натуральные величины перспективных линий архитектурного сооружения, изображенных на фотографии. Относительными они считаются до тех пор, пока не указан один из физических размеров указанного архитектурного сооружения.

Основной блок архитектурного сооружения, изображенного на фотографии, в упрощенном виде представляет собой параллелепипед. Ширина этого параллелепипеда – AE , глубина – AC , высота – AB .

Так как AB – величина относительная натуральная, то остается определить относительные натуральные величины ширины и глубины:

- 1) через точку А проводится прямая m параллельная прямой O_2S ;
 - 2) для определения относительной натуральной величины ширины AE проводится из точки S прямая через точку E ; находится её точка пересечения с m ; отрезок AE_m является натуральной величиной отрезка AE .

Проведем аналогичные рассуждения для отыскания относительной натуральной величины отрезка AC .

Таким образом, относительные натуральные величины основного блока здания найдены (Рисунок 4).

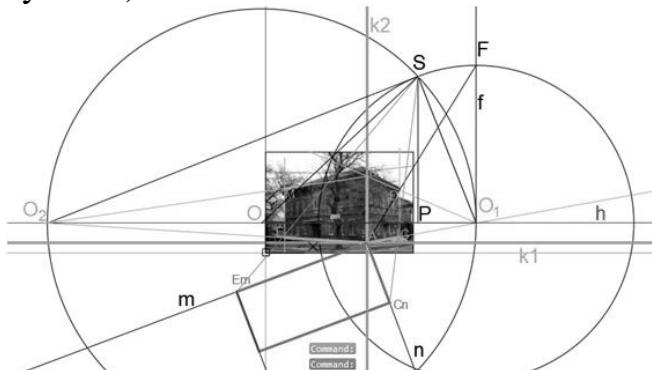


Рисунок 4 – Отыскание относительных натуральных величин основного блока архитектурного сооружения

Задача реконструкции кривой линии как формообразующего элемента с применением интерполяционного метода. Задача отыскания относительной натуральной величины криволинейного элемента,

изображенного на фотографии, в общих случаях сводится к проецированию точек, указанных в качестве опорных и соединению их гладкой кривой (Рисунок 5).

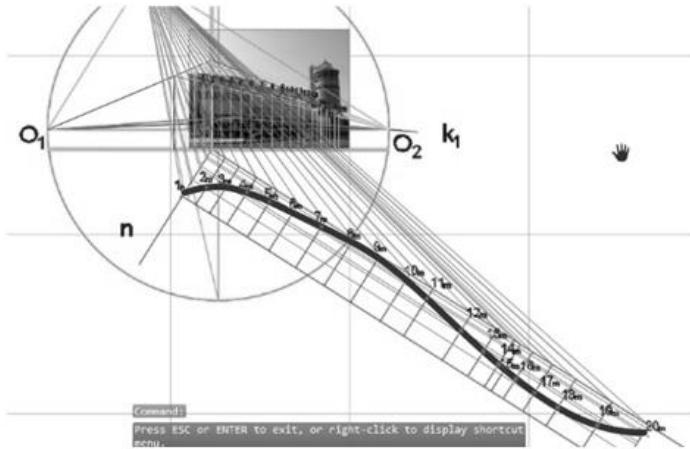


Рисунок 5 – Отыскание относительной натуральной величины кривой линии фасада Донецк-Сити

Для построения искомой кривой был выбран метод интерполяции при помощи многочлена Лагранжа. Пусть имеется набор точек, принадлежащих кривой: $(x_1; y_1), (x_2; y_2), \dots, (x_n; y_n)$. Такие точки называются узловыми. По этим данным необходимо найти приближенное значение функции в точках, отличных от узловых.

Интерполяционный многочлен Лагранжа имеет вид:

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n \frac{\omega(x)}{(x-x_i)\omega'(x_i)} y_i, \quad (4)$$

где

$$\omega(x) = (x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_n), \quad (5)$$

$$\omega'(x) = (x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n). \quad (6)$$

Для удобства вычислений переведём формулы в безразмерных переменных:

$$\frac{(x-x_0)}{h} = t, \quad x_k - x_{k-1} = h, \quad k = \overline{1, n}, \quad \frac{(x_i-x_k)}{h} = i - k, \quad i, k \in \{0, n\}. \quad (7)$$

Тогда формула (4) запишется в виде:

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n \frac{(t-(i+1)) \dots (t-n)(t-0)(t-1) \dots (t-(i-1))}{(i-(i+1)) \dots (i-n)(i-0)(i-1) \dots (i-(i-1))} y_i. \quad (8)$$

Показано, что использование интерполяционного многочлена Лагранжа дает возможность обеспечить высокоточную реконструкцию кривых линий при решении поставленной задачи независимо от среды компьютерной реализации алгоритма.

Таким образом, доказано, что предложенный вычислительный алгоритм синтеза моделей трехмерных архитектурных объектов по их изображениям с использованием метода перспективных масштабов дает относительно простой, но качественный практический инструмент решения поставленной задачи в

условиях ограниченного объема входных данных.

Третий раздел «Компьютерные средства синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям с применением метода перспективных масштабов» посвящен разработке компьютерной реализации предложенного вычислительного алгоритма. В результате получен комплекс программ, включающий:

- программу на языке AutoLISP, встроенным в среду AutoCAD, и позволяющем разработать программу для выполнения любых геометрических построений;
- набор формул в OpenOffice Calc для расчетов координат точек при построении кривых линий в качестве формообразующих элементов.

Входной информацией для создания трехмерной модели является графический файл, содержащий фотографию или другое изображение архитектурного сооружения, импортированные в рабочую среду AutoCAD.

Структура программы соответствует описанию алгоритма, приведенному во втором разделе.

При отыскании точек схода и опорных точек элементов модели действия выполняются в графическом диалоге, точность реконструкции трехмерной модели зависит от правильности указания этих точек.

Для первичного построения трехмерной модели архитектурного сооружения, с учетом имеющейся дополнительной информации об объекте, одного изображения может оказаться достаточно. Для дальнейшего уточнения модели возможен импорт других изображений, при их наличии.

Проведено испытание программного комплекса для моделирования эталонного объекта, а также было сделано сравнение полученной модели эталонного объекта с моделью, сгенерированной в фотограмметрическом редакторе. Модель, полученная с помощью разработанного программного комплекса, отличается лучшими качественными характеристиками, по сравнению с моделью, построенной в одной из самых популярных систем – Autodesk ReCap Photo (Рисунок 6) и соответствует натурным измерениям эталонного объекта.

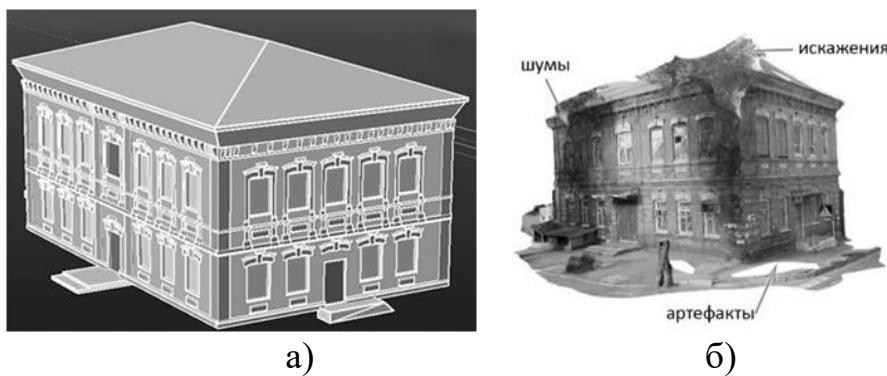


Рисунок 6 – Сравнение результатов моделирования: а) модель, полученная с помощью разработанного программного комплекса; б) модель, сгенерированная в редакторе Autodesk ReCap Photo

Отмечено, что в общем случае полученные результаты могут содержать шумы и искажения, поэтому может потребоваться дальнейшее редактирование полученной модели (Рисунок 6б). Кроме того, для получения полной модели на рисунке 6б потребовалось 20 фотографий с разных ракурсов, которые невозможно отыскать для реконструкции утраченных сооружений.

Четвертый раздел «Применение комплекса программ синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям с применением метода перспективных масштабов» посвящен применению разработанного комплекса программ синтеза моделей трехмерных объектов архитектуры по их изображениям для практической реконструкции моделей частично утраченного дома Юза-Свицына, полностью утраченного дома Бальфура, а также сохранившегося дома Горелика (г. Донецк).

Реконструкция проводилась по нескольким изображениям объектов в целях определения адекватности разработанного комплекса программ в условиях ограниченного использования иконографического материала.

Результаты моделирования показаны на рисунках 7–11.

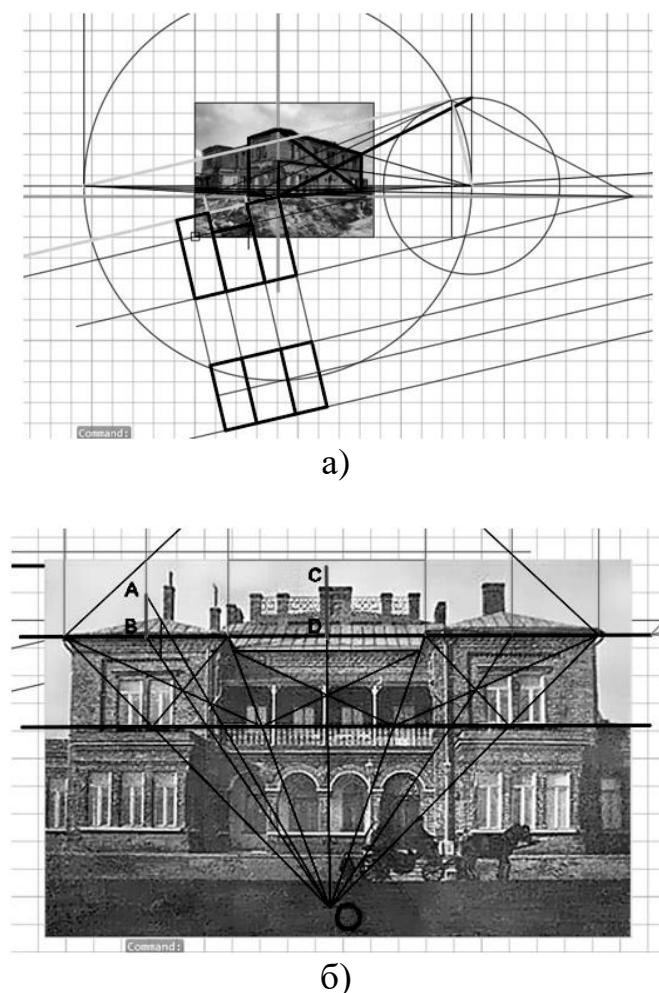
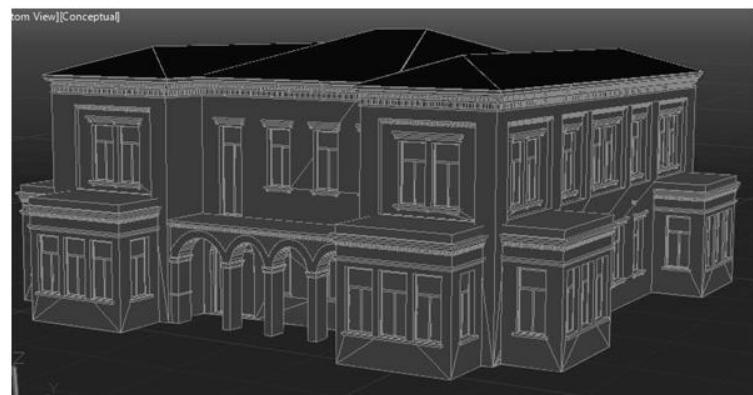


Рисунок 7 – Этапы моделирования дома Юза-Свицына: а) отыскание относительных натуральных величин общего блока дома; б) отыскание относительных натуральных величин крыши

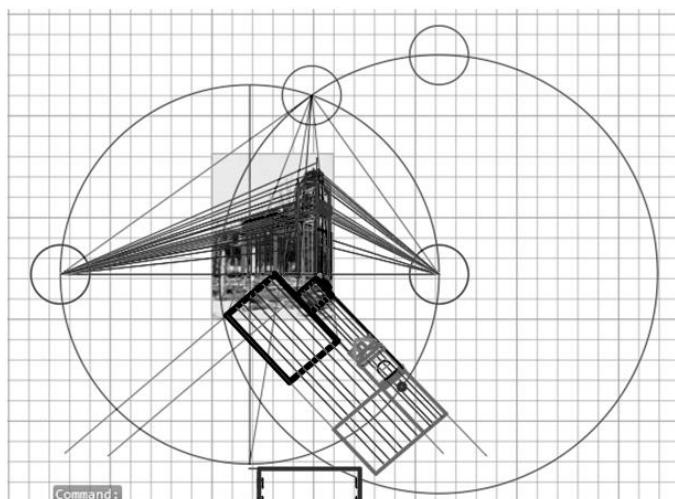


в)



г)

Рисунок 8 – Этапы моделирования дома Юза-Свицына: в) модель дома в среде AutoCAD; г) визуализация модели дома



а)



б)

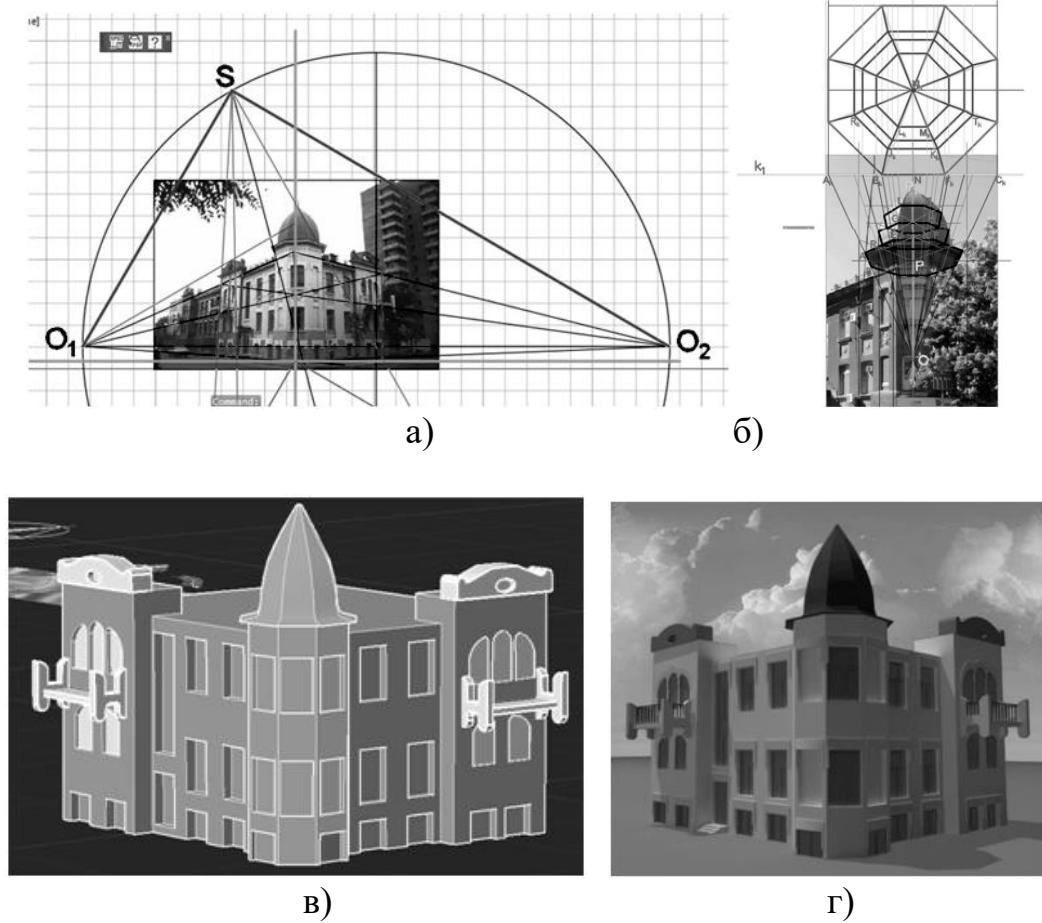
Рисунок 9 – Этапы моделирования дома Бальфура: а) отыскание относительных натуральных величин общего блока дома; б) определение кривых линий



в)

г)

Рисунок 10 – Этапы моделирования дома Бальфура: в) модель дома в среде AutoCAD; г) визуализация модели дома



в)

г)

Рисунок 11 – Этапы моделирования дома Горелика: а) отыскание относительных натуральных величин общего блока дома; б) отыскание относительных натуральных величин крыши; в) модель дома в среде AutoCAD; г) визуализация модели дома

Таким образом, доказано, что применение разработанных компьютерных средств реконструкции моделей зданий с использованием ограниченного

количества изображений объекта, позволяет получить качественную и пропорционально правильную трехмерную модель архитектурного сооружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение важной научно-практической задачи совершенствования вычислительных алгоритмов и компьютерных средств синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, позволяющих выполнить трехмерную реконструкцию моделей, используя ограниченное количество иконографического материала.

Основные научные результаты, полученные в работе, следующие.

1. Проанализированы основные методы реконструкции моделей трехмерных объектов по их изображениям, проведена их классификация по способу синтеза моделей. Выявлено, что известные методы не в полной мере отвечают требованиям синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, таким как качество получаемой модели, скорость генерации, возможность работы с ограниченным иконографическим материалом, возможность построения модели, содержащей кривые поверхности.

2. Разработан новый вычислительный алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов архитектурных сооружений по их изображениям, основанный на методе перспективных масштабов, который определяет пропорциональную зависимость между элементами трехмерной модели, использует интерполяционный метод для построения кривых как формообразующих элементов, что является важным при создании сложных архитектурных деталей либо кривых фасадов, позволяющий проводить высокую точность построений при ограниченном количестве фотоизображений, и не требующих дополнительных итераций для уточнения. Доказано, что предложенный вычислительный алгоритм синтеза моделей трехмерных архитектурных объектов по их изображениям с использованием метода перспективных масштабов дает относительно простой, но качественный практический инструмент решения поставленной задачи в условиях ограниченного объема входных данных. Вычислительный алгоритм может применяться в уже существующих графических средах, и использоваться проектировщиками для трехмерной реконструкции объекта даже по одиночному изображению с учетом имеющейся дополнительной информации об объекте.

3. Разработана компьютерная реализация предложенного вычислительного алгоритма синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, включающая следующий комплекс программ: программа на языке AutoLISP, встроенном в графическую среду AutoCAD; набор формул в OpenOffice Calc для расчетов координат точек при построении кривых линий в качестве формообразующих элементов. Установлено, что с помощью

разработанного комплекса программ обозначаются базовые линии для дальнейшего создания архитектурных чертежей, а также синтезируется трехмерная модель архитектурного сооружения. Доказано, что применение разработанных компьютерных средств реконструкции моделей зданий с использованием ограниченного количества изображений объекта, позволяет получить качественную и пропорционально правильную трехмерную модель архитектурного сооружения.

4. Экспериментальное исследование программного комплекса при моделировании различных объектов архитектуры показало, что полученная модель отличается лучшими качественными характеристиками (без искажений и шумов) по сравнению с моделью, полученной с применением традиционно используемых систем. Приведены результаты применения комплекса программ синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям на примере частично утраченного памятника архитектуры г. Донецка дома Юза-Свицына, полностью утраченного дома Бальфура, а также сохранившегося дома Горелика. Сделаны выводы об ограничениях в работе комплекса программ синтеза моделей трехмерных объектов, которые в дальнейшем могут быть уточнены и устраниены.

5. Результаты исследований внедрены в научно-методическом отделе по охране памятников истории и культуры Государственного учреждения культуры «Донецкий республиканский краеведческий музей» при выполнении работ по созданию виртуальной реконструкции Старой Юзовки, в учебный процесс ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (справка №29-22/16 от 26.12.19) при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по дисциплине «Графическое и геометрическое моделирование» для бакалавров кафедры «Компьютерное моделирование и дизайн» по направлению подготовки 09.03.02 «Информационные системы и технологии», а также в научно-исследовательскую госбюджетную работу кафедры компьютерного моделирования и дизайна Н8-16 «Методы и средства компьютерного моделирования объектов, систем и процессов» (справка №29-4/16 от 04.03.21).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– публикации в рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук ДНР:

1. **Руденко, М.П.** Алгоритм трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению методом перспективных масштабов / **М.П. Руденко** // Информатика и кибернетика, Донецк, ДонНТУ, 2019. – №2(16). – С. 89-95.

2. Руденко, М.П. Моделирование сложных элементов архитектурных сооружений методом перспективных масштабов / М.П. Руденко // Информатика и кибернетика, Донецк, ДонНТУ, 2019. – №3(17). – С. 30-37.
3. Руденко, М.П. Усовершенствованный алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям/ М.П. Руденко, А.А. Бабакина, В.В. Карабчевский // Проблемы искусственного интеллекта, Донецк, ГУ ИПИИ, 2020. – №1 (16). – С. 75-88.
4. Руденко, М.П. Алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям с использованием перспективы с одной и тремя точками схода / М.П. Руденко//Проблемы искусственного интеллекта, Донецк, ГУ ИПИИ, 2020. – №2 (17). – С. 83-93.
 - публикации в других научных изданиях:
5. Руденко, М.П. Способы виртуальной реконструкции памятников архитектуры / М.П. Руденко // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, Донецк, ДонНТУ, 2015. – №1(8) - 2(9). – С. 110-117.
6. Руденко, М.П. Инструментальные средства виртуальной реконструкции утраченных памятников архитектуры / М.П. Руденко // Информатика и кибернетика, Донецк, ДонНТУ, 2016. – №2(4). – С. 62-67.
7. Руденко, М.П. Трехмерная реконструкция утраченных памятников архитектуры по фотографическому изображению методом перспективных масштабов / М.П. Руденко // Информатика и кибернетика, Донецк, ДонНТУ, 2018. – №2(12). – С. 64-68.
 - публикации по материалам научных конференций:
8. Rudenko, M.P. Computer modeling in architecture and design / M.P. Rudenko // Young Scientists' Researchers and Achievements in Science: Матеріали регіональної міжвузівської науково-технічної конференції для молодих вчених. м.Донецьк, 18 квітня2013р.– Донецьк: ДонНТУ, 2013. – С. 122-128.
9. Rudenko, M.P. Softwares For The Lost Architectural Monuments 3d Reconstruction / M.P. Rudenko // Young Scientists' Researchers and Achievements in Science: Тезисы докладов научно-технической конференции для молодых ученых. /г. Донецк, 14 апреля 2016 г. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – С. 68-75.
10. Руденко, М.П. Алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям на примере трехмерной реконструкции архитектурных сооружений/ М.П. Руденко // Информационное пространство Донбасса: проблемы и перспективы: материалы II Респ. с междунар. участием науч.-практ. конф., 31 окт. 2019 г. – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2019. – С. 253-256.
11. Руденко, М.П. Применение алгоритма синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям при трехмерной реконструкции архитектурных сооружений / М.П. Руденко // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: материалы VII Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции

молодых исследователей, Волгоград, 20 - 25 апреля 2020 г. – М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Волгогр. гос. техн. ун-т. Волгоград: ВолГГТУ, 2020. – С. 384-385.

12. **Руденко, М.П.** Реконструкция утраченных архитектурных сооружений с использованием алгоритма синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям/ **М.П. Руденко**, В.В. Карабчевский // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию СГТУ, «Геометрическое и компьютерное моделирование в подготовке специалистов для цифровой экономики» / г.Саратов, 2020. – С. 79-84.

13. Мажаев, А.В. Визуализация решения геометрических построений и поиска натуральных величин трехмерного объекта / А.В. Мажаев, **М.П. Руденко** // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование в рамках VI форума «Иновационные перспективы Донбасса» (ИУСМКМ – 2020): XI Международная научно-техническая конференция, 27-28 мая 2020, г. Донецк: – Донецк: ДОННТУ, 2020. – С.297-300.

14. **Руденко, М.П.** Виртуальная реконструкция утраченных памятников архитектуры с применением алгоритма синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям / **М.П. Руденко** // Искусственный интеллект: теоретические аспекты, практическое применение: материалы Донецкого международного научного круглого стола. – ГУ ИПИИ / г.Донецк, 2020. – С. 170-175.

АННОТАЦИЯ

Руденко М. П. Вычислительные алгоритмы и компьютерные средства синтеза моделей трехмерных объектов по их изображению. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) – ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Донецк, 2021 г.

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение научно-практических задач совершенствования вычислительных алгоритмов и компьютерных средств синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, позволяющих выполнить трехмерную реконструкцию моделей архитектурных сооружений, используя ограниченное количество иконографического материала.

Предложен новый вычислительный алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, основанный на методе перспективных масштабов, позволяющий создать реконструкцию объекта по одиночному изображению с учетом имеющейся дополнительной информации о нем, и использующий интерполяционный метод для построения кривых как формообразующих элементов.

С использованием разработанного вычислительного алгоритма был создан комплекс программ, обеспечивающий решение таких задач, как определение точек схода архитектурного сооружения на фотографии; определение относительных натуральных величин отрезков, отмеченных на изображении архитектурного сооружения; построение трехмерной модели архитектурного сооружения; обозначение базовых линий для дальнейшего создания архитектурных чертежей; и позволяющий с высокой точностью выполнять трехмерную реконструкцию архитектурных сооружений.

Приведены результаты применения комплекса программ синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям на примере частично утраченного памятника архитектуры г. Донецка дома Юза-Свицьина, полностью утраченного дома Бальфура, а также сохранившегося дома Горелика.

Ключевые слова: вычислительные алгоритмы, трехмерное моделирование, фотограмметрия, архитектурное сооружение, архитектурная реконструкция, перспективные масштабы, AutoCAD, трехмерная модель, геометрическое моделирование.

ANNOTATION

Rudenko M. P. **Computational Algorithms and Tools for the synthesis of three-dimensional objects models from their image.** - Manuscript.

Candidate's Thesis in Engineering Science by specialty 05.13.18 - Mathematical modeling, numerical methods and software complexes (technical sciences) - STATE HIGHER EDUCATIONAL ESTABLISHMENT "DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY", Donetsk, 2021.

In the dissertation work, a theoretical justification is given and the solution of scientific and practical problems of improving computational algorithms and computer tools for synthesizing models of three-dimensional objects from their images is given, which allows three-dimensional reconstruction of models of architectural structures using a limited amount of iconographic material.

A new computational algorithm for synthesizing models of three-dimensional objects from their images is proposed, based on the method of perspective scales, which makes it possible to create a reconstruction of an object from a single image, taking into account the available additional information about it, and using an interpolation method to construct curves as form-generating elements.

Using the developed computational algorithm, a complex of programs was created that provides the solution of such problems as determining the vanishing points of an architectural structure in a photograph; determination of the relative natural values of the segments marked on the image of the architectural structure; building a three-dimensional model of an architectural structure; designation of baselines for the further creation of architectural drawings; and allows high-precision three-dimensional reconstruction of architectural structures.

The results of the application of a complex of programs for the synthesis of models of three-dimensional objects from their images are presented on the example

of a partially lost architectural monument of Donetsk, the house of Yuza-Svitsyn, the completely lost house of Balfour, as well as the preserved house of Gorelik.

Keywords: computational algorithms, three-dimensional modeling, photogrammetric, architectural construction, architectural reconstruction, perspective scales, AutoCAD, three-dimensional model, geometric modeling.