

На правах рукописи

**Медведева Диана Евгеньевна**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕРАКТИВНОЙ  
ТРЕХМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ  
СОПОСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО  
КЛЮЧЕВЫМ ТОЧКАМ ПРИ  
МАСШТАБИРУЕМОСТИ И ВРАЩЕНИИ  
ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.13.11 – Математическое и программное  
обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных  
сетей

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

Научный руководитель: **Ревунков Георгий Иванович**  
кандидат технических наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, доцент

Официальные оппоненты: **Толок Алексей Вячеславович**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, главный научный сотрудник

**Шелагурова Марина Сергеевна**  
кандидат технических наук, доцент, АО Раменское приборостроительное конструкторское бюро, начальник сектора научно-исследовательского отдела по разработке программных продуктов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Защита состоится «25» марта 2020 г. в 13.00 на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.216.02 при МГТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, зал Ученого совета ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте <http://bmstu.ru>.

Отзыв об автореферате в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 999.216.02.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 999.216.02  
доктор технических наук, доцент

А.Н. Алфимцев

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Для решения проблемы дефицита наглядности и достижения максимально реалистичной визуализации с 2000-х годов начали использоваться информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) создания интерфейсов трёхмерной интерактивной визуализации. Технологии позволяют производить сопоставление и анализа изображений для решения прикладных задач строительства, промышленного моделирования и оценки функциональности изделия еще до запуска в массовое производство, для нахождения координат формы и размеров 3D-объектов на поверхности Земли.

Создание трёхмерной сцены из двух и более изображений относится к одним из наиболее сложных задач компьютерной обработки изображений. В качестве исходных данных всегда будет выступать набор изображений, отснятых зачастую под разным углом, на разном фокусном расстоянии, а также при различном направлении попадания освещающего луча. Если провести сопоставление изображения без их предварительной обработки, полученная реконструкция сцены будет сильно отличаться от идеальной, а также обладать рядом пространственных визуальных дефектов [1]. Следовательно, для получения максимально правдоподобной и качественной 3D модели, необходимо решить основополагающую задачу компьютерного зрения – проанализировать и сопоставить точечные характеристики изображения.

Значимый вклад в исследование методов и алгоритмов восстановления трёхмерных моделей сцен по разноракурсным изображениям внесли отечественные ученые, такие как И.С. Грузман, О.А. Гомозов, А.Л. Резник, В.А. Колмогоров и зарубежные исследователи, такие как Д. Лове, А. Деланой, Д. Кэмпбелл, Э. Цисерман, Д. Форсайт и другие.

Актуальность исследования заключается в том, сейчас нет универсальных методик сопоставления точечных характеристик, инвариантных к различным проективным преобразованиям. Предложенный подход позволяет повысить эффективность реконструкции трехмерной модели сцены или рельефа, полученной путем съемки сцены/рельефа с разных точек обзора, на различном фокусном расстоянии, при различной освещенности.

**Объектом исследования** является интерактивная трёхмерная визуализация.

**Предметом исследования** являются модели и алгоритмы интерактивной трехмерной визуализации для сопоставления разноракурсных изображений по ключевым точкам с учетом эпиполярных ограничений.

**Целью** работы является повышения эффективности восстановления трехмерной модели сцены или рельефа местности.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Разработка алгоритма сопоставления разноракурсных изображений, использующего основы эпиполярной геометрии, без выравнивания изображений вдоль эпиполярных прямых при известных / неизвестных параметрах камеры

2. Разработка алгоритма для вычисления фундаментальной матрицы по  $N$  числу соответствующих точек ( $N < 16$ ), который позволит обеспечить повышение точности и надежности задания эпиполярных ограничений

3. Разработка алгоритма для реконструкции трёхмерных моделей сцен и рельефа местности, позволяющего снизить число ошибок сопоставления с учетом эпиполярных ограничений. Проведение эксперимента для подтверждения результатов работы предложенного алгоритма.

#### **Научная новизна:**

1. Выявлены новые ограничения существующих моделей и алгоритмов формирования разноракурсных изображений для создания 3D моделей сцены и рельефа при масштабируемости и вращении объектов, и предложен новый алгоритм сопоставления разноракурсных изображений, который позволяет учитывать эпиполярные ограничения без ректификации.

2. Обоснован и разработан новый алгоритм выборочной фильтрации для исключения найденных на изображении неверных соответствующих точек, который, в отличие от существующих, позволил увеличить качество сопоставления 3D-сцен.

3. Предложен инновационный подход к автоматизации алгоритма сопоставления разноракурсных изображений на основе разработанной математической модели, что позволяет формировать карты диспарантности (высот) и реконструировать трёхмерные цифровые модели сцены и рельеф местности.

#### **Практическая значимость:**

1. Рекомендации по оптимизации алгоритма сопоставления изображений для повышения качества работы с пространственно-распределенной информацией.

2. Уменьшение числа ошибок сопоставлений и повышение точности и надежности задания эпиполярных ограничений путем вычисления параметров фундаментальной матрицы методом согласованной идентификации

3. Разработка программного комплекса, реализующего вычислительный алгоритм построения трёхмерных цифровых моделей сцен по разноракурсным изображениям (на базе библиотеки POB-Rey).

**Методы исследования.** В работе используется ряд алгоритмов формирования, обработки и сопоставления изображений, методы вычислительного моделирования и математической статистики. Для подтверждения результатов работы предложенного алгоритма сопоставления разноракурсных изображений, проведено экспериментальное исследование.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм сопоставления разноракурсных изображений, который позволяет учитывать эпиполярные ограничения, без выравнивания изображений вдоль эпиполярных прямых

2. Алгоритма для вычисления фундаментальной матрицы по  $N$  числу соответствующих точек ( $N < 16$ ), обеспечивающего повышение точности и надежности задания эпиполярных ограничений

3. Алгоритм выборочной фильтрации для исключения найденных на изображении неверных соответствующих точек и увеличения качества сопоставления 3D-сцен.

4. Алгоритм, реализующий информационную технологию построения трёхмерных цифровых моделей сцен по разноракурсным изображениям (на базе библиотеки POB-Rey).

**Соответствие паспорту специальности.** Результаты исследования соответствуют пунктам:

1 - «Модели, методы и алгоритмы проектирования и анализа программ и программных систем, их эквивалентные преобразования, верификации и тестирования»,

7 - «Человеко-машинные интерфейсы; модели, методы, алгоритмы и программные средства машинной графики, визуализации, обработки изображений, систем виртуальной реальности, мультимедийного общения» паспорта научной специальности 05.13.11 -Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

**Достоверность** полученных в диссертационном исследовании результатов подтверждается математическими расчётами и вычислительными экспериментами. Достоверность выводов и рекомендаций, полученных в диссертации, обосновывается постановкой задачи в исследовании, регулярными экспериментами.

**Апробация работы.** Результаты, полученные в рамках диссертационного исследования моделей и алгоритмов по поиску соответствий на разноракурсных изображениях и реконструкции трёхмерных цифровых моделей сцен, докладывались на следующих конференциях: Международная конференция студентов и аспирантов SEE-2016 (март 2016), Конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика -2016» - Национальный Исследовательский Университет МИЭТ, Минобрнауки России (апрель 2016), 2017 Internet Technologies and Applications (ITA).

**Внедрение результатов работы.** Модели и алгоритмы, разработанные в исследовании, автором были предложены и протестированы в производственной деятельности компании ООО «ДжиИ Рус Инфра» в рамках научного проекта получения трехмерных моделей турбин для нефти-газовой промышленности «DaVinci Lab» Италия, Флоренция. Теоретические результаты исследования были внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Публикации и личный вклад автора.** Результаты исследования были изложены в 8 статьях, 2 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, а 1 — в журнале, входящим в международную научную базу цитирования Scopus. Все гласные результаты исследования получены автором лично.

**Объём и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 161 страниц с 62 рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит 112 наименования.

## **Содержание работы**

Во **введении** рассмотрена актуальность диссертационного исследования, сформулирована цель, поставлены задачи исследования, обоснована научная новизна и практическая ценность полученных результатов работы, приведены научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен обзор предметной области исследования, введена терминология, даны определения.

Приведено описание методов отслеживания точечных особенностей изображений, калибровки камеры и реконструкции трехмерных объектов, рассмотрены геометрические свойства модели перспективного проектирования. Введены понятия эпиполярной геометрии и эпиполярных ограничений. В качестве достоверного способа формирования изображения трехмерной сцены в компьютерном зрении использован принцип построения модели сцены в камере обскура.

Для удобства сопоставления изображений введено понятие соответствующих точек, которые должны удовлетворять следующим признакам:

1. Значимость и повторяемость. Соответствующие (характерные) точки должны быть существенно отличимыми от других точек изображения и уникальны для данного объекта.
2. Локальность. Соответствующие точки должны быть инварианты относительно изменения масштаба и ракурса.
3. Компактность и эффективность. На объекте должно быть несколько характерных точек, при этом окрестность точки должна быть небольшой.

Сформулировано ограничение на положение соответствующих точек  $m$  и  $m'$ , вытекающее из эпиполярной геометрии, что точка  $m'$ , соответствующая  $m$ , должна лежать на эпиполярной линии  $l'$ , соответствующей  $l$  - условие называется эпиполярным ограничением (Рис. 1). В однородных координатах условие того, что точка  $m$  лежит на линии  $l$  записывается как  $l^T m = 0$ . Эпиполярная линия проходит также через эпиполярную точку [3].

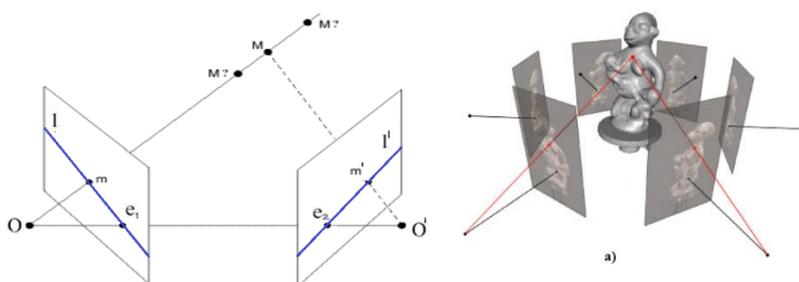


Рис. 1. Эпиполярная геометрия двух видов

Для того, чтобы сопоставить каждой соответствующей точке  $m$  некоторую эпиполярную прямую  $m \rightarrow l'$  и далее найти соответствующую ей точку вводится понятие фундаментальной матрицы  $F$ , которая не зависит от параметров камер, а задается за счет соответствия изображений, что позволяет вычислить матрицу по характерным точкам.

При фотосъемке изображений с разных точек зрения, изображение подвергается проективным искажениям как для нескольких изображений объекта, так по полю самого изображения. Таким образом, при сравнении

фрагментов изображения возникают сложности сопоставления. Традиционно, для решения данной проблемы используется ректификация - предварительная обработка изображений с целью выравнивания изображений вдоль эпиполярных прямых. Ректификация подразумевает преобразование изображения так, чтобы соответствующие точки объектов на изображении располагались в соответствующих строках (Рис. 2).

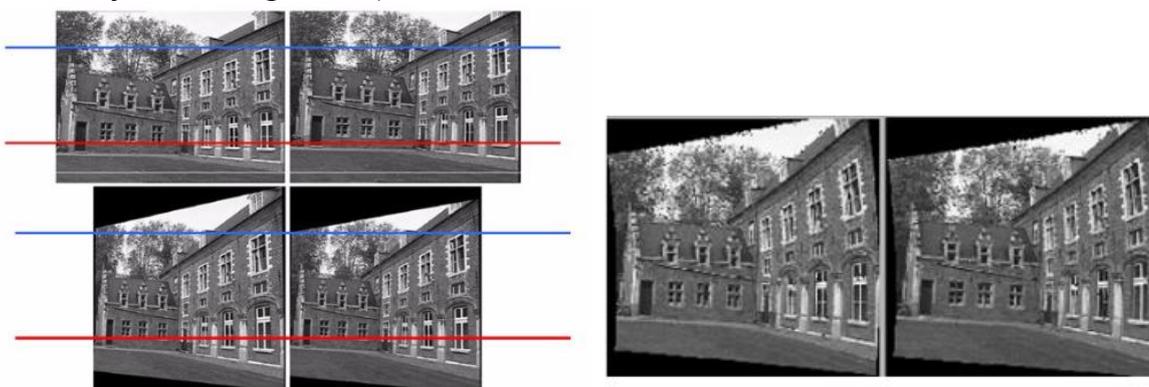


Рис. 2. Результат ректификации

Чтобы учесть различия масштаба объектов на изображениях, полученных при съемке с различных фокусных расстояний, на первом этапе ректификации соответствующий набор точек изображения подвергается коррекции, а именно сжатию, расширению или сдвигу. Далее производится базовая процедура ректификации. Применение такого подхода приводит к ряду сложностей, а именно, значительному искажению формы объекта на изображении, появлению дополнительных погрешностей.

Таким образом, в диссертационном исследовании необходимо описать алгоритм сопоставления изображений, позволяющий производить поиск соответствующих точек на исходных эпиполярных изображениях до проективных преобразований, что позволит избежать трансформации изображений, искажения формы объекта и появления дополнительных погрешностей при ректификации.

Для построения такой модели необходимо учесть некоторые аспекты, а именно, то, что эпиполярные линии на изображениях описаны уравнением прямой, где координаты являются вещественными числами. Следующий важный момент заключается в том, что соответствующие фрагменты на разноразмерных изображениях описываются функциями распределения яркости на дискретном множестве отсчетов изображений, которые определены с точностью до величины межпиксельного расстояния.

На основе описанной проблематики выявлены задачи диссертационного исследования, связанные с разработкой алгоритма сопоставления изображений, снятых с различных фокусных расстояний, и дальнейшая их реконструкция в трехмерную модель при исключении этапа ректификации для минимизации проективных искажений.

Во **второй главе** рассматривается математическая реализация алгоритмов сопоставления изображений и задание эпиполярных ограничений. В качестве

первого этапа алгоритма проводится предварительное сопоставление изображений путем определения масштабно-инвариантных характеристик. Для разноразмерных изображений сформируется пирамида изображений – набор изображений, полученных уменьшением разрешения в 2 раза (Рис. 3). Инвариантность относительно масштаба достигается за счет нахождения ключевых точек для исходного изображения, взятого в разных масштабах. Точка является ключевой, если она является локальным экстремумом разности гауссианов [4].

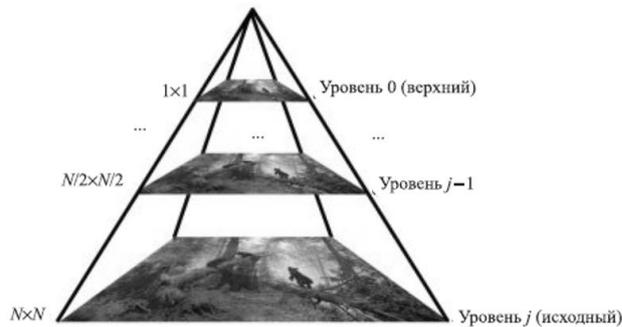


Рис. 3. Многомасштабного представления изображения. Нахождение локального экстремума

При условии, что известна фундаментальная матрица, которая, как один из вариантов, вычисляется по координатам точки геопривязки, может быть описана базовая модель сопоставления изображений с учетом эпиполярных ограничений. В данном случае подразумевается, что внешние и внутренние параметры камеры известны.

Для уменьшения влияния неравномерности проективных искажений по полю изображения и сокращения область поиска точек рассматриваются два способа задания эпиполярных ограничений. В первом случае вдоль эпиполярных линий выбираются точки с определенным шагом, для которых задаются окрестности. Для совокупности фрагментов вычисляется значение яркости. Обозначим значение яркостей для ряда элементарных квадратов  $N$   $I_k(a, b), \Gamma_k(a', b')$ , где  $k=\overline{1, N}$ , а  $(a, b), (a', b')$  – координаты точек, связанных с элементарным квадратом.

Меру схожести составных фрагментов двух изображении будет определяться, как (1):

$$G = \sum_{k=1}^N |I_k(a, b) - \Gamma_k(a', b')| \quad (1)$$

Возможна ситуация, когда не представляется возможным определить точку, для этого вводится понятие порога меры близости. Тогда, если минимальное значение  $J$  меньше порогового значения, предполагаем, что точка не определена. Таким образом, описано значение дескрипторов по признаку яркости.

Рассмотрим случаи дескрипторов по другим признакам, например, по градиенту. Существует два типа дескрипторов: инвариантные к повороту и неинвариантные [2].

1. Для дескрипторов, инвариантных к повороту величина интенсивности будет представлена как

$$I_k(a, b), \Gamma_k(a', b'), \quad (2)$$

где  $k = \overline{1, N}$ , а значение градиента описывается в следующем виде:

$$|\text{grad}I_k(a, b)|, |\text{grad}\Gamma_k(a', b')|, k = \overline{1, N} \quad (3)$$

2. Для дескрипторов неинвариантных к повороту, рассмотрим координаты  $(a, b)$  локальных градиентов.

$$\text{grad}_u I_k(a, b), \text{grad}_u \Gamma_k(a', b'), k = \overline{1, N} \quad (4)$$

$$\text{grad}_v I_k(a, b), \text{grad}_v \Gamma_k(a', b'), k = \overline{1, N} \quad (5)$$

При рассмотрении дескрипторов в таком виде уменьшается количество ошибок сопоставления, однако требуется вычисление градиентов по отношению к эпиполярным прямым. На Рис. 7 приводится пример реконструкции сцены по описанному выше алгоритму с использованием инвариантных и неинвариантных дескрипторов (3), (4), (5).

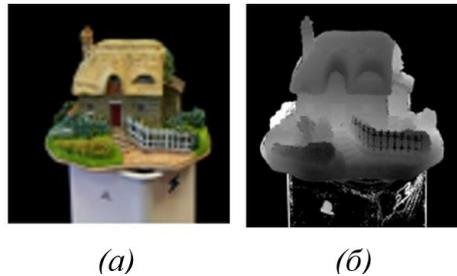


Рис. 7. а) - исходное и б) - реконструированное изображение

Опишем ситуацию, когда заданные направления эпиполярных линий очень близки.

Если  $(a, b)$  – координаты точек на первом изображении, учитывая сдвиг  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  относительно данных координат, координаты точек на втором изображении будут заданы как  $(a + \Delta a, b + \Delta b)$ . Опишем функции распределения яркости фрагментов на паре изображений как  $I(a, b)$  и  $I(a + \Delta a, b + \Delta b)$ . Найдем для каждой точки  $(a, b)$  соответствующую ей точку  $(a + \Delta a, b + \Delta b)$ , определив меру близости квадратичной нормой (6):

$$e(a, b, \Delta a, b, \Delta b) = \|I(a, b) - I(a + \Delta a, b + \Delta b)\| \quad (6)$$

Определим значение координат  $(a + \Delta a, b + \Delta b)$  для точки  $(a, b)$  путем минимизации критерия близости (6) за счет перебора вероятного множества сдвигов в определенной области точки:

$$E(a_0, b_0, \Delta a, \Delta b) = \sum_{(a, b) \in Z(a_0, b_0)} h(u, v) e(a, \Delta a, b, \Delta b) \quad (7)$$

где  $Z(a_0, b_0)$  – фиксированная зона точки  $(a_0, b_0)$ , при этом для увеличения качества сопоставления точек на изображениях, используется весовая функция  $h(a, b)$ . При сопоставлении точек изображения в условиях эпиполярных ограничений, необходимо принять во внимание ряд факторов, таких как проективные искажения, а также неверное задание координат точек,

находящихся на эиполярных линиях по причине дискретизации. Таким образом, необходимо включить вышеописанные условия в весовую функцию  $h(a, b)$  (8):

$$h(a, b) = w_a w_b w_c \quad (8)$$

где  $w_a$ ,  $w_b$  – коэффициенты, которые учитывают возможное воздействие проективных неточностей,  $w_c$  – параметр, который гарантирует возможную близость расположения точки относительно эиполярной прямой, так как маловероятно, что точка точно будет находиться на эиполярной линии. Для увеличения качества сопоставления изображений необходимо подобрать коэффициенты весовой функции таким образом, чтобы их произведение сократило влияние проективных неточностей, а также гарантировало нахождение токи максимально близко к эиполярной линии. Определим коэффициенты, учитывающие влияние проективных искажений в следующей форме:

$$w_a = \exp\{-\|(a_0, b_0) - (a, b)\|^2\}, (a, b) \in Z \quad (9)$$

$$w_b = \exp\{-\|I(a_0, b_0) - \Gamma(a, b)\|^2\}, (a, b) \in Z \quad (10)$$

Коэффициент  $w_b$  используется для того, чтобы уменьшить влияние проективных искажений на качество сопоставления. Известно, что, чем дальше удалена точка от центра фрагмента, тем сильнее на нее влияют проективные искажения. Так использование параметра  $w_b$  позволяет охватывать информацию всего фрагмента целиком, не принимая во внимание проективные искажения. Можно отметить, что размер анализируемой области становится меньше.

В отличии от параметра  $w_b$ , учитывающего проективные искажения, коэффициент  $w_a$  повышает качество сопоставления изображений за счет анализа яркости фрагментов. Такой подход позволяет увеличить анализируемую область фрагмента, при условии, что яркость в области точки  $(u_0, v_0)$  распределена равномерно. Отметим, что для эффективного сопоставления необходимо принимать во внимания оба параметра, так как информация об области распределения проективных искажений может отсутствовать.

Коэффициент, учитывающий эиполярные ограничения, будет описан как:

$$w_c = \exp\{-d((a', b'), l')\} = \exp\left\{\frac{|aa' + bb' + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right\} \quad (11)$$

Чтобы улучшить качество сопоставления изображений в условиях эиполярных ограничений рассмотрим алгоритм выборочной фильтрации.

Проведем поиск соответствующих точек на эиполярных прямых  $l$  и  $l'$ . Проверим ориентацию изображений так, чтобы направление эиполярных линий совпадало. По эиполярным прямым выстроим последовательность натуральных чисел  $D$  и  $D'$  соответственно. Найдем для каждой точки из множества  $N$ , принадлежащей эиполярной прямой  $l$ , соответствующую ей точка из множества  $M$  на эиполярной прямой  $l'$ . Процесс сопоставления будет проходить в три этапа:

1. Первым этапом является массовое сопоставление с порогом  $t_1$ , который задается так, чтобы свести к нулю ложные сопоставления. Сравниваются все точки из множества  $N$ , и для них строятся

последовательность  $C$ . Если  $d_1(i) \in D_1$ , а  $d_2(j) \in D_2$ , точки, соответствующие заданному пороговому значению, то  $C(i) \in J$ , если такая точка не найдена, то  $C(i) = 0$ . Таким образом, будет получена последовательность  $C$  натуральных чисел длиной  $N$  из множества  $M$ . Однако, так как идет поиск по всей прямой, в данной последовательности возможно присутствие нулей, что говорит об ошибочных сопоставлениях.

2. Следующим этапом является устранение неверных соответствий – нулевых значений. Таким образом будет получена некоторая возрастающая последовательность. Если в последовательности будет обнаружено нарушение условия монотонного неубывания, то такие значения будут отсеяны прореживающей маской.

Процесс определения соответствия, не удовлетворяющего начальному условию, определим следующим образом:

- для каждого отрезка описывается вариационный ряд и проверяется, является ли он убывающим, если найдено нарушение, такое значение заменяется нулевым,
- для минимизации неверных соответствий формируем последовательность  $\hat{C}$ , в которой была произведена замена всех ненулевых величин согласно результату прореживающей маски.

3. Заключительным этапом является проверка всех ранее удаленных нулевых соответствий, так как есть вероятность того, что были исключены верные значения. Для этого в радиусе  $k$  для каждого удаленного элемента последовательности  $\hat{C}$  проверяется значение  $\hat{c}(i - k)$ ,  $\hat{c}(i + k)$ . При этом, если было обнаружено ненулевое значение в заданной окрестности, то устанавливается соответствие для  $d_1(i) \in D_1$ , среди множества точек  $d_2(j) \in D_2$ , где  $j$  принадлежит области  $\hat{c}(i - k) \leq j \leq \hat{c}(i + k)$ . Если в процессе поиска не были обнаружены соответствия, то область  $k$  может варьироваться до тех пор, пока не будет найдено соответствие.

В третьей главе описана методика реализации теоретического решения. Проведено экспериментальное исследование разработанного алгоритма (Рис. 8) на 700 тестовых разноракурсных изображениях. Для количественной оценки качества реконструкции использовалось число пикселей, которым не было найдено соответствие в процессе сопоставления изображений.

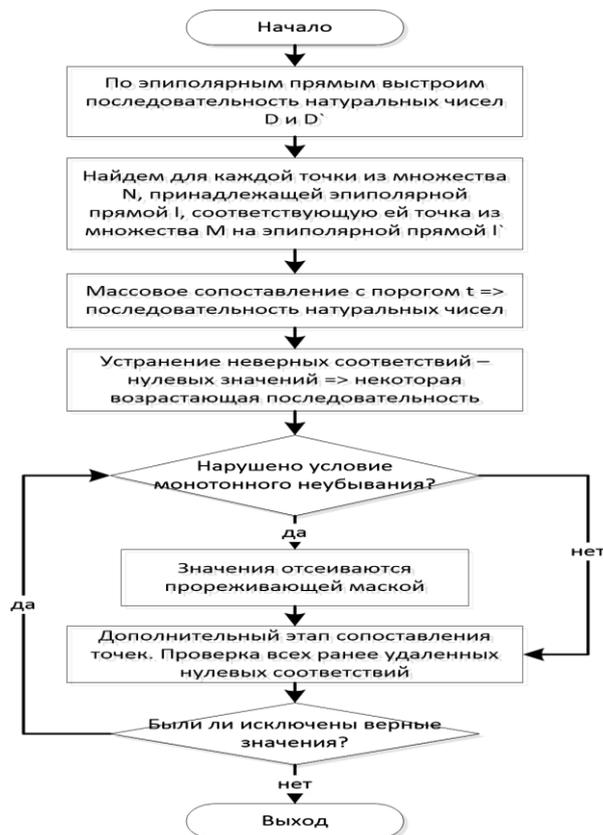


Рис. 8. Алгоритм выборочной фильтрации

В Таблице 1 приведено число ошибочных пикселей, в скобках после абсолютного числа пикселей приведено также их относительное число в процентах к общему числу оцениваемых пикселей.

Таблица 1. Ложные соответствия в процентном соотношении

| Освещение при съемке | С применением алгоритма выборочной фильтрации | Без алгоритма выборочной фильтрации |
|----------------------|---|-------------------------------------|
| Естественный свет    | 20185 (~7,2%)                                 | 42882 (~19%)                        |
| Лабораторная съемка  | 14334 (~5,5%)                                 | 43094 (~18%)                        |

Рассмотрим случай, когда конструктивные параметры и центры камер неизвестны и фундаментальная матрица может быть оценена по соответствующим точкам. Традиционно используют алгоритм случайных выборок, который не теряет эффективность при большом количестве ложных сопоставлений. Но алгоритм необходимо использовать, когда имеется много наблюдений и неверные соответствия не повлияют на результат сопоставления. В диссертационной работе описан метод согласованной идентификации по небольшому количеству наблюдений. Данная задача возникает в тех случаях, когда на изображении большую часть (более 80%) занимает фон или однородная поверхность. Для пары двух изображений, алгоритм нахождения наиболее согласованного множества подсистем формулируется следующим образом (Рис. 9).

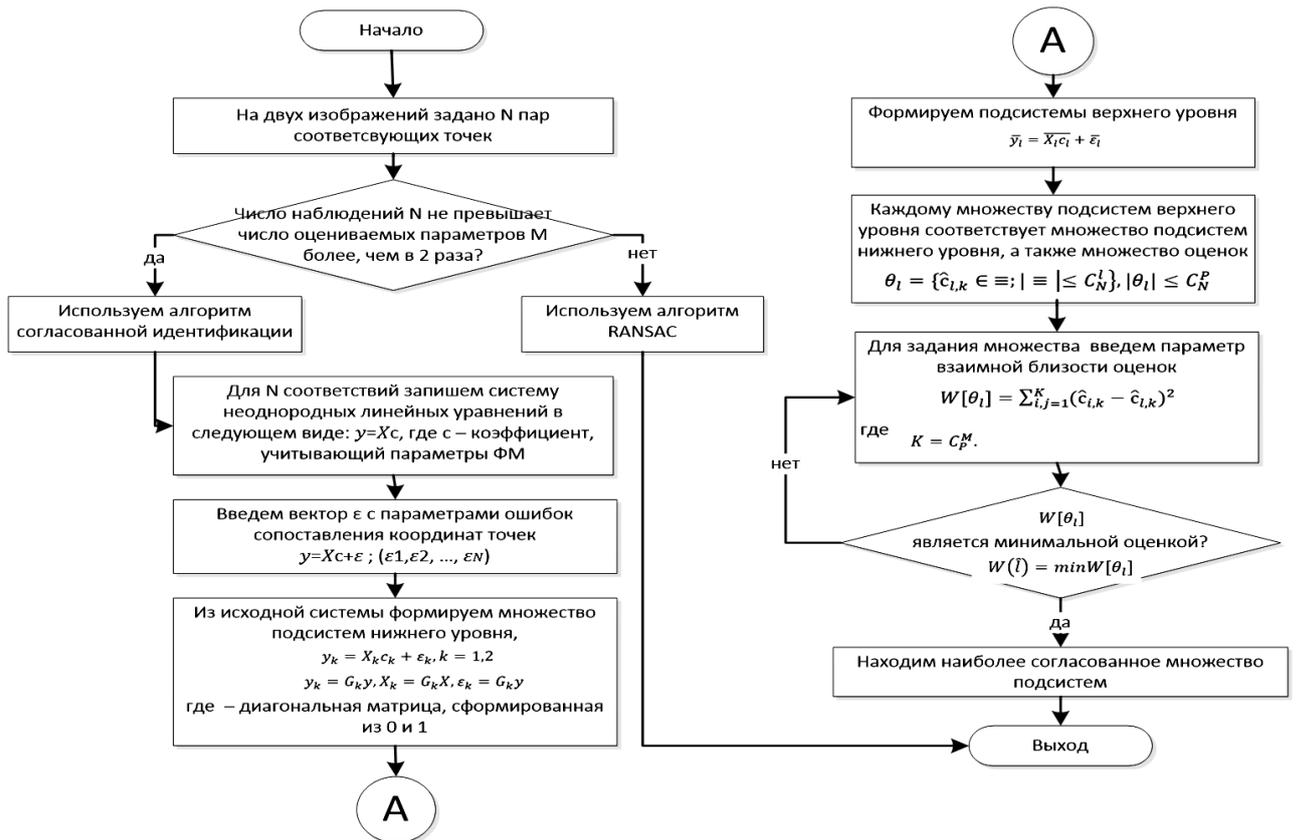


Рис. 9. Алгоритм нахождения наиболее согласованного множества подсистем

Рассмотрим графики зависимости среднего значения погрешности от числа аномальных ошибок для различного количества параметров оценки (светлый - для алгоритма случайных выборок, тёмный - для метода согласованной идентификации) (Рис. 10).

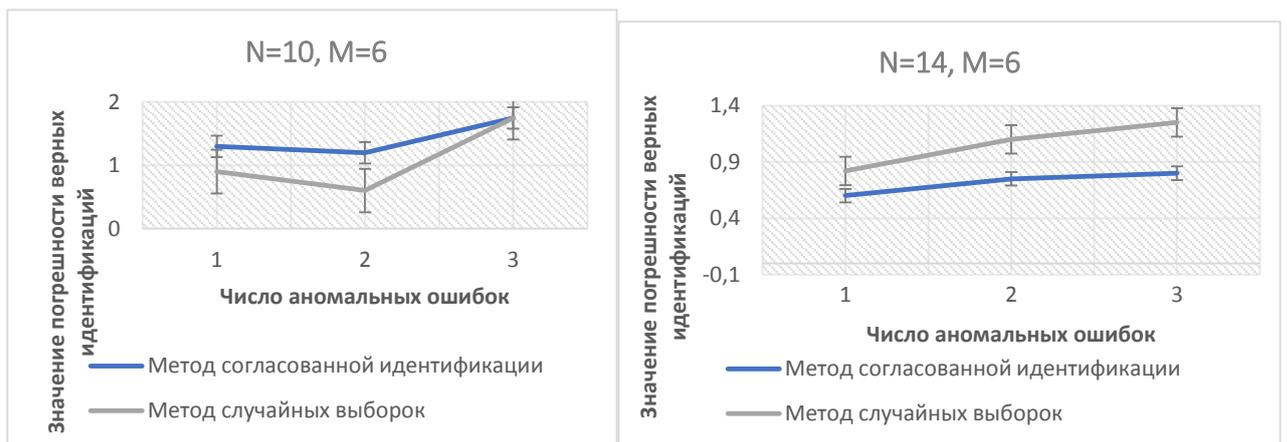


Рис. 10. Значение погрешности верных identifications:

а) N=10, M=6; б) N=14, M=6

На Рис. 11 изображены зависимости ошибочных результатов идентификации, данные для которых отобраны из 110 экспериментов, от количества аномальных ошибок. Таким образом, проанализировав результаты

экспериментов, можно сделать вывод, что метод согласованной идентификации превосходит метод случайных выборок по точности, а также по надёжности.

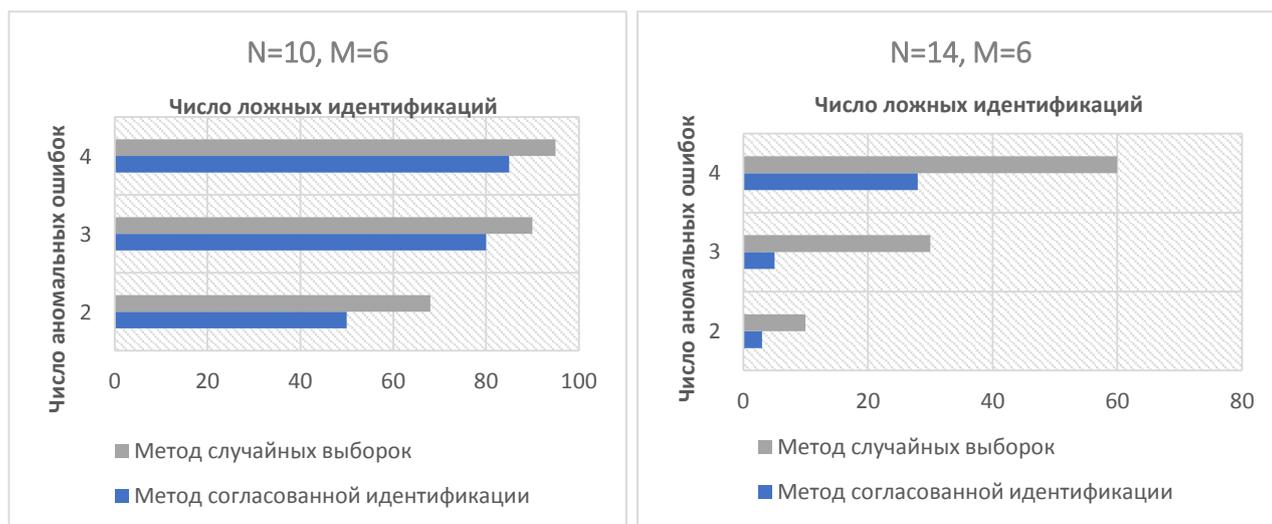


Рис. 11. Число ложных идентификаций на 110 экспериментов: а) N=10, M=6; б) N=14, M=6

В четвёртой главе рассмотрен алгоритм автоматического сопоставления точек на паре разноракурсных изображений. Реализация алгоритма состоит из пяти модулей (Рис. 12) и использует следующий алгоритм (Рис. 13).

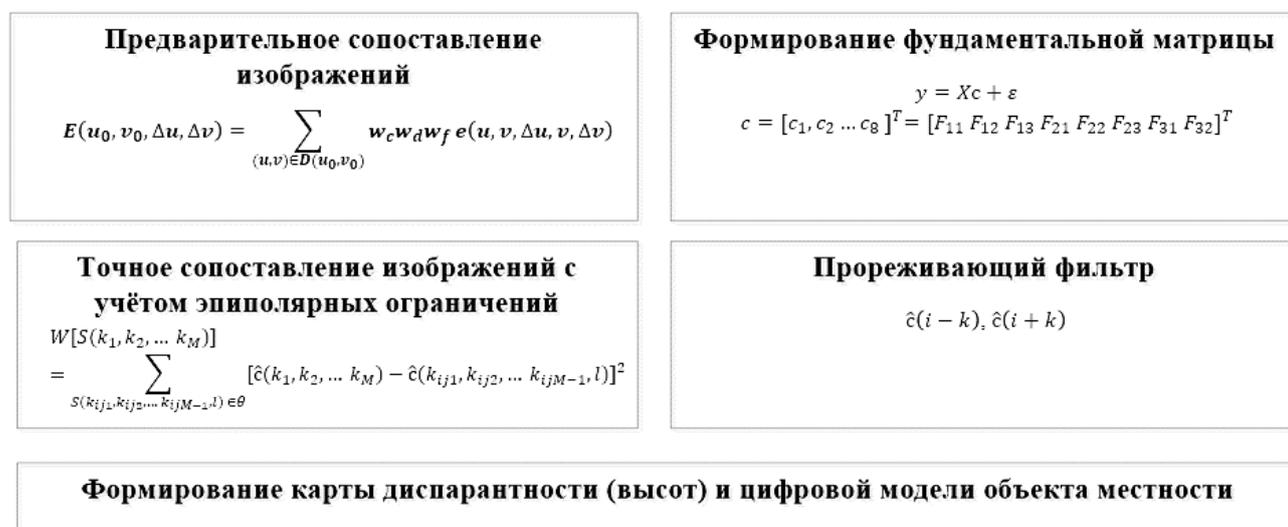


Рис. 12. Модули алгоритма

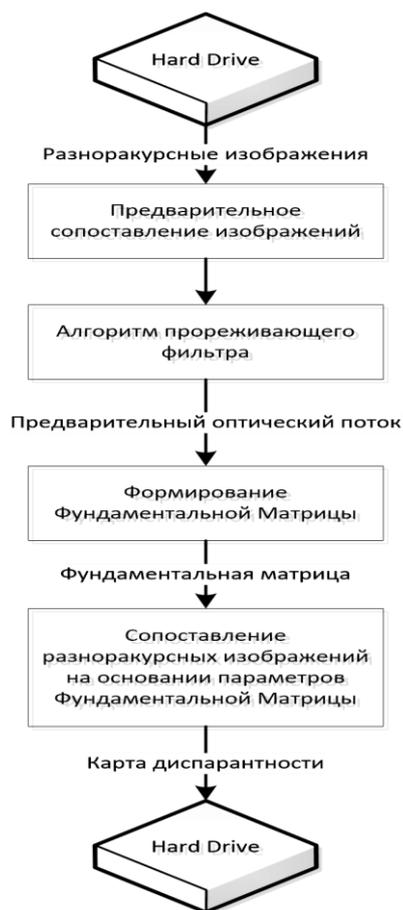


Рис. 13. Алгоритм автоматического сопоставления точек на паре разноразмерных изображений

Была исследована точность реконструкции трехмерных объектов в зависимости от количества входных изображений (Рис. 14).

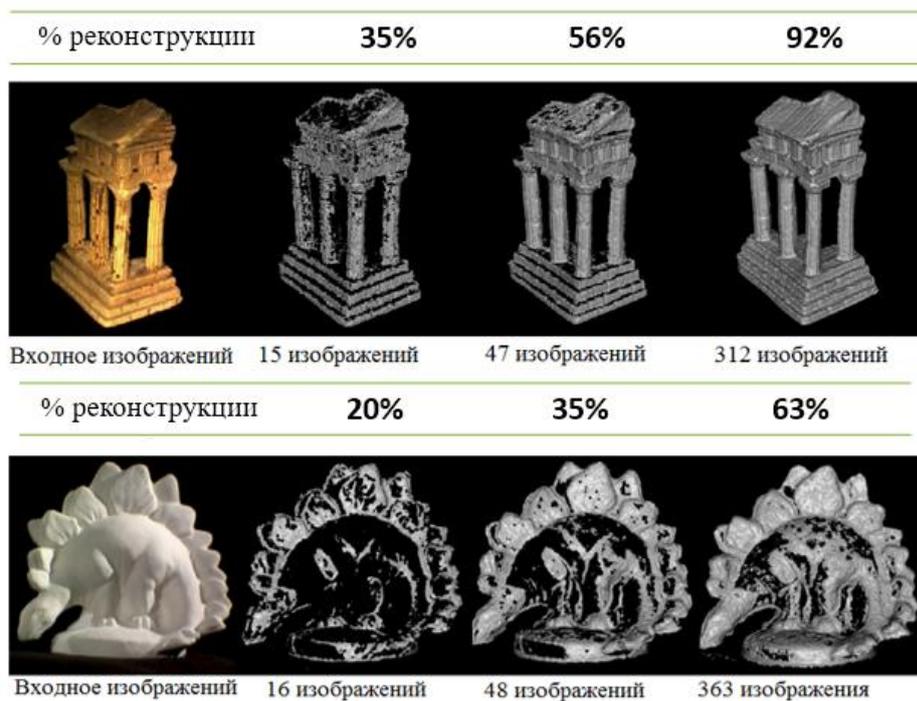


Рис. 14. Реконструкции трехмерных объектов

Для выявления зависимости точности реконструкции от количества входных изображений было исследовано более 100 объектов различной сложности (Рис. 15).

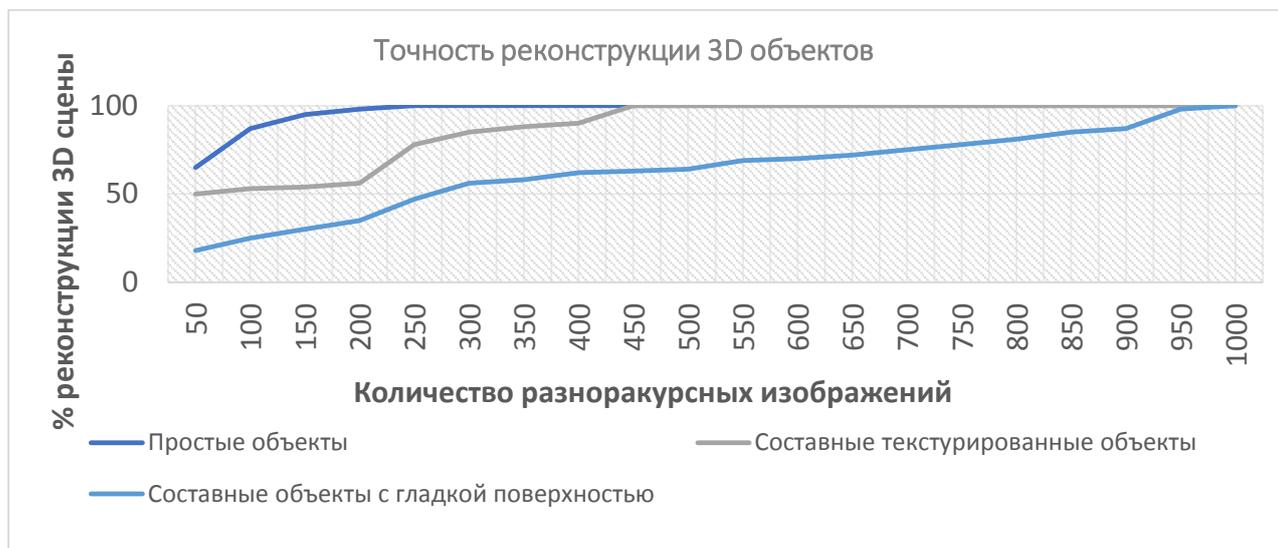


Рис. 15. Точность реконструкции трехмерных объектов

Приводятся результаты экспериментальных исследований алгоритма, подтверждающего эффективность разработанных в диссертации методов и алгоритмов. А именно, для создания трехмерной текстурированной модели со сложной формой рекомендуется использовать съемку в лабораторных условиях при искусственном направленном свете. Для минимизации ошибки сопоставления рекомендуется количество фотографий зависит от сложности конструкции и варьируется от 100 до 1000 разноракурсных изображений. На Рис. 16 представлен пример реконструкции детали турбины в трехмерную цифровую модель для дальнейшей 3D печати.



Рис. 16. Построение трехмерной модели объекта для 3D печати

На Рис. 17 приведен пример создания 3D модели местности с высотой съемки в пределах от 300 м до 450 м. Для создания экспериментальной модели было использовано 564 разноракурсных изображения (с разрешением 220 ppi).

Использование модифицированного алгоритма позволило реконструировать 3D модель местности и снизить число ошибок сопоставления до 8,2% по сравнению со стандартным алгоритмом, использующим выравнивание изображений вдоль эпиполярных прямых.

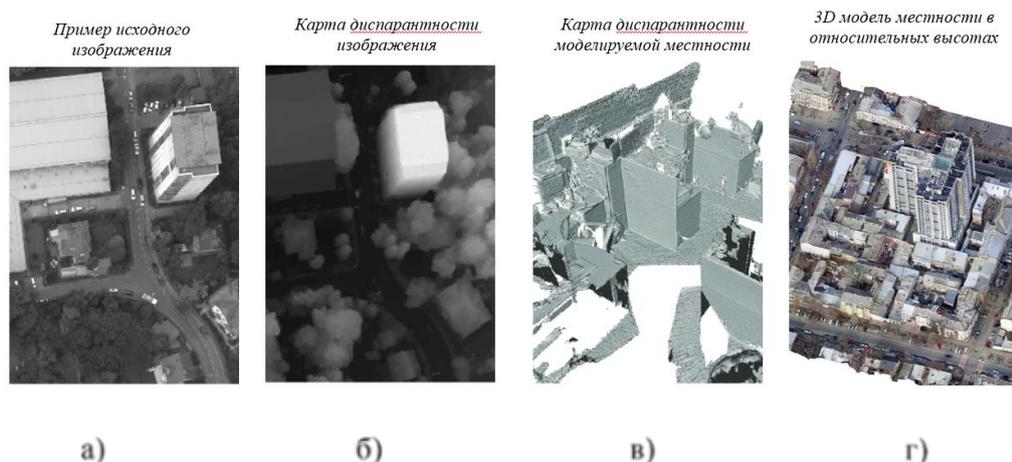


Рис. 17. Пример использования алгоритма: а) исходное изображение, б), в) карта диспарантности, г) восстановленная модель рельефа местности

В **заклучении** описаны основные результаты диссертационного исследования:

1. Выявлены ограничения существующих моделей и алгоритмов формирования разноракурсных изображений для создания 3D моделей сцены и рельефа местности при масштабируемости и вращении объектов сцены.

2. Предложенная модель сопоставления разноракурсных изображений предоставляет возможность учитывать эпиполярные ограничения при сопоставлении точек на исходных изображениях, что позволяет избежать дополнительных искажений до 16%, возникающих в результате выполнения ректификации.

3. Для исключения найденных на изображении ложных соответствующих точек предложен алгоритм выборочной фильтрации. В условиях эпиполярных ограничений данный алгоритм позволяет улучшить качество сопоставления соответствующих точек на 10% при дневном свете и на 15% при направленном свете.

4. Проведенные экспериментальные исследования на модельных примерах показали, что алгоритм согласованной идентификации ФМ по малому числу соответствующих точек дает лучшие показатели по надежности и точности по сравнению с алгоритмом случайных выборок, что позволяет уменьшить число ошибок идентификации с 14% до 3%

5. Приведены рекомендации по количеству разноракурсных изображений, необходимых для восстановления трехмерного объекта и достижения максимального процента реконструкции восстанавливаемого объекта.

6. Разработан новый алгоритм автоматического сопоставления на разноракурсных изображениях, формирование карты диспарантности (высот) и реконструкции трёхмерной цифровой модели сцены и рельефа местности

7. Проведены экспериментальные исследования предложенного алгоритма, которые позволяют восстановить рельеф местности с высотой съемки от 300 до 450 метров (с разрешением от 220 ppi) и уменьшить ошибку сопоставления на 8% по сравнению с алгоритмами, использующими ректификацию.

8. Приведено практическое обоснование алгоритма сопоставления разноразмерных изображений без ректификации для создания модели местности, а также объекта 3D печати.

9. Разработанный алгоритм позволяет создать качественную трехмерную модель для дальнейшей 3D печати без предварительного ручного моделирования в графических редакторах.

Таким образом, цель, поставленная в диссертационном исследовании, достигнута, задачи решены. Использование результатов исследования позволит повысить эффективность восстановления трехмерной модели сцены или рельефа местности.

### **Публикации автора по теме диссертации**

*В журналах, входящих в базу цитирования Scopus:*

1. Image matching principles in photometrical transformations / Suprun D. (Medvedeva D.), Canningham S. // 2017 Internet Technologies and Applications (ITA), АК. 2017. P. 234-239. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.)

*В рецензируемых изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ:*

2. Супрун Д.Е. (Медведева Д.Е.) Алгоритм сопоставления изображений по ключевым точкам при масштабировании и вращении объектов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2016. № 5[110]. С. 86-98. (1,1 п.л.)

3. Супрун Д.Е. (Медведева Д.Е.), Матвеев В.А. Алгоритм создания виртуального мини-музея // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана. 2013. № 4[93]. С. 67-78. (1 п.л./ 0,85 п.л.)

*В других изданиях:*

4. Медведева Д.Е. Техническая реализация автоматизированного алгоритма формирования 3D объектов и рельефа с учетом эллипсоидных ограничений // Естественные и технические науки. М.: Изд-во Спутник плюс. 2019. №12 (138). С. 334- 337. (0,5 п.л.)

5. Супрун Д. Е. (Медведева Д.Е.) Автоматизированная информационная система «Музеи-экспозиции» // Сборник трудов №9 молодых учёных, аспирантов и студентов «Информатика и системы управления в XXI веке». М.: Изд-во МГТУ им. Баумана. 2012. № 9. С. 142-148. (0,58 п.л.)

6. Супрун Д.Е. (Медведева Д.Е.) Обзор постреляционных СУБД. AllegroGraph // Молодёжный Научно-Технический Вестник. Изд-во М.: МГТУ им. Баумана. 2014. С. 1-10. (0,83 п.л.)

7. Супрун Д.Е. (Медведева Д.Е.) Облачные вычисления в бизнесе // Молодёжный Научно-Технический Вестник. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2013. С. 1-9. (0,75 п.л.)

8. Супрун Д.Е. (Медведева Д.Е.) Автоматизированная система французского импрессионизма начала XX века // Сборник трудов №7 молодых учёных, аспирантов и студентов «Информатика и система управления в XXI веке». М.: Изд-во МГТУ им. Баумана. 2009. № 7. С. 112-119. (0,66 п.л.)