

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 004.932.2; 004.932.72; 004.93'11

**ГОЛОВАТАЯ**  
**Екатерина Александровна**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ТРЕХМЕРНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ  
ОБЪЕКТОВ ПО ПОЛНОЦВЕТНЫМ ВИДЕОЭНДОСКОПИЧЕСКИМ  
ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности  
05.13.01 – системный анализ, управление и обработка  
информации

Минск, 2020

Работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель      **Садов Василий Сергеевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры интеллектуальных систем  
факультета радиопизики и компьютерных  
технологий Белорусского государственного  
университета

Официальные оппоненты:    **Дудкин Александр Арсентьевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий лабораторией идентификации систем  
государственного научного учреждения  
«Объединенный институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси»

**Гулай Анатолий Владимирович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой интеллектуальные и  
мехатронные системы Белорусского национального  
технического университета

Оппонирующая                      **УО «Белорусский государственный университет**  
организация                            **информатики и радиоэлектроники»**

Защита состоится 18 сентября 2020 г. в 13.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.14 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407. Телефон ученого секретаря: 209-57-09.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «25» июня 2020 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



Ю.И. Воротницкий

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие информационных технологий обуславливает всё более тесную интеграцию методов автоматизированной обработки и преобразования информации в самые разнообразные сферы жизнедеятельности. Медицина представляет собой одну из наиболее значимых областей, носящих стратегический характер, поскольку использование информационных технологий открывает широчайшие возможности по усовершенствованию процессов диагностики и терапии разнообразных заболеваний и патологий на различных стадиях, тем самым повышая качество оказываемых медицинских услуг.

Современный подход к диагностике онкологических заболеваний направлен на раннее выявление потенциально злокачественных новообразований в ходе проведения профилактических осмотров и скрининга пациентов, находящихся в группе риска. К одной из наиболее важных областей онкологической диагностики относится диагностика заболеваний желудочно-кишечного тракта, которая осуществляется посредством эндоскопического обследования.

В данной работе исследуется возможность предоставления информативной визуализации результатов видеоэндоскопического обследования в виде трехмерной модели поверхности пищевода и других исследуемых полостей тела пациента. Такая визуализация позволяет акцентировать внимание на отдельных участках поверхности, представляющих интерес в процессе диагностики, упрощает визуальный анализ для подтверждения и классификации вида образований, а также позволяет осуществлять измерения линейных размеров и площадей участков поверхностей исследуемых полостей, на основании чего в дальнейшем может быть поставлен диагноз, прослежена динамика развития заболевания, запланированы терапевтические мероприятия и оперативные вмешательства. При этом сама трехмерная реконструкция по видеоряду, получаемому в результате видеоэндоскопического обследования, не может напрямую осуществляться на основании известных методов восстановления трехмерной структуры по двумерным проекциям, поскольку первичная система съемки и исходные данные обладают рядом характерных особенностей.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы «Информатика и космические исследования» (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 №190), научно-технической деятельности Республики Беларусь на 2016–2020 годы «Информационно-коммуникационные и авиакосмические технологии: биоэлектроника, биоинформатика и информационные технологии в медицине» (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 №166) и государственной программе на 2016-2020 годы «Здоровье народа и демографическая безопасность Республики Беларусь» (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 14.03.2016 № 200).

Диссертационная работа выполнялась в рамках НИР №810/17 «Методы и алгоритмы комплексного анализа речевой и видео информации в коммуникационных процессах с целью поддержки принятия экспертных решений», а также НИР №427/17 «Методы и алгоритмы оценки эмоционального состояния человека по динамике мимики его лица на видеопоследовательностях» государственной программы научных исследований «Информатика, космос и безопасность» на 2014–2018 и 2019-2020 годы, а также в рамках грантов студентов и аспирантов БГУ на 2018 и 2019 годы и гранта «БРФФИ-РФФИ М-2019» № 241/17 (№Ф19РМ-006) на 2019–2021 годы.

### **Цель и задачи исследования**

Объектом исследования диссертационной работы являются данные видеозондоскопических исследований. Предметом исследования являются алгоритмы поиска и описания локальных признаков на изображении, методы определения трехмерных координат точек по проекциям, а также алгоритмы построения трехмерных моделей по результатам проведения видеозондоскопических обследований.

Целью диссертационной работы является повышение достоверности оценки пространственных характеристик объектов видеозондоскопических исследований путем построения трехмерной модели, учитывающей особенности оптической системы видеозондоскопа и получаемых с ее помощью изображений.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

- разработать модели процесса формирования изображений в видеозондоскопических системах, позволяющие связать двумерные координаты полученных проекций исследуемых объектов и трехмерные

- координаты их реконструированных образов;
- повысить информативность первичных изображений видеоэндоскопических систем;
  - разработать алгоритм построения трехмерной модели исследуемых объектов по результатам их видеоэндоскопических исследований;
  - разработать инвариантный относительно типичных преобразований алгоритм поиска и сопоставления аналогичных участков сцены на различных изображениях, учитывающий особенности видеоэндоскопических данных, для повышения точности трехмерной реконструкции;
  - реализовать разработанные алгоритмы в рамках программного комплекса, позволяющего осуществлять их тестирование, а также анализ и обработку данных видеоэндоскопических исследований;
  - исследовать корректность результатов трехмерной реконструкции на основании данных других видов медицинских обследований, а также при помощи имитационного моделирования процесса получения исходных данных.

### **Научная новизна**

1. Создана математическая модель формирования сферической широкоугольной проекции объектов видеоэндоскопических исследований при съемке широкоугольными объективами, отличающаяся введением дополнительной проекции на сферическую поверхность для описания процесса формирования изображений с учетом дисторсионных искажений, что позволяет сократить потери информации из-за коррекции дисторсии на величину, пропорциональную квадрату угла обзора оптической системы, и на  $33,7 \pm 12,1\%$  (95%-й доверительный интервал) увеличить количество точек на начальном этапе трехмерной реконструкции объектов.

2. Разработан алгоритм построения трехмерной модели внутренних органов по результатам видеоэндоскопических обследований, отличающийся введением дополнительных этапов фильтрации связей и итеративной подстройки по времени и детализации, и позволяющий предоставить эффективный инструмент медицинским работникам для диагностики заболеваний внутренних органов.

3. Созданы алгоритмы локализации и описания ключевых точек изображений на основании анализа локальных пространственных окрестностей, отличающиеся адаптивностью относительно яркостных, частотных и цветовых характеристик изображения и инвариантностью относительно типичных преобразований, что позволяет увеличить точность поиска и сопоставления

одинаковых участков на изображениях для дальнейшего использования в задачах распознавания образов и трехмерной реконструкции по сравнению с существующими подходами, особенно на изображениях с однородной структурой.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель формирования сферической широкоугольной проекции объектов видеэндоскопических исследований при съемке широкоугольными объективами, учитывающая дисторсионные искажения изображений проекций, которая при расчете трехмерных координат позволяет исключить, в зависимости от угла обзора камеры, до 30% потерь каждого изображения, возникающих при их калибровке, и на  $33,7 \pm 12,1\%$  (95%-й доверительный интервал) увеличить количество точек на начальном этапе трехмерной реконструкции объектов.

2. Алгоритм построения трёхмерной модели объектов и сцен по изображениям, полученным при съемке видеэндоскопическими системами, основанный на модифицированном методе связок с фильтрацией связей, итерационной подстройкой по времени и детализации, что повышает достоверность определения пространственного положения ключевых точек модели и сокращает время построения модели в 3-4 раза по сравнению с построением по всему набору кадров.

3. Адаптивный алгоритм поиска, описания и индексирования ключевых точек изображений, основанный на анализе распределения яркостей пикселей в их окрестностях, разбиении этих окрестностей на сегменты и последующем двухразрядном бинарном кодировании, отличающийся устойчивостью к шумам, инвариантностью к поворотам, масштабированию и изменению освещенности, что уменьшает среднеквадратичную ошибку обратной проекции на  $32,2 \pm 9,4\%$  (95%-й доверительный интервал) при его использовании для сопоставления точек при трехмерной реконструкции по данным видеэндоскопических исследований.

4. Программный комплекс анализа и трехмерной реконструкции объектов медицинских исследований, разработанный на основе предложенных моделей и алгоритмов, позволяющий по изображениям, полученным в ходе видеэндоскопического обследования, оценивать пространственные характеристики этих объектов, а также строить их трехмерную модель, что расширяет информационный базис для врачей-диагностов при постановке диагноза и назначении лечения.

### **Личный вклад соискателя**

Представленные в диссертационной работе результаты получены лично соискателем. Научный руководитель Садов В.С. участвовал в определении тематики и направления исследований. Соавтор Гинько Т.А. оказывала помощь в интерпретации медицинских данных и постановке задачи для дальнейшего использования в медицинской практике. Научный руководитель и соавторы совместных работ участвовали в обсуждении полученных результатов.

### **Апробация диссертации и информация об использовании результатов**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 13 международных научно-технических и научно-практических конференциях и семинарах: 3-я, 5-я Международная конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (28 – 29 апреля 2015 г., 16-17 мая 2019 г.) Минск, Беларусь; 4th International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research (May 23-27 2016) Niš, Serbia; Международная научно-практическая конференция «Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (22-24 ноября 2017 г.) Минск, Беларусь; Международная научно-практическая конференция «Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана» (13 октября 2016 г.) Минск, Беларусь; 3-я Международная научно-практическая конференция «Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции» (23-24 марта 2017 г.) Минск, Беларусь; Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (6 июня 2017 г.) Минск, Беларусь; Международная научная конференция «Информационные технологии и системы» (25 октября 2017 г., 30 октября 2019) Минск, Беларусь; Международная научно-техническая конференция «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» (15-17 февраля 2018, 21-23 февраля 2019) Минск, Беларусь; Международная научно-практическая конференция «Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации» (14-15 июня 2018 г.) Новополоцк, Беларусь; 62nd International Conference For Students Of Physics And Natural Sciences «Open Readings» (Vilnius, Lithuania, 19-22 March 2019); 14th International conference on pattern recognition and information processing (21-23 May 2019) Minsk, Belarus; и на 3 республиканских научно-технических конференциях: 71-я, 72-я, 74-я Научные конференции студентов и аспирантов БГУ (15 – 24 мая 2014 г., 11 – 22 мая 2015 г., 15 – 24 мая 2017 г.) Минск, Беларусь.

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 28 научных работах, из которых: 7 статей в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь и зарубежных рецензируемых изданиях (общим объемом 4.3 авторского листа), 2 статьи в других научных рецензируемых изданиях, 14 статей в сборниках материалов научных конференций, 5 тезисов докладов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Объем диссертации составляет 153 страницы, включая 98 страниц основного текста, 43 рисунка на 20 страницах, 3 таблицы на 3 страницах, библиографический список из 103 наименований на 8 страницах, список публикаций соискателя из 28 наименований на 4 страницах и трех приложений на 20 страницах.

### **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**В первой главе** рассмотрены основные принципы проведения современных видеозндоскопических исследований, проанализированы актуальные системы и их возможности. Сформулированы задачи трехмерной реконструкции, а также приведена классификация существующих методов. Рассмотрены основные подходы к работе с локальными признаками изображений.

Результатом проведенного обзора являются следующие выводы:

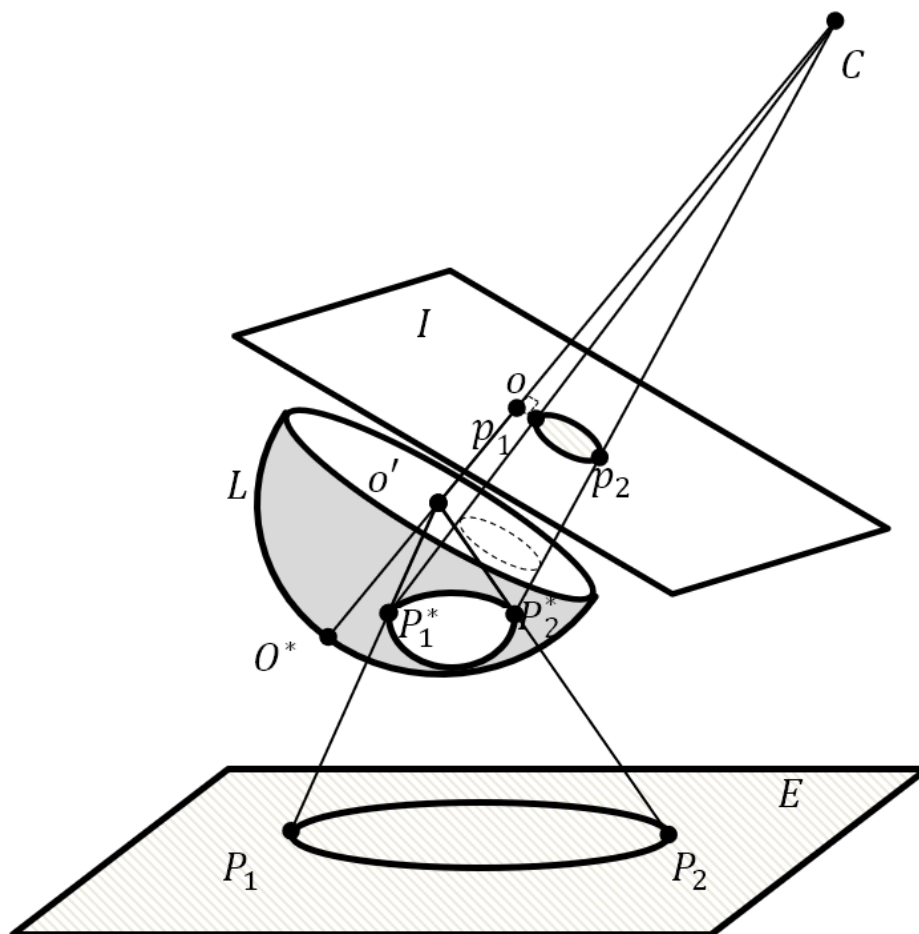
- одним из основных видов искажений на снимках видеозндоскопических систем являются дисторсионные искажения, возникающие из-за значительной кривизны внешней линзы для обеспечения широкого угла обзора;
- возможность получения, сохранения и более позднего воспроизведения полноцветного изображения и видеоряда современными видеозндоскопическими системами способствует принятию окончательного решения о необходимых мерах лечения уже после обследования, что позволяет уменьшить итоговое время процедуры;
- одной из нерешенных задач является определение абсолютных размеров и пространственных характеристик образований и их окрестностей, для чего могут использоваться их трехмерные представления;
- для трехмерной реконструкции по данным видеозндоскопических систем наиболее подходящим подходом являются методы реконструкции по



смещению при съемке с произвольных ракурсов, однако существующие реализации не адаптированы для работы с видеоэндоскопическими изображениями и видеорядом;

- существующие подходы к трехмерной реконструкции при коррекции дисторсии производят обрезку кадра, что приводит к потерям до 30% информации;
- для повышения точности трехмерной реконструкции необходим устойчивый алгоритм поиска и сопоставления аналогичных участков сцены на различных изображениях, учитывающий особенности видеоэндоскопических данных;
- для анализа предлагаемых подходов и их внедрения в учреждения здравоохранения необходима программная реализация.

**Во второй главе** анализируется модель формирования изображения трехмерной сцены, процесс восстановления её трехмерного представления по полученным изображениям, а также предлагается модель сферической широкоугольной проекции (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Модель формирования изображения на основе сферической широкоугольной проекции**

Показано, что существующая модель центральной проекции является чувствительной к нелинейным искажениям проектирования, возникающим в реальных видеоэндоскопических системах из-за использования выпуклых широкоугольных линз со значительной кривизной. Стандартный подход подразумевает калибровку и коррекцию дисторсии, которая вносит потери в размере до 30% пикселей всего изображения, в зависимости от угла обзора камеры. Обосновано, что предложенная модель сферической широкоугольной проекции может служить для устранения этой проблемы. Модель описывает процесс формирования изображения  $I$  объекта  $\{P_1, P_2\}$  сцены  $E$  с точки зрения двух проекций – проекции  $\{P_1^*, P_2^*\}$  на сферическую поверхность  $L$ , ориентированную вдоль оптической оси  $Co$ , а затем проекции  $\{p_1, p_2\}$  с поверхности линзы на плоскость изображения.

Для предложенной модели выведены уравнения, связывающие глобальные трехмерные координаты произвольной точки  $X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}$  с углами сферической проекции  $\gamma_{ij}, \theta_{ij}$  и с локальными координатами точек изображения  $x_{ij}, y_{ij}$  через параметры ориентирования камеры  $X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \beta_j, r, h, f$ :

$$\begin{bmatrix} x_{ij}^* \\ y_{ij}^* \\ z_{ij}^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_j \cos \varphi_j & \cos \omega_j \sin \varphi_j \sin \beta_j - \sin \omega_j \cos \beta_j & \cos \omega_j \sin \varphi_j \cos \beta_j + \sin \omega_j \sin \beta_j & X_{0j} \\ \sin \omega_j \cos \varphi_j & \sin \omega_j \sin \varphi_j \sin \beta_j - \cos \omega_j \cos \beta_j & \sin \omega_j \sin \varphi_j \cos \beta_j + \cos \omega_j \sin \beta_j & Y_{0j} \\ -\sin \varphi_j & \cos \varphi_j \sin \beta_j & \cos \varphi_j \cos \beta_j & Z_{0j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\gamma_{ij} = \arccos \frac{\sqrt{x_{ij}^{*2} + y_{ij}^{*2}}}{\sqrt{x_{ij}^{*2} + y_{ij}^{*2} + z_{ij}^{*2}}}, \quad (2)$$

$$\theta_{ij} = \arccos \frac{x_{ij}^*}{\sqrt{x_{ij}^{*2} + y_{ij}^{*2}}}, \quad (3)$$

$$x_{ij} = \frac{r(h+f) \cos \gamma_{ij} \cos \theta_{ij}}{r \sin \gamma_{ij} - f}, \quad (4)$$

$$y_{ij} = \frac{r(h+f) \cos \gamma_{ij} \sin \theta_{ij}}{r \sin \gamma_{ij} - f}. \quad (5)$$

На основании модели сферической широкоугольной проекции разработана модификация метода связок для трехмерной реконструкции, а также описана возможность введения дополнительных ограничений с целью уточнения результатов. По соотношениям (1) – (5) для некоторого набора точек  $\{X_i, Y_i, Z_i\}$ , для которых известны координаты их проекций  $\{x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}\}$  на изображениях, полученных с камеры в положениях  $\{X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \beta_j\}$ , может быть составлена система уравнений. При корректном определении совпадающих

точек на различных изображениях полученная система может быть линеаризована и оптимизирована для нахождения трехмерных координат в моделируемом пространстве. Показано, что использование сферической широкоугольной проекции увеличивает количество точек после начальной оптимизации на  $33,7 \pm 12,1\%$  (95%-й доверительный интервал).

**В третьей главе** приведен полный алгоритм построения трехмерной модели по изображениям и видеоряду, полученным с использованием видеоэндоскопических систем (рисунок 2). Данный алгоритм объединяет в себе предварительную обработку отдельных кадров, работу с локальными признаками на изображении, построение системы уравнений и облака точек в пространстве с использованием разработанной модели сферической широкоугольной проекции и модифицированного метода связей, итеративное уплотнение облака точек, а также интерполяцию и текстурирование поверхностей. Результатом работы алгоритма является трехмерная модель объекта и его окрестностей.

Разработанный алгоритм ориентирован на конкретный вид изображений и подразумевает определенный формат полученных входных данных. Для корректного формирования видеоряда в процессе обследования сформулирован ряд методических рекомендаций специалистам для повышения качества входных данных и их последующей реконструкции.

По временной метке отдельных кадров изображения предлагается введение дополнительных весовых коэффициентов для сопоставленных пар точек по их взаимной пространственной и временной удаленности; вводится предположение о том, что соответствующие точки у двух кадров, расположенных ближе во времени, будут расположены ближе в пространственной области. Для предотвращения некорректных сопоставлений и повышения производительности реализован метод фильтрации с помощью случайного отбора пар точек на основании вычисленных весовых коэффициентов.

Для непосредственной реконструкции положений отдельных точек в пространстве используется оптимизация системы уравнений, построенной по методу связей с помощью модели сферической широкоугольной проекции. Для оптимизации используется алгоритм на базе метода Левенберга-Марквардта. Начальные положения точек уточняются и уплотняются итеративно на основании расширения их пространственных окрестностей дополнительными точками из снимков. Показано, что использование итеративной подстройки по сравнению с реконструкцией по всему отрезку сокращает время реконструкции в 2-3 раза, наибольшая производительность при частоте кадров 30 Гц достигается на окне длительностью в 3 с. Кроме того, итоговое время реконструкции отрезка

с 3-секундными разбиениями осуществляется за время, близкое к длине этого отрезка.

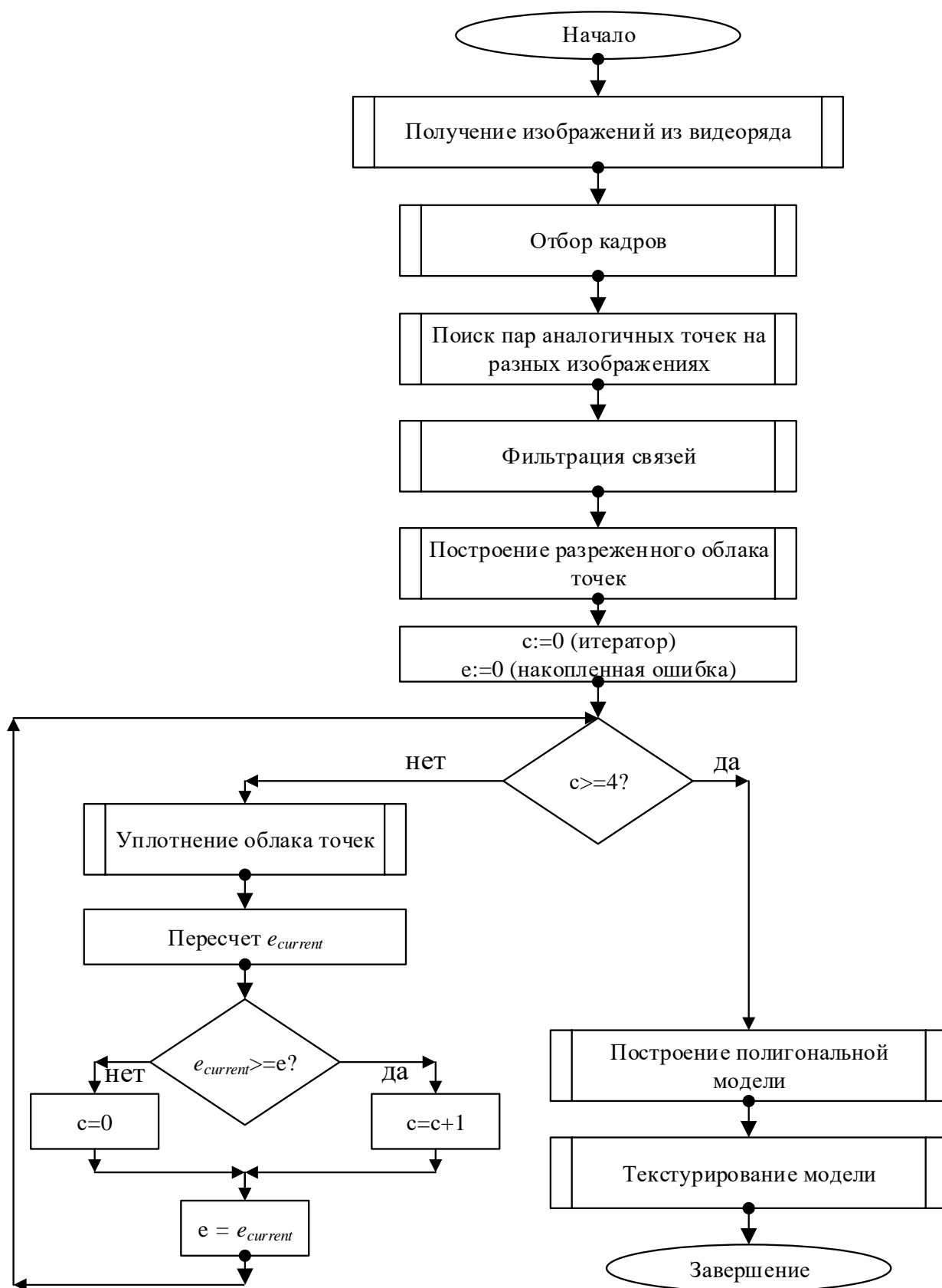


Рисунок 2. – Блок-схема общего алгоритма трехмерной реконструкции

Для построения итоговой трехмерной модели используется алгоритм интерполяции поверхностей на основе экранированной Пуассоновской реконструкции, поддерживающий настройку разрешающей способности. В зависимости от требований к конечной модели разрешающая способность может быть оптимизирована для детектирования мелких деталей или для корректного восстановления крупных планов.

**В четвертой главе** детально анализируются высокоуровневые требования к алгоритмам поиска и локализации ключевых точек, исследуются особенности работы таких алгоритмов на изображениях, полученных с использованием видеоэндоскопических систем, а также представляется реализация детектора и дескриптора, обладающих устойчивостью к основным видам преобразований. Разработанный алгоритм детектирования и описания локальных признаков основан на анализе конфигурации сегментов окружностей окрестности точки и обладает адаптивностью относительно основных характеристик изображения. Для алгоритма оценена асимптотическая сложность и проведены оптимизации для повышения производительности сопоставления.

Разработанные алгоритмы могут использоваться как для анализа самого изображения и поиска объектов на нем, так и для сопоставления одинаковых точек исходного трехмерного пространства на различных проекциях одной и той же сцены, что является ключевым этапом трехмерной реконструкции.

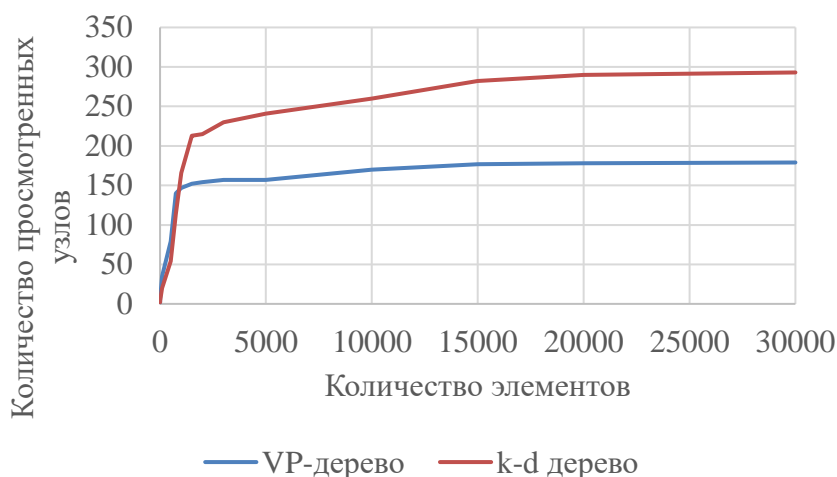
Корректное определение положений и смещений точек между различными кадрами позволяет составить более полную систему уравнений для метода связок, что уменьшает итоговую ошибку при оптимизации этой системы. Таким образом, одним из эффективных способов повышения точности реконструкции является повышение устойчивости и качества детекторов и дескрипторов ключевых точек.

Необходимость разработки отдельного алгоритма следует из того факта, что большинство существующих алгоритмов поиска и описания локальных признаков ориентированы на более широкий класс изображений. С одной стороны, это делает их более универсальными. С другой стороны, изображения, получаемые с использованием видеоэндоскопических систем, обладают рядом особенностей, которые не учитываются в работе этих алгоритмов, что делает их менее пригодными.

Одной из особенностей разработанных алгоритмов является возможность адаптивного подбора параметров. При этом по исходному изображению вычисляются характеристики, на основании которых в дальнейшем подбираются пороговые значения, варианты конфигурации и другие параметры алгоритма.

Поскольку поиск и сопоставление ключевых точек занимает значительную часть времени при построении итоговой трехмерной модели, особое внимание

при разработке дескрипторов и детекторов уделяется их алгоритмической сложности. Показано, что разработанные алгоритмы имеют минимально возможную асимптотическую алгоритмическую сложность; кроме того, дополнительно для оптимизации сопоставления точек между несколькими кадрами предлагается использовать индексирование по расстоянию между дескрипторами с использованием VP-деревьев, что позволяет сопоставить ключевые точки между кадрами за квазилинейное время вместо квадратичного (рисунок 3).



**Рисунок 3. – Количество узлов, просмотренных для поиска произвольного элемента в VP-деревьях и k-d деревьях для 512-битовых строк и расстояния Хэмминга, в зависимости от количества элементов в дереве**

Следует также отметить, что разработанные алгоритмы в совокупности с алгоритмом адаптивного подбора параметров позволяют точнее выделять характерные особенности изображения, но при этом являются алгоритмами общего назначения. Это означает, что разработанные детекторы и дескрипторы могут применяться не только для решения задачи трехмерной реконструкции, но и в рамках других проблем компьютерного зрения, требующих выделения и сопоставления локальных признаков – индексирование изображений, поиск объектов по шаблону, построение гомографических проекций и т.п.

**Пятая глава** посвящена оценке разработанных алгоритмов детектирования и описания локальных признаков на изображениях видеоэндоскопических систем, а также получаемой в результате реконструкции модели. Кроме того, в главе представлен программный комплекс, сочетающий в себе базовые функции по обработке изображений и реализацию исследуемого в работе метода трехмерной реконструкции по результатам видеоэндоскопических обследований.

Вследствие отсутствия строгого определения того, какие именно признаки

делают точку ключевой и какой вид должен иметь вектор локальных признаков, актуальной является задача оценки устойчивости алгоритмов детектирования и описания локальных признаков. Для анализа и сравнения разработанных алгоритмов реализован информационный ресурс «Система анализа алгоритмов извлечения и описания локальных признаков изображений», позволяющий анализировать как существующие алгоритмы, так и расширять функционал приложения своими алгоритмами, получать статистические данные о качестве алгоритмов на конкретных наборах данных. Исследованы такие виды преобразований, как аффинные, перспективные, субдискретизация, дисторсия, преобразования цветового пространства и размытие. Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный алгоритм поиска и сопоставления ключевых точек обеспечивает на 20-25% меньшее смещение положения ключевой точки после преобразований.

Визуальная оценка моделей может осуществляться для первичного анализа корректности определения положения камер и интерполированных поверхностей. Однако, детальный анализ требует использования более строгих критериев. В работе для проверки качества реконструкции разработана моделирующая среда, способная сгенерировать искусственную сцену с известными пространственными параметрами, а также смоделировать процесс получения изображений в рамках этой сцены. Это позволяет осуществить непосредственное сравнение исходной модели и модели, полученной в результате применения разработанного алгоритма трехмерной реконструкции.

Тем не менее, даже при наличии моделирующей среды, точное сопоставление трехмерного представления с исходной моделью сложно использовать для анализа реконструкции из-за небольших отклонений, не влияющих на общий результат, что обуславливает необходимость разработки более универсального способа оценки. В качестве такой оценки в работе предлагается критерий оптимальности трехмерной реконструкции в виде комплексной взвешенной оценки на основе среднеквадратических отклонений положений ключевых точек в исходном трехмерном пространстве, положений камер в трехмерном пространстве и углов поворота камер.

$$E = w_1 E_{kp} + w_2 E_c + w_3 E_a, \quad (6)$$

где  $w_1, w_2, w_3$  – весовые коэффициенты;

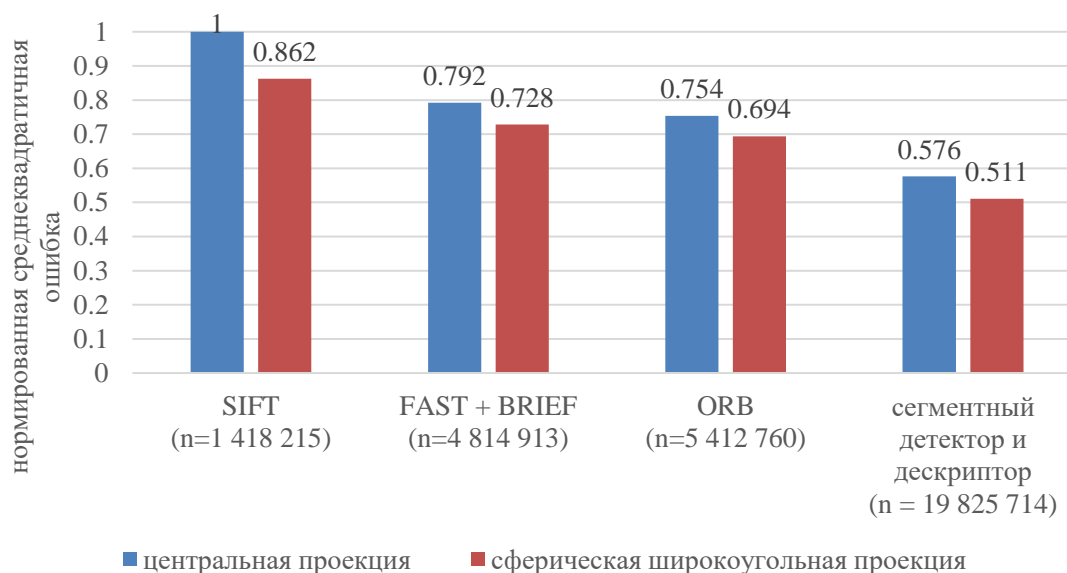
$E_{kp}$  – среднеквадратичная ошибка определения положения ключевой точки, вычисляемая по фактическим координатам ключевых точек и их координатам, полученным в результате реконструкции;

$E_c$  – среднеквадратичная ошибка определения положения камеры,

вычисляемая по фактическим координатам положений камеры и координатам положений камеры, полученными по методу связок;

$E_a$  – среднеквадратичная ошибка определения угла наклона камеры, вычисляемая по фактическим углам наклона и углам, вычисленным в процессе реконструкции.

С помощью введенного критерия было проанализировано влияние на качество реконструкции алгоритмов поиска и описания локальных признаков. Полученные значения критерия оптимальности (6) при использовании различных детекторов и дескрипторов, а также при использовании модели центральной и сферической широкоугольной проекции, нормированные на максимум, представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4. – Нормированное значение критерия (6) при использовании различных видов алгоритмов работы с локальными признаками**

Таким образом, использование разработанных алгоритмов поиска, описания и индексирования ключевых точек сокращает среднеквадратичную ошибку на  $32,2 \pm 9,4\%$  (95%-й доверительный интервал) при трехмерной реконструкции по данным видеоэндоскопических обследований.

Оценка точности производилась также сравнением с результатами других медицинских исследований, в частности, по 94 выборочным измерениям длины с использованием результатов томографии. Для всех измерений полученные значения заключены в 84%-й доверительный интервал.

Для анализа и внедрения разработанные алгоритмы реализованы в рамках программного комплекса анализа изображений и трехмерной реконструкции объектов в медицинских исследованиях. Программный комплекс позволяет осуществлять предварительную обработку, структурную детализацию,



проведение измерений отдельных объектов по полноцветным изображениям, построение трехмерной модели по загруженным изображениям, и, в первую очередь, направлен на обработку данных, полученных с использованием медицинских систем. Специальная функциональность предусмотрена для видеозендоскопических изображений, однако, отдельные функции могут использоваться и для других типов изображений.

Программный комплекс зарегистрирован в Национальном центре интеллектуальной собственности и внедрен в медицинские центры и учебный процесс, о чем свидетельствуют регистрационное свидетельство и акты о практическом использовании результатов исследования.

**В заключении** перечислены основные научные результаты, полученные в рамках представленной диссертационной работы.

**В приложении** приведены дополнительные функции разработанного программного комплекса, свидетельства о регистрации, справки и акты внедрения, подтверждающие апробацию и тестирование разработанных в рамках диссертационной работы программных решений.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработана математическая модель трехмерной реконструкции образований и соответствующих окрестностей по данным видеозендоскопического обследования, отличающаяся от существующих использованием предложенной в работе модели сферической широкоугольной проекции. Предложенная модель исключает потери из-за коррекции дисторсии в объеме до 30% от каждого кадра и может быть численно оптимизирована на основании метода связок для построения разреженного облака точек, содержащего в среднем в  $1,34 \pm 0,12$  (95%-й доверительный интервал) раз больше точек по сравнению с традиционными методами. Использование предложенной модели проекции сокращает среднеквадратичную ошибку обратной проекции последующей трехмерной реконструкции в среднем на  $11,2 \pm 2,8\%$  (95%-й доверительный интервал) [5, 27, 28].

2. Предложен алгоритм предварительной обработки с отбором кадров по 4 классам изображений, которые должны быть исключены из обработки, для повышения качества итоговой трехмерной реконструкции. Введение такого отбора улучшает сходимость решения и повышает точность реконструкции по отдельным измерениям. Сформирован комплекс методических рекомендаций для специалистов, проводящих обследование [2, 4, 10, 21].

3. Разработан алгоритм построения трехмерной модели по результатам

видеоэндоскопических исследований, отличающийся от существующих использованием дополнительной информации о временных метках отдельных кадров, а также введением дополнительных этапов фильтрации связей и итерационного уплотнения разреженного облака точек, что позволяет повысить производительность определения пространственного расположения точек и сокращает время построения модели в 3-4 раза по сравнению с построением по всему набору кадров. Предложенные оптимизации делают алгоритм пригодным для последовательной достройки модели в масштабе реального времени [4, 20, 21].

4. Разработан адаптивный алгоритм поиска и сопоставления ключевых точек, учитывающий особенности входных данных. Разработанный алгоритм, по сравнению с существующими, обеспечивает в среднем на 20-25% меньшее смещение точки после аффинных, перспективных и яркостных преобразований на видеоэндоскопических изображениях, что, в свою очередь, уменьшает среднеквадратичную ошибку обратной проекции на  $32,2 \pm 9,4\%$  (95%-й доверительный интервал). Разработанный алгоритм обладает линейной алгоритмической сложностью по поиску и квазилинейной алгоритмической сложностью по сопоставлению благодаря индексированию на основе VP-деревьев, что сокращает время сопоставления точек в 1,5-2 раза. Благодаря своей адаптивности, разработанный алгоритм может применяться для обработки изображений в других задачах компьютерного зрения [3, 7-9, 11, 14-19, 22, 23, 29].

5. Предложенные алгоритмы реализованы в рамках кроссплатформенного «Программного комплекса для обработки медицинских изображений и трехмерной реконструкции» для их анализа и тестирования, а также использования в медицинской практике. Помимо этого, разработанный комплекс предоставляет дополнительные функции по обработке изображений с использованием известных алгоритмов цветовой коррекции, яркостных преобразований, повышения резкости, гистограммного анализа и других методов [1, 10, 12, 25, 26].

6. Разработана моделирующая среда, имитирующая процесс захвата данных аналогично процедуре видеоэндоскопического исследования, на основании которой показано, что использование модели сферической широкоугольной проекции и разработанных алгоритмов поиска и сопоставления ключевых точек обеспечивают уменьшение ошибки реконструкции до 2 раз по сравнению с традиционными подходами. Исследована корректность результатов трехмерной реконструкции на основании данных других видов медицинских обследований по 94 выборочным измерениям длины. Полученные значения заключены в 84%-й доверительный интервал [6, 13, 24].

## **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Созданная компьютерная программа «Программный комплекс анализа изображений и трехмерной реконструкции объектов по ним в медицинских исследованиях» зарегистрирована в Национальном центре интеллектуальной собственности (№ 1186 от 18.06.2019 г.) и позволяет осуществлять предварительную обработку, структурную детализацию, проведение измерений отдельных объектов по полноцветным изображениям, построение трехмерной модели по загруженным изображениям, и, в первую очередь, направлена на обработку данных полученных с использованием медицинских систем. Однако, отдельные функции могут использоваться и для других типов изображений.

2. Разработанная компьютерная программа «Программный комплекс анализа изображений и трехмерной реконструкции объектов по ним в медицинских исследованиях» используется в медицинских центрах ООО «Биомедика Плюс» и УП «МедАрт» для анализа изображений, получаемых при проведении ультразвуковых и эндоскопических исследований, с целью уточнения по ним диагноза.

3. Разработанная компьютерная программа «Программный комплекс анализа изображений и трехмерной реконструкции объектов по ним в медицинских исследованиях» используется в УЗ «3-я городская клинической больницы имени Е.В. Клумова» для определения степени дегенеративного поражения головки зрительного нерва на основе анализа результатов фоторегистрации диска зрительного нерва.

4. Разработанный информационный ресурс «Система анализа алгоритмов извлечения и описания локальных признаков изображений» позволяет анализировать существующие алгоритмы, расширять функциональные возможности ресурса, получать статистические данные о качестве алгоритмов на конкретных наборах данных. Для проведения анализа используется предложенный в работе подход оценки устойчивости к основным видам искажений и преобразований.

5. Разработанная компьютерная программа «Программный комплекс анализа изображений и трехмерной реконструкции объектов по ним в медицинских исследованиях» и информационный ресурс «Система анализа алгоритмов извлечения и описания локальных признаков изображений» внедрены в учебный процесс на факультете радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета.

6. На основе предлагаемых в работе алгоритмов описания и извлечения локальных признаков изображений разработан и включен в Государственный регистр информационных ресурсов (№1271712977 от 21.09.2017 г.) информационный ресурс «Определение площади листового аппарата растений»,

позволяющий осуществлять автоматизированную оценку относительной и абсолютной площади эффективной листовой поверхности по изображениям, что необходимо для автоматизации управления процессами растениеводства и способствует оптимизации оценки ожидаемой урожайности, а также определению эффективности технологических операций.

7. Информационный ресурс «Определение площади листового аппарата растений» используется в научной работе ГНУ «Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### *Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь и рецензируемых зарубежных изданиях*

1. Гинько, Т. А. Обработка и структурная детализация объектов изображений в лечебной эндоскопии / Т. А. Гинько, Е. А. Головатая, Л. В. Калацкая // Электроника инфо. – 2014. – № 2. – С. 27–31.

2. Головатая, Е. А. Особенности информационного обеспечения процессов фотодинамической терапии на основе видеоэндоскопических исследований / Е. А. Головатая, В. С. Садов // Электроника инфо. – 2017. – № 3. – С. 54–57.

3. Головатая, Е. А. Оценка эффективности детекторов локальных признаков при обработке видеоэндоскопических изображений / Е. А. Головатая, В. С. Садов, О. М. Демиденко // Изв. Гомел. гос. ун-та. Естеств. науки. – 2018. – № 3 (108). – С. 97–103.

4. Головатая, Е. А. Алгоритм трехмерной реконструкции сцен по данным видеоэндоскопических исследований / Е. А. Головатая, В. С. Садов // Новости науки и технологий. – 2019. – № 3 (50). – С. 10–18.

5. Головатая, Е. А. Модель формирования изображений для трехмерной реконструкции сцен по данным видеоэндоскопических исследований / Е. А. Головатая, В. С. Садов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2019. – № 12. – С. 43–49.

6. Чернявский, А. Ф. Моделирующая среда для анализа алгоритмов трехмерной реконструкции объектов видеоэндоскопических исследований / А. Ф. Чернявский, Е. А. Головатая, В. С. Садов // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 108–118.

7. Halavataya, K. Local feature descriptor indexing for image matching and object detection in real-time applications / K. Halavataya // Pattern recognition and image analysis. – 2020. – Vol. 30, № 1. – С. 18–23.

***Статьи в других научных рецензируемых изданиях***

8. Варченко, А. А. Анализ кариотипа человека по данным микроскопического исследования на основе системы нечеткой логики / А. А. Варченко, Е. А. Головатая // Электроника плюс. – 2017. – № 5. – С. 55–57.

9. Головатая, Е. А. Оптимизация алгоритмов описания и сравнения локальных признаков изображений при детектировании объектов на видеопоследовательностях в реальном времени / Е. А. Головатая, В. С. Садов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем : сб. науч. тр. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2019. – Вып. 3. – С. 269–272.

***Статьи в сборниках материалов научных конференций***

10. Головатая, Е. А. Обработка и структурная детализация цветных изображений видеоэндоскопических систем / Е. А. Головатая, Т. А. Гинько, Л. В. Калацкая // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы Третьей междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–29 апр. 2015 г. / Ин-т приклад. физ. проблем Белорус. гос. ун-та ; редкол.: В. И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2015. – С. 151–154.

11. Головатая, Е. А. Использование системы нечеткой логики для анализа кариотипа хромосом / Е. А. Головатая, А. В. Курочкин // Новейшие достижения в науке и образовании: отечественный и зарубежный опыт : сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., Смоленск, 31 окт. 2015 г. : в 2 ч. / Наукосфера. – Смоленск, 2015. – Ч. 1. – С. 28–30.

12. Halavataya, K. Applied structural detail enhancement methods in videoendoscopic imaging and their use in clinical practice / K. Halavataya, T. Ginko, L. Kalatskaya // Fourth international conference on radiation and applications in various fields of research, Nis, Serbia, 23–27 May 2016 : proceedings / Univ. of Nis; ed.: G. Ristic [et al.]. – Nis, 2016. – Vol.1. – P. 139–142.

13. Лабаревич, И. И. Трехмерное моделирование и пространственная визуализация физических процессов / И. И. Лабаревич, Е. А. Головатая // Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана : сб. материалов науч.-практ. конф., 13 окт. 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016. – С. 254–256.

14. Головатая, Е. А. Трехмерная реконструкция объектов по цветным изображениям и видеоряду аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов / Е. А. Головатая, В. С. Садов // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 марта 2017 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол. В. Я. Груданова [и др.]. – Минск, 2017. – С. 270–272.

15. Нечай, О. С. Анализ изображений систем молекулярно-генетических

исследований при проведении флуоресцентной гибридизации / О. С. Нечай, Е. А. Головатая // Сборник работ 74-й научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета, Минск, 15–24 мая 2017 г. : в 3 ч. / Белорус. гос. ун-т. – Минск, 2017. – Ч. 1. – С. 232–235.

16. Головатая, Е. А. Использование детекторов и дескрипторов локальных признаков изображений в задаче трехмерной реконструкции объектов по видеоданным / Е. А. Головатая, В. С. Садов // Информационные технологии и системы 2017 (ИТС 2017) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 25 окт. 2017 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2017. – С. 94–95.

17. Нечай, О. С. Выделение объектов на изображениях молекулярно-генетических исследований при проведении флуоресцентной гибридизации / О. С. Нечай, Е. А. Головатая // Информационные технологии и системы 2017 (ИТС 2017) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 25 окт. 2017 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2017. – С. 84–85.

18. Головатая, Е. А. Автоматизированное детектирование объектов в реальном времени при проведении эндоскопического скрининга / Е. А. Головатая, А. В. Курочкин // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем : материалы науч.-техн. конф., Минск, 15–17 февраля 2018 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 2. – С. 247–250.

19. Головатая, Е. А. Исследование устойчивости алгоритмов вычисления дескрипторов локальных признаков к аффинным преобразованиям в задаче трехмерной реконструкции [Электронный ресурс] / Е. А. Головатая, В. С. Садов // Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ – 2018) : электрон. сб. ст. I Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

20. Головатая, Е. А. Исследование алгоритмов построения разреженного облака точек в задаче трехмерной реконструкции по набору изображений / Е. А. Головатая, Т. А. Гинько, В. С. Садов // Актуальные вопросы современной науки : сб. ст. по материалам XIV междунар. науч.-практ. конф., Томск, 26 сент. 2018 г. : в 2 ч. / НИЦ Вестник науки. – Уфа, 2018. – Ч. 1. – С. 9–13.

21. Чернявский, А. Ф. Сбор и обработка видеоэндоскопических изображений для построения трехмерной модели объекта / А. Ф. Чернявский, Е. А. Головатая, В. С. Садов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы Пятой

международ. науч.-практ. конф., Минск, 16–17 мая 2019 г. / Ин-т приклад. физ. проблем Белорус. гос. ун-та ; редкол.: В. И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2019. – С. 161–163.

22. Григорьев, И. П. Детектирование офтальмологических нарушений на основе нейросетевого анализа данных медицинских исследований / И. П. Григорьев, Е. И. Козлова, Е. А. Головатая, К. В. Белявцева // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы Пятой международ. науч.-практ. конф., Минск, 16–17 мая 2019 г. / Ин-т приклад. физ. проблем Белорус. гос. ун-та ; редкол.: В. И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2019. – С. 131–132.

23. Головатая, Е. А. Оценка качества результатов алгоритмов трехмерной реконструкции сцен / Е. А. Головатая, В. С. Садов // Информационные технологии и системы (ИТС 2019) : материалы международ. конф., Минск, 30 окт. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2019. – С. 160-161.

### *Тезисы докладов*

24. Halavataya, K. Interactive color image processing in photodynamic therapy / K. Halavataya, T. Ginko, L. Kalatskaya // Fourth international conference on radiation and applications in various fields of research, Nis, Serbia, 23–27 May 2016 : book of abstr. / Univ. of Nis. – Nis, 2016. – P. 114.

25. Курочкин, А. В. Защита информации и информационная безопасность в медицинских системах / А. В. Курочкин, Е. А. Головатая // Технические средства защиты информации : тез. докл. XV Белорус.-рос. науч.-техн. конф., Минск, 6 июня 2017 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Т. В. Борботько [и др.]. – Минск, 2017. – С. 52.

26. Доменикан, А. В. Подходы к биометрической аутентификации с использованием трехмерной реконструкции / А. В. Доменикан, Е. А. Головатая // Технические средства защиты информации : тез. докл. XV Белорус.-рос. науч.-техн. конф., Минск, 6 июня 2017 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Т. В. Борботько [и др.]. – Минск, 2017. – С. 87–88.

27. Halavataya, K. 3D reconstruction of small-scale interior surface / K. Halavataya, V. Sadau // 62nd international conference for students of physics and natural sciences «Open readings 2019» : book of abstr. / Vilnius Univ. ; ed.: E. Skliutas [et al.]. – Vilnius, 2019. – P. 472.

28. Grygoryev, I. Detection of ophthalmic disorders on the basis of neural network analysis of medical research data / I. Grygoryev, K. Halavataya // 62nd international conference for students of physics and natural sciences «Open readings 2019» : book of abstr. / Vilnius Univ. ; ed.: E. Skliutas [et al.]. – Vilnius, 2019. – P. 469.

**Галаватая Кацярына Аляксандраўна****Мадэлі і алгарытмы трохмернай рэканструкцыі аб'ектаў  
па поўнакаляровым відэаэндаскапічным малюнкам**

Ключавыя словы: трохмерная рэканструкцыя, апрацоўка малюнкаў, відэаэндаскапічныя медыцынскія сістэмы.

Мэтай дысертацыйнай працы з'яўляецца атрыманне рэпрэзентатыўнай прасторавай трохмернай мадэлі па выніках відэаэндаскапічнага даследавання, якая адлюстроўвае асноўныя характарыстыкі доследных абласцей і дазваляе праводзіць больш дэталёвую дыягностыку.

Метады даследавання: лічбавая апрацоўка сігналаў, метады апрацоўкі малюнкаў і камп'ютэрнага гледжання, алгарытмы апісання і супастаўлення лакальных прыкмет малюнкаў, алгарытмы трохмернай рэканструкцыі, метады звязкаў, метады зваротных праекцый, метады лічбавай аптымізацыі, метады лічбавага рашэння дыферэнцыяльных раўнанняў, а таксама метады і сродкі распрацоўкі праграмаўнага забеспячэння.

Атрыманы новыя вынікі: матэматычная мадэль фармавання малюнка сферычнай шырокавугольнай праекцыі пры здымцы шырокавугольнымі аб'ектывамі з улікам дыстарсійных скажэнняў, алгарытмы пошуку і апісання характэрных кропак малюнкаў на падставе аналізу лакальных прасторавых наваколляў, якія маюць адаптыўнасць адносна яркасных, частотных і каляровых характарыстык малюнка, алгарытм пабудовы трохмернай мадэлі ўнутраных органаў па выніках відэаэндаскапічнага абследавання з ітэратыўнай падладкай.

Вынікі апрабаваны і выкарыстоўваюцца медыцынскімі цэнтрамі ТАА «Біямедыка Плюс»; УП «МедАрт»; УЗ «3-я гарадская клінічная бальніца імя А.В. Клумава»; ДНУ «Інстытут эксперыментальнай батанікі імя В.Ф. Купрэвіча Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі»; кафедрай інтэлектуальных сістэм Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта.

Вобласцю ужывання распрацаваных мадэляў і алгарытмаў з'яўляюцца сістэмы медыцынскай дыягностыкі, а таксама іншыя сістэмы камп'ютэрнага гледжання.



**Головатая Екатерина Александровна**

**Модели и алгоритмы трехмерной реконструкции объектов  
по полноцветным видеоэндоскопическим изображениям**

Ключевые слова: трехмерная реконструкция, обработка изображений, видеоэндоскопические медицинские системы.

Целью диссертационной работы является получение репрезентативной пространственной трехмерной модели по результатам видеоэндоскопических исследований, отражающей основные характеристики исследуемых областей и позволяющей проводить более детальную диагностику.

Методы исследования: цифровая обработка сигналов, методы обработки изображений и компьютерного зрения, алгоритмы описания и сопоставления локальных признаков изображений, алгоритмы трехмерной реконструкции, метод связок, методы обратных проекций, методы численной оптимизации, методы численного решения дифференциальных уравнений, а также методы и средства разработки программного обеспечения.

Получены новые результаты: математическая модель формирования изображения сферической широкоугольной проекции при съемке широкоугольными объективами с учетом дисторсионных искажений, алгоритмы поиска и описания характерных точек изображений на основании анализа локальных пространственных окрестностей, обладающие адаптивностью относительно яркостных, частотных и цветовых характеристик изображения, алгоритм построения трехмерной модели внутренних органов по результатам видеоэндоскопических обследований с итеративной подстройкой.

Результаты апробировались и используются медицинскими центрами ООО «Биомедика Плюс»; УП «МедАрт»; УЗ «3-я городская клинической больницы имени Е.В. Клумова»; ГНУ «Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси»; кафедрой интеллектуальных систем Белорусского государственного университета.

Областью применения разработанных моделей и алгоритмов являются системы медицинской диагностики, а также другие системы компьютерного зрения.

**SUMMARY****Halavataya Katsiaryna Aliaksandrauna****Models and algorithms for 3D object reconstruction  
from full-color videoendoscopic images**

Keywords: three-dimensional reconstruction, image processing, video endoscopic medical systems.

The aim of the thesis is to obtain a representative spatial three-dimensional model based on the results of video endoscopic studies, which reflects the main characteristics of the studied areas and allows for more detailed diagnostics.

Research methods: digital signal processing, image processing and computer vision methods, algorithms for describing and comparing local image features, three-dimensional reconstruction algorithms, bundle adjustment method, backprojection methods, computational optimization methods, computational differential equation solving methods, as well as software development methods and tools.

New results were obtained: a mathematical model for forming an image of a spherical wide-angle projection of a wide-angle lens shots, taking into account optical distortion deformations, algorithms for localizing and describing key points of images based on the analysis of local spatial neighborhoods, that are adaptive to the brightness, frequency and color characteristics of the image, an algorithm for reconstructing three-dimensional models of internal organs according to the results of video endoscopic examinations with iterative tuning.

The results were tested and used by the medical centers LLC «Biomedica Plus»; company «MedArt»; 3rd city clinical hospital named after E.V. Klumova; State Scientific Institution «V.F.Kuprevich Institute of experimental botany of the National academy of sciences of Belarus»; Department of Intelligent Systems of the Belarusian State University.

Application fields of the developed models and algorithms are medical diagnostic systems, as well as other computer vision systems.

