

Государственное научное учреждение
«Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси»

УДК 004.932; 528.854; 528.716.1

ЛУКАШЕВИЧ
Павел Владимирович

**АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ НАВИГАЦИИ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ЦЕЛЬЮ
АЭРОФОТОСЪЕМКИ И ВЫДЕЛЕНИЯ ЗДАНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Минск, 2018

Работа выполнена в государственном научном учреждении «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

Научный руководитель **Залесский Борис Андреевич**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией обработки и распознавания изображений ГНУ «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

Официальные оппоненты: **Головко Владимир Адамович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных информационных технологий УО «Брестский государственный технический университет»

Буча Виктор Валентинович, кандидат технических наук, технический директор УП «ДейтаМола»

Оппонирующая организация УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита состоится 25 сентября 2018 г. в 14:30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.04.01 при государственном научном учреждении «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220012, Минск, ул. Сурганова, 6, зал заседаний. Телефон ученого секретаря (+375 17) 284-21-68, e-mail: lipn@newman.bas-net.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, доцент



Липницкий С.Ф.

ВВЕДЕНИЕ

Алгоритмы автоматической обработки и анализа аэрофотоснимков и космических изображений в последнее время получили широкое распространение и занимают важную нишу в современных системах обработки и анализа информации. Это вызвано, прежде всего, возрастающей потребностью в автоматизированных методах обработки информации, увеличивающейся доступностью данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также снижением стоимости и повышением качества этих данных.

Следует отметить, что доступность данных ДЗЗ связана в том числе с появлением принципиально новых возможностей их получения посредством пролетов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Распространение БПЛА позволило не только удешевить получение данных, но и *решать принципиально новые задачи*, основанные на *систематическом получении и анализе* данных аэрофотосъемки высокого разрешения на заданную территорию.

Традиционно для выполнения автономных пролетов БПЛА гражданского назначения используются системы глобального спутникового позиционирования: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. Однако системы такого рода могут оказаться недостаточно надежными и точными для некоторых задач. Наличие резервных систем автономного позиционирования аппарата является необходимым в условиях слабого, отсутствующего или заблокированного сигнала глобальной спутниковой навигации, особенно при пролетах над густонаселенными районами.

В последние годы для решения задач навигации мобильных роботов успешно применяются подходы на основе анализа изображений с бортовой камеры устройства. Эти же базовые принципы могут быть использованы и для *определения положения БПЛА* относительно подготовленного навигационного изображения-образца. Такие алгоритмы будут особенно полезны при выполнении регулярной плановой аэрофотосъемки местности, которая может быть выполнена в автономном режиме и с высокой точностью.

Важной составляющей задачи анализа ДЗЗ являются алгоритмы автоматизированной обработки аэрофотоснимков для *обнаружения и выделения на них зданий и их признаков*. Задача востребована для учета объектов недвижимости, зданий, сооружений, объектов незавершенного строительства, незаконных или опасных застроек. Ее актуальность продиктована тем, что на данный момент идет активное освоение территорий и остро стоит вопрос составления новых и актуализации существующих карт. В связи с этим растёт необходимость в автоматизации обработки данных, поскольку их ручная обработка занимает слишком много времени и средств.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа относится к приоритетному направлению 5 «Информационно-коммуникационные, авиационные и космические технологии и аппаратура» Перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденному 19 апреля 2010 г. Советом Министров Республики Беларусь (Постановление № 585); а также к приоритетному направлению 5 «Информатика и космические исследования» Перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2017 – 2020 годы, утвержденному 12 марта 2015 г. Советом Министров Республики Беларусь (Постановление № 190).

Основой диссертационной работы являются исследования, проведенные автором в 2005 – 2017 гг. в Объединенном институте проблем информатики НАН Беларуси в рамках государственных научно-технических программ и заданий, договоров, а также международных научно-технических программ:

– «Комплекс программных средств подготовки и контроля информационного обеспечения полетных заданий» («МОДЕЛЬ ПЗ»), договор № 219/1 от 23.12.2011 г.;

– «Разработать алгоритмы обнаружения областей изображений по эталону для коррекции курса беспилотного летательного аппарата и экспериментальные программы моделирования работы его оптико-электронной навигационной системы» (НТП Союзного государства «Космос-НТ» на 2008 – 2011 годы, мероприятие 1.1, задание 5СК/08-211), № гос. рег. 20115533;

– «Методы и технологии анализа и распознавания статических и динамических изображений» (ГКПНИ «Научные основы информационных технологий и систем (ИНФОТЕХ)» на 2006–2010 годы, задание ИНТ 03), № гос. рег. 20063580;

– «Знание-ориентированный подход к пониманию изображений. Теоретические основы и экспериментальные исследования» (задание БРФФИ № Ф08Р-096), № гос. рег. 20082754;

– «Интеллектуальные методы, модели и алгоритмы обработки и распознавания объектов изображений сложной природы» (ГПНИ «Научные основы и инструментальные средства информационных и космических технологий» на 2011–2013 годы, задание ИК 1.4.03), № гос. рег. 20113160;

– Совместный Французско-Российско-Белорусский проект «Object Detection and EStimation using Stochastic Algorithms» («ODESSA») (<http://www-sop.inria.fr/ariana/Projets/Odessa/index.html>).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является повышение эффективности выделения зданий на аэрофотоснимках. Для достижения поставленной цели в диссертации разработан комплекс алгоритмов анализа изображений для автономной навигации беспилотных летательных аппаратов при выполнении аэрофотосъемки и автоматического обнаружения и выделения зданий и их признаков на полученных аэрофотоснимках.

В диссертации поставлены и решены следующие *задачи*:

- 1) разработан алгоритм быстрого поиска изображения с бортовой камеры БПЛА на навигационном изображении-образце для уточнения на его основе положения БПЛА в пространстве при выполнении аэрофотосъемки;
- 2) разработан алгоритм выделения теней на аэрофотоснимках для формирования на его основе одного из критериев наличия зданий;
- 3) разработан алгоритм определения положения и ориентации углов заданной угловой меры на аэрофотоснимках для формирования на его основе одного из критериев наличия зданий;
- 4) разработан многокритериальный алгоритм для обнаружения и выделения зданий на аэрофотоснимках, учитывающий в том числе и упомянутые критерии наличия тени, наличия углов, а также критерии формы и цвета.

Научная новизна

1. Разработан алгоритм быстрого обнаружения областей на изображениях, позволяющий определять положение БПЛА в пространстве на основе поиска соответствий кадров, полученных бортовой камерой БПЛА, и навигационного изображения-образца, заданного аэрофото- или космическим снимком района пролета. Алгоритм разработан с учетом ограничений бортовых вычислителей малых БПЛА и обеспечивает навигацию в режиме реального времени на больших аэрофотоснимках (до $10^4 \times 10^4$ пикселей).

2. Разработан алгоритм выделения теней, позволяющий выделять тени от зданий на полутоновых и цветных аэрофотоснимках сложного городского ландшафта на основе анализа формы гистограмм яркости областей изображения.

3. Разработан алгоритм автоматического обнаружения углов, позволяющий выделять на полутоновых и цветных аэрофотоснимках характерные для зданий углы, в том числе заданной градусной меры, и их вершины на основе анализа ориентаций градиента изображения.

4. Разработан многокритериальный алгоритм обнаружения зданий на полутоновых и цветных аэрофотоснимках, позволяющий осуществлять выделение зданий без предварительного обучения на основе характеристик формы объекта, наличия углов заданной величины, теней, яркости или цвета.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм быстрого обнаружения областей на аэрофото- и космических снимках, основанный на сравнении гистограмм ориентаций градиента изображений, совместном анализе серии кадров с последующим уточнением их найденных положений, позволяющий до 50 раз ускорить поиск областей, по сравнению с известными методами SURF, SIFT, ORB, обеспечивающий вычисления в режиме реального времени на больших аэрофотоснимках (до $10^4 \times 10^4$ пикселей).

2. Алгоритм выделения теней, основанный на анализе формы гистограмм яркости областей изображений, позволяющий осуществлять автоматическое выделение теней от зданий на полутоновых и цветных аэрофотоснимках сложного городского ландшафта.

3. Алгоритм автоматического обнаружения углов, основанный на анализе ориентаций градиента изображения, позволяющий выделять вершины углов заданной градусной меры на полутоновых и цветных аэрофотоснимках, а также, в отличие от известных алгоритмов, оценивать ориентацию их сторон и выделять все искомые углы, выходящие из одной вершины.

4. Алгоритм обнаружения зданий на полутоновых и цветных аэрофотоснимках, основанный на вычислении и совместном анализе набора признаков, позволяющий, в отличие от известных, осуществлять выделение зданий без предварительного обучения на основе характеристик формы объекта, наличия углов заданной величины, теней, яркости или цвета.

Личный вклад соискателя

Основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены лично диссертантом. Все алгоритмы, обсуждаемые в работе, были разработаны и экспериментально исследованы автором самостоятельно. Научный руководитель принимал участие в постановке цели и задач исследования, их предварительном анализе, планировании экспериментов, а также в обсуждении полученных результатов. Соавторы опубликованных работ принимали участие в обсуждении промежуточных и конечных результатов. Обработка, интерпретация данных, а также выводы сделаны автором самостоятельно.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 9th International conference on Pattern Recognition and Image Analysis (Nizhny Novgorod, 2008); 10th International

conference on Pattern recognition and information processing (Minsk, 2009); XXIIe colloque GRETSI - Traitement du Signal et des Images (Dijon, 2009); 11th International Conference on Pattern recognition and information processing (Minsk, 2011); International conference on Information and Digital Technologies (Žilina, 2013, 2015, 2017); Восьмая Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (Дивноморское, 2015); Конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'17» (Дивноморское, 2017).

Результаты диссертационной работы использованы в комплексе программных средств подготовки и контроля информационного обеспечения полетных заданий (ГНУ «ОИПИ НАН Беларуси»), экспериментальном картографическом обеспечении унифицированных мобильных платформ (ОАО «ВОЛАТАВТО»), результаты также отражены в четырех отчетах НИР.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, из них шесть статей в научных журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 3,4 авторского листа), семь статей и два тезиса доклада в материалах международных научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 148 страниц, из них 96 страниц текста, 38 иллюстраций на 15 страницах, 11 таблиц на трех страницах, список использованных библиографических источников (140 наименований на 12 страницах), список публикаций автора по теме диссертации (15 наименований на трех страницах), три приложения на 11 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** описаны важные на текущий момент задачи получения и автоматической обработки данных ДЗЗ, обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость проведения исследований, связанных с разработкой методов и алгоритмов визуальной навигации, автоматического выделения зданий и их признаков.

В **первой главе** выполнен анализ научно-технической литературы по вопросам навигации по изображению, задачам автоматического выделения зданий на полутоновых и цветных аэрофотоснимках, а также двум важным подзадачам выделения признаков теней и углов зданий на изображениях. Показана актуальность исследования в выбранном направлении. Выполнен обзор существующих алгоритмов и подходов к решению рассматриваемых задач, выявлены их слабые стороны и недостатки. В конце главы на основе проведенного анализа сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

Вторая глава диссертации посвящена решению задачи быстрого поиска соответствий кадров бортовой камеры БПЛА и навигационного изображения-образца для обеспечения автономной навигации аппарата при выполнении аэрофотосъемки местности.

В главе описывается разработанный масштабно инвариантный алгоритм обнаружения областей изображений SICHT (Scale Invariant Compressed Histogram Transform) [2, 10, 12, 15]. SICHT объединяет быстрые методы глобального поиска, статистического анализа, корреляционного уточнения и состоит из следующих *крупных блоков*:

- *предварительное определение взаимного расположения* областей изображений на основе сравнения гистограмм ориентаций их градиента;
- *статистическая обработка* информации о положении, ориентации и масштабе по нескольким последовательным кадрам и *повышение* на ее основе *точности и достоверности* найденного решения;
- *уточнение взаимного положения, относительного угла поворота и масштаба* изображений при помощи корреляции.

Для выполнения *глобального поиска (первый этап SICHT) шаблона* на *эталоне – кадров с БПЛА* на навигационном *изображении-образце* – в условиях неопределенности их масштаба, сдвига и поворота, прежде всего необходимо подготовить набор многомасштабных дескрипторов эталона. Для этого требуется: построить масштабную пирамиду эталона; вычислить гистограммы ориентаций градиента областей изображений (HoG) для регулярной подрешетки пикселей; сгладить, выровнять по главному направлению градиента, сжать в наперед заданное число раз и сохранить найденные HoG. Эти операции могут выполняться *заблаговременно*.

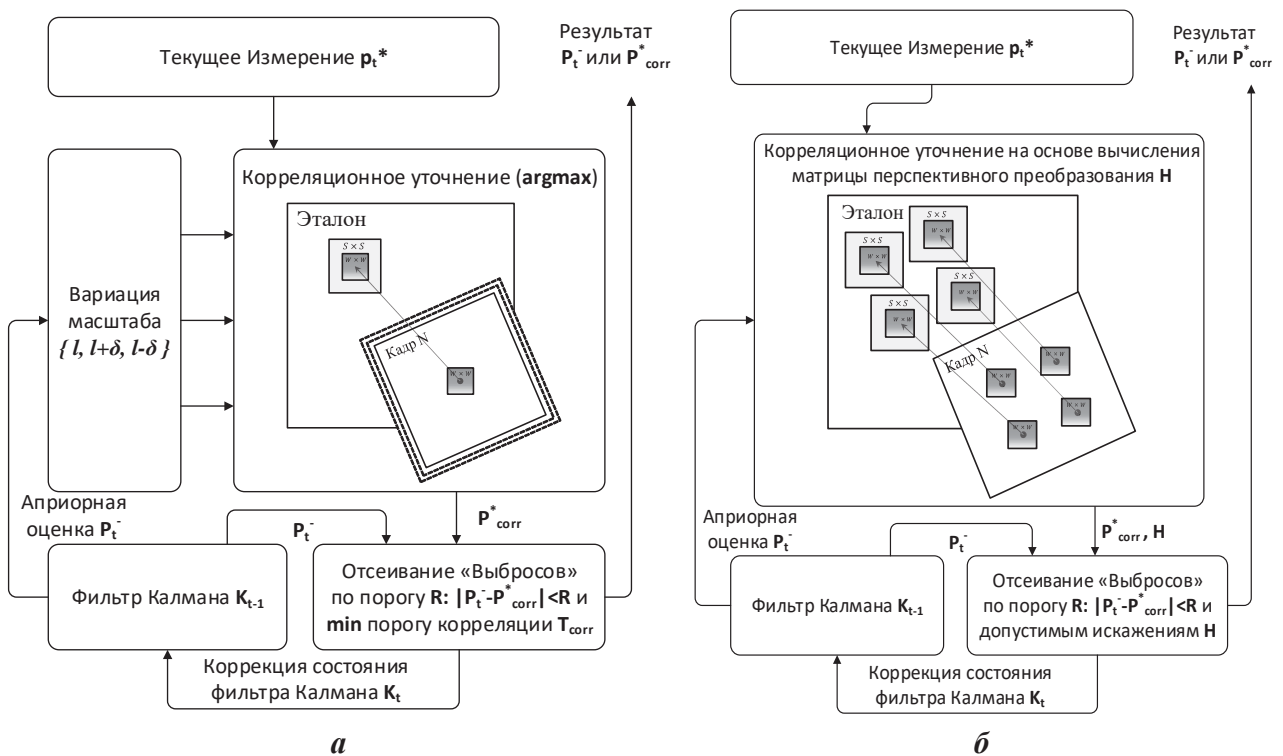
Далее, *в режиме реального времени* необходимо аналогичным образом провести вычисления дескриптора для шаблона, сравнить его со всеми дескрипторами эталона и выбрать из них наиболее похожий.

На тестовых видеопоследовательностях при настройках, обеспечивавших работу в режиме реального времени, указанным методом глобального поиска

было обнаружено более 85 % кадров при ошибке определения координат не более 12 % ширины кадра шаблона.

Для *повышения точности и достоверности* определения положения, ориентации и масштаба шаблона были разработаны процедуры статистической обработки и уточнения найденных решений (*второй этап SICHT*). Реализованные подходы основаны на предположении о близком пространственном расположении и схожей ориентацией бортовой камеры БПЛА при получении последовательных кадров шаблона, что сделало возможным разделить все наблюдения на два класса: *координаты с шумом* и *выбросы*. После фильтрации выбросов проводилось уточнение обобщенных координат кадра на основе одного из двух методов: анализ усредненных по серии наблюдений обобщенных координат (CLUSTER); применение алгоритма на основе фильтра Калмана (KALMAN).

При необходимости *дополнительного повышения точности* на последнем этапе работы алгоритма (*третий этап SICHT*) применяется несколько разновидностей процедур уточнения координат *на основе корреляции* (см. рисунок 1).



а – корреляция разномасштабных областей шаблона (CORR_PS);

б – анализ нескольких локальных корреляционных максимумов (CORR_W4)

Рисунок 1. – Схема процедуры уточнения параметров на основе корреляции

Первый алгоритм (CORR_PS, рисунок 1, а) уточняет положение центра кадра на эталоне на основе корреляции, а также на основе вычисления корреляций с увеличенным и уменьшенным шаблоном уточняет масштаб.

Второй алгоритм (CORR_W4, рисунок 1, б) основан на вычислении корреляции для четырех областей изображения. Такой подход позволил: более точно определять положение, масштаб и угол поворота; осуществлять верификацию найденного решения на основании проверки условия сохранения взаимного расположения областей кадра-шаблона на эталоне; а также частично компенсировать возникающие при незначительном наклоне камеры перспективные искажения.

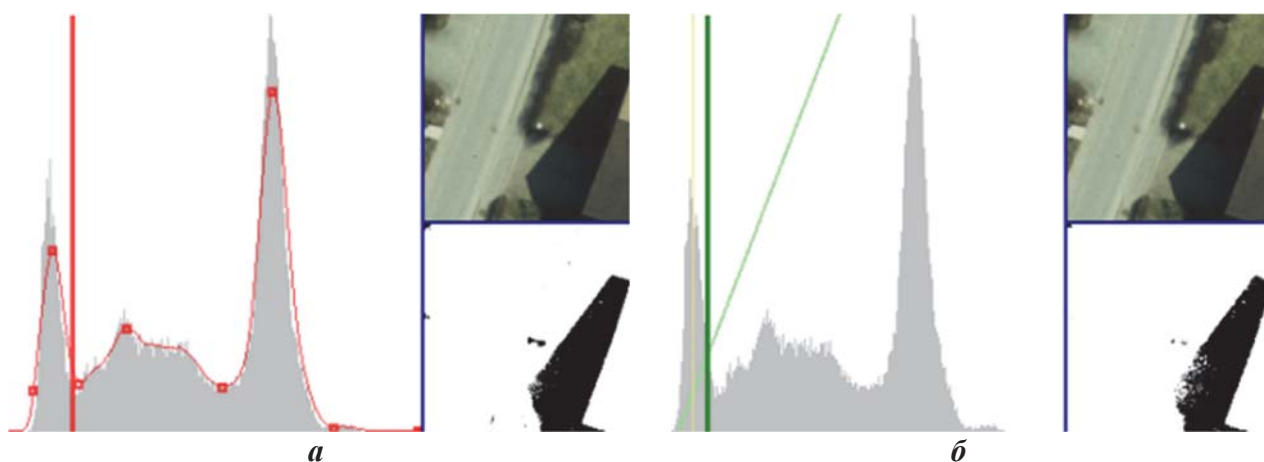
Результаты комплексного тестирования показали, что разработанный алгоритм SICHT успешно конкурирует в решении задач *быстрого* поиска участков изображений с лучшими известными аналогами (таблица 1).

Таблица 1. – Сравнение производительности алгоритмов SURF и SICHT

	SURF						SICHT	
	<i>Image Video</i>	$\frac{1}{2}$ Image Video	$\frac{1}{4}$ Image Video	$\frac{1}{2}$ Image Video	$\frac{1}{4}$ Image Video	$\frac{1}{4}$ Image Video	CORR-PS	CORR-W4
СО* координаты, пикс	0,18	0,22	0,81	1,04	1,38	3,4	0,9	0,86
СО* масштаба, %	0,3	0,6	4,8	1	4,3	12,5	11,3	2,5
СО* угла, град	0,70	0,73	2,3	0,82	2,73	6,71	7,81	1,82
Время счета, мс	3 303	1 272	713	948	349	202	42	31,1
Найдено кадров, %	100	100	96	100	95,6	69,4	86,24	67,9

*СО – среднее отклонение (среднее абсолютное отклонение).

В **третьей** главе описываются алгоритмы обработки изображений, позволяющие выделять информативные признаки на изображениях, используемые в дальнейшем для выделения зданий. Это алгоритмы автоматического *обнаружения и выделения теней* на изображениях (см. рисунок 2), алгоритм *проверки наличия и определения ориентации* расположенных на них *углов* заданной величины, алгоритмы *сравнения цветов*.



а – анализ расположения экстремумов сглаженной гистограммы (Алгоритм 3.1.2)

б – анализ скорости роста (угла наклона) гистограммы (Алгоритм 3.1.3)

Рисунок 2. – Автоматический выбор локального порога тени по форме гистограммы яркости участка изображения (толстая вертикальная линия)

В *разделе 3.1* предлагаются алгоритмы *автоматического выделения теней* на полутоновых и цветных изображениях [1]. Алгоритмы основаны на поиске определенных шаблонов *формы гистограмм яркостей участков изображения*, характерных для пикселей теней зданий на аэрофотоснимках.

В работе описано *два* способа выделения тени. *Первый* основан на нахождении и анализе расположения экстремумов сглаженных гистограмм (*Алгоритм 3.1.2*, рисунок 2, *а*). Для быстрого вычисления гистограмм яркостей участков использовались подходы описанные в [8], а для их сглаживания применялись: скользящее среднее, аппроксимация линейными, квадратичными и кубическими сплайнами.

Алгоритм 3.1.2 выполняется для каждого пикселя \mathbf{p} изображения:

Шаг 1. Вычисление гистограммы $\mathbf{h}(\mathbf{p})$ участка изображения в окне $O(\mathbf{p})$.

Шаг 2. Сглаживание или аппроксимация $\mathbf{h}(\mathbf{p})$ (реализовано 3 варианта).

Шаг 3. Определение i_{beg} – области начала существенного роста $\mathbf{h}(\mathbf{p})$:

$$i_{beg} = \min_i \left\{ \frac{\sum_{k=0}^i h_k(\mathbf{I})}{\sum_{k=0}^{255} h_k(\mathbf{I})} \geq \tau, i \in [0; 255], \tau = 0,01 \div 0,1 \right\}. \quad (1)$$

Шаг 4. Нахождение $i_{max}(1)$ – положения первого значимого локального максимума $\mathbf{h}(\mathbf{p})$ на интервале $[i_{beg}, 255]$. Если значимого локального максимума нет, считать пиксел освещенным, перейти к *шагу 8*.

Шаг 5. Нахождение $i_{max}(2)$ – положения второго значимого локального максимума $\mathbf{h}(\mathbf{p})$ на интервале $[i_{max}(1), 255]$. Если значимого локального максимума нет, считать пиксел освещенным, перейти к *шагу 8*.

Шаг 6. Вычисление порога тени $\rho = 2 \cdot i_{max}(1) - i_{beg}$ для пикселя \mathbf{p} .

Шаг 7. Классификация \mathbf{p} . Если $I_{\mathbf{p}} < \rho$, пиксел \mathbf{p} считается принадлежащим тени, в противном случае – принадлежащим освещенной части изображения.

Шаг 8. Конец.

Второй способ выделения локального порога тени (*Алгоритм 3.1.3*, рисунок 2, *б*) основан на анализе скорости роста (угла наклона) гистограммы яркости участка изображения.

Алгоритм 3.1.3 во многом повторяет *алгоритм 3.1.2*, однако для него *шаги 4, 5, 6* запишутся как:

Шаг 4. Вычисление величины среднего колебания ω гистограммы $\mathbf{h}(\mathbf{p})$:

$$\omega(\mathbf{h}(\mathbf{p})) = \frac{1}{255 - i_{beg}} \sum_{i=i_{beg}}^{255} |h_{i+1}(\mathbf{p}) - h_i(\mathbf{p})|. \quad (2)$$

Шаг 5. Вычисление вспомогательного порога δ тени для пикселя \mathbf{p} :

$$\delta = \min_i \{ |h_{i+1}(\mathbf{p}) - h_i(\mathbf{p})| \leq \omega(\mathbf{h}(\mathbf{p})), i \in [i_{beg}, 255] \}. \quad (3)$$

Шаг 6. Окончание вычисления порога тени $\rho = 2\delta - i_{beg}$ для пикселя \mathbf{p} .

Разработанные алгоритмы были протестированы на цветных и полутоновых аэрофотоснимках и показали хорошие результаты (см. таблицу 2). Алгоритмы устойчивы к сдвигам и растяжениям гистограмм, просты для понимания и реализации, легко поддаются доработке; могут быть модифицированы и для выделения наиболее ярких объектов, например, крыш зданий.

Таблица 2. – Точность алгоритмов выделения теней на полутоновом изображении

Метод	Верно найденные (TP), Мпикс	Пропущенные (FN), Мпикс	Ошибочно найденные (FP), Мпикс	Точность, % P = TP/(TP+FP)	Полнота, % R = TP/(TP+FN)	F ¹ -мера, % F ¹ = 2PR/(P+R)
Алгоритм 3.1.2	1,32	0,66	0,69	65,6	66,6	66,1
Алгоритм 3.1.3	1,88	0,27	0,09	95,5	87,3	91,2
Выбор вручную	1,72	0,42	1,38	55,5	80,3	65,6
Метод Отсу	2,25	0,03	6,97	24,4	98,9	39,1

В *разделе 3.2* представлен алгоритм *автоматического выделения положения и ориентации углов* заданной величины на полутоновых и цветных изображениях. Алгоритм основан на анализе ориентаций градиента изображения и оценивает степень заполнения тонкого (толщиной от одного до нескольких пикселей) растрового шаблона угла градиентом [4].

Алгоритм позволяет выделять на изображениях вершины углов заданной градусной меры, а также, в отличие от известных алгоритмов, оценивать ориентацию их сторон и выделять все искомые углы, выходящие из одной вершины.

Например, наличие углов градусной меры 90° является надежным и информативным критерием существования здания на изображениях современной городской застройки. Для загородной застройки дополнительно могут учитываться углы 45°, 135°, характерные для вантовых и четырехскатных крыш.

Для обнаружения углов фиксированной угловой величины α необходимо:

Шаг 1. Заполнить матрицу градиента $\hat{\mathbf{G}}$ изображения элементами $\hat{\mathbf{G}}_p = (|\mathbf{G}_p|, \alpha_p)$, где α_p – угол наклона градиента в пикселе p , а $|\mathbf{G}_p|$ – его длина.

Шаг 2. Рассчитать и сохранить массив \mathbf{L} растровых шаблонов отрезков сторон угла l , образующих с осью Ox углы $0, \delta, 2\delta, \dots, M\delta$, $M = \left\lfloor \frac{2\pi}{\delta} \right\rfloor$ (δ – шаг по углу, задающий точность вычислений для поставленной задачи).

Шаг 3. Для каждого пиксела изображения p и для каждого угла $\gamma = k\delta$, $k = 0 \div M$ вычислить степень заполнения n_1, n_2 растровых шаблонов сторон $l_1, l_2 \in \mathbf{L}$, образующих угол величины α :

$$n_i(\gamma) = \sum_{p \in l_i} |G_p|^{q_1} (1 + |\gamma_i - \alpha_p|)^{-q_2}, i = 1, 2. \quad (4)$$

Значения q_1 и q_2 следует выбирать исходя из характеристик исходных данных, в работе эти значения принимались равными единице.

Шаг 4. Проверить выполнение одного из двух неравенств:

$$\frac{n_1(\gamma)}{|l_1|} \cdot \frac{n_2(\gamma)}{|l_2|} \geq \rho^2 \text{ или } \min\left(\frac{n_1(\gamma)}{|l_1|}, \frac{n_2(\gamma)}{|l_2|}\right) \geq \rho, \quad (5)$$

где ρ определяет степень заполнения растрового шаблона градиентом (в работе ρ выбиралось из интервала от 0,05 до 0,5). Если выражение выполняется, то характеристику угла γ занести в список углов для p .

Шаг 5. Конец.

Разработанный алгоритм показал высокую надежность выделения углов зданий на аэрофотоснимках и низкую вероятность их ложного обнаружения, что важно при формировании на его основе одного из критериев наличия зданий.

В *разделе 3.3* описываются алгоритмы сравнения цветов, разработанные специально для задачи обнаружения зданий на аэрофотоснимках. Описывается два алгоритма сравнения цветов: на основе вычисления коэффициента корреляции Пирсона от трех и более цветовых компонент; и на основе вычисления взвешенного произведения цветовых компонент в пространстве HSV (Hue, Saturation, Value).

Предложенные алгоритмы сравнения цветов просты в реализации и легко поддаются адаптации для применения в различных задачах технического зрения. Каждый из них был использован в задаче выделения зданий на аэрофотоснимках, и доказал свою состоятельность.

В *четвертой главе* описывается алгоритм автоматического обнаружения зданий на аэрофотоснимках и космических изображениях [3, 6].

Разработанный алгоритм основан на *выделении и анализе* однородных по цвету или яркости областей изображения (*кластеров*). При поиске и выделении зданий используется информация о геометрических характеристиках границ кластеров, соседстве кластеров, информация о наличии теней, углов заданной величины, цветовых характеристиках кластеров-кандидатов и др. [5, 7]. Решение о принадлежности кластера C зданию принимается *по совокупности признаков* $\{\rho_1(C), \dots, \rho_n(C)\}$. Каждый из них $\rho_k(C)$ разработан так, чтобы с наименьшими ошибками ложного обнаружения выделять здания или их части.

Все признаки $\rho_k(C)$ имеют числовое выражение, на основании которого вычисляется бинарная переменная $\phi_k(C)$ (принимающая только значения ноль или единица), отражающая отсутствие или наличие у кластера C признака k .

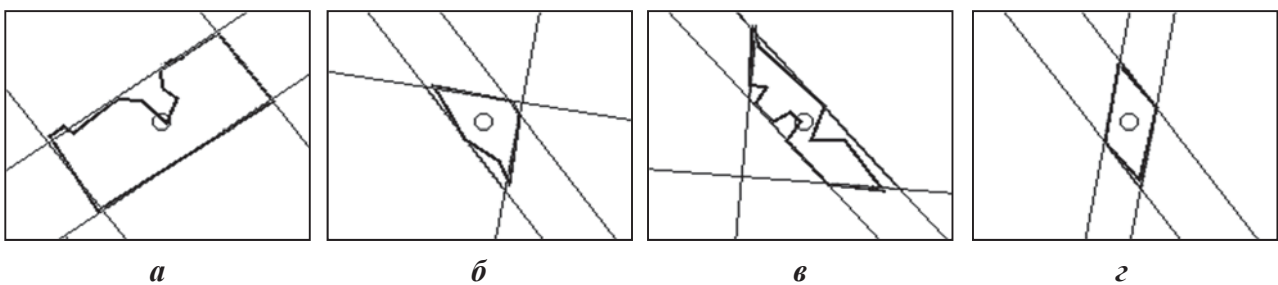
Окончательное решение о принадлежности кластера C зданию производится на основе разработанного классификатора $D(C)$, который является логическим выражением от бинарных переменных.

Самые простые, но информативные признаки основаны на площади кластера $\rho_{size}(C) = |C|$; его изопериметрическом отношении $\rho_{iso}(C) = |\Gamma(C)|/\sqrt{|C|}$; наличии параллельных и перпендикулярных отрезков $\rho_{par\&ort}(C)$.

Важным признаком принадлежности кластера зданию является степень соответствия формы кластера многоугольнику заданной конфигурации $\rho_{form}(C)$. Например, для городского массива с плоскими крышами следует искать кластеры прямоугольной формы, а для коттеджной застройки с двускатными и вантовыми крышами будут более характерны кластеры треугольной и трапециевидной формы.

Для быстрой аппроксимации формы кластера многоугольником заданной формы разработан подход на основе преобразования Хафа. Особенностью алгоритма, позволившей существенно ускорить работу и повысить точность распознавания формы, является использование ломаной $B(C)$, приближающей границу кластера $\Gamma(C)$ с заданной точностью, при построении пространства Хафа и аппроксимации формы кластера C .

Алгоритм позволяет не только найти наилучшую аппроксимацию кластера C фигурой из набора заданных классов геометрических фигур $F = (F_1, \dots, F_k)$, определенных последовательностью углов между смежными сторонами $F_i = (\alpha_{i,1}, \dots, \alpha_{i,l})$, но также и вычислить на основе критерия симметрической разности площадей количественную меру их схожести $\rho_{form}(C)$ (см. рисунок 3).



a – прямоугольник; *б* – треугольник; *в* – трапеция; *г* – параллелограмм

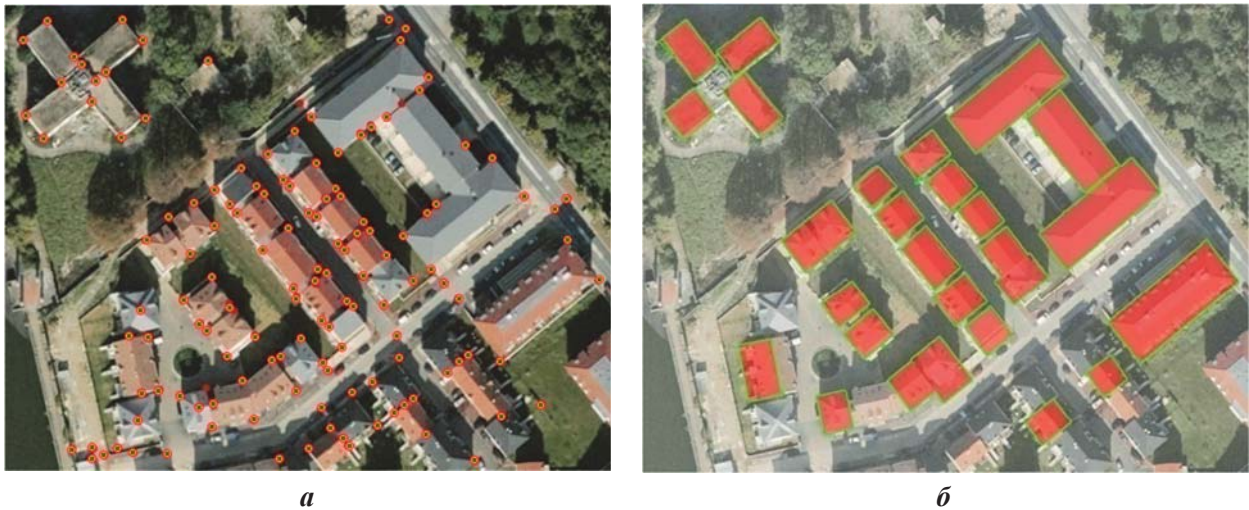
Рисунок 3 – Примеры автоматической аппроксимации кластера многоугольниками

Как показывает практика, на большинстве аэрофотоснимков городской застройки присутствуют контрастные тени, которые также полезны для автоматического выделения зданий. В работе описаны два признака тени. Первый признак $\rho_{shad}^{not}(C)$ характеризует степень заполнения кластера тенью и предназначен для исключения из рассмотрения кластеров напоминающих по форме участки крыш здания, но принадлежащих области тени (ошибочных).

Второй признак $\rho_{shad}^{make}(C)$ характеризует степень того, что кластер C является участком крыши здания, отбрасывающим собственную тень и вычисляется на основании взаимного расположения области тени, исследуемого кластера C и информации о положении источника освещения (солнца).

Так, если скат крыши здания освещен прямыми солнечными лучами, то следует ожидать в непосредственной близости от него в направлении лучей света \overrightarrow{sun} область тени.

Собранная ранее информация о положении и ориентации сторон углов заданной величины применяется для вычисления признака $\rho_{ang}(C)$. Например, для выделения здания прямоугольной формы, необходимо требовать нахождения четырех углов градусной меры $\alpha = 90^\circ$ в непосредственной близости от границы кластера C (см. рисунок 4).



a – исходное изображение и найденные углы 90° ; *б* – выделенные здания
Рисунок 4. – Пример выделения зданий только по признаку $\rho_{ang}(C)$

На основе описанных признаков – $\rho_{size}(C)$, $\rho_{iso}(C)$, $\rho_{par\&ort}(C)$, $\rho_{tetr}(C)$, $\rho_{form}(C)$, $\rho_{shad}^{not}(C)$, $\rho_{shad}^{make}(C)$, $\rho_{ang}(C)$ – в большинстве случаев удастся с высокой точностью выделить бóльшую часть (но не все) зданий.

Для выделения крыш зданий более сложных форм (или частично скрытых кронами деревьев и т.д.) дополнительно был предложен подход на основе анализа цвета крыш зданий. Оригинальность подхода состоит в использовании для выделения новых кандидатов информации о цвете уже найденных зданий, без дополнительного указания априорной информации о цвете. Применение признака цвета $\rho_{col}(C)$ на последней стадии анализа космического изображения существенно увеличивает общее качество распознавания и делает его более универсальным и надежным. В качестве меры близости цвета выбирались критерии, описанные в разделе 3.3 диссертации.

Построение комплексного классификатора $D(C)$ проводится на основе вектора $\Phi(C)$ бинаризованных значений всех перечисленных выше признаков.

При этом переменные $\phi_{size}(C)$, $\phi_{iso}(C)$, $\phi_{par\&ort}(C)$, $\phi_{tetr}(C)$, $\phi_{shad}^{not}(C)$, $\phi_{shad}^{make}(C)$, $\phi_{ang}(C)$ – базовые в том смысле, что каждая из них вычисляется независимо от других. А переменная $\phi_{col}(C)$ – производная, так как ее значение определяется на основе цвета уже классифицированных кластеров.

Таким образом, значения полного классификатора $D(C)$ можно представить через значение базового классификатора $D_0(C)$ и значение $\phi_{col}(C)$. Причем классификатор $D_0(C)$ (для краткости D_0) будет записан как:

$$D_0 = \phi_{size} \wedge \phi_{iso} \wedge \phi_{shad}^{not} \wedge [\phi_{tetr} \vee \phi_{form} \vee \phi_{par\&ort} \vee \phi_{ang} \vee \phi_{shad}^{make}], \quad (6)$$

где $a \wedge b = \min(a, b)$ и $a \vee b = \max(a, b)$.

А после включения производного критерия цвета $\phi_{col}(C)$, получим выражение для полного классификатора $D(C)$ (см. рисунок 5):

$$D(C) = D_0(C) \vee \{\phi_{size}(C) \wedge \phi_{iso}(C) \wedge \phi_{shad}^{not}(C) \wedge \phi_{col}(C)\}. \quad (7)$$



Рисунок 5. – Результат автоматического выделения зданий на изображении (фрагмент) классификатором $D(C)$. Красным контуром выделены обнаруженные части зданий

В общем случае можно построить и более сложное решающее правило, например, на основе голосования признаков, порога их взвешенной суммы или обучения с учителем, но в проведенных экспериментах такой подход не дал ощутимых преимуществ, потеряв при этом простоту формирования итогового правила в виде объединения бинарных критериев.

Для автоматизации тестирования задачи поиска и выделения зданий на нескольких наборах изображений, в том числе и для предварительного выделения на этих изображениях признаков теней и углов заданной величины, применялись подходы, описанные в работах [5, 11, 14]. Реализованный на базе скрипт-ядра планировщик задач осуществлял запуск и контроль выполнения необходимых этапов предобработки изображений и выделения на них зданий в параллельном режиме по мере освобождения вычислительных ресурсов персонального компьютера.

В конце четвертой главы описываются условия проведения, исходные данные и результаты экспериментального тестирования разработанного алгоритма (рисунок 5, таблица 3). В выводах сформулированы условия использования алгоритма, его сильные и слабые стороны.

Таблица 3. – Оценка качества работы алгоритма выделения зданий

Тестовое изображение	Верно найденные (TP)	Пропущенные (FN)	Ошибочно найденные (FP)	Точность, % $P = TP/(TP+FP)$	Полнота, % $R = TP/(TP+FN)$	F ¹ -мера, % $F^1 = 2PR/(P+R)$
<i>Image #1</i>	172	7	5	97,2	96,1	96,6
<i>Image #2</i>	150	9	9	94,3	94,3	94,3
<i>Image #3</i>	80	5	10	88,9	94,1	91,4
<i>Image #4</i>	288	21	119	70,8	93,2	80,4
<i>Все данные</i>	<i>690</i>	<i>42</i>	<i>143</i>	<i>82,8</i>	<i>94,3</i>	<i>88,2</i>

В приложениях представлены не вошедшие в основную часть диссертации результаты тестирования алгоритмов автоматического выделения теней зданий и автоматического обнаружения зданий; приведены документы о практическом использовании результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан алгоритм быстрого обнаружения областей на изображениях SICHТ (Scale Invariant Compressed Histogram Transform), позволяющий до 50 раз ускорить поиск кадра видеопоследовательности на навигационном изображении-образце по сравнению с наиболее популярными методами (SURF, SIFT, ORB). Алгоритм разработан с учетом ограничений бортовых вычислителей малых БПЛА и позволяет осуществлять обработку видеопоследовательности в режиме реального времени на больших аэрофотоснимках (до $10^4 \times 10^4$ пикселей). В основе алгоритма лежит анализ близости гистограмм ориентаций градиента (HoG), а также используются методы подвыборки данных, сглаживания, сжатия и сравнения HoG, совместного анализа серии кадров видеопоследовательности и последующего уточнения их положения [2, 10, 12, 15];

2. Разработан алгоритм выделения теней зданий на аэрофотоснимках, позволяющий на основе анализа формы гистограмм яркостей областей изображения осуществлять автоматическую сегментацию теней на полутонных и цветных изображениях сложного городского ландшафта, цветовые или яркостные характеристики которых различны в разных его областях [1];

3. Разработан алгоритм автоматического определения положения и ориентации сторон углов заданной градусной меры. Алгоритм основан на анализе заполнения растрового шаблона угла значениями градиента изображения и позволяет выделять на изображениях характерные для зданий углы, а также, в отличие от известных алгоритмов, оценивать ориентацию их сторон и выделять все углы, выходящие из одной вершины [4];

4. Разработан алгоритм обнаружения и выделения зданий на полутонных и цветных аэрофотоснимках, позволяющий формировать системы признаков для выделения объектов без предварительного обучения, используя лишь простые геометрические характеристики их формы, дающий возможность сократить время решения задачи за счет использования векторизованных границ кластеров и приближающих их ломаных [3, 6, 7, 9, 13]. Важным достоинством алгоритма является его способность работать только на данных аэрофотосъемки без предварительного обучения, не используя при этом другие типы данных дистанционного зондирования земли (например, данные лидара, стереофотосъемку, серии изображений и видеопоследовательности, радиолокационные изображения высокого разрешения и др.).

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные алгоритмы могут применяться для автоматизированного получения и обработки аэрофотоснимков. Алгоритм быстрого обнаружения участков изображения может применяться для решения задач навигации БПЛА по изображению-образцу, точного позиционирования других аппаратов и манипуляторов, поиска изображений по визуальному запросу и др.

Алгоритм обнаружения и выделения зданий на аэрофотоснимках может применяться как по прямому назначению, так и быть адаптирован для выделения на изображениях других объектов, обладающих выраженными признаками геометрической формы.

Алгоритмы выделения теней, обнаружения углов заданной угловой меры, простых геометрических фигур, контуров и др. могут быть использованы как самостоятельно, так и в составе более сложных систем анализа изображений.

Результаты диссертационной работы использованы в комплексе программных средств подготовки и контроля информационного обеспечения полетных заданий (ГНУ «ОИПИ НАН Беларуси»), экспериментальном картографическом обеспечении унифицированных мобильных платформ (ОАО «ВОЛАТАВТО»), результаты также отражены в четырех отчетах НИР.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Лукашевич, П. В. Выделение теней на изображениях с помощью анализа гистограмм / П. В. Лукашевич, Б. А. Залесский // Информатика. – 2011. – № 29. – С. 118–128.
2. Лукашевич, П. В. Масштабно-инвариантный алгоритм обнаружения областей изображений / П. В. Лукашевич, Б. А. Залесский // Информатика. – 2011. – № 31. – С. 24–30.
3. Лукашевич, П. В. Обнаружение зданий на кластеризованных аэрофотоснимках и космических изображениях / П. В. Лукашевич, Б. А. Залесский // Информатика. – 2011. – № 32. – С. 38–47.
4. Залесский, Б. А. Выделение углов на изображениях на основе ориентированного градиента / Б. А. Залесский, П. В. Лукашевич // Информатика. – 2012. – № 33. – С. 5–11.
5. Недзьведь, А. М. Гибкая система обработки изображений на базе скрипт-ядра с использованием интеллектуального агента / А. М. Недзьведь,

П. В. Лукашевич, А. М. Белоцерковский // Искусств. интеллект. – 2013. – № 61. – С. 200–208.

6. Lukashevich, P. Building detection on aerial and space images / P. Lukashevich, B. Zalesky, A. Belotserkovsky // Slovak Computer Sciences a. Informatics J. – 2017. – Vol. 1. – P. 246–251.

Статьи в сборниках научных трудов и материалах конференций

7. Zalesky, B. Methods of object recognition that use cluster representation of images / B. Zalesky, A. Kravchonok, P. Lukashevich // 9-th International conference on Pattern Recognition and Image Analysis: new information technologies (PRIA'2008) : conf. proc., Nizhni Novgorod, 14–20 Sept. 2008 / Russ. Acad. of Sciences [et al.] ; editorial board: Yu. I. Zhuravlev (chairman) [et al.]. – Nizhni Novgorod, 2008. – Vol. 2. – P. 339–342.

8. Fast realization of digital elevation model / X. Descombes, A. I. Kravchonok, P. V. Lukashevich, B. A. Zalesky // Pattern recognition and information processing (PRIP'09) : proc. of the 10th Intern. conf., Minsk, 19–21 May 2009 / Belarusian State Univ. ; ed.: V. Krasnoproshin, S. Ablameyko, R. Sadykhov. – Minsk, 2009. – P. 156–160.

9. Reconstruction 3D du bâti par la technique des ombres chinoises [Electronic resource] / P. Lukashevish, A. Kravchonok, X. Descombes, J.-D. Durou, B. Zalesky, E. Zhizhina // XXIIe colloque GRETSI: traitement du signal et des images : 8–11 Sept. 2009 / Univ. de Bourgogne. – Dijon, 2009. – Mode of access: <https://hal.inria.fr/inria-00399208>. – Date of access: 14.03.2018.

10. Zalesky, B. A. Scale invariant algorithm to match regions on aero or satellite images / B. A. Zalesky, P. V. Lukashevich // Pattern recognition and information processing (PRIP'2011) : proc. of the 11th Intern. conf., Minsk, 18–20 May 2011 / Belarusian State Univ. of Informatics a. Radioelectronics ; editorial board: R. Sadykhov [et al.]. – Minsk, 2011. – P. 25–30.

11. Belotserkovsky, A. Flexible task-driven system for image processing / A. Belotserkovsky, A. Nedzved, P. Lukashevich // The International conference on Digital Technologies (DT) : Žilina, 29–31 May 2013 / Univ. of Žilina ; ed.: E. Zaitseva, V. Levashenko. – Žilina, 2013. – P. 17–21.

12. Lukashevich, P. The new approach for reliable UAV navigation based on onboard camera image processing / P. Lukashevich, A. Belotserkovsky, A. Nedzved // International conference on Information and Digital Technologies (IDT) : Žilina, 7–9 July 2015 / Inst. of Electrical a. Electronics Engineers ; ed.: E. Zio, E. Zaitseva, K. Pancierz. – Zilina, 2015. – P. 230–234.

13. Лукашевич, П. В. Выделение зданий на космических изображениях и аэрофотоснимках / П. В. Лукашевич // Конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'17» : тр. конгр., Дивноморское, Геленджик, 2 – 9 сент. 2017 г., : в 3 т. / Юж. федер. ун-т. – Таганрог, 2017. – Т. 3. – С. 239–244.

Тезисы докладов

14. Недзведь, А. М. Гибкая система обработки изображений на базе скрипт-ядра с использованием интеллектуального агента / А. М. Недзведь, П. В. Лукашевич, А. М. Белоцерковский // Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы (ИИ-2013) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Кацивели, 23–27 сент. 2013 г. / Ин-т проблем искусств. интеллекта М-ва образования и науки Украины и НАН Украины. – Донецк, 2013. – С. 116–118.

15. Лукашевич, П. В. Устойчивая навигация БПЛА по изображению с бортовой видеокамеры / П. В. Лукашевич, А. Н. Недзведь, А. М. Белоцерковский // Восьмая Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2015) : материалы 8-й Всерос. мультikonф., Дивноморское, Геленджик, 28 сент. – 3 окт. 2015 г. : в 3 т. / Рос. акад. наук [и др.]. – Ростов н/Д, 2015. – Т. 2. – С. 217–219.

РЭЗІЮМЭ

Лукашэвіч Павел Уладзіміравіч

Алгарытмы аналізу выяў для навігацыі беспілотных лятальных апаратаў з мэтай аэрафотаздымкі і вылучэння будынкаў

Ключавыя словы: вылучэнне будынкаў, пошук абласцей, навігацыя па выяве, вылучэнне ценяў, вылучэнне вуглоў, апраксімацыя формы.

Мэта даследаванняў: павышэнне эфектыўнасці вылучэння будынкаў на аэрафотаздымках.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: лічбавая апрацоўка выяў, аналіз дадзеных, фарміраванне і параўнанне дэскрыптарай выяў, тэорыя графаў, аналіз формы, тэхналогіі праграмавання і аптымізацыі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны алгарытм аналізу выяў для ўстойлівай навігацыі БПЛА па малюнку-ўзоры пры выкананні аэрафотаздымкі мясцовасці; распрацаваны алгарытмы для аўтаматычнага выяўлення і вылучэння будынкаў і іх прыкмет на атрыманых аэрафотаздымках. Алгарытм хуткага выяўлення абласцей на малюнках распрацоўваўся з улікам абмежаванняў бартавога вылічальніка малых БПЛА і забяспечвае рашэнне задачы навігацыі ў рэжыме рэальнага часу на вялікіх аэрафотаздымках (да $10^4 \times 10^4$ кропак). Алгарытмы вылучэння ценяў, вуглоў і выяўлення будынкаў на аэрафотаздымках, дазваляюць ажыццяўляць вылучэнне будынкаў на адзіночных паўтонавых ці каляровых малюнках без папярэдняга навучання на аснове характарыстык формы аб'екта, наяўнасці вуглоў зададзенай велічыні, ценяў, яркасці ці колеры.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення: Распрацаваныя алгарытмы могуць прымяняцца для аўтаматызаванага атрымання і апрацоўкі аэрафотаздымкаў. Алгарытм хуткага выяўлення абласцей малюнка можа прымяняцца для: рашэнні задач навігацыі БПЛА па малюнку-ўзоры, дакладнага пазіцыянавання іншых апаратаў і маніпулятараў, пошуку выяў па візуальным запыце і інш. Алгарытм выяўлення і вылучэнні будынкаў на аэрафотаздымках можа ўжывацца як па прамым прызначэнні, так і быць адаптаваны для вылучэння на малюнках іншых аб'ектаў, якія валодаюць выразнымі прыкметамі геаметрычнай формы.

Алгарытмы вылучэння ценяў, выяўлення вуглоў зададзенай велічыні, простых геаметрычных фігур, контураў і інш. могуць быць выкарыстаны як самастойна, так і ў складзе больш складаных сістэм аналізу выяў.

РЕЗЮМЕ

Лукашевич Павел Владимирович

Алгоритмы анализа изображений для навигации беспилотных летательных аппаратов с целью аэрофотосъемки и выделения зданий

Ключевые слова: выделение зданий, поиск областей, навигация по изображению, выделение теней, выделение углов, аппроксимация формы.

Цель работы: повышение эффективности выделения зданий на аэрофотоснимках.

Методы исследования и использованная аппаратура: цифровая обработка изображений, анализ данных, формирование и сравнение дескрипторов изображения, теория графов, анализ формы, технологии программирования и оптимизации.

Полученные результаты и их новизна: разработан алгоритм анализа изображений для устойчивой навигации БПЛА по изображению-образцу при выполнении аэрофотосъемки местности; разработаны алгоритмы для автоматического обнаружения и выделения зданий и их признаков на полученных аэрофотоснимках. Алгоритм быстрого обнаружения областей на изображениях разрабатывался с учетом ограничений бортовых вычислителей малых БПЛА и обеспечивает решение задачи навигации в режиме реального времени на больших аэрофотоснимках (до $10^4 \times 10^4$ пикселей). Алгоритмы выделения теней, углов и обнаружения зданий на аэрофотоснимках, позволяют осуществлять выделение зданий на одиночных полутоновых или цветных изображениях без предварительного обучения на основе характеристик формы объекта, наличия углов заданной величины, теней, яркости или цвета.

Рекомендации по использованию и область применения: разработанные алгоритмы могут применяться для автоматизированного получения и обработки аэрофотоснимков. Алгоритм быстрого обнаружения участков изображения может применяться для: решения задач навигации БПЛА по изображению-образцу, точного позиционирования других аппаратов и манипуляторов, поиска изображений по визуальному запросу и др. Алгоритм обнаружения и выделения зданий на аэрофотоснимках может применяться как по прямому назначению, так и быть адаптирован для выделения на изображениях других объектов, обладающих выраженными признаками геометрической формы.

Алгоритмы выделения теней, обнаружения углов заданной угловой меры, простых геометрических фигур, контуров и др. могут быть использованы как самостоятельно, так и в составе более сложных систем анализа изображений.

SUMMARY

Lukashevich Pavel

Algorithms of image analysis for navigation of unmanned aerial vehicles for aerial photography and extraction of buildings

Keywords: building detection, image areas detection, visual navigation, shadow detection, corners detection, object shape approximation.

Mission: improve the efficiency of automatic building detection on aerial images.

Research methods and used facilities: digital image processing, data analysis, image descriptors, graph theory, form analysis, program optimization.

Obtained results and their novelty: the image analysis algorithm was developed for: image-based navigation of UAV during aerial photography; automatic detection and allocation of buildings and their parts on the obtained aerial images. The developed algorithm for fast detection of regions on images takes into account the limitations of the onboard computational facilities of small UAVs and provides a real-time navigation solution for large aerial images (up to $10^4 \times 10^4$ pixels). Algorithms for shadows segmentation, corners and buildings detection on halftone and color aerial images allows the automatic buildings allocation on a single halftone or color images without prior learning. It based only on the criterion of shape of the object, presence of angles of a given value, presence of shadows, object brightness or color.

Application field and usage recommendations: the developed algorithms will be useful for automated taking and processing of aerial images. The algorithm for rapid detection of image areas will be useful for: image-based navigation of UAV, precise positioning of other devices and manipulators, content based image retrieval, etc. The algorithm of detection and allocation of buildings on aerial photographs can be used both for its direct purpose, and can be adapted to detect other objects with clearly expressed geometric shape.

The algorithms for highlighting shadows, detecting the angles of a given value, recognition of object geometric shape, contours, etc. can be used independently or as a part of a complex image analysis systems.

