

На правах рукописи

Новоторцев Леонид Владимирович

**Исследование и разработка алгоритмов поиска и восстановления
населенных пунктов на наборе аэрофотоснимков**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Научный руководитель: **Волобой Алексей Геннадьевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник, Институт
прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Официальные оппоненты: **Михайлюк Михаил Васильевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий отделом программных средств
визуализации, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

Конушин Антон Сергеевич,
кандидат физико-математических наук, и.о.
руководителя департамента искусственного
интеллекта, ООО «Исследовательский центр
Самсунг»

Ведущая организация: Государственный научный центр ФГУП
«Государственный научно-исследовательский
институт авиационных систем»

Защита состоится 19 октября 2021 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д002.024.01, созданного на базе ФГУ "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук", расположенного по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и на сайте www.keldysh.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета Д002.024.01,
кандидат физико-математических наук

М.Г. Ширококов

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

В современном мире имеющаяся информация устаревает с огромной скоростью. В связи с этим возникает задача быстрого получения актуальных сведений в той или иной области. Это особенно важно, когда данные перед использованием требуют обработки, которая может требовать много времени, в результате чего полученные результаты теряют актуальность. Поэтому высока потребность в автоматизации их обработки, которая ускоряет извлечения необходимой информации из «сырых» данных. При этом часто значительное увеличение скорости обработки происходит за счет ухудшения результирующего качества и точности. Нередко это неприемлемо, и точность является важной характеристикой результата.

Одной из таких областей, сочетающей в себе большие объемы данных, необходимость их быстрой обработки и требование высокой точности результатов, является фотограмметрия и картография. В наши дни человек активно осваивает новые территории и изменяет вид уже освоенных, поэтому важно вести постоянное наблюдение как за прямыми проявлениями этого процесса, такими как, например, застройка и вырубка лесов, так и за вторичными, такими как оседание грунта.

В настоящее время возможно достаточно оперативно делать снимки с самолетов, спутников, БПЛА (БесПилотные Летательные Аппараты) и проводить дальнейшие исследования по полученным снимкам. Это значительно облегчает задачу слежения за интересующей территорией. На данный момент наиболее распространенным источником качественных снимков является аэрофотосъемка. В основном это вызвано оптимальным соотношением цены и качества "сырых" данных, полученных таким образом.

Для аэрофотоснимков характерны следующие свойства и параметры:

- высота съемки достаточно большая, чтобы избежать искажений в рамках одного объекта, вызванных его близким расположением к камере, и достаточно низкая, чтобы можно было не учитывать кривизну Земли при анализе соседних пар снимков;
- съемка ведется при помощи дорогих камер, дающих четкие снимки высокого качества;
- самолет имеет стабильную траекторию без существенных отклонений и все снимки сняты надирно, то есть съемка направлена строго вертикально вниз (или отклоняется настолько незначительно, что это не влияет на результат);
- съемка ведется "маршрутами": последовательно сделанными снимками, которые имеют большие пересечения между собой (40-80% от размера снимка), где один маршрут – это один заход самолета

над интересующей территорией, маршруты между собой тоже имеют пересечения;

- доступна дополнительная информация о снимках: геолокационные данные (GPS, ГЛОНАСС и т.д.), направление съемки (ориентация камеры при съемке), высота съемки, параметры камеры (фокусное расстояние, дисторсия).

Одной из часто встречающихся задач картографии, связанных с анализом аэрофотоснимков, является обнаружение на них строений и их дальнейшая трехмерная реконструкция, то есть создание трехмерной модели по снимкам. При этом ввиду свойств аэрофотоснимков решение этой задачи базируется на обнаружении и реконструкции крыш. Именно обнаружению и трехмерной реконструкции строений и посвящена данная работа.

Существуют множество решений данной задачи, основанных на разных подходах и разных исходных данных. Подробный анализ существующих решений показал, что требуется дальнейшее развитие существующих методов и разработка новых подходов.

Цели работы

Целью работы является создание автоматической технологии, исследование и разработка соответствующих алгоритмов и методов обнаружения строений по снимкам, полученным в результате надирной (вертикальное направление съемки) аэрофотосъемки, с использованием данных ориентирования камер и построение их трехмерных моделей. Реализация разработанной технологии и алгоритмов в прикладных программных комплексах.

Задачи

Представленный подход можно разбить на следующие задачи:

- 1) поиск и выделение отрезков, соответствующих попавшим на изображение границам объектов, на одном изображении;
- 2) выделение областей интереса, получаемых связыванием отрезков в замкнутые контуры, представляющие интерес для дальнейших операций, с целью уменьшения вычислительных затрат;
- 3) сопоставление областей и отрезков, соответствующих одним и тем же объектам, на различных изображениях для последующей трехмерной реконструкции по нескольким кадрам с разных ракурсов;
- 4) построение плоскостей внутри сопоставленных областей и получение трехмерной реконструкции за счет выполнения пересечения и ограничения построенных плоскостей.

Научная новизна

Предложен новый подход обнаружения и трехмерной реконструкции населенных пунктов по аэрофотоснимкам, состоящий в том, что производится анализ каждого из снимков по отдельности с выделением областей интереса, их

сопоставление и последующая реконструкция строений посредством перебора полуплоскостей, образованных ранее найденными отрезками.

Разработана модификация существующего метода выделения отрезков LSD (Line Segment Detector), позволяющая более точно выделять отрезки на аэрофотоснимках большого размера, что в свою очередь, существенно увеличивает точность остальных методов, используемых в данной работе.

Представлен новый подход выделения областей интереса (областей, в которых проводятся дальнейшие операции), позволяющий сократить в несколько раз (до 5 раз) площадь снимков, подвергающихся дальнейшей обработке.

Предложен новый быстрый метод сопоставления областей, опирающийся на поиск и анализ горизонтальных отрезков, а также на анализ взаимного положения областей.

В данной работе также разработана модификация метода перебора плоскостей, позволяющая на порядок ускорить перебор при сохранении точности итогового результата.

Теоретическая и практическая значимость

В рамках данной диссертационной работы предложен новый многоэтапный подход, опирающийся на выделение, анализ и сопоставление линейных черт (отрезков) на снимках, а также их взаимное расположение. Это позволяет увеличить как скорость работы всей технологии, так и точность выделения и трехмерной реконструкции населенных пунктов.

На основе проведенного исследования разработана система обнаружения и восстановления населенных пунктов, которая позволяет производить обработку аэрофотоснимков как в полностью автоматическом режиме, так и в полуавтоматическом режиме с незначительным участием оператора.

На основе предложенного подхода была реализована и внедрена программная компонента в программное обеспечение "АО Фирма "Ракурс" ЦФС РНОТОМОД. Этот продукт и программная компонента используется в «Роскартография» и в Федеральном агентстве кадастра объектов недвижимости («Роснедвижимость»).

Апробация

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- 17-ый научно-практический семинар «Новые информационные технологии в автоматизированных системах», Россия, Москва, 2014;
- 24-ая международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон-2014», Россия, Ростов-на-Дону, 2014;
- 23th International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision WSCG, Czech Republic, Plzen, 2015;

- 25-ая международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон-2015», Россия, Протвино, 2015;
- 19-ый научно-практический семинар «Новые информационные технологии в автоматизированных системах», Россия, Москва, 2016;
- 26-ая международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон-2016», Россия, Нижний Новгород, 2016;
- 16-ая международная конференция CAD/CAM/PDM-2016 "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта", Россия, Москва, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2016.
- 27-ая международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон-2017», Россия, Пермь, 2017;
- 21-ый научно-практический семинар «Новые информационные технологии в автоматизированных системах», Россия, Москва, 2018;
- 28-ая международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон-2018», Россия, Томск, 2018.
- Семинар им. М.Р. Шура-Бура, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Россия, Москва, 2019.

На основе предложенного подхода была реализована программная компонента, она внедрена в программное обеспечение Photomod. Этот продукт, а с ним и программная компонента, используется в «Роскартография» и в Федеральном агентстве кадастра объектов недвижимости «Роснедвижимость». Результаты, полученные в процессе использования разработанной технологии, достигают субпиксельной точности по плану и высокой точности обнаружения (порядка 0.9 по метрике F1) при более высокой скорости работы по сравнению с подходами, дающими аналогичную точность.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 15 печатных работах [1-15]. 5 статей было опубликовано в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ [2, 5, 12, 13, 15], из них 2 публикации, входящие в системы цитирования Web of Science (WoS) и Scopus [13, 15]. 8 текстов докладов опубликовано в сборниках трудов международных конференций.

Личный вклад автора

Все результаты получены лично автором. Разработка и реализация всех алгоритмов, программной компоненты программного комплекса Photomod, основанной на результатах исследования, выполнены автором лично.

Содержание работы

Первая глава посвящена обзору научной литературы по изучаемой проблеме, описываются достоинства и недостатки существующих решений, вводится оригинальная классификация методов. На основе представленных

данных для решения поставленной задачи выбирается подход, основанный на обработке нескольких аэрофотоснимков одной местности с информацией о внешнем ориентировании за счет высокой доступности исходных данных с высокой потенциальной точностью. Основным недостатком подобных подходов является скорость их работы, вызванная необходимостью обрабатывать и выполнять сопоставление снимков целиком. В случае промышленной аэрофотосъемки, где размер каждого снимка составляет несколько гигабайт, а количество снимков может достигать нескольких десятков, такой недостаток является критическим.

По этой причине работа в основном посвящена ускорению алгоритмов и ограничению площади, на которой применяются ресурсоемкие алгоритмы. Для достижения этого предлагается использовать выделение примитивов на снимке, в частности, отрезков, в качестве основы описываемого подхода. Это в свою очередь позволяет использовать выделенные отрезки в качестве базового элемента для последующих операций, тем самым уменьшая ресурсоемкий анализ растровых данных. Также предложен оригинальный подход выделения областей, представляющих интерес для дальнейших вычислений, с отсечением остальных частей изображения, не содержащих полезной информации.

В конце главы кратко описывается предлагаемый подход. Его можно разделить на четыре этапа: обнаружение границ и отрезков; выделение областей; сопоставление областей; трехмерная реконструкция.

Во второй главе рассматривается задача обнаружения границ и отрезков. В этой главе описываются и анализируются существующие подходы поиска отрезков на изображении, такие как метод Хафа, EdLines и LSD. На основе проведенных исследований существующих подходов, делается вывод, что метод LSD позволяет получить наиболее точное и полное выделение отрезков на снимках меньших размеров в рамках поставленной задачи. Но с увеличением размеров снимков этот метод допускает все больше и больше пропущенных прямых линий, что приводит к снижению качества итогового результата. Также значимым фактором является ограничение по оперативной памяти, не позволяющее обрабатывать все изображение за один раз. Деграция точности выделения отрезков методом LSD обусловлена тем, что он использует метрику для фильтрации, которая настроена работать по аналогии со зрением человека. То есть при увеличении изображения некоторые детали могут пропадать.

Для преодоления этого недостатка предлагается разбивать изображение на сегменты, к которым и применять метод LSD. В работе приведены оценки размера сегмента в зависимости от желаемой точности, проанализирована зависимость размера сегмента от погрешности обнаружения отрезка. Далее необходимо объединять отрезки, попавшие в соседние сегменты снимка. Для достижения этой цели для каждого отрезка строится его проекция на границы сегмента. В данной работе вводится термин "проекция отрезка на сегмент" – множество точек границы сегмента, на которых может находиться конец отрезка

(или конец его продолжения) с учетом погрешности нахождения отрезка (сдвиг, поворот). В дальнейшем происходит проверка на наличие подходящих отрезков в областях, смежных с проекцией рассматриваемого отрезка на сегмент, и их слияние в один с усреднением параметров.

На следующем этапе для каждого необработанного отрезка проверяется наличие отрезков на заданном расстоянии. Это значение является входным параметром моего подхода и соответствует среднему размеру строений в пикселах. В представленной работе используется значение по умолчанию, соответствующее 15-и метрам для рассматриваемого проекта, что соответствует среднему размеру домов в США (максимальный средний размер домов), выраженное в пикселах. Расстояние между отрезками определяется минимальным расстоянием между их концами. Для отрезков выполняется дополнительная проверка на необходимость их слияния (по углу наклона, изменению угла результирующего отрезка и проверка поля градиентов между ними) и построение результирующего объединенного отрезка.

	LSD	EdLines	Предложенный метод
Время (сек)	2.68	1.56	3.58
Количество отрезков	2511	1467	4289
Ложные срабатывания (шт.)	471	213	1167

Табл. 1. Сравнение методов обнаружения отрезков.

В Табл. 1 представлены сравнения результатов выделения отрезков предложенным методом, EdLines и LSD на исходном изображении размером 1655 x 1698 пикселей. Из таблицы видно, что предложенный метод медленнее, но находит большее количество отрезков, при этом у него больше ложных срабатываний, но не настолько много, чтобы существенно отразиться на производительности. Так как дальнейшая обработка легко справляется с шумом и ложными срабатываниями, то предложенный метод является наиболее подходящим для разрабатываемого подхода реконструкции моделей зданий.

В третьей главе рассматривается задача выделения областей. Обычно большую часть аэрофотоснимков занимают поля, леса, огороды, дороги, которые не представляют особого интереса в рамках поставленной задачи. Использование методов реконструкции строений на подобных участках приводит к существенному понижению скорости работы всего рассматриваемого подхода. По этой причине в рамках разработанной технологии мной был предложен новый метод выделения областей интереса, который позволяет существенно сократить площадь, к которой применяются методы трехмерной реконструкции. Это достигается за счет анализа уже полученных отрезков и их взаимного положения. Данный метод имеет низкую

вычислительную сложность, но при этом позволит выделить области, представляющие интерес для дальнейшего анализа, и отсеять такие участки, как поля, леса и водные пространства. Предложенный метод состоит из двух этапов.

Первый этап представляет собой поиск пар отрезков, которые можно было бы скомпоновать в зависимости от их взаимного положения. В результате этого этапа мы получим ломаные, которые в общем случае не являются замкнутыми. Поскольку цель метода, описываемого в данной главе, – это получить области интереса, то возникает необходимость произвести замыкание ломаных контуров в замкнутые области, что и выполняется на втором этапе метода.

На первом этапе поочередно рассматриваются случаи, когда отрезки лежат на одной прямой, на пересекающихся прямых и на параллельных прямых (анализ производится именно в таком порядке). Случай, когда отрезки лежат на одной прямой, обрабатывается аналогично объединению отрезков, рассмотренному в главе 2. Если два отрезка находятся на пересекающихся прямых, то выполняется их продление до пересечения друг с другом. В этом случае возможны два варианта для каждого из отрезков. Первый вариант – точка пересечения находится на самом отрезке. Тогда отрезок разделяется на два точкой пересечения в случае, если производится объединение. Второй вариант – точка пересечения находится на продолжении отрезка. Рассмотрение этого варианта идентично рассмотрению случая с отрезками на одной прямой за тем исключением, что не производится проверка угла наклона. То есть рассматривается расстояние продолжения отрезка до пересечения и происходит анализ градиента. Если отрезки лежат на параллельных прямых (с учетом погрешности угла наклона), то рассмотрению подлежат следующие варианты: отрезки сдвинуты относительно друг друга, отрезки мало отличаются по длине и их концы на небольшом расстоянии друг от друга. В остальных случаях отрезки остаются как есть. В первом варианте предлагается построить отрезок, соединяющий ближайшие концы параллельных отрезков. Далее по аналогии с предыдущими этапами проверяется градиент в области построенного отрезка и на этой основе принимается решение о создании нового соединительного отрезка. Во втором варианте рассматривается расстояние между отрезками (перпендикуляр). Если оно незначительно (сильно зависит от качества снимков и порога, определяющего незначительность расстояния и задаваемого как входной параметр метода), и если один из отрезков является частью контура, то тогда контур расширяется до второго отрезка. В противном случае все остается как есть.

На втором этапе производится замыкание ломаных, полученных на первом этапе. Поскольку ломаные линии могут получиться разветвленными и иметь больше двух концов и минимизация пропусков имеет высокий приоритет в рамках рассматриваемого подхода выделения областей, то рассматриваться будут все концы, соединение которых не приведет к пересечению замыкающего отрезка с остальной ломаной. Если некоторые замыкающие отрезки имеют

пересечения друг с другом, то они разбиваются точкой пересечения на разные отрезки, каждый из них тоже считается замыкающим.

Данная операция производится исключительно с целью уменьшения вычислительных затрат посредством уменьшения площади изображения, к которой в последующем применяется алгоритм реконструкции крыш по снимкам. Поэтому неточность выделения не влияет на качество конечного результата. Стоит отметить, что внутрь областей попадают не только сами строения, но и тени от них.

Ошибки типа *false negative* (ошибочно не найденные строения) составляет порядка 5%-10%. Но поскольку этот метод используется как предобработка снимков для алгоритма, обрабатывающего снимки снятых с разных ракурсов, то это не так важно. Если на одном снимке строение не обнаружено, то оно будет обнаружено на другом, снятым с более удобного ракурса. Таким образом, итоговая точность обнаружения будет примерно такой же, как и в более затратном методе, но количество данных, обрабатываемых этим алгоритмом, будет значительно меньше.

На аэрофотоснимках данный алгоритм выделял для будущей обработки 20-30% от общей площади для сельской местности и 50-70% для местности городского типа. Это позволяет рассчитывать на ускорение всего подхода порядка 30-60%, поскольку данные, полученные на всех этапах, кроме анализа полученных отрезков и соединения их в контуры, используются в алгоритме реконструкции зданий по набору аэрофотоснимков. Дополнительные вычислительные затраты малы, поскольку обработка векторных данных вычислительно проще, чем анализ растров.

В четвертой главе рассматривается задача сопоставления областей. Выделение областей, представляющих интерес для дальнейших операций, значительно уменьшают количество проводимых вычислений. Здесь также, как и при выделении областей важно, чтобы выигрыш от применения этой операции был больше, чем затраты на нее. Наиболее распространенные существующие методы такие, как SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) или ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) не подходят как раз из-за большой вычислительной сложности, а точность этих методов не оправдывает временных затрат на них. По этой причине возникла необходимость разработать новый метод, использующий особенности рассматриваемых данных и работающий быстрее существующих аналогов.

Предложен подход, опирающийся на упрощенное сопоставление крупных примитивов (отрезков) внутри областей с использованием априорной информации о том, что в рассматриваемых областях находятся строения. Для поиска соответствующей области используется преобразование из координат одного снимка в геодезические, после чего из геодезических координат в координаты второго снимка. Поскольку нельзя восстановить высоту точки по одному рассматриваемому снимку, то представленные преобразования

параметризуются. В результате, в общем случае точка на одном снимке переходит в луч или отрезок на другом. Исходная точка может находиться где угодно на полученном луче или отрезке в зависимости от ее положения в трехмерном пространстве. По аналогии отрезок перейдет в множество отрезков, концы которых находятся на лучах, образованных конечными точками исходного отрезка.

При идеальном совпадении отрезок должен заканчиваться у границ зоны сопоставления. По этой причине в качестве веса используется отношение длин сопоставляемого отрезка к рассматриваемому. Чем ближе значение веса к единице, тем более вероятно, что сопоставление верно.

Наконец, вычисляются веса для оценки соответствия областей на сопоставляемом снимке. Для каждой сопоставляемой области вес высчитывается как усредненная сумма весов отрезков, вычисленная на предыдущем этапе. Чем ближе вес к единице, тем более вероятно, что области коррелируют.

Однако, из-за того, что единственный метод при сопоставлении областей между снимками, – это геометрические операции, то есть вероятность того, что описанный выше метод даст некорректное сопоставление. По этой причине вместо того, чтобы выбрать одну область, сопоставляемые области сортируются по значениям веса. Далее используется верификационный алгоритм, описанный ниже.

Сначала рассчитываются расстояния между областями на исходном и сопоставляемом снимках. В качестве соответствующих областей выбираются те, что имеют наибольший вес. После этого расстояния между соответствующими областями сравниваются. Далее на сопоставляемом снимке находятся те области, расстояния между которыми больше остальных отличаются от расстояний связанных областей на исходном снимке. Тогда для исходной области ставится в соответствие следующая область в списке, полученном на предыдущем этапе.

		SIFT	Предложенный метод
Сельская местность	Точность	93%	87%
	Скорость	247 сек.	43 сек.
Городская застройка	Точность	85%	78%
	Скорость	20 мин.	9 мин.

Табл. 2. Сравнение методов сопоставления областей между двумя снимками.

Данная операция продолжается для всех связей до тех пор, пока не будет установлен минимум разницы расстояний.

Результаты, полученные на этапе сопоставления областей, представлены в Табл. 2. Сравнение производится на данных для городской и сельской местности с результатами метода SIFT, который является одним из наиболее распространенных подходов сопоставления изображений.

Из таблицы следует, что предложенный метод дает существенное ускорение за счет некоторой потери точности сопоставления областей между двумя снимками. Потеря точности больше для снимков плотной городской высокоэтажной застройки с множеством однотипных строений. В этом случае и ускорение не такое большое, как для сельской местности.

Потеря точности частично компенсируется при сопоставлении множества пар снимков. Также снимки городской застройки менее востребованы, поэтому более важными являются больший выигрыш в скорости и меньшая потеря точности для снимков сельской местности.

В пятой главе описывается метод построения трехмерной модели строений. В связи с тем, что основной фокус данной работы направлен на аэрофотосъемку, которая ведется с большой высоты, то строения практически полностью определяются крышами, а их стены либо сложно, либо невозможно восстановить. По этой причине предлагается сделать упор именно на восстановление крыш строений, а их стены строить как вертикальные плоскости, отступающие от края крыш.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать подход, опирающийся на метод перебора плоскостей. В данной работе разработана новая модификация метода перебора плоскостей, работающая значительно быстрее при небольшой потере точности. Ускорение метода предлагается достичь за счет использования информации о пересечении отрезков, полученной на этапе поиска контуров. Поскольку два пересекающихся отрезка однозначно задают плоскость, то вместо полного перебора плоскостей можно сразу ее построить по двум отрезкам. Полученную плоскость нельзя использовать как конечный результат по нескольким причинам. Во-первых, пересечение рассматриваемых отрезков может быть результатом ошибки их построения. Во-вторых, точность построения плоскости по двум отрезкам будет меньше, чем точность построения плоскости методом перебора. По этой причине найденную по двум отрезкам плоскость будем использовать как первое приближение. Далее метод перебора плоскостей будем применять, рассматривая только отклонения в окрестности угла, образующего построенную плоскость-приближение, и используя один из отрезков как ось.

При таком подходе можно получить уточненные данные и также выполнить контроль корректности, поскольку ни одна из перебираемых плоскостей не пройдет отбор по величине корреляции. Если у рассматриваемого отрезка есть несколько связанных с ним отрезков, то описанная выше процедура применяется для каждого из них. Точность построения плоскостей можно еще больше увеличить следующим образом.

Рассматриваются отрезки, находящиеся на проекции плоскости на изображения. Из этих отрезков отфильтровываются короткие для исключения шума и деталей крыши (обычно достаточно фильтровать все отрезки короче трех метров в трехмерном пространстве, но конкретная величина зависит от качества

и вида снимков). Далее отфильтровываются отрезки, расстояние от концов, которых до плоскости превышает погрешность при построении. Данная величина высчитывается на основе шага угла при переборе плоскостей и размера рассматриваемого отрезка: расстояние от одного из концов отрезка до плоскости при его отклонении от нее на угол, равный шагу перебора. Также не рассматриваются отрезки, находящиеся дальше удвоенного размера отрезка-оси. Из оставшихся отрезков выбираются не более десяти, имеющих наименьшие отклонения. И по трехмерным координатам концов отрезков проводится линейная регрессия для уточнения плоскости. Данная операция сходится быстро благодаря точному начальному приближению, полученному на предыдущем этапе.

Заключительным этапом метода является финальное построение результата (крыш) по имеющимся плоскостям. Для этого в представленной работе предлагается использовать аналогичный этап метода перебора плоскостей без существенных изменений. Его суть заключается в ограничении полуплоскостей отрезками, лежащими на них, и выделении новых граней за счет пересечения полуплоскостей. Также на этом этапе проходит фильтрация объектов по таким параметрам как размер (отсеиваются машины, гаражи), высота объектов и их протяженность (отсеиваются дороги и поля).

К преимуществам приведенного подхода можно отнести субпиксельную точность построения результирующего объекта и высокую скорость работы. Это достигается за счет предварительной обработки, что позволяет проводить на порядок меньше сопоставлений, которые имеют большую вычислительную сложность.

К недостаткам можно отнести пропускание мелких деталей на крышах, таких как, например, трубы. Однако для большинства случаев это не имеет принципиального значения и может заменяться наложением текстуры на полученный объект.

В шестой главе предоставляются результаты работы. Реализация представленного подхода проходила проверку на компьютере с 8-ядерным процессором AMD FX-8370 4GHz, 16 Gb RAM, GPU Radeon RX470 4Gb, SSD 500Gb. Тестирование и оценка результатов предложенного метода проводилась на следующих наборах данных (далее проектах): UltraCamX (6 снимков, 9420x14430), NewZealand (16 снимков, 14336x14848), UAS_MINI (27 снимков, 4912x3264), UltraCamX_part (6 снимков 700x800). Выбор проектов проводился на основе подбора широкого диапазона видов данных для наиболее широкого покрытия функциональности описанного подхода и получения более точных оценок при сравнении с другими алгоритмами, решающими схожую задачу. Стоит отметить, что проект UltraCamX_part представляет из себя небольшой сегмент проекта UltraCamX. Это было сделано для получения более комфортных для восприятия и сравнения данных, как визуальных, так и численных

(например, где используются абсолютные величины, такие как количество найденных отрезков).

Для оценки точности обнаружения в работе предлагается использовать известную метрику F-мера (также обозначаемая, как F_1). На рис. 1 показаны результаты работы описанного подхода на каждом из проектов. На основе этих данных, можно сделать вывод, что предложенный подход обладает высокой точностью и имеет очень маленькое количество ложных срабатываний. Ожидается, наилучшие результаты представленный подход дает для проекта UltraCamX, где самое высокое качество съемки.

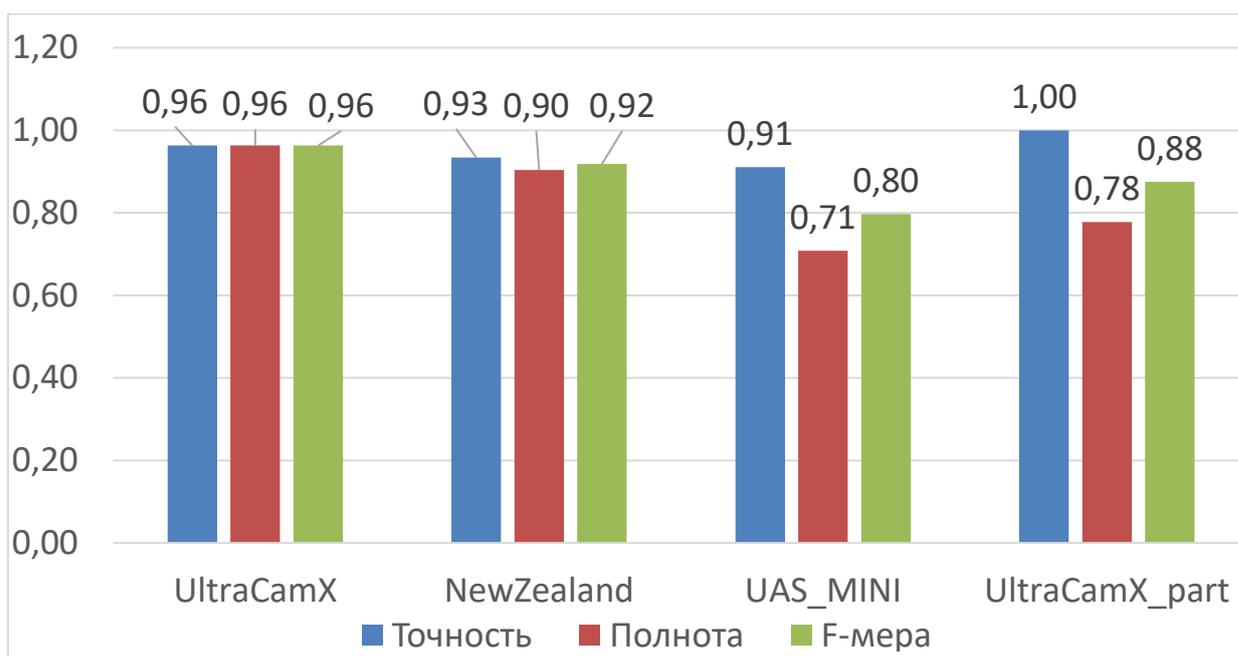


Рис.1. Оценка результатов работы предложенного подхода.

Метрика	Метод Baillard'00	Метод Peng'16	Представленный метод
Точность	0.94	0.82	0.93
Полнота	0.96	0.86	0.90
F-мера (F_1)	0.95	0.84	0.92

Табл. 3. Сравнение представленного метода с существующими по точности распознавания на проекте NewZealand.

Также можно заметить, что при обработке данных, снятыми беспилотными летательными аппаратами (проект UAS_mini), значительно падает полнота. Это связано с тем, что съемка такого рода проектов ведется зачастую под наклоном, а не вертикально вниз (надир). Это и приводит к снижению качества обнаружения, хотя и незначительно.

Из табл. 3 следует, что предложенный метод немного уступает по точности методу перебора плоскостей (Baillard'00), но по-прежнему превосходит метод, опирающийся на ортофото (Peng'16).

На рис. 2 представлены результаты работы рассматриваемого метода с точки зрения точности построения трехмерной модели. Для нормализации метрик все данные представлены в пикселях. Данные значения получаются путем приведения значений в метрической системе в пиксельные с использованием параметра «размер пикселя»

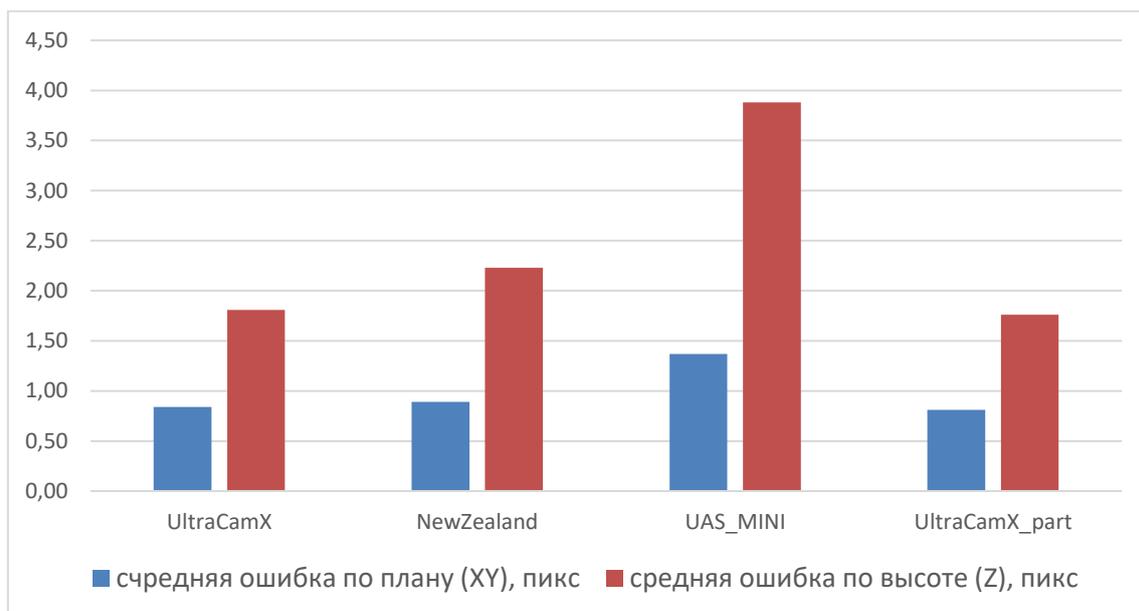


Рис. 2. Оценка результатов предложенного подхода.

Метрика	Метод Baillard'00	Метод Dahlke'15	Представленный метод
Ошибка по плану (пикс)	0.89	0.68	0.81
Ошибка по высоте (пикс)	2.98	2.01	2.76
Время (мин)	86	197	43

Табл. 4. Сравнение представленного метода с существующими по точности построения и времени работы на проекте UltraCamX_part.

На представленной диаграмме (рис. 2) видно, что предложенный метод работает заметно хуже на проекте БПЛА (UAS_mini). Это вызвано тем, что метод рассчитан и оптимизирован с расчетом на вертикальную (надирную) аэросъемку. Съемка с БПЛА не имеет строго вертикального направления, ведется с меньшей высоты и при помощи более дешевого оборудования и, как следствие, имеет менее качественный результат. Также при съемке с БПЛА может существенно меняться высота (на проекте UAS_mini эти изменения не существенны, что

является исключением из правил для БПЛА съемки), что противоречит допущениям разработанного подхода.

Из данных, представленных в таблице 4, можно сделать вывод, что представленный метод работает быстрее, чем метод перебора плоскостей (Baillard'00), при близкой точности. Метод, основанный на облаке точек (Dahlke'15), превосходит по точности описанный подход. Данная разница объясняется компромиссом между точностью и скоростью работы. Помимо этого, метод на основе построения облака точек, восстанавливает не только строения, а всю сцену целиком, что также сказывается на скорости работы.

Основные результаты

1. Предложен новый подход, решающий задачу выделения и построения трехмерных моделей строений по снимкам, полученным в результате надирной аэрофотосъемки в автоматическом режиме, за счет выделения и сопоставления отрезков на снимках. Представленный метод имеет высокую точность сопоставления и распознавания, не уступающую существующим методам. При этом предложенный подход имеет большую скорость работы.
2. Предложена оригинальная модификация метода LSD, основанная на разбиении изображения на области и последующем объединении отрезков. Данный подход позволяет увеличить количество распознанных отрезков на снимках за счет незначительного увеличения времени работы, потраченного на объединение отрезков.
3. Представлен оригинальный метод ускорения обработки аэрофотоснимков за счет выделения областей интереса и их сопоставления. Это позволяет отсеять до 80% изображения. При этом количество пропущенных строений не превышает 2%.
4. На основе предложенного подхода реализована программная компонента, используемая в индустриальном программном продукте Photomod, что приводит к повышению производительности операторов при решении задач, связанных с трехмерной реконструкцией населенных пунктов, зданий и строений.

Приложение 1. Детали программной реализации. В рамках данной работы была реализована программная компонента, составляющая порядка 15 000 строк кода, написанная на языке программирования C++. В процессе реализации наибольшие трудности вызвали следующие подзадачи: работа с изображениями большого размера (2GB и более) и работа с отрезками.

Первая проблема связана с тем, что невозможно держать все изображения, с которыми надо проводить преобразования, в памяти. Поэтому была реализована структура классов для работы с сегментами изображения,

обеспечивающая виртуальный доступ к произвольному прямоугольнику на изображении. Реализованная структура также позволяет использовать гибкие «цепочки» преобразований изображения.

Вторая проблема связана с операциями над отрезками. Практически на всех этапах предложенного подхода используется поиск отрезков по заданным критериям (угол поворота, положение). Кроме того, часть отрезков являются объединением из других отрезков. Поэтому была реализована специальная структура, позволяющая осуществлять быстрый поиск и доступ к отрезкам по заданным параметрам. Это достигается разбиением каждого из параметров (угол наклона, положение, размер) на непересекающиеся группы, в которые складываются индексы отрезков, относящиеся к нему. При поиске отрезков вычисляется, в каких сегментах находятся интересующие отрезки, что является быстрой операцией. После этого выполняется фильтрация отрезков, попавших в эти сегменты посредством перебора.

Список литературы

1. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Нахождение отрезков на аэрофотоснимках с использованием преобразования Хафа // Труды XXIV международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Ростов-на-Дону. 2014. С. 170-172.
2. Новоторцев Л. В., Волобой А. Г. Улучшенный алгоритм обнаружения отрезков для реконструкции строений по аэрофотоснимкам / Приволжский научный журнал, № 4, 2014. С. 49-53.
3. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Нахождение областей, содержащих здания, на аэрофотоснимках // Труды XXV международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Протвино. 2015. С. 85-88.
4. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Модификация фильтра Кэнни в рамках задачи обнаружения строений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы девятнадцатого научно-практического семинара, Москва, ИПМ им. М.В.Келдыша, 21 апреля 2016. С. 22-25.
5. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Ускорение алгоритма распознавания зданий по нескольким аэрофотоснимкам за счет предобработки изображений // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 35. С 12.
6. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Постобработка Прямых и Ломаных, Полученных Методом Хафа // Труды XXVI международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Нижний Новгород. 2016. С. 100-104.
7. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Обнаружение и сопоставление областей, содержащих строения, на аэрофотоснимках // Труды XXVI международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Нижний Новгород. 2016. С. 404-408.

8. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Автоматическое распознавание зданий на аэрофотоснимках // Труды 16-ой международной конференции CAD/CAM/PDM-2016 "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта", Москва, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, октябрь 17-19, 2016. С. 68-72.
9. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Выделение отрезков на аэроснимках в рамках задачи обнаружения строений // Труды XXVII международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Пермь. 2017. С. 228-232.
10. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Сопоставление областей на аэрофотоснимках в задаче распознавания строений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы девятнадцатого научно-практического семинара, Москва, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 20 апреля 2018. С. 17-23.
11. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Ускорение метода перебора плоскостей при трехмерной реконструкции строений по аэроснимкам // Труды XXVIII международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Томск. 2018. С. 226-229.
12. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Ускорение алгоритма распознавания зданий по нескольким аэрофотоснимкам за счет предобработки изображений // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 207. С 12.
13. Novotortsev, L., Voloboy, A.: Automated Detection of Buildings on Aero Images // 23rd International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision WSCG'2015, Poster paper proceedings. Czech Republic, Plzen. 2015. P. 23-28.
14. Новоторцев Л.В., Игнатенко А.В. Тональная компрессия изображений широкого динамического диапазона, использующая бинокулярное зрение человека // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы семнадцатого научно-практического семинара, Москва, ИПМ им. М.В.Келдыша, 2014. С. 176-184.
15. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Обнаружение и трехмерная реконструкция строений по аэрофотоснимкам. Программирование, № 6, 2019. С. 13-22.
L.V. Novotortsev, A.G. Voloboy. Detection and 3D Reconstruction of Buildings from Aerial Images // Programming and Computer Software, vol. 45, No. 6, 2019, pp. 311-318, DOI:10.1134/S0361768819060069.

Новоторцев Леонид Владимирович

Исследование и разработка алгоритмов поиска и восстановления
населенных пунктов на наборе аэрофотоснимков

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физ.-мат. наук

Подписано в печать 30.06.2021 г.

Формат 210×148/16. Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ № 562607

Отпечатано в типографии «Копирка»

123022, г. Москва, ул. 1905 года, д.7, стр. 1.

Телефон: 8 (495) 660-36-00, E-mail: info@kopirka.ru