

На правах рукописи



Мирзоян Андрей Сергеевич

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Специальность

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева» на кафедре «Математическое и программное обеспечение электронных вычислительных средств».

Научный руководитель: Малышев Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, профессор ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Официальные оппоненты: Граничин Олег Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры системного программирования математико-механического факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Виноградов Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, заместитель руководителя Исследовательского центра искусственного интеллекта ФГБУН «Институт программных систем имени А. К. Айламазяна Российской академии наук».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет имени П. Г. Демидова», г. Ярославль.

Защита состоится «02» октября 2017 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.07 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <http://www.eltech.ru/>.

Автореферат разослан «30» июня 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.07
к.т.н., профессор

 Цехановский В. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важной областью применения оптико-электронных систем являются задачи распознавания в реальном времени летательных аппаратов на фоне небосвода и наземных объектов на фоне подстилающей поверхности в условиях существенных помех с высокой вероятностью правильного распознавания. В прикладных задачах при этом дополнительно требуется достаточно точно определить пространственное положение объектов в заданной системе координат. Диссертационная работа посвящена задачам распознавания и определения пространственного положения летательных аппаратов и наземных объектов. Работа систем распознавания в реальном времени обеспечивается благодаря использованию эффективных алгоритмов вычислительной геометрии.

В зарубежной и отечественной литературе существенные результаты по распознаванию образов были изложены в работах Ф. Розенבלата, М. Минского, С. Пейперта, В. А. Якубовича, А. В. Тимофеева, В. Н. Фомина, В. В. Харичева, А. М. Шведова и А. А. Шмидта. Алгоритмы распознавания образов, основанные на математической статистике, абстрактной алгебре и функциональном анализе, изложены в работах Ю. И. Журавлева, Н. Г. Федотова и К. Фукунага. Современные методы вычислительной геометрии с многочисленными практическими приложениями изложены в работах Ф. Препарата, М. Шеймоса и Е. А. Никулина.

Существенный вклад в решение задач распознавания образов и обработки изображений внесли специалисты ИСОИ РАН (г. Самара), ГОИ им. С. И. Вавилова (г. Санкт-Петербург), НИИ ТП (г. Москва), НИИКИ ОЭП (г. Сосновый Бор), ИПМ им. М. В. Келдыша РАН (г. Москва), НИЦ (г. Тверь) ЦНИИ ВВКО Минобороны России, НИИ ПМК (г. Нижний Новгород), РГРТУ (г. Рязань), МЗ РИП (г. Муром), НИИ РЛТ МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва), ФГУП «Курский НИИ» МО РФ (г. Курск) и других организаций.

Тем не менее, важные для прикладных приложений задачи распознавания и определения пространственного положения объектов наблюдения в реальном времени в условиях помех не получили алгоритмические и схемные решения, удовлетворяющие современным требованиям. Это говорит об актуальности выбранной тематики диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов функционирования систем распознавания и определения пространственного положения летательных аппаратов и наземных объектов в реальном времени на основе методов вычислительной геометрии.

Задачи диссертационной работы.

1. Применение методов вычислительной геометрии для решения задач определения пространственного положения летательных аппаратов по внешним контурам и опорным точкам.
2. Применение метрики Никодима совмещения внешних контуров для решения задачи распознавания летательных аппаратов на динамических изображениях в полете на фоне небосвода.
3. Разработка методов выделения элементов конструкции летательных аппаратов для решения задачи распознавания летательных аппаратов на статических спутниковых изображениях на фоне аэродрома.
4. Разработка методов преобразования трехмерных лазерных изображений в двумерные инвариантные изображения для решения задачи распознавания наземных объектов в лазерном канале с авиационного носителя на фоне подстилающей поверхности.

Направление исследований. Развитие методов распознавания летательных аппаратов и наземных объектов в оптических и лазерных каналах.

Методы исследований. Основными методами решения задач распознавания и определения пространственного положения являются методы вычислительной геометрии, системного анализа и теории аппроксимации.

Научная новизна.

1. Для решения задачи сравнения реальных изображений летательных аппаратов с эталонными в реальном времени предложен многоуровневый алгоритм минимизации на ε -сети по метрике Никодима, отличительной особенностью которого является возможность переноса части вычислений на стадию предобработки, что позволяет при определении точки минимума существенно уменьшить число операций по сравнению с алгоритмом прямого перебора.
2. С целью ускорения вычисления невязки внешних контуров по метрике Никодима предложен алгоритм построения пересечения полигонов на основе построения минимальных по числу структурных элементов выпуклых упаковок, что позволяет обеспечить ускорение вычислений в $5 \div 11$ раз по сравнению с алгоритмами из библиотек GPC, Boost и Clipper.
3. С целью уменьшения числа структурных элементов выпуклых упаковок предложен алгоритм аппроксимации n -звенной ломаной посредством m -звенной ломаной с числом звеньев $m \ll n$, отличительной особенностью которого является близость ломаных по метрике Хаусдорфа.
4. Предложен метод определения трех линейных координат центра и трех угловых координат ориентации ортов пространственного положения летательного аппарата, позволяющий в рамках аксиоматики проективной камеры получить точное решение задачи позиционирования.
5. На основе метода главных компонент предложено решение задачи определения нормали подстилающей поверхности по матрице наклонных дальностей лазерного канала, позволяющее осуществить распознавание наземных объектов по инвариантным видам сверху.

Практическая значимость. Алгоритмы, изложенные в работе, были реализованы в виде программ и использовались при обработке экспериментальных результатов при тестировании ОЭС.

Положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритм построения пересечения полигонов на основе минимальных выпуклых упаковок, позволяющий осуществить эффективное по числу операций вычисление метрики Никодима.
2. Алгоритм минимизации на двухуровневых ε -сетях, позволяющий в предметной области задач распознавания реализовывать системы, работающие в реальном времени.
3. Метод определения пространственного положения летательных аппаратов в рамках аксиоматики проективной камеры, позволяющий повысить вероятность правильного распознавания посредством повышения точности позиционирования.
4. Метод определения нормали подстилающей поверхности по матрице наклонных дальностей, позволяющего осуществить распознавание наземных объектов по инвариантным видам сверху.

Реализация результатов исследований. Алгоритмическое и программное обеспечение, разработанное в рамках диссертационной работы, использовалось при проведении исследований в организации НИЦ (г. Тверь) ЦНИИ ВВКО Минобороны России при выполнении НИР «Решетник» (2011 – 2013 гг.), НИР «Таймень» (2015 – 2016 гг.), НИР «Грейфон 7» (2015 г.), НИР «Фон-13» (2015 г.), выполняемых по заказу Минобороны России.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на конференциях: 55-я научная конференции МФТИ, 56-я научная конференции МФТИ, Теория и практика системного анализа 2014, 57-я научная конференции МФТИ, 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2014», на совещаниях НИИ ТП (г. Москва) и

на семинаре кафедры «Теоретическая кибернетика» СПбГУ.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 6 статьях в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 5 работах в материалах научно-технических конференций, 1 монографии, а также получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (98 наименований). Общий объем диссертации – 150 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 85 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагаются цели исследования диссертационной работы и формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается обзор литературы по методам системного анализа, распознаванию образов и алгоритмам вычислительной геометрии. Делается постановка задач распознавания летательных аппаратов в полете на фоне небосвода и наземных объектов на фоне подстилающей поверхности. Принцип работы систем распознавания показан на рис. 1.

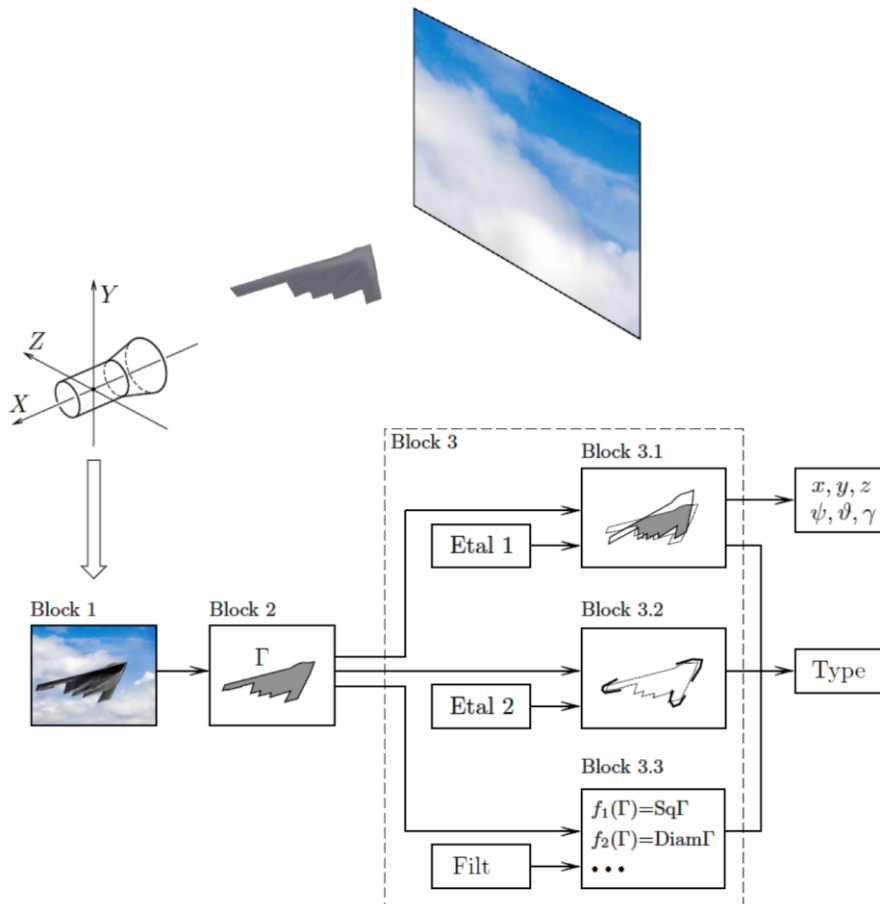


Рис. 1 – Принцип работы систем распознавания

Изображение, получаемое в оптическом канале с абсолютной системой координат XYZ , поступает в Блок 1, в котором осуществляется его предварительная обработка. В Блоке 2 осуществляется выделение распознаваемого объекта на фоновой поверхности. В Блоке 3 осуществляется распознавание выделенного объекта. При распознавании летательных аппаратов на фоне небосвода (Блок 3.1) решающее правило формулируется в терминах метрики Никодима относительной невязки площадей контуров объекта и эталонов. При рас-

познавании летательных аппаратов на фоне аэродрома (Блок 3.2) решающее правило формулируется в результате анализа взаимного расположения основных элементов конструкции летательного аппарата (нос, размахи и заделки крыльев и стабилизаторов), аппроксимированных эталонными элементами конструкции. При распознавании наземных объектов в лазерном канале на фоне подстилающей поверхности (Блок 3.3) решающее правило формулируется в терминах геометрических фильтров. В результате работы блоков распознавания 3.1, 3.2 и 3.3 определяется тип объекта в заданном классе. Дополнительно в Блоке 3.1 определяются линейные и угловые координаты пространственного положения объекта в системе координат оптического канала XYZ .

Во второй главе излагаются необходимые для дальнейшего алгоритмы минимизации на ε -сети по метрике Никодима, алгоритмы кусочно-линейной аппроксимации полигонов и алгоритмы построения пересечения полигонов на основе минимальных выпуклых упаковок.

При решении задач распознавания близость между внешним контуром Γ^0 реального изображения объекта распознавания и эталонными внешними контурами Γ будет определяться по метрике Никодима относительной невязки площадей. В общем случае на плоских множествах A, B относительная невязка площадей задается по правилу

$$\Delta(A, B) = \frac{S(A \cup B) - S(A \cap B)}{S(A \cup B)}.$$

Обозначим через gB множество B , преобразованное элементом g группы сдвигов, растяжений и поворотов плоскости. Величина

$$\mu(A, B) = \min_{g \in G} \Delta(A, gB)$$

является метрикой Никодима близости плоских множеств A и B . В практических вычислениях определение величины $\mu(A, B)$ сводится к определению сдвига V , растяжения λ и поворота ϕ множества B . В рамках приближенного решения задачи сдвиг V определяется по формуле $V = C_A - C_B$ через центры масс C_A и C_B множеств A и B , растяжение λ определяется по формуле $\lambda = \text{diam } A / \text{diam } B$ через отношение диаметров $\text{diam } A$ и $\text{diam } B$ множеств A и B , а поворот ϕ определяется из совмещения направлений на вершины выпуклых оболочек множеств A и B .

Наиболее трудоемкой вычислительной процедурой при распознавании по близости между реальным контуром Γ^0 и эталонным контуром Γ является решение задачи минимизации

$$\mu(\Gamma, \Gamma^0) \xrightarrow{\Gamma} \min$$

в заданном семействе эталонных контуров Γ . В общем случае в компактном метрическом пространстве X с метрикой ρ приближенное решение задачи минимизации

$$\rho(x, x^0) \xrightarrow{x \in X} \min$$

для заданной точки x^0 сводится к решению задачи минимизации

$$\rho(x_k, x^0) \xrightarrow{0 \leq k \leq n} \min$$

на конечной ε -сети x_0, x_1, \dots, x_n .

Традиционно решение задачи глобальной минимизации на конечной ε -сети осуществляется посредством полного перебора ее элементов. Однако в предметной области задач распознавания заданной точкой x^0 является обрабатываемый внешний контур Γ^0 реального изображения объекта, а элементами ε -сети являются эталонные контуры Γ из

некоторого многопараметрического семейства. В этом случае с целью уменьшения объема вычислений может быть предложен следующий алгоритм минимизации.

На этапе предобработки для каждого элемента ε -сети x_k определяются невязки

$$r_k^0 = \rho(x_k, x_0), r_k^1 = \rho(x_k, x_1), \dots, r_k^n = \rho(x_k, x_n).$$

При получении точки x^0 полагается $\rho_* = \infty$ и начинается обработка элементов ε -сети. Для текущего x_k вычисляется невязка $r_k = \rho(x_k, x^0)$. Если $r_k < \rho_*$, то полагается $\rho_* = r_k$ и $x_* = x_k$. Далее выделяются те элементы ε -сети, для которых $r_k^i \leq r_k - \rho_*$ или $r_k^i \geq r_k + \rho_*$, где ρ_* – текущий минимум. Очевидно, для выделенных элементов выполняется одно из неравенств:

$$\begin{aligned} \rho(x_i, x^0) &\geq \rho(x_k, x^0) - \rho(x_k, x_i) \geq r_k - (r_k - \rho_*) = \rho_* \\ \rho(x_i, x^0) &\geq \rho(x_k, x_i) - \rho(x_k, x^0) \geq (r_k + \rho_*) - r_k = \rho_*. \end{aligned}$$

Поэтому выделенные элементы исключаются из дальнейшего рассмотрения. При завершении работы алгоритма ρ_* принимает значение глобального минимума, который реализуется в точке x_* . В случае большого объема n элементов ε -сети рационально использовать многоуровневый вариант изложенного алгоритма с несколькими вложенными друг в друга ε -сетями.

Для повышения скорости вычисления невязки $\mu(\Gamma, \Gamma^0)$ по метрике Никодима между эталонными контурами Γ и реальным контуром Γ^0 предлагается при получении реального контура Γ^0 с целью уменьшения числа вершин осуществлять кусочно-линейную аппроксимацию. Практика показывает, что число вершин в исходном реальном контуре Γ^0 по причине пиксельной дискретизации обычно оказывается в диапазоне $100 \div 500$. Однако, исходя из геометрических особенностей объектов распознавания, удовлетворительное решение задачи удается получить в классе замкнутых ломаных с существенно меньшим числом вершин. Например, для летательных аппаратов удается ограничиться числом вершин порядка $25 \div 30$. В этой связи возникает задача кусочно-линейной аппроксимации замкнутых n -звенных ломаных замкнутыми m -звенными ломаными с числом вершин $m \ll n$. В диссертационной работе предложен алгоритм кусочно-линейной аппроксимации в равномерной метрике Хаусдорфа, понижающий число вершин обрабатываемых реальных контуров в среднем в $17 \div 18$ раз без ущерба для решения задачи распознавания. Аналогичная процедура кусочно-линейной аппроксимации семейства эталонных контуров осуществляется на этапе предобработки. Кусочно-линейные аппроксимации записываются в долговременную память и в последующем остаются неизменными. Кроме того, для рационального вычисления невязки по метрике Никодима между эталонными и реальными контурами для каждого эталонного контура формируется структура минимальной выпуклой упаковки в объемлющем квадрате.

Для вычисления невязки $\mu(\Gamma, \Gamma^0)$ по метрике Никодима требуется алгоритм пересечения полигонов Γ и Γ^0 . В контексте решаемых задач для полигона Γ на этапе предобработки построена минимальная выпуклая упаковка, что позволяет для решения задачи построения пересечения сформулировать рациональный по объему вычислений алгоритм. Пример минимальной выпуклой упаковки для полигона Γ показан на рис. 2. На этом же рисунке пунктирной прямой изображен текущий отрезок $[A_1, A_2]$ полигона Γ^0 .

Основной процедурой в алгоритме является построение точек пересечения q_0, q_1, \dots, q_m отрезка $[A_1, A_2]$ полигона Γ^0 с отрезками полигона Γ . Использование минимальной выпуклой упаковки полигона Γ позволяет существенно оптимизировать задачу

построения точек q_0, q_1, \dots, q_m , что в конечном итоге позволяет существенно ускорить процедуру построения пересечения полигонов.

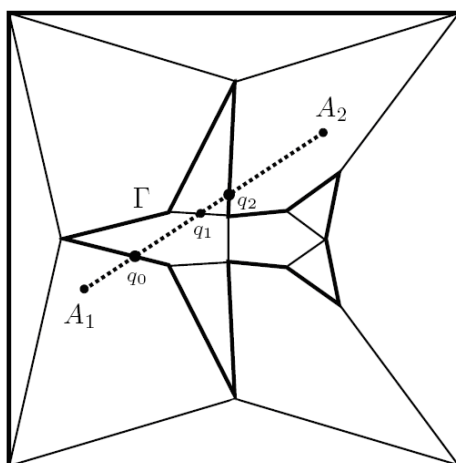


Рис. 2 – Пересечение отрезка с элементами выпуклой упаковки

Предлагаемый алгоритм пересечения полигонов реализован на языке Object Pascal и прошел сравнение на процессоре Intel Core 2 Quad с алгоритмами-аналогами GPC (Object Pascal), Boost (C++) и Clipper (C++). При сравнении алгоритмов производилось попарное пересечение полигонов Γ^0 и Γ . При этом полигон Γ^0 брался из тестового набора объемом 184 полигона, а полигон Γ брался из тестового набора объемом 856 полигонов, что составляет $157\,504 = 184 \times 856$ пересечений. Используемые тестовые полигоны состояли в среднем из 37 вершин и генерировались изображениями летательного аппарата F15 в различных ракурсах. Абсолютные значения времени работы алгоритмов на процессоре Intel Core 2 Quad даются в табл. 1. Кроме того, в табл. 1 дано ускорение времени счета предлагаемого алгоритма по отношению к алгоритмам-аналогам. Ускорение предлагаемого алгоритма достигается в основном за счет переноса процедуры построения минимальной выпуклой упаковки на этап предобработки эталонных контуров.

Табл. 1. Сравнение алгоритмов пересечения полигонов

Алгоритмы	Время счета, с	Ускорение
Предлагаемый алгоритм	1.67	
Clipper	9.78	5.86
Boost	14.15	8.47
GPC	18.42	11.03

В третьей главе в рамках аксиоматики проективной камеры излагаются два метода точного определения пространственного положения летательных аппаратов – метод внешних контуров и метод опорных точек.

В задаче определения положения летательного аппарата требуется по его изображению на приемной матрице получить значения линейных координат x, y, z центра P^0 и угловых координат ψ, ϑ, γ рыскания, тангажа и крена ориентации ортов X^0, Y^0, Z^0 связанной системы координат летательного аппарата в системе координат $OXYZ$ оптического канала. В вычислениях будем пользоваться тройкой углов поворота r, t, k , где первый поворот осуществляется на угол k вокруг оси OX , второй поворот осуществляется на угол t вокруг оси OZ , а третий поворот осуществляется на угол r вокруг оси OY . Решение задачи будет получено при помощи использования виртуальной сферической приемной мат-

рицы, представляющей собой сферический четырехугольник, вырезаемый на единичной сфере S^2 конусом наблюдения оптического канала, как на рис. 3.

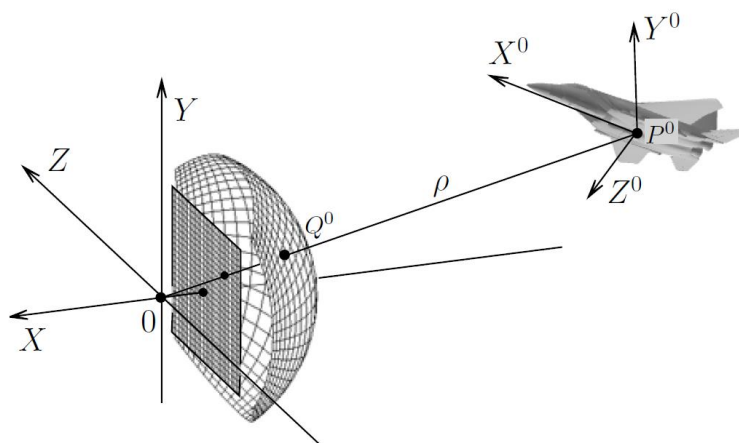


Рис. 3 – Плоская и сферическая приемные матрицы

Геометрической основой метода внешних контуров служит свойство инвариантности единичной сферы S^2 относительно поворотов вокруг центра системы координат $OXYZ$ оптического канала. Используя это свойство, опишем построение эталонных объектов, позволяющих получить решение задачи определения пространственного положения. Пусть центр P^0 установлен на оси OX на заданном расстоянии ρ от начала координат при нулевом угле поворота $k = 0$ и заданных углах поворота r, t , как на рис. 4.

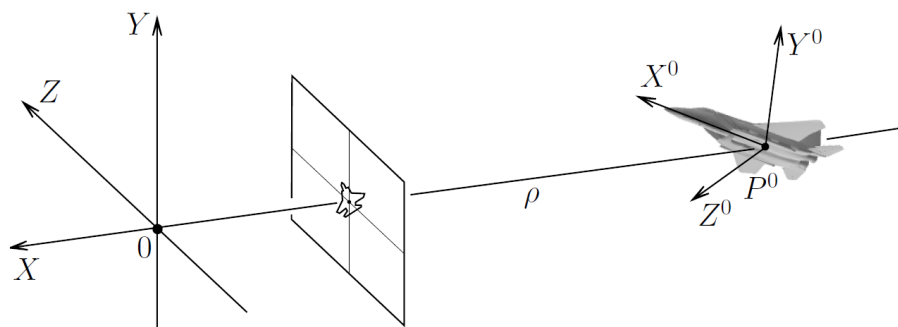


Рис. 4 – Построение эталонных изображений

Построим проекцию изображения летательного аппарата на сферу S^2 . Обозначим через $C(\rho, r, t)$ проекцию на сферу S^2 центра масс полученной фигуры, обозначим через $\Gamma(\rho, r, t)$ внешний контур проекции изображения летательного аппарата на плоскость, касательную к сфере S^2 в точке $C(\rho, r, t)$ и обозначим через $\Delta(\rho, r, t)$ точку в данной касательной плоскости, получаемую в результате ее пересечения с осью OX . При этом система координат касательной плоскости определяется направлениями параллелей и меридианов в точке касания. Так определенные объекты $\Gamma(\rho, r, t)$, $C(\rho, r, t)$, $\Delta(\rho, r, t)$ назовем эталонными. Построение эталонных объектов с заданным шагом изменения по расстоянию ρ и углам r, t осуществляется на этапе предобработки при помощи цифровых моделей летательных аппаратов.

Изложим алгоритм определения пространственного положения по методу внешних контуров. Пусть получено реальное изображение на плоской приемной матрице летательного аппарата известной модели, расположенной в некотором пространственном положении. Построим проекцию внешнего контура изображения на сферу S^2 . Обозначим через

C^0 проекцию на сферу S^2 центра масс полученной фигуры, обозначим через Γ^0 внешний контур проекции изображения летательного аппарата на плоскость, касательную к сфере S^2 в точке C^0 . Используя построенные эталонные объекты, определяем расстояние ρ и углы поворота r и t , при которых реальный контур Γ^0 оказывается геометрически идентичен некоторому эталонному контуру $\Gamma(\rho, r, t)$. Определим угол k' как угол поворота, переводящий контур $\Gamma(\rho, r, t)$ в контур Γ^0 . Далее определим угол k'' по формуле

$$\operatorname{tg} k'' = -\frac{(x^2 + z^2) \operatorname{tg} k'}{x + yz \operatorname{tg} k'},$$

где x, y, z – координаты точки $C(\rho, r, t)$. Это позволяет определить угол $k = k' + k''$. Установим точку $\Delta^0 = \Delta(\rho, r, t)$ в системе координат касательной плоскости к сфере S^2 в точке C^0 . Осуществляя поворот точки Δ^0 в данной касательной плоскости на угол k с последующим проектированием полученной точки на единичную сферу S^2 , получим точку Q^0 , позволяющую определить центр летательного аппарата $P^0 = \rho Q^0$.

Вычисление координат x, y, z точки центра P^0 и углов поворота r, t, k ортов X^0, Y^0, Z^0 связанной системы координат дает решение задачи определения пространственного положения, поскольку углы рысканья, тангажа и крена ψ, ϑ, γ однозначным образом вычисляются через углы поворота r, t, k .

При практическом решении задачи линейные координаты x, y, z и угловые координаты r, t, k вычисляются с точностью, определяемой точностью построения семейства эталонных контуров $\Gamma(\rho, r, t)$. На практике семейство эталонных контуров $\Gamma(\rho, r, t)$ строится при фиксированном характерном расстоянии $\rho = \rho_0$. При этом семейство эталонных контуров определяется как конечная ε -сеть по метрике Никодима μ для семейства углов $(r_0, t_0), (r_1, t_1), \dots, (r_n, t_n)$. В этом случае значения углов поворота r и t для реального контура Γ^0 определяются из решения задачи минимизации

$$\mu[\Gamma^0, \Gamma(\rho_0, r_i, t_i)] \xrightarrow{0 \leq i \leq n} \min,$$

а значение расстояния ρ определяется из соотношения подобия

$$\rho = \frac{D_0}{D} \rho_0,$$

где D – диаметр реального изображения, а D_0 – диаметр эталонного изображения летательного аппарата, выраженные в единых линейных единицах.

Геометрическая суть метода опорных точек заключается в решении задачи позиционирования пространственного треугольника. Пусть треугольник с вершинами Q_1, Q_2, Q_3 и длинами сторон r_1, r_2, r_3 расположен в пространстве R^3 так, что ни одна из его вершин не попадает в начало координат. Обозначим через V_1, V_2, V_3 центральные проекции вершин Q_1, Q_2, Q_3 на единичную сферу S^2 . Очевидно, для некоторых t_1, t_2, t_3 имеют место соотношения

$$\|t_1 V_1 - t_2 V_2\|^2 = r_1^2, \quad \|t_2 V_2 - t_3 V_3\|^2 = r_2^2, \quad \|t_3 V_3 - t_1 V_1\|^2 = r_3^2.$$

Зададим скалярные произведения $s_1 = (V_1, V_2)$, $s_2 = (V_2, V_3)$, $s_3 = (V_3, V_1)$. Тогда

$$t_1^2 - 2s_1 t_1 t_2 + t_2^2 = r_1^2, \quad t_2^2 - 2s_2 t_2 t_3 + t_3^2 = r_2^2, \quad t_3^2 - 2s_3 t_3 t_1 + t_1^2 = r_3^2.$$

Полученная алгебраическая система трех уравнений сводится к решению алгебраического уравнения четвертой степени, дающего несколько ветвей решений t_1, t_2, t_3 , дающих несколько искомых положений пространственного треугольника.

При использовании метода опорных точек для определения пространственного положения летательного аппарата, три основные точки Q_1^0, Q_2^0, Q_3^0 устанавливаются, например, на носу и размахах крыла, а две контрольные точки Q_4^0, Q_5^0 устанавливаются, например, на горизонтальных стабилизаторах, как на рис. 5 слева.

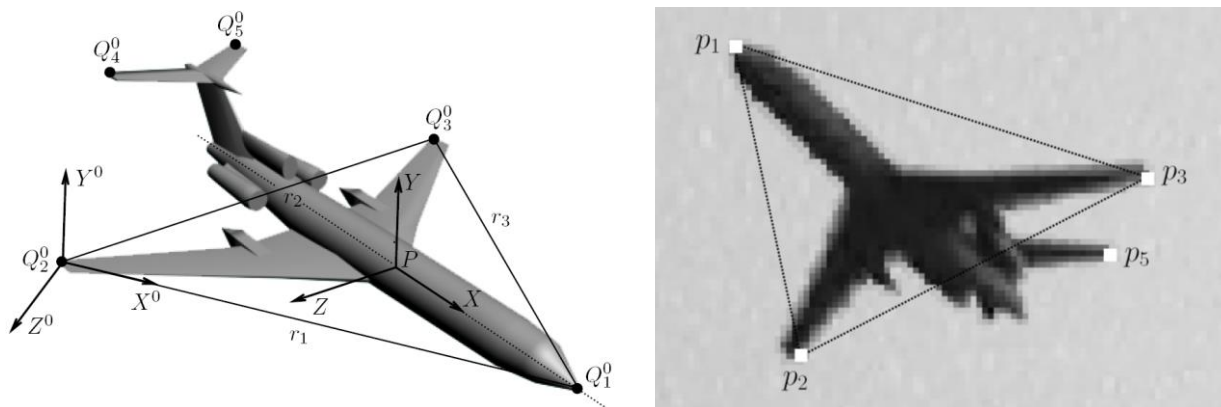


Рис. 5 – Опорные точки

Расстояния $r_1 = \|Q_1^0 - Q_2^0\|$, $r_2 = \|Q_2^0 - Q_3^0\|$, $r_3 = \|Q_3^0 - Q_1^0\|$ между основными опорными точками будут использоваться при решении задачи позиционирования пространственного треугольника с вершинами Q_1, Q_2, Q_3 .

При практическом решении задачи позиционирования по методу опорных точек на изображении летательного аппарата отмечаются пиксели, соответствующие трем основным и по крайней мере одной контрольной точке. На рис. 5 справа отмечены три основные p_1, p_2, p_3 и одна контрольная p_5 опорные точки.

С помощью координат пикселей p_1, p_2, p_3 и вектор-функции $V(p)$ трассировки приемной матрицы, задающей направление пространственной прямой, все точки которой оптическая система переводит в заданный пиксель, определяются нормированные направления

$$V_1 = V(p_1), V_2 = V(p_2), V_3 = V(p_3),$$

по которым далее определяются ветви положений пространственного треугольника с вершинами Q_1, Q_2, Q_3 . Выбор истинной ветви осуществляется по положениям контрольных опорных точек.

С целью проверки метода опорных точек на измерительном стенде, изображенном на рис. 6 было проведено 100 независимых экспериментов по определению угловых координат рыскания, тангажа и крена для модели Ту-154, выполненной в масштабе 1:144. В проведенных экспериментах среднее расстояние между центром модели и оптическим центром было 2250 мм. Это означает, что при масштабе 1:144 среднее расстояние до летательного аппарата было 324 м. Результаты экспериментов сведены в табл. 2.

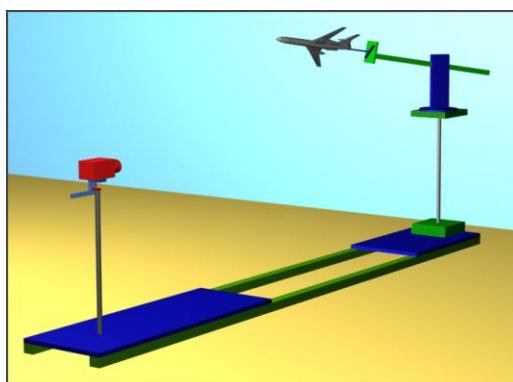


Рис. 6 – Измерительный стенд

Табл. 2. Статистика ошибок измерения угловых координат

Ошибка	Рысканье $\Delta\psi, ^\circ$	Тангаж $\Delta\theta, ^\circ$	Крен $\Delta\gamma, ^\circ$
Нижняя граница	-0.039	-0.168	-1.134
Верхняя граница	3.126	2.513	1.756
Систематическая	1.572	1.247	0.136
Средняя абсолютная	1.573	1.253	0.416

В четвертой главе даются описания системы распознавания летательных аппаратов в полете на фоне небосвода, системы распознавания летательных аппаратов на фоне аэродрома на спутниковых изображениях и системы распознавания наземных объектов в лазерном канале.

1. Система распознавания летательных аппаратов на фоне небосвода.

Основными элементами системы распознавания летательных аппаратов на фоне небосвода являются оптический канал и вычислитель. Предполагается, что система распознавания летательных аппаратов в полете работает в реальном времени, поэтому все операции должны осуществляться в промежутках между последовательно идущими кадрами. Таковыми операциями являются получение изображения I в оптическом канале, перевод изображения I в оцифрованном виде из оптического канала в вычислитель, построение внешнего контура G реального изображения летательного аппарата, сравнение реального контура G по метрике Никодима с эталонными контурами G_0, G_1, \dots, G_n , поступающими из баз эталонов моделей T_0, T_1, \dots, T_n , и процедура распознавания типа летательного аппарата по сериям кадров заданной длины. Процедура распознавания по сериям кадров осуществляется по мажоритарному принципу с целью повышения вероятности правильного распознавания, при этом задержка распознавания пропорциональным образом зависит от длины серии и частоты кадров.

Работа системы распознавания была проверена на видеозаписях полетов реальных летательных аппаратов типа A10, F15, F16, F22, F35, F117 и Su33. Изложим результаты обработки видеозаписи полета летательного аппарата F22. Данная видеозапись образована из 650 кадров. Типичные кадры видеозаписи показаны на рис. 7.



Рис. 7 – Кадры видеозаписи полета F22

В данном эксперименте при частоте кадров 25 Гц вычисления осуществлялись в реальном времени на процессоре с тактовой частотой 2.33 ГГц. В результате работы системы из общего числа 650 кадров 28 кадров были исключены по причине плохого качества. Из оставшихся 622 кадров правильное распознавание летательного аппарата осуществилось на 575 кадрах, что составляет 88.4% от общего числа кадров и 92.4% от числа кадров, принятых к распознаванию.

В лабораторных условиях система распознавания была проверена на прототипе аппаратной реализации, в которой оптическая система имела следующие параметры: частота кадров 15 Гц, размеры приемной матрицы 640x480 пикселей, а вычислитель имел следующие параметры: тактовая частота 2.33 ГГц, объем ОЗУ 4 Гб, объем долговременной памяти 256 Мб. В классе распознаваемых летательных аппаратов был выделен тестовый набор из 6 летательных аппаратов типа A10, F15, F16, F117, T50, Su33, для каждого из которых были подготовлены физические модели в масштабе 1:72.

Общая схема экспериментов дана на рис. 8. Тестовая физическая модель подвешивалась горизонтально на нити. Закручивание нити вызывало вращательное движение, приводящее к изменению угла поворота Ψ физической модели в горизонтальной плоскости. В проводимых экспериментах основным варьируемым параметром являлся угол Θ наклона оптической оси к горизонтали, удовлетворяющий соотношению $tg\Theta = H/L$, где H – высота полета, а L – расстояние по горизонтали.

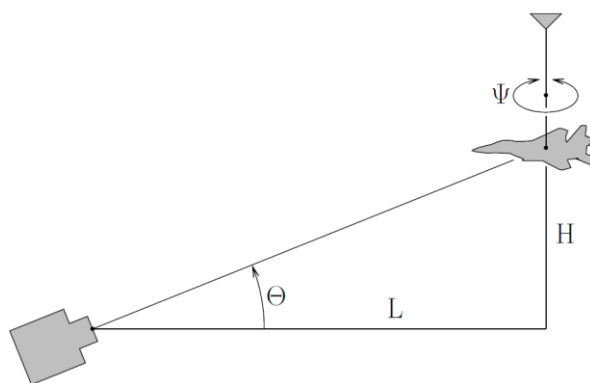


Рис. 8 – Схема эксперимента

Оценки вероятности правильного распознавания P в зависимости от угла Θ оптической оси по отношению к горизонтали даны в табл. 3.

Табл. 3. Оценки вероятности правильного распознавания

Наклон Θ , °	min P, %	max P, %	Среднее avg P, %
-60	87	100	97,5
-45	86	100	96,8
-30	83	100	93,8
-15	82	99	92,7
0	72	96	89,0
15	87	100	94,3
30	86	100	95,2
45	83	100	95,5

В табл. 3 в столбце min P даны минимальные вероятности, в столбце max P даны максимальные вероятности, а в столбце avg P даны средние арифметические значения вероятности по тестовому набору.

Из таблицы можно сделать вывод, что среднее значение вероятности по заданному тестовому набору распознавания варьируется от 89,0% до 97,5% в зависимости от значения угла наклона. Причем минимальные значения вероятности правильного распознавания достигаются при угле визирования $\Theta = 0^\circ$.

2. Система распознавания летательных аппаратов на фоне аэродрома

Система распознавания летательных аппаратов на фоне аэродрома на спутниковых снимках осуществляет распознавание по конструктивным элементам летательных аппаратов. Эталоны конструктивных элементов будут задаваться ориентированными незамкнутыми четырехзвенными ломаными. С точностью до сдвига и поворота плоская незамкнутая четырехзвенная ломаная задается семью параметрами $\varphi, R_1, R_2, L_1, H_1, L_2, H_2$, геометрический смысл которых понятен из рис. 9 слева.

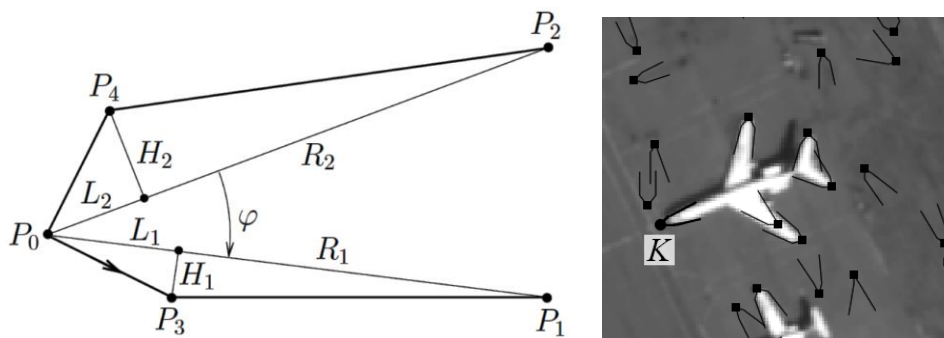


Рис. 9 – Параметры эталонного элемента

Решение задачи распознавания летательных аппаратов начинается с построения набора конструктивных элементов на границах яркостей изображений летательных аппаратов, как на рис. 9 справа. В данном случае эталонные элементы выделяют носовую часть фюзеляжа, размахи крыла и размахи стабилизатора. Для каждого конструктивного элемента K построенного набора и каждой модели M летательного аппарата заданного класса осуществляются три действия: позиционирование эталонного контура Γ модели M по конструктивному элементу K , коррекция эталонных контуров Γ_i по близлежащим конструктивным элементам и фильтрация эталонных контуров Γ_i по невязкам средних яркостей внутри и вне эталонных контуров. На рис. 10 дается результат работы алгоритма распознавания по конструктивным элементам.

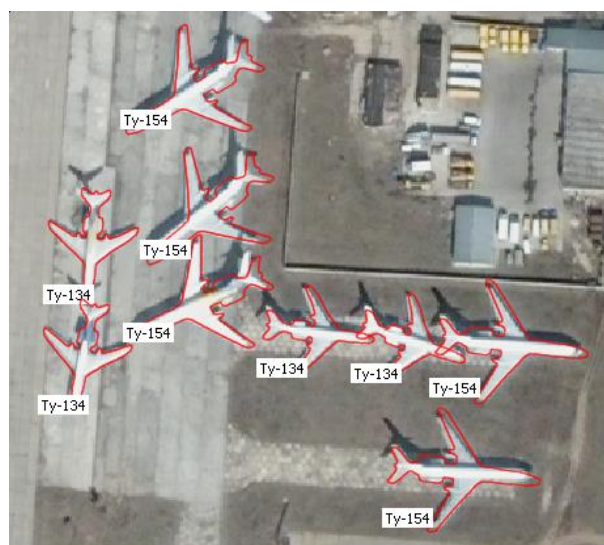


Рис. 10 – Распознавание по конструктивным элементам

3. Система распознавания наземных объектов в лазерном канале

Решение задачи распознавания наземных объектов в лазерном канале основано на выделении объекта на фоне подстилающей поверхности, посредством определения ее локальной нормали. Изложим способ построения плоскости Π , аппроксимирующей подстилающую поверхность, по методу главных компонент. Исходными данными задачи являются точки A^1, A^2, \dots, A^n , получаемые с приемной матрицы. Зададим искомую плоскость Π в виде $(N, X - C) = 0$, где C – центр, а N – единичный вектор нормали. Тогда построение Π сводится к задаче минимизации

$$\sum_{k=1}^n (N, A^k - C)^2 \rightarrow \min.$$

Построение аппроксимирующей плоскости Π позволяет преобразовать 3D портреты объектов по матрице дальностей (сверху на рис. 11) в 3D портреты по матрице высот (снизу на рис. 11).

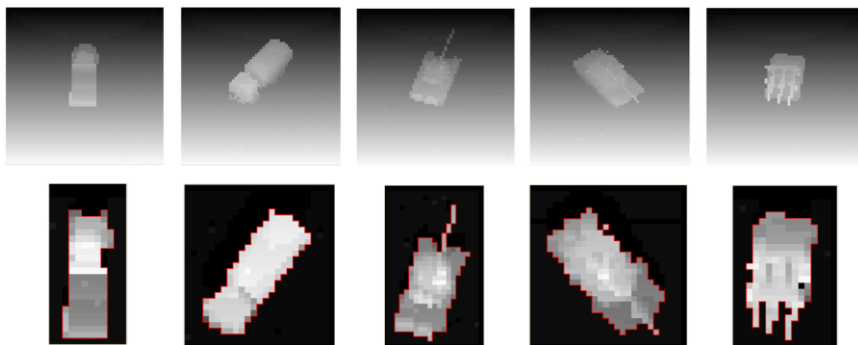


Рис. 11 – Портреты по матрицам дальностей (сверху) и высот (снизу)

Для распознавания объектов по 3D портретам по матрице высот введем фильтры по площади $F_1(G)$, диаметру $F_2(G)$, выпуклости $F_3(G)$, удлинению $F_4(G)$ и средней яркости $F_5(G)$. Для каждого объекта из заданного класса, занумерованного индексом $i = 1, 2, \dots, n$, задается цепочка фильтрации из пяти введенных фильтров:

$$a_1^i \leq F_1(G) \leq b_1^i, a_2^i \leq F_2(G) \leq b_2^i, a_3^i \leq F_3(G) \leq b_3^i, a_4^i \leq F_4(G) \leq b_4^i, a_5^i \leq F_5(G) \leq b_5^i$$

Границы a_j^i, b_j^i цепочек фильтрации определяются так, чтобы через цепочку данного объекта пропускались только внешние контуры его изображений и отсеивались внешние контуры других объектов и случайных помех.

В рамках математического моделирования лазерного канала получены оценки вероятности правильного распознавания наземных объектов в зависимости от высоты полета H , угла расходимости φ и углового отклонения Δ луча от номинала, изображенных на рис. 12.

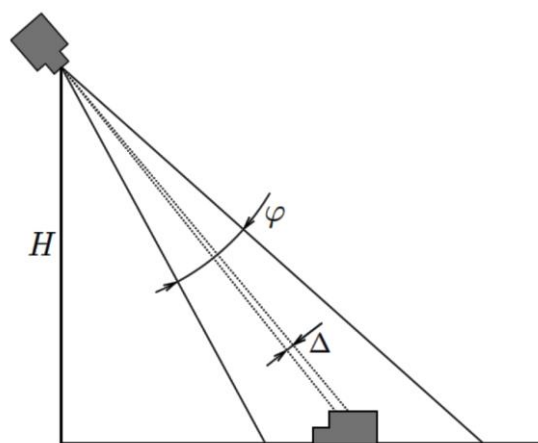


Рис. 12 – Параметры эксперимента

В проведенных вычислительных экспериментах высота полета H изменялась от 5000 до 7000 м, угол расходимости φ изменялся от 0.6 до 0.8 градусов, а среднее отклонение Δ луча от номинала изменялась от 0.005 до 0.015 градусов. Результаты математического моделирования даются в табл. 4, в которой показана зависимость вероятности правильного распознавания пяти наземных объектов от значений параметров H , φ и Δ .

Табл. 4 – Оценки вероятности правильного распознавания

№ эксп.	H , м	φ , °	Δ , °	Урал 4320	Камаз 4310	Т 80	М1 Abrams	ЗРК Куб
1	5000	0.6	0.005	99	98	100	100	100
2	5000	0.7	0.005	80	98	96	85	100
3	5000	0.8	0.005	77	70	94	91	98
4	6000	0.6	0.005	99	100	100	92	97
5	6000	0.7	0.005	81	97	98	85	97
6	7000	0.6	0.005	93	100	95	89	100
7	7000	0.7	0.005	57	83	84	58	96
8	5000	0.6	0.015	93	56	86	96	100
9	5000	0.7	0.015	77	47	71	76	98
10	5000	0.8	0.015	68	48	63	56	94

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Для решения задачи минимизации в компактном метрическом пространстве, снабженном инвариантной метрикой Никодима, предложен алгоритм минимизации на многоуровневых ε -сетях, позволяющий в $10 \div 25$ раз ускорить процесс определения точки глобального минимума по сравнению с прямым перебором по ε -сети объема $\sim 10^3$ узловых точек.
2. На основе построения выпуклых упаковок с минимальным числом структурных элементов разработан алгоритм пересечения полигонов, который в предметной области задач распознавания летательных аппаратов в случае полигонов объема $\sim 10^2$ имеет скорость работы в 5.81, в 8.38 и в 11.05 раз выше скорости работы алгоритмов-аналогов из библиотек Clipper, Boost, GPC.
3. На основе методов сферической геометрии разработаны алгоритмы определения пространственного положения летательного аппарата с точностью нахождения угловых

- координат рысканья, тангажа и крена порядка 2-3 градуса для автоматизированного метода опорных точек и порядка 4-5 градусов для автоматического метода внешних контуров.
4. Разработана программно-аппаратная реализация системы распознавания летательных аппаратов в полете на фоне небосвода с техническими характеристиками: частота кадров 15 Гц, объем приемной матрицы 640x480 пикселей, тактовая частота вычислителя 2.33 ГГц, объем оперативной памяти 4 Гб и объем долговременной памяти 256 Мб, обеспечивающая распознавание летательных аппаратов в реальном времени с приемлемой вероятностью правильного распознавания.
 5. Разработана система распознавания летательных аппаратов на спутниковых изображениях на фоне аэродрома по элементам конструкции: носовой части фюзеляжа, размахам и заделкам крыла, размахам и заделкам горизонтального стабилизатора. В рамках разработанной системы удастся повысить вероятность правильного распознавания летательных аппаратов в случаях, когда их внешние контуры претерпевают существенные деформации по причинам оптических помех и особенностей парковки.
 6. На основе метода главных компонент аппроксимации подстилающей поверхности по значениям матрицы наклонных дальностей разработана система распознавания наземных объектов по 3D лазерным изображениям с авиационного носителя

Список публикаций

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ

1. Мирзоян А. С. Математическое моделирование изображений наземных объектов для лазерной локации // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П. А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2012. – № 2. – С. 186 – 192.
2. Мирзоян А. С. Алгоритм быстрого построения пересечения полигонов в задаче распознавания летательных аппаратов // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2013. – № 4. – С. 17 – 23.
3. Мирзоян А. С., Хмаров И. М., Кондрашов Н. Г., Шахов С. В. Выделение наземных объектов над подстилающей поверхностью в лазерном канале по методу главных компонент // Вестник Московского авиационного института. – М.:МАИ, 2013. – № 4. – С. 118 – 127.
4. Мирзоян А. С., Малышев О. В., Хмаров И. М., Канивец В. Ю. Распознавание летательных аппаратов оптической системой в реальном масштабе времени // Вестник Московского авиационного института. – М.:МАИ, 2014. – № 5. – С. 145 – 156.
5. Мирзоян А. С., Малышев О. В., Хмаров И. М., Мешков В. В., Шахов С. В. Численные методы определения пространственного положения летательного аппарата на основе 2D-оптических изображений // Программные продукты и системы. – Тверь: НИИ «ЦПС», 2015. – № 3. – С. 33 – 41.
6. Мирзоян А. С., Малышев О.В. Распознавание летательных аппаратов на спутниковых снимках по элементам конструкции // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2015. – № 3. – С. 107 – 115.

Материалы конференций

7. Мирзоян А. С. Выделение объектов над подстилающей поверхностью в задаче распознавания лазерными локационными средствами //Труды 55-й научной конференции МФТИ. Радиотехника и кибернетика. Том 1. – М.:МФТИ, 2012. – С. 114.

8. Мирзоян А. С. Алгоритм быстрого построения пересечения полигонов //Труды 56-й научной конференции МФТИ. Радиотехника и кибернетика. – М.:МФТИ, 2013. – С. 97 – 98

9. Мирзоян А. С. Прототип системы автоматического распознавания воздушных целей, работающей в реальном масштабе времени // Теория и практика системного анализа: Труды III Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. – Т. II. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2014. – С. 84 – 90.

10. Мирзоян А. С. Применение методов вычислительной геометрии для распознавания воздушных целей в оптической системе в реальном масштабе времени // 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2014». Москва. Тезисы. – СПб.: Мастерская печати, 2014. – С. 639 – 641.

11. Мирзоян А. С. Распознавание воздушных целей в оптической системе в реальном масштабе времени // Труды 57-й научной конференции МФТИ. Радиотехника и кибернетика. – М.:МФТИ, 2014. – С. 113 – 114.

Другие публикации

12. Малышев В. А., Малышев О. В., Мирзоян А. С., Хмаров И. М., Канивец В. Ю., Кондрашов Н. Г., Вишняков А. С. Распознавание наземных объектов и летательных аппаратов 2-D и 3-D оптико-электронными системами. – М.: ФГУП «НТЦ «Информ-техника», 2013. – 158 с.: ил.

Свидетельства о регистрации программ ЭВМ

13. Свидетельство №2016662489. Программа распознавания летательных аппаратов в полете на фоне небосвода // Мирзоян А. С.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО РГАТУ имени П. А. Соловьева – заявка №2016619838; заявл. 19.09.2016; зарегистр. 11.11.2016.

14. Свидетельство №2017611905. Программа распознавания наземных объектов в лазерном канале // Мирзоян А. С.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО РГАТУ имени П. А. Соловьева – заявка №2016661994; заявл. 08.11.2016; зарегистр. 10.02.2017.

15. Свидетельство №2017613625. Программа распознавания летательных аппаратов на фоне аэродрома по элементам конструкции // Мирзоян А. С., Малышев О. В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Соловьева – заявка №2016663687; заявл. 13.12.2016; зарегистр. 23.03.2017.