

**Российская ассоциация искусственного интеллекта**

---



**ВТОРОЙ ВСЕРОССИЙСКИЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР  
«БЕСПИЛОТНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ  
СРЕДСТВА С ЭЛЕМЕНТАМИ  
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА»**

**в рамках международной научно-технической конференции  
«Экстремальная робототехника (ЭР-2015)»**

**9 октября 2015  
г. Санкт-Петербург, Россия**

**Труды семинара**

УДК 004.8  
ББК-32.813

**Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)» (9 октября 2015г., г. Санкт-Петербург, Россия): Труды семинара. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. – 140 с.**

В сборник включены тексты работ, представленные на втором Всероссийском научно-практическом семинаре «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)» 9 октября 2015 года в рамках международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника (ЭР-2015)».

Официальный сайт семинара – [www.ai-uv.ru](http://www.ai-uv.ru)

ISBN 978-5-906782-78-6

© Коллектив авторов, 2015  
© Российская ассоциация  
искусственного интеллекта, 2015

## О семинаре

В настоящее время наблюдается существенное повышение интереса исследователей и разработчиков к созданию беспилотных транспортных средств различного типа и назначения, способных к автономному решению высокоуровневых задач в динамических, непрогнозируемых средах. Создание подобных средств невозможно без интеграции усилий специалистов в различных областях науки: механики, теории управления, теории передачи информации, компьютерной графики, распознавания образов, искусственного интеллекта, когнитивных наук и многих других. Одним из механизмов указанной интеграции является проведение семинара «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ), в ходе которого исследователи различных специализаций имеют возможность обмениваться опытом решения актуальных проблем, связанных с созданием беспилотных транспортных средств нового поколения – таких средств, которые могли бы быть названы интеллектуальными.

Первый семинар БТС-ИИ прошел в 24 сентября 2014 года в Казани в рамках Четырнадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2014). Продолжая традицию проведения семинара совместно с крупными научными мероприятиями, в 2015 году семинар БТС-ИИ пройдет на базе Центрального научно-исследовательского института робототехники и технической кибернетики (г. Санкт-Петербург) в рамках Международной научно-технической конференции «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА». Программа семинара подразумевает выступление 2 приглашенных и 16 регулярных докладчиков, а также заключительное обсуждение.

Желаем успехов участникам семинара и надеемся на плодотворную дискуссию в ходе работы!

**Программный комитет БТС-ИИ-2015**

## Организатор

Российская ассоциация искусственного интеллекта ([www.raai.org](http://www.raai.org))

## Организационная поддержка

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики ([www.rtc.ru](http://www.rtc.ru))

## Программный комитет

**В.Е. Павловский**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, член Научного совета Российской ассоциации искусственного интеллекта.

**С.Б. Ткачев**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры "Математическое моделирование" МГТУ им. Н.Э. Баумана, лауреат премии правительства РФ в области науки и техники.

**Д.А. Добрынин**, кандидат технических наук, научный сотрудник сектора Интеллектуальных систем ВИНТИ РАН, член Российской ассоциации искусственного интеллекта, финалист конкурса беспилотных летающих роботов КРОК-2013.

**В.Э. Карпов**, кандидат технических наук, доцент МФТИ, начальник лаборатории робототехники НИЦ «Курчатовский институт», вице-президент Российской ассоциации искусственного интеллекта.

**Н.В. Ким**, кандидат технических наук, лауреат премии правительства РФ в области образования, профессор кафедры 704 факультета №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» Московского авиационного института.

**К.С. Яковлев**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, финалист конкурса беспилотных летающих роботов КРОК-2013, член Научного совета Российской ассоциации искусственного интеллекта.

## Официальный сайт семинара

[www.ai-uv.ru](http://www.ai-uv.ru)

## Контакты

Яковлев Константин Сергеевич, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, [yakovlev@isa.ru](mailto:yakovlev@isa.ru), +7-499-135-14-42

# **Приглашенные доклады**

## **Мировые соревнования и перспективные направления развития беспилотных транспортных средств**

Д.А. Добрынин (*dobr@viniti.ru*)  
ВИНИТИ РАН, Москва

Разработка беспилотных транспортных средств – одно из бурно развивающихся направлений в современном мире. Все промышленно-развитые страны предпринимают большие усилия для привлечения в эту область молодых специалистов. Ежегодно в мире проходит большое количество различных соревнований – для школьников, студентов и профессионалов.

Главной целью соревнований для студентов является усиление мотивации к обучению, приобретение глубоких и разносторонних инженерных навыков, создание коллективов, которые впоследствии будут заниматься разработками в области робототехники и беспилотных транспортных средств. Соревнования для профессионалов ставят своей целью объединение усилий различных групп, непосредственное создание и развитие новых технологий. Таким образом, практическим выходом таких соревнований является воспитание специалистов и создание устойчивых коллективов разработчиков, а также продвижение новых технологий.

Каждый год в мире проходит несколько сотен различных соревнований в области робототехники и беспилотных транспортных средств. Наиболее известные из них – это RoboCup, которые являются международными соревнованиями по футболу среди роботов, соревнования международной ассоциации беспилотных транспортных средств AUVSI, международные соревнования EURATHLON, соревнования космических аппаратов GOOGLE LUNAR X PRIZE, соревнования беспилотных автомобилей DARPA Grand Challenge, соревнования гуманоидных роботов DARPA Robotics Challenge и др.

Как показывает международный опыт, соревнования робототехнических систем (в том числе – беспилотных транспортных средств), как увлекательный вид состязаний в области разработок новой техники, оказываются мощным рычагом ускорения развития научно-технического прогресса.

## **Беспилотные летательные аппараты: машущий полет**

Яцун С.Ф. (*teormeh@inbox.ru*)

Юго-Западный государственный университет, Курск

Последние годы возрос интерес к беспилотным летающим аппаратам (БПЛА), в которых реализованы принципы полета насекомых. Такие аппараты получили название инсектоптеры. Одним из преимуществ аппарата-инсектоптера является то, что энергопотребление при прочих равных по сравнению с традиционными схемами, например мультироторного типа, значительно ниже. Крылья с изменяемыми параметрами и геометрией могут быть переориентированы и адаптированы под текущие условия полета летательного аппарата, что позволяет максимально использовать энергию воздушных потоков и увеличить дальность свободного планирования. Поэтому ведущие научные центры мира ведут разработки по созданию малогабаритных летательных аппаратов с машущим крылом.

Рассматриваемый в докладе БПЛА - стрекоза оснащен двумя оппозитно двигающимися крыльями, установленными на фюзеляже, где также установлено хвостовое оперение, оснащенное рулями высоты и направления. Такая схема крыльев является уравновешенной и позволяет создавать реактивную струю воздуха, обеспечивающую соответствующее тяговое усилие и необходимую подъемную силу. Определение реальных координат аппарата в полете осуществляется с помощью установленных в системе управления GPS – навигатора, гироскопа и альтиметра. Обработка данных, поступающих с датчиков, сравнение их с заданными, нахождение управляющих воздействий по отклонениям реальных координат от заданных, происходит в бортовой системе управления. На основе разработанной математической модели БПЛА, выполнено математическое моделирование полета. Спроектирован и изготовлен прототип БПЛА-стрекозы.

## Содержание

### *А.К. Буйвал*

Локализация беспилотного летательного аппарата внутри помещений на основе визуальных геометрических признаков и известной 3D модели окружающей среды.....10

### *И.М. Афанасьев, А.Г. Сагитов, И.Ю. Данилов, Е.А. Магид*

Навигация гетерогенной группы роботов (БПЛА и БНР) через лабиринт в 3D симуляторе Gazebo методом вероятностной дорожной карты.....18

### *А.В. Боковой*

Исследование методов одновременного картирования и локализации беспилотных летательных аппаратов по видеопотоку, полученному с единственной камеры .....26

### *В.В. Воробьев*

Решение задачи групповой рекогносцировки с использованием локального взаимодействия роботов.....34

### *Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, И.Г. Крылов*

Поиск наземных объектов беспилотными летательными аппаратами .....42

### *В.Ю. Волков, Е.Г. Борисов*

Выделение мелкомасштабных объектов на цифровых изображениях.....50

### *Е.А. Ивашина, М.О. Корлякова, А.Ю. Пилипенко, А.А. Филимонков*

Подход к настройке системы технического зрения для мобильной платформы.....58

### *А.Д. Московский*

Метод распознавания сцен для задачи навигации мобильных роботов.....66

### *А.И. Панов*

Представление знаний в задачах согласованного перемещения группы БПЛА .....74

### *С.В. Лебедев, М.Г. Пантелеев*

Онтолого-ориентированное проектирование подсистемы оценки обстановки интеллектуального агента реального времени.....83

***М.М. Сурцук, А.Д. Московский***

Система управления и навигации мультироторным летательным аппаратом для задачи пролета над заданной траекторией .....91

***В.Е. Павловский, С.Ф. Яцун, О.В.Емельянова, С.П.Стуканёва***

Математическое моделирование робота с переменным вектором тяги .....99

***В.Е. Павловский, В.Н.Огольцов, И.А.Спиридонова***

Задачи управления беспилотным автомобилем в проекте "АвтоНИВА".107

***В.С. Фетисов, Ш.Р. Ахмеров, Р.В. Сизоненко***

Интеллектуальная коммутация бортовых посадочных электродов БПЛА с открытыми контактными площадками зарядной платформы ..... 115

***В.М. Шibaев, Д.В. Аполлонов, В.А. Матвеев, Т.Л. Кобцева***

Формирование сценариев безопасного автономного завершения полета ДПЛА с целью определения критериев сертификации ..... 123

***М.В. Хачумов***

Алгоритмы целочисленной арифметики в задачах расчета траекторного движения..... 130

УДК 004.932.2

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВИЗУАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ И ИЗВЕСТНОЙ 3D МОДЕЛИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А.К. Буйвал (*alexbuyval@gmail.com*)

Брянский государственный технический университет, Брянск

**Аннотация.** В статье приводится описание алгоритма визуальной локализации БПЛА квадроспирального типа внутри помещения на основе сопоставления граней, полученных из изображения с видеокamеры и из смоделированного изображения, полученного на основе известной 3D модели окружающей среды (помещения). В конце статьи приводятся результаты экспериментов на основе моделирования в среде Gazebo.

**Ключевые слова:** визуальная локализация, фильтр частиц, ROS, Gazebo

### Введение

Локализация мобильного робота и в частности БПЛА является часто критически важной функцией, так как позволяет роботу более точно планировать маршрут и принимать решения. Для ряда БПЛА и мобильных роботов, функционирующих вне помещений, основным источником данных о собственном местоположении, как правило, является GPS/ГЛОНАСС приемник. Для роботов же, функционирующих внутри помещений, как известно, использование этого датчика практически невозможно. Как правило, для локализации внутри помещений очень часто используются инерциальные датчики и лазерные дальнометры, которые в свою очередь также обладают недостатками. В частности, лазерные дальнометры на сегодняшний день достаточно дороги, имеют ограниченное пространство действия и являются чувствительными к отражающей способности окружающей среды. Использование же инерциальных датчиков сопряжено с накоплением ошибки локализации и чувствительностью к вибрациям.

Также одним из распространённых подходов в локализации является использование визуальной информации, полученной с камеры робота. Как правило, выделяют визуальную локализацию в подготовленном

помещении (с использованием специальных маркеров, например, как в работе [Яковлев и др., 2014]) и в не подготовленном помещении. Несомненно, использование маркеров значительно упрощает задачу визуальной локализации, но часто подготовка помещения является невозможной. Также количество маркеров и их визуальная доступность напрямую влияют на точность локализации.

Недостатками визуальной локализации являются сложность обработки визуальной информации, частые изменения внешних условий, затрудняющих анализ изображения (изменения освещенности, помехи и т.д.)

В данной статье предлагается использовать визуальную информацию для локализации БПЛА путем сравнения изображения, полученного с камеры, со смоделированным изображением, полученным на основе 3D модели помещения. Несомненно, недостатком данного метода является необходимость в модели помещения, но в то же время часто проще создать такую модель (на основе планов помещения), чем размещать визуальные маркеры внутри помещения.

## **1 Использование граней как характерных визуальных признаков для задачи локализации**

Ключевым моментом в предлагаемом методе визуальной локализации является сравнение и численная оценка схожести 2-х изображений: полученного с камеры и изображения, смоделированного на основе модели помещения. Предполагается, что алгоритм строит ряд гипотез о положении робота в пространстве, затем на основе этих гипотез он моделирует изображения, каждое из которых соответствует изображению которое должен получить робот, если он находится в этой предполагаемой точке. Таким образом, на каждой итерации алгоритма мы сравниваем одно изображение с камеры со множеством смоделированных изображений и определяем степень их схожести.

Для определения степени схожести существует ряд методов:

1. попиксельное сравнение;
2. сравнение на основе общих характеристик изображения (гистограмма, цветовое распределение и т.д.);
3. использование характерных точек;
4. использование характерных линий или других геометрических признаков.

Использование методов №1 и №2 является нецелесообразным, т.к. потребует точной визуальной модели помещения, учитывающей особенности освещенности, текстуры и свойства материалов и массу других факторов. Также эти методы неустойчивы к изменению условий,

например, к изменению освещенности.

Использование метода №3 также является затруднительным, т.к. также потребует учета в модели помещения текстур материалов и элементов интерьера.

Наиболее подходящим для нашей задачи методом сопоставления является использование граней, наблюдаемых в изображениях для их сопоставления. Грани в нашем случае будут образовываться в первую очередь элементами конструкции помещения: стыки стен, потолка и пола, границы окон и дверей и т.д. Такие грани являются достаточно устойчивыми признаками. Они устойчивы во времени, и изменения освещенности в разумных пределах, как правило, не влияет на их восприятие. Для данного метода достаточно учесть в модели помещения основные конструкционные элементы, что существенно упрощает создание 3D модели помещения.

## 2 Использование фильтра частиц для локализации робота

Для обработки данных о схожести изображений, а также данных с других доступных датчиков предлагается использовать алгоритм локализации, основанный на множестве частиц (гипотез о местоположении робота) – фильтр частиц (particle filter). Данный метод широко известен и хорошо зарекомендовал себя в подобных задачах. Преимуществом этого метода является то, что он позволяет использовать множество гипотез, а также нелинейные модели как самой системы, так и нелинейные модели показаний датчиков.

### 2.1 Структура состояния системы и модель предсказания

Для описания положения БПЛА в системе координат помещения используется следующий вектор состояния:

$$X_t = (x_t, y_t, z_t, \alpha_t, \beta_t, \gamma_t)^T \in R^6,$$

где  $x_t, y_t, z_t$  – пространственные координаты,  $\alpha_t, \beta_t, \gamma_t$  – крен, тангаж и рысканье соответственно.

Использование всех компонентов данного вектора состояния для формирования группы гипотез (частиц) является практически трудно осуществимым, т.к. количество возможных гипотез, которые необходимо оценить, слишком высоко.

Для снижения размерности задачи в данной работе предлагается использовать данные с других датчиков БПЛА. В частности, крен и тангаж являются прямо наблюдаемыми параметрами с помощью инерциального датчика (IMU). Также в данной работе принято, что угол рысканья тоже является наблюдаемой величиной за счет использования гироскопа и компаса. Хотя стоит отметить, что использование компаса

внутри помещений достаточно неэффективно. Помимо этого, будем использовать ультразвуковой дальномер для прямого наблюдения высоты полета. Для помещений это оправдано, т.к. высота полета редко превышает 4-5 метров.

Таким образом, при формировании гипотез о положении робота мы варьируем только компоненты  $x_t, y_t$ .

Модель предсказания в этом случае выглядит следующим образом:

$$X_{t+\Delta t} = X_t + \Delta t (\dot{x}_t, \dot{y}_t, 0, 0, 0, 0)^T,$$

где  $\Delta t$  – приращение времени,  $\dot{x}_t, \dot{y}_t$  – пространственные скорости.

Пространственные скорости являются также прямо наблюдаемыми за счет использования IMU датчика и датчика визуальной одометрии. Единственно, необходимо преобразовать пространственные скорости из системы координат робота в рабочую систему координат.

## 2.2. Измерительная модель фильтра частиц

Для того, чтобы оценить вероятность каждой гипотезы (частицы) необходимо оценить близость границ, полученных из изображения с камеры, к границам, полученным из смоделированного изображения, соответствующего гипотезе.

Существуют различные методы подобной оценки. В работе [Nuske, 2009] были исследованы 3 метода:

1. Метод Klein и Murray [Klein, 2006]. Вероятность гипотезы в данном методе оценивается на основе отношения количества совпадающих пикселей на гранях изображения с общим количеством. Недостатком данного метода является то, что не учитывается количество найденных граней. Т.е., например, все совпадающие точки могут принадлежать одной грани, которая может быть ошибочной.
2. Модифицированный метод Klein и Murray [Nuske, 2008], который также оценивает отношения совпадающих пикселей, но оценивает их в разрезе каждой грани. После чего объединяет вероятности для каждой грани в общую вероятность. Данная модификация позволяет усилить влияние коротких граней (например, контуров окон) на конечный результат и улучшить локализацию.
3. Метод ближайшей грани. Предыдущие два метода имеют серьёзный недостаток, который заключается в том, что учитываются только совпадающие на гранях пиксели. Т.о. если грани одного и того же конструктивного элемента на изображении с камеры и на смоделированном изображении не совпадают, но проходят близко друг к другу, то это не будет учитываться в конечной вероятности. В данном методе предлагается оценивать близость смоделированной грани к грани на изображении с

камеры с помощью набора нормалей, построенных от смоделированной грани. В работе [Nuske, 2009] показана эффективность данного метода по сравнению с предыдущими для колесного робота.

В связи с выше изложенным, в данной работе мы опираемся на метод ближайшей грани.

В рассматриваемом методе выполняются последовательно следующие этапы:

1. Выделение границ на изображении, полученном с камеры.
2. Нахождение прямых в выделенных границах с помощью преобразования Хафа. Полученные прямые используются как исходные данные для вычисления вероятности каждой частицы.
3. Рендеринг изображения согласно вектору состояния частицы.
4. Выделение границ на полученном изображении.
5. Нахождение прямых в выделенных границах с помощью преобразования Хафа.
6. На каждой прямой формируется набор точек с постоянным шагом. Из каждой точки строится нормаль некой предельной длины. Если эта нормаль пересекается с какой-либо прямой из полученных на основе изображения с камеры, то длина такой нормали учитывается в общем весе рассматриваемой прямой по следующей формуле:

$$g(d) = \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где  $d$  – длина нормали,  $\sigma$  – параметр определяющий вес нормали в зависимости от длины нормали (позволяет либо усиливать влияние длинных нормалей, либо уменьшать).

7. Для каждой прямой вычисляется общий вес путем суммирования всех весов нормалей по следующей формуле:

$$l = \frac{\sum_{i=0}^S g(d_i)}{S}, \quad (2)$$

где  $S$  – общее количество прямых в смоделированном изображении.

8. Вычисляется итоговая вероятность гипотезы на основе объединения весов каждой линии по следующей формуле:

$$W = \alpha \cdot \exp\left(k \frac{\sum_{n=0}^m l_n}{m}\right), \quad (3)$$

где  $m$  – количество прямых,  $\alpha, k$  – параметры учета веса прямых в итоговом результате.

Результат работы описанного алгоритма представлен на рис 1. На данном рисунке показан результат рендеринга изображения на модели простого помещения в позиции, соответствующей определенной гипотезе. Зеленым цветом показаны прямые, которые были найдены на смоделированном изображении, красными кружками обозначены точки,

на которых формируются нормали. Синими линиями показаны прямые, полученные из изображения с камеры. В ситуациях, когда алгоритм смог построить нормаль, не превышающую максимальную длину, изображены красные отрезки.

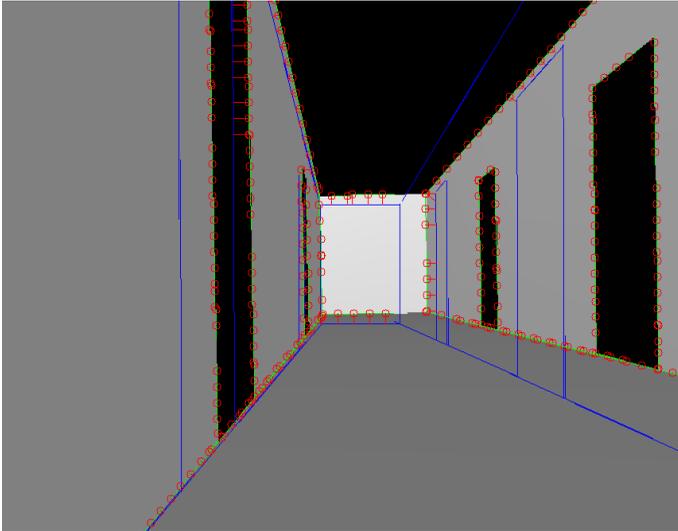


Рис. 1 Иллюстрация оценки вероятности частицы

Результат расчета веса для представленной на рис. 1 частицы, согласно формулам (1), (2), (3), равен 3.86. При этом были использованы следующие параметры: максимальная длина нормали  $d_{max} = 20$ ,  $\alpha = 3$ ,  $k = 1$ .

### 3 Испытание алгоритма в системе моделирования Gazebo

Для проверки работоспособности алгоритма была разработана подсистема на базе комплекса ROS. Ключевыми частями (узлами) разработанной подсистемы являются узел рендеринга изображений и узел локализации, основанный на фильтре частиц.

В качестве модели БПЛА использовалась модель квадрокоптера AR.Drone, которая по программному интерфейсу является идентичной реальному квадрокоптеру.

В качестве модели помещения, использовалась простая модель комнаты с 4 дверьми, представленная рис. 2.

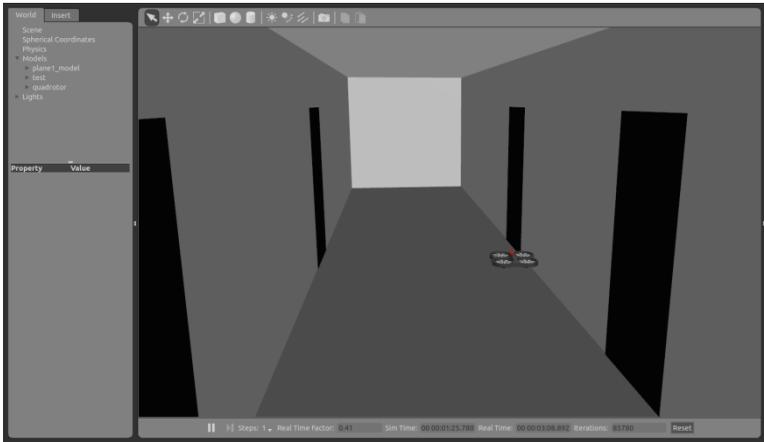


Рис. 2 Модель помещения и квадрокоптера в среде Gazebo

В ходе эксперимента управление моделью квадрокоптера выполнялось с клавиатуры. При этом количество частиц, которые использовал фильтр равнялось 50. На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования в виде графиков значений пространственных координат  $x_t, y_t$  соответственно.

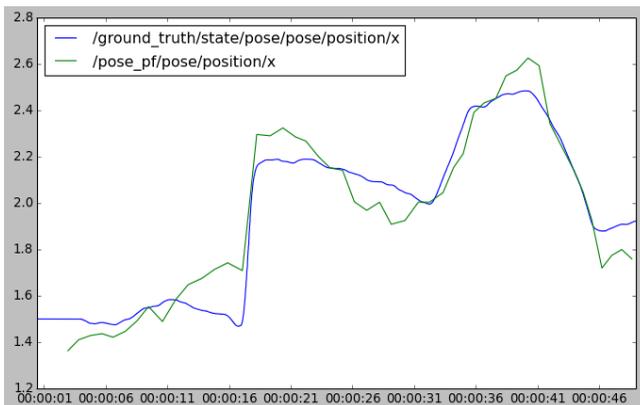


Рис. 3 Результаты эксперимента для координаты  $x$

На обоих графиках представлено по два значения. Одно значение (обозначено синим цветом) показывает реальное положение робота, взятое из среды моделирования Gazebo. Второе значение (обозначено зеленым цветом) показывает результат локализации.

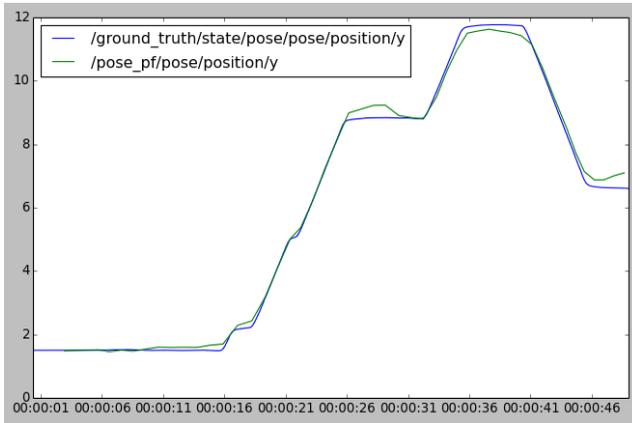


Рис. 4 Результаты эксперимента для координаты  $y$

Как видно из результатов, ошибка локализации, как правило, не превышает 0.3 м и в основном связана с невысокой частотой работы и небольшим количеством частиц.

#### 4 Направления дальнейших исследований

В дальнейшей работе планируется исследовать зависимость между количеством частиц и точностью локализации. Несомненно, чем больше количество частиц мы используем в фильтре, тем точнее результат. Но в данном методе измерительная модель фильтра является достаточно вычислительно сложной. В связи с этим необходимо определить оптимальное количество частиц, которое обеспечит приемлемую ошибку локализации и достаточную частоту вычислений.

#### Список литературы

- [Яковлев и др., 2014] Яковлев К.С., Хитьков В.В., Логинов М.И., Петров А.В. Система навигации группы БЛА на основе маркеров // Ж-л Робототехника и техническая кибернетика. 2014 №5(4), стр. 44-48
- [Nuske, 2008] Nuske, S., Roberts, J., & Wyeth, G. (2008, May). Outdoor visual localization in industrial building environments. // IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA., 2008, 544-550
- [Nuske, 2009] Nuske, S., Roberts, J., & Wyeth, G. Robust outdoor visual localization using a three-dimensional-edge map // Journal of Field Robotics. 2009 №26(9), 728-756.
- [Klein, 2006] Klein, G., & Murray, D. Full-3D edge tracking with a particle filter // In British Machine Vision Conference. 2006. Edinburgh, UK.

УДК 629.7.05, 004.942, 519.876.5

## НАВИГАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППЫ РОБОТОВ (БПЛА И БНР) ЧЕРЕЗ ЛАБИРИНТ В 3D СИМУЛЯТОРЕ GAZEBO МЕТОДОМ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ДОРОЖНОЙ КАРТЫ

И.М. Афанасьев (*i.afanasyev@innopolis.ru*)

А.Г. Сагитов (*i.sagitov@innopolis.ru*)

И.Ю. Данилов (*i.danilov@innopolis.ru*)

Е.А. Магид (*e.magid@innopolis.ru*)

Университет Иннополис, Казань

**Аннотация.** В статье рассматривается навигация смоделированной гетерогенной группы роботов: беспилотного наземного робота (БНР) и беспилотного летающего аппарата (БПЛА) через 3D модель лабиринта методом вероятностной дорожной карты (PRM). Сперва в симуляторе Gazebo была получена 3D модель лабиринта. Далее рассмотрены согласованные действия группы роботов в в симулированной 3D среде Gazebo с целью картографирования местности и навигации БНР через лабиринт. По сценарию миссии, БПЛА взлетает с БНР, производит съемку местности и передает изображения наземному роботу. БНР обрабатывает изображения, рассчитывая оптимальную траекторию движения по методу вероятностной дорожной карты, и осуществляет автономную навигацию через лабиринт по вычисленному маршруту. Для симуляции поведения группы были выбраны существующие модели роботов в Gazebo: БНР Clearpath Husky и БПЛА квадрокоптер Nector Quadrotor.

**Ключевые слова:** беспилотный летающий аппарат (БПЛА), беспилотный наземный робот (БНР), 3D симулятор Gazebo, гетерогенная группа роботов, навигация, вероятностная дорожная карта (PRM), одновременная локализация и картографирование (SLAM), робототехническая операционная система (ROS)

### Введение

Моделирование роботов в робототехнических 3D симуляторах, подобно Gazebo [Koenig et al., 2004], находит все большее применение для разработки алгоритмов поведения роботов в реалистичной трехмерной окружающей среде [Meuer et al., 2012; Neumann et al., 2014]. Подобное

моделирование помогает разработчикам создавать алгоритмы управления беспилотными транспортными средствами, одновременно визуализируя их поведение и отображая информацию с сенсоров в трехмерном пространстве.

В данной статье рассматривается моделирование гетерогенной группы роботов: БПЛА и БНР в 3D симуляторе Gazebo<sup>1</sup> с применением робототехнической операционной системы - Robot Operating System (ROS)<sup>2</sup>. Сценарий взаимодействия роботов следующий:

1. БПЛА взлетает с БНР и движется над лабиринтом, фотографируя его с помощью камеры и передавая БНР отснятые данные.
2. БНР использует изображение карты местности для вычисления оптимального маршрута прохождения через лабиринт методом вероятностной дорожной карты (PRM)
3. БНР, используя полученную на этапе 2 дорожную карту, движется через лабиринт при помощи стандартного метода SLAM<sup>3</sup>, применяя лазерный дальномер.

Целью статьи является демонстрация возможностей моделирования взаимодействия группы роботов в реалистичной 3D среде с целью навигации через лабиринт методами вероятностной дорожной карты (PRM – Probabilistic Roadmap) и одновременной локализации и картографирования (SLAM).

## 1 Трехмерная модель лабиринта

В качестве окружающей среды для симулирования поведения гетерогенной группы роботов выбрана готовая 3D модель лабиринта из библиотеки трехмерных моделей TurboSquid<sup>4</sup>. Модель представляет собой простую симуляцию (Рис. 1), выполненную и визуализированную в среде компьютерной графики для 3D моделирования, анимации и рендеринга Cheetah 3D<sup>5</sup>. Модель поддерживает различные форматы: 3ds (3D Studio), fbx (Autodesk), dxf (AutoCAD), obj (общий формат для 3D программ) и stl

---

<sup>1</sup> 3D симулятор Gazebo: [www.gazebosim.org](http://www.gazebosim.org)

<sup>2</sup> Robot Operating System (ROS) – робототехническая среда (фреймворк) для разработки и использования алгоритмов моделирования, управления и визуализации робота, [ros.org](http://ros.org)

<sup>3</sup> SLAM - Simultaneous Localization and Mapping, Метод одновременной навигации и картографирования, применяемый роботами для составления карты неизвестного пространства (или для динамического обновления существующей карты) с одновременным контролем текущей позиции робота и пройденного пути.

<sup>4</sup> TurboSquid Maze by kabeltelevizio - лабиринт: [www.turbosquid.com/3d-models/free-small-maze-3d-model/686346](http://www.turbosquid.com/3d-models/free-small-maze-3d-model/686346)

<sup>5</sup> Cheetah3D: [www.cheetah3d.com](http://www.cheetah3d.com)

(для стереолитографического программного обеспечения CAD), что позволяет импортировать её в такие программы для работы с 3D моделями, как MeshLab<sup>1</sup> и симулятор Gazebo, где её можно раскрасить или нанести на неё нужную текстуру. В нашем случае, мы использовали MeshLab для конвертации формата лабиринта в dae (COLLADA DAE).

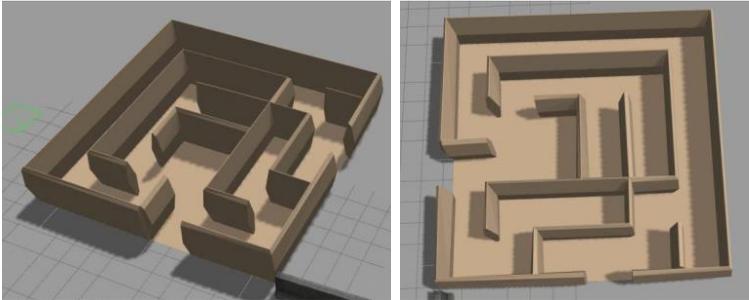


Рис. 1. 3D модель лабиринта, используемого в качестве окружающей среды для навигации робота.

## 2 Симуляция беспилотных летающих и наземных роботов в Gazebo

### 2.1 Обоснование выбора роботов в Gazebo

Для симуляции поведения гетерогенной группы были выбраны существующие модели роботов в Gazebo: квадрокоптер Hector Quadrotor<sup>2</sup> и наземный робот Clearpath Husky. Выбор данных моделей роботов был обусловлен их широкой популярностью в исследовательских работах и наличием готовых моделей в симуляторе Gazebo и в робототехнической операционной системе ROS.

### 2.2 Описание модели БПЛА

Модель квадрокоптера Hector Quadrotor [Meyer et al., 2012], поддерживаемая ROS и доступная в библиотеке моделей Gazebo, может включать в себя лазерный дальномер, но мы остановились на использовании цифровой камеры, с которой будем получать изображения лабиринта с высоты полета коптера. Прототипом такого квадросоторного БПЛА являются коптеры, зачастую собираемые вручную из небольших,

<sup>1</sup> MeshLab – свободное программное обеспечение: [meshlab.sourceforge.net](http://meshlab.sourceforge.net)

<sup>2</sup> Hector Quadrotor package - пакет для контроля и моделирования систем квадросоторного БПЛА, совместимый с ROS: [wiki.ros.org/hector\\_quadrotor](http://wiki.ros.org/hector_quadrotor)

легких элементов конструкции и электромеханических компонентов с низким энергопотреблением, как например, коптер из работы [Sa et al., 2014], показанный на Рис. 2(слева). Модель из Gazebo для коптера Hector Quadrotor [Meyer et al., 2012] представлена на Рис. 2(справа).



Рис. 2. Квадроторный БПЛА: фото (слева) и модель из Gazebo (справа).

### 2.3 Описание модели БНР

Беспилотный наземный робот Clearpath Husky<sup>1</sup> от канадской компании Clearpath Robotics<sup>2</sup> представляет собой четырехколесный малоразмерный беспилотный наземный вездеход, габаритами 99 x 67 x 37 см (длина, ширина и высота соответственно), весом около 50 кг и скоростью 1 м/с, способный везти на себе нагрузку до 75 кг. Робот Clearpath Husky очень популярен для симуляции в Gazebo (где применяются различные сенсоры, в нашем случае - симулированный лазерный дальномер Hokuyo) и имеет поддержку в ROS, которая позволяет использовать разработанные для него алгоритмы планирования пути и локализации, такие как SLAM. Рис. 3 представляет фотографию робота (слева) и его модель в Gazebo (справа).



Рис. 3. Робот Clearpath Husky: фото (слева) и модель из Gazebo (справа).

## 3 Определение оптимального маршрута и навигация через лабиринт наземного робота в симуляторе Gazebo

<sup>1</sup> Беспилотный вездеход Clearpath Husky: [www.clearpathrobotics.com/husky/](http://www.clearpathrobotics.com/husky/)

<sup>2</sup> Clearpath Robotics: [www.clearpathrobotics.com/](http://www.clearpathrobotics.com/)

### 3.1. Взлет БПЛА и фотографирование местности в Gazebo

В силу ограниченного ресурса аккумуляторов квадрокоптера, его среднее время полета составляет 10-15 минут. Поэтому изначально коптер находится на посадочной площадке БНР (Рис. 4, слева). При приближении БНР к лабиринту, квадрокоптер взлетает и движется над лабиринтом, фотографируя его с помощью камеры и передавая отснятые данные БНР. Симуляция этого процесса в Gazebo показана на Рис. 4 (справа).

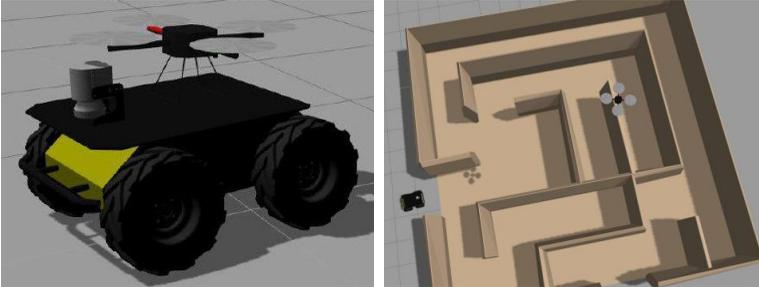


Рис. 4. Размещение БПЛА на БНР (слева); вид роботов сверху (справа).

### 3.2. Вычисление оптимального маршрута прохождения через лабиринт БНР методом вероятностной дорожной карты (PRM)

Если лабиринт небольшой, для вычисления оптимального маршрута БНР, в принципе, достаточно одной фотографии с коптера, как в нашем случае. Сперва используется предварительная обработка изображения лабиринта (Рис. 5): изображение в оттенках серого обрабатывается градиентным фильтром с применением оператора Собеля [Kanopoulos et al., 1988], потом учитываются реальные габариты робота, сужающие пространство лабиринта для поиска оптимального маршрута по методу вероятностной дорожной карты (PRM). Описание метода PRM и его псевдокод предложены на Рис. 6. Более подробно применение метода PRM изложено в [Simonin et al., 2008]. Метод PRM был реализован в пакете MATLAB 2015a Robotics System Toolbox<sup>1</sup>. Результат нахождения оптимальной траектории маршрута робота показан на рис. 5 (справа), красным цветом; зеленым цветом отмечены вершины графа (координаты изменения направления движения робота); синим цветом – множество случайно сгенерированных точек; серым цветом – неоптимальные графы.

<sup>1</sup> MATLAB 2015a: Robotics System Toolbox: [www.mathworks.com/products/robotics/](http://www.mathworks.com/products/robotics/)

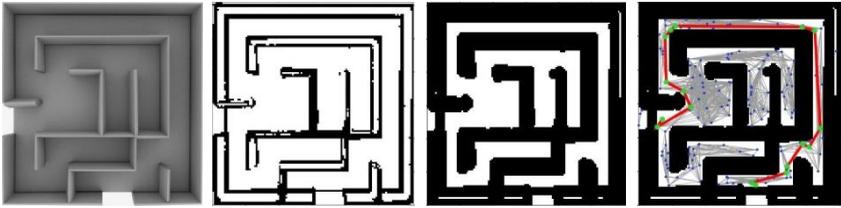


Рис. 5. Вычисление оптимального маршрута наземного робота через лабиринт: слева-направо: вид лабиринта сверху; стены лабиринта, выделенные градиентным методом; «скелет» лабиринта с учетом габаритов робота; оптимальный маршрут робота (в красном цвете), вычисленный по методу PRM (Probabilistic Roadmap).

Описание алгоритма вероятностной дорожной карты (Probabilistic Roadmap).

На вход алгоритма поступает изображение лабиринта с ходами и препятствиями, а на выходе мы получаем граф с набором узлов  $R$  и набором ребер  $A$ , символизирующий оптимальный маршрут от заданной начальной точки к конечной. Случайно генерируем набор точек на изображении и соединяем их прямыми. Функция **Точка\_Не\_На\_Препятствии** ( $q$ ) проверяет: лежит ли случайно взятая точка  $q$  на свободном пространстве, не занятом препятствием. Функция **Можно\_Связать** ( $q, q'$ ) проверяет, можно ли соединить две точки прямой линией, не пересекая препятствие.

$R \leftarrow \emptyset, A \leftarrow \emptyset$ , координаты начальной и конечной точек

**ПОВТОРЯТЬ**

$q \leftarrow$  случайная точка на плоскости изображения

**ЕСЛИ** ТОЧКА\_НЕ\_НА\_ПРЕПЯТСТВИИ ( $q$ ), **ТО**

Добавить  $q$  к множеству  $R$

$M_q \leftarrow$  набор соседних точек из множества  $R$ , лежащих поблизости с  $q$

**ДЛЯ ВСЕХ**  $q'$  **ИЗ НАБОРА**  $M_q$

**ЕСЛИ** МОЖНО\_СВЯЗАТЬ ( $q, q'$ ), **ТО**

Добавить ребро  $(q, q')$  к множеству ребер  $A$

**ПОКА** не связаны графом начальная и конечная точки

**КОНЕЦ ЦИКЛА**

Рис. 6. Описание метода PRM (слева) и его псевдокод (справа).

### 3.3. Навигация БНР через лабиринт методом SLAM

Навигация наземного робота Clearpath Husky через лабиринт по вычисленной оптимальной траектории осуществляется по алгоритму OpenSLAM GMapping<sup>1</sup>, реализованному в ROS на основе метода фильтра частиц [Grisetti et al., 2007]. На выходе алгоритма PRM мы имеем набор координат (вершин графа), привязанных к отмасштабированной карте лабиринта, по которым робот будет осуществлять движение по прямой. Вход в лабиринт находится слева в центре, выход – в нижней части (Рис.5, слева). Результат движения робота по лабиринту от точки входа до точки выхода одновременно с движением БНР отображался в программе RVIZ<sup>2</sup>. Рис. 7 и 8 показывают процесс движения робота; при этом, цвет отражает вероятность наличия препятствия: желтый цвет – 100%-ная вероятность наличия стены, голубой, красный и синий – соответственно убывающие вероятности наличия препятствия. Темно-серым цветом отмечено уже

<sup>1</sup> OpenSLAM GMapping algorithm, [www.openslam.org/gmapping.html](http://www.openslam.org/gmapping.html)

<sup>2</sup> RViz – инструмент для 3D визуализация в ROS: [wiki.ros.org/rviz](http://wiki.ros.org/rviz)

исследованное пространство перед лазерным дальномером робота; светло-серым - пространство, еще не исследованное БНР.

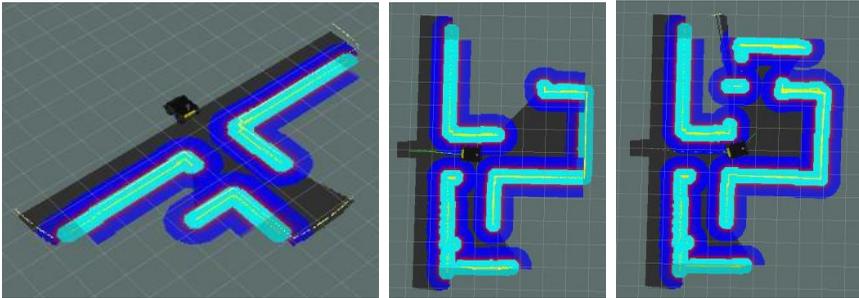


Рис. 7. Навигация БНР через лабиринт методами PRM и SLAM: БНР в точке входа в лабиринт (слева) и его продвижение (справа).

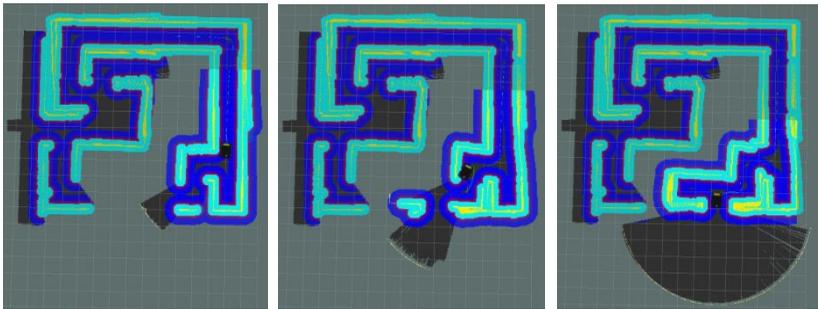


Рис. 8. Навигация БНР на выходе из лабиринта методами PRM и SLAM. БНР в точке выхода из лабиринта (справа)

## 4 Заключение

Представленные в статье исследования продемонстрировали широкие возможности моделирования взаимодействия беспилотной транспортной группы из БНР и БПЛА в реалистичной 3D среде при навигации наземного робота через лабиринт методами вероятностной дорожной карты (PRM) и одновременной локализации и картографирования (SLAM). С этой целью рассмотрен следующий сценарий поведения группы: БПЛА взлетает с БНР, производит съемку местности и передает изображения наземному роботу. БНР обрабатывает изображения, рассчитывает оптимальную траекторию движения по методу PRM, и осуществляет автономную навигацию через лабиринт по вычисленному маршруту методом SLAM с использованием лазерного дальномера. Для симуляции поведения группы были выбраны существующие модели

роботов в Gazebo: вездеход Clearpath Husky и симуляция квадрокоптера Hector Quadrotor. Результаты работы показали достоинства реалистичного моделирования в среде Gazebo для тестирования разрабатываемых алгоритмов: возможность проведения интенсивного тестирования программной части без задействования аппаратной части систем, значительное уменьшение времени и стоимости разработки, возможность оценки работы новых методов и алгоритмов на различных робототехнических системах без предварительного приобретения дорогостоящего оборудования, что в свою очередь позволяет по результатам оценки осуществить оптимальный подбор аппаратной части.

**Благодарности.** И.Ю. Данилов, как «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК»), благодарит «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» за финансирование гранта № 0010930 «Разработка системы автоматической посадки беспилотных коптеров на платформу беспроводной подзарядки».

## Список литературы

- [Grisetti et al., 2007] Grisetti G., Stachniss C., Burgard W. Improved Techniques for Grid Mapping With Rao-Blackwellized Particle Filters // IEEE Trans. Robot. 23(1). P. 34–46, 2007.
- [Kanopoulos et al., 1988] Kanopoulos N., Vasanthavada N., Baker R.L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator // IEEE J. Solid-State Circuits. 23(2). P. 358–367, 1988.
- [Koenig et al., 2004] Koenig N., Howard A. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator // Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Vol. 3. P. 2149–2154, 2004.
- [Meyer et al., 2012] Meyer J. et al. Comprehensive Simulation of Quadrotor UAVs Using ROS and Gazebo // Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. Lecture Notes in Computer Science. / Springer, P. 400–411, 2012.
- [Neumann et al., 2014] Tobias Neumann et al. Towards a Mobile Mapping Robot for Underground Mines // Proc. 2014 PRASA, RobMech and ALaT Int. Joint Symposium, Cape Town, South Africa, 2014.
- [Sa et al., 2014] Sa I., Corke P. Vertical Infrastructure Inspection Using a Quadcopter and Shared Autonomy Control // Field and Service Robotics / Edited by K. Yoshida, S. Tadokoro. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, P. 219–232, 2014.
- [Simonin et al., 2008] Simonin E., Diard J. BBPRM: A behavior-based probabilistic roadmap method // Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, P. 1719–1724, 2008.

УДК 004.932.7, 004.4, 004.021

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОДНОВРЕМЕННОГО КАРТИРОВАНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО ВИДЕОПОТОКУ, ПОЛУЧЕННОМУ С ЕДИНСТВЕННОЙ КАМЕРЫ

А.В. Боковой (*bokovoy@isa.ru*)

Федеральный исследовательский центр «Информатика и  
управление» Российской академии наук, Москва

**Аннотация.** В работе исследуются современные методы одновременного картирования и локализации по видеопотоку (Visual-based Simultaneous Localization and Mapping - vSLAM), полученному с единственной камеры, применимые в задачах навигации беспилотных летательных аппаратов в неизвестной среде. Представлены данные экспериментального сравнения актуальных программных реализаций методов vSLAM с использованием среды Robot Operating System (ROS).<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, методы одновременного картирования и локализации, единственная камера, видеопоток.

### Введение

В настоящее время наблюдается существенное повышение интереса к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА). Современные БПЛА используются для решения широкого круга задач: мониторинг объектов инфраструктуры, дистанционное зондирование земли, доставка грузов и т.д. Как правило, для навигации, а также повышения автономности, БПЛА оснащаются различными видами датчиков, которые позволяют отслеживать состояние объекта управления в каждый момент времени. К таким датчикам относятся датчики инерциальной навигационной системы (ИНС) – акселерометры, гироскопы, с помощью которых определяется отклонение корпуса БПЛА в земных координатах, приемники системы глобального позиционирования GPS/ГЛОНАСС, оптические датчики (видеокамеры, стереопары), ИК датчики, лазерные дальнометры и т.д.

Существует большое количество методов, позволяющих определять текущее местоположение беспилотного летательного аппарата, но, как

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-07483).

правило, они используют информацию от спутниковых навигационных систем, которая доступна только на открытой местности. Для навигации в закрытых помещениях необходимо полагаться на ИНС, оптические и прочие датчики.

Одним из активно развивающихся направлений исследований в настоящее время является навигация БПЛА по данным, полученным с оптических датчиков. Одной из задач этого направления является разработка методов и алгоритмов одновременного картирования и локализации по видеопотоку [Lemaire, 2007], полученному с единственной камеры. Использование единственной камеры приводит к ряду проблем, которые необходимо рассматривать как отдельные подзадачи, а именно:

- выделение областей или особенностей (особых точек, углов и т.д.) изображений, которые будут использоваться как элемент построенной модели местности (карты);
- построение модели неизвестной местности по двум или более кадрам видеопотока;
- локализация системы в построенной модели;
- построение и корректировка пройденной траектории.

В связи с большими объемами данных, поступающих с камеры БПЛА, дополнительным условием (при решении указанных выше задач) является возможность обработки поступающих изображений, локализации и построения карты в режиме реального времени на современных бортовых вычислителях. Невыполнение этого условия может стать причиной потери актуальности данных и, следовательно, невозможности навигации БПЛА в неизвестной среде.

В настоящей работы представлен аналитический обзор методов одновременного картирования и локализации по видеопотоку, полученному с единственной камеры, а именно методов MonoSLAM [Davidson, 2007], PTAM [Klein, 2007] и LSD-SLAM [Engel, 2014]. Также приведены результаты экспериментального исследования, в котором сравнивались различные параметры (скорость обработки изображений, детализация полученной карты, скорость составления карты и т.д.) актуальных программных реализаций указанных алгоритмов.

## **1. Выделение областей и особенностей изображений**

Для построения модели неизвестной местности и локализации БПЛА в ней необходимо выделить устойчивые признаки (особенности) изображений, которые будут являться элементами будущей карты. Определяющим условием при выделении особенностей является возможность сравнивать полученные признаки для разных изображений и

находить однозначное соответствие между ними. В основном под особенностями понимаются точки локального градиента яркости и дескрипторы, которые представляют из себя вектор, элементами которого являются градиенты в некоторой области вокруг полученной особенности.

Распространенные методы выделения особенностей изображения, такие как SIFT [Lowe, 2004] и SURF [Bay, 2006], используемые в MonoSLAM, позволяют получать инвариантные повороту, масштабированию и (в некоторой степени) перспективным искажениям дескрипторы размером 64 или 128 элементов, которые соответствуют каждой выделенной особенности. Модель местности в таком случае модель местности (карта) представляет из себя облако точек, элементами которой и являются эти особенности.

Метод FAST-10 [Rosten, 2006], используемый в алгоритме PTAM, выделяет углы в качестве особенностей изображения и, соответственно, вычисляет дескриптор каждого угла.

Главными преимуществами вышеописанных методов выделения особенностей является скорость обработки поступающих изображений и составления дескрипторов полученных особенностей, позволяющая выполнять эти алгоритмы в реальном времени даже на слабых бортовых вычислителях и использовать их как составной элемент алгоритмов vSLAM.

Недостатком использования алгоритмов SIFT, SURF и FAST-10, является скорость сопоставления дескрипторов разных изображений видеопотока. По причине того, что на изображении могут быть найдены тысячи особенностей, каждой из которых соответствует дескриптор размером от 64-х элементов, то их полный перебор и сравнение всех дескрипторов может занимать длительное время. Для сокращения времени сопоставления наборов дескрипторов между собой используется представление дескрипторов в виде K-мерного дерева и, соответственно, применяются алгоритмы поиска на K-мерных деревьях.

В качестве входных данных для составления модели местности могут также использоваться наиболее контрастные области (а не отдельные точки) изображения. Такой подход впервые был представлен авторами метода LSD-SLAM (см. рис. 2). Он позволяет строить детализированные модели, а алгоритм, его реализующий, может выполняться в реальном времени без использования ускорения на GPU.



Рис 1. Карта, построенная с использованием контрастных областей изображений (LSD-SLAM Foodcourt Dataset)

## 2. Построение модели местности и локализация

Для построения модели местности (карты) с помощью единственной камеры используются алгоритмы, позволяющие находить положение определенной точки в пространстве, используя 2 кадра, на которых эта точка обозревается. В качестве точек карты используются вышеописанные особенности изображений.

Для начала, необходимо откалибровать камеру. Это позволит найти внутренние параметры камеры, такие как фокусные расстояния, углы наклона пикселей и принципиальную точку. Эти параметры используются как для устранения искажений на изображениях, так и для построения карты глубины изображения (т.е. матрицы, каждый элемент которой соответствует расстоянию от камеры до пикселя).

Зная параметры калибровки камеры, можно найти фундаментальную матрицу и существенную матрицу. Фундаментальная матрица, в данном случае, необходима для вычисления уравнений эпиполярных линий, которые необходимы для составления карты глубины. Для вычисления фундаментальной матрицы обычно используется Eight-point algorithm [Hartley, 1997] и его вариации, которые позволяют найти фундаментальную матрицу по 8-ми или более сопоставленных точек на двух изображениях. Существенная матрица позволяет восстановить положение и поворот камеры относительно ее предыдущего состояния по двум изображениям. Для нахождения такой матрицы достаточно знать внутренние параметры камеры, полученные на этапе калибровки камеры.

Процесс вычисления расстояний до особых точек и нахождения положения камеры происходит в каждый для каждого вновь поступившего изображения с камеры. Текущий снимок сравнивается с предыдущим.

Данные о положении камеры поступают на вход расширенному фильтру Калмана (Extended Kalman Filter) [Julier, 2004], где вычисляется текущее положение относительно построенной карты, а также производится корректировка предыдущих положений согласно полученным данным.

Вышеописанные вычисления производятся для каждого вновь поступившего изображения с камеры, что накладывает требования к скорости выполнения каждого алгоритма. В совокупности, все алгоритмы должны выполняться до поступления нового изображения с камеры. Иначе возможна потеря актуальности данных и, следовательно, затрудненность или невозможность навигации БПЛА или иного робототехнического устройства.

На данный момент, существуют программные реализации описанных алгоритмов, выполняющихся в режиме реального времени для видеоряда с частотой до 30-ти кадров в секунду.

### **3. Экспериментальные исследования методов vSLAM**

Для проведения экспериментов была сформирована коллекция, состоящая из 63 видеозаписей помещений коридорного типа. Были смоделированы движения БПЛА, оснащенного камерой, а именно смещения вперед/назад, изменение высоты, повороты вокруг своей оси и т.д. Все изображения видеопотока имеют разрешение 640x480 pix. Частота кадров – 30 кадр./с. Камера была откалибрована алгоритмами открытой библиотеки компьютерного зрения OpenCV [Datta, 2009] с помощью паттерна типа “шахматная доска” размером 9x6.

Для эксперимента были выбраны разные помещения коридорного типа. 18 видеозаписи были произведены с учетом замыкания траектории (т.е., возвращения камеры в исходную позицию). Помещение на этих видеозаписях имеет квадратную форму с квадратной перегородкой внутри. Остальные видеозаписи были сняты в коридоре, имеющим один поворот. Длины траекторий – 12,8 м для первых 18 видео и от 5 м до 9,8 м для всех остальных.

Для сравнения реальной траектории камеры и траектории, построенной алгоритмами, была создана 3D модель описанных помещений и реальной траектории. Сравнение производилось путем наложения построенной модели и карты с траекторией, полученной с помощью каждого из методов.

Платформа, на который производился эксперимент, представляет собой персональный компьютер со следующими основными характеристиками: CPU – Intel Core i7 3770K 3,4 GHz, 16 GB RAM, ОС – Linux

Для тестирования были выбраны свободные реализации алгоритмов MonoSLAM, PTAM и LSD-SLAM на языке C++ для фреймворка Robot

Operating System (ROS). Исходные коды методов скомпилированы с использованием набора компиляторов GCC 4.9.2 без использования возможности ускорения параллельных вычислений (таких, как OpenCL или CUDA).

Параметрами для сравнения являлись время обработки одного изображения (пре-процессинг + выделение особенностей), время обновления карты и текущего положения системы, количество устойчивых особенностей (данный параметр также характеризует детализацию карты) и среднее отклонение от действительной траектории. Примеры карт, построенных с помощью каждого из методов представлены на рисунке 2.

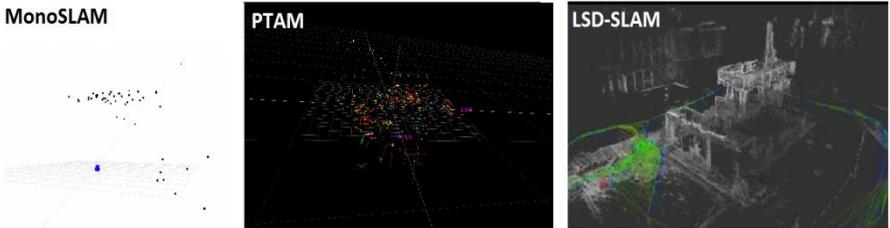


Рис 2. Примеры карт, построенных с помощью методов MonoSLAM, PTAM и LSD-SLAM

Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Метод	Время обработки кадра (мс)	Время обновления карты (мс)	Кол-во устойчивых признаков	Среднее отклонение от траектории (в %)
MonoSLAM	8.35	4.7	473	2.1
PTAM	14.7	32.95	5837	1.9
LSD SLAM	12.4	20	~19 000*	0.9

\*Количество устойчивых признаков различается в следствии вероятностного характера алгоритма выделения областей интереса.

По этим данным можно заключить, что метод MonoSLAM является самым быстрым из 3-х представленных методов, однако обладает наименьшей детализацией карты и наибольшим отклонением построенной траектории от действительной. Метод PTAM – самым медленным, но обладающим большей детализацией карты, нежели

MonoSLAM и более высокой точностью построенной траектории. Метод LSD-SLAM обладает средними среди этих методов характеристиками по скорости выполнения алгоритма, но зато позволяет строить высокодетализированные карты и его среднее отклонение от заданной траектории – наименьшее.

В каждом из методов, на разных этапах (выделение особенностей, построение карты и т.д.) используются разные алгоритмы, реализации которых влияют на скорость выполнения и обработки данных. Некоторые данные об использовании конкретных алгоритмов в каждом из методов приведены в таблице 2.

Этап	MonoSLAM	PTAM	LSD-SLAM
Выделение особенностей	SIFT	FAST-10	Выделение контрастных областей
Построение фундаментальной матрицы	8-point algorithm	5-point algorithm	5-point algorithm
Построение карты и траектории	Extended Kalman Filter	JCBB*	Extended Kalman Filter
Алгоритм корректировки замыкания траектории	-	-	+

\*JCBB – Joint Compatibility Branch and Bound [Neira, 2001]

В ходе эксперимента было показано, что все 3 метода подходят для использования в задачах одновременного картирования и локализации БПЛА в помещениях. Использование каждого из методов обуславливается контекстом решаемой задачи. При малых вычислительных мощностях робототехнического устройства целесообразно использование метода MonoSLAM. Возможно улучшить точность алгоритма при использовании данных с инерциальных датчиков. Если данные с видеокамеры отсылаются на наземную станцию, то точной метода LSD-SLAM даст достаточно точные результаты для возможности навигации БПЛА. Использование метода PTAM является уместным при использовании полученной карты другими, более ресурсоемкими алгоритмами (т.к. количество выделенных точек в разы меньше, нежели в методе LSD-SLAM).

## Заключение

В работе рассмотрены методы одновременного картирования и локализации по видеопотоку MonoSLAM, PTAM и LSD-SLAM. В результате эксперимента установлена возможность применения их в задачах навигации и повышения автономности беспилотных летательных аппаратов в условиях нехватки датчиков (наличия только информации с единственной камеры).

В дальнейшем планируется доработка метода LSD-SLAM, как наиболее современного и перспективного, с учетом полученных данных исследования, программная оптимизация отдельных компонентов алгоритма и интеграция метода в систему управления беспилотными летательными аппаратами малого размера.

## Список литературы

- [**Bay, 2006**] Bay H., Tuytelaars, T., Van Gool, L., SURF: Speeded Up Robust Features. // Proceedings of the ninth European Conference on Computer Vision, 2006.
- [**Datta, 2009**] A. Datta, J.S. Kim, T. Kanade. Accurate camera calibration using iterative refinement of control points. // Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2009 IEEE 12th International Conference on 2009, p. 1201-1208
- [**Davison, 2007**] Davison A, Reid I, Molton N. and Stasse O. MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence archive, Volume 29 Issue 6, J, pp 1052-1067, 2007
- [**Engel, 2014**] Engel J., Schops T. and Cremers D. LSD-LSAM: Large-Scale Monocular SLAM // In Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV), 2007
- [**Hartley, 1997**] Hartley I, In Defence of the 8-point Algorithm. // Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 19, Issue 6, pp. 580-593, 1997
- [**Julier, 2004**] Julier, S.J.; Uhlmann, J.K.. Unscented filtering and nonlinear estimation. // Proceedings of the IEEE, pp. 401–422, 2004
- [**Klein, 2007**] Klein G. and Murray D. Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces // In Proc. International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR'07, 2007
- [**Lemaire, 2007**] Lemaire T., Berger C., Jung I. and Lacroix S. Vision-Based SLAM: Stereo and Monocular Approaches // International Journal of Computer Vision, Volume 74, Issue 3, pp 343-364, 2007
- [**Lowe, 2004**] Lowe G., Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. // International Journal of Computer Vision, pp. 91-110, 2004
- [**Rosten, 2006**] Neira J, Tardos J. Data Association in Stochastic Mapping using the Joint Compatibility Test. // Robot and Automation, IEEE Transactions pp. 890-897, 2001
- [**Rosten, 2006**] Rosten E. and Drummond T., Machine learning for high-speed corner detection. // In Proc. 9th European Conference on Computer Vision (ECCV'06), 2006.

УДК 004.896

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ГРУППОВОЙ РЕКОГНОСЦИРОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОБОТОВ

В.В. Воробьев (gatus86@mail.ru)

МИЭМ НИУ ВШЭ, НИЦ "Курчатовский институт", Москва

**Аннотация.** На данный момент существенное внимание уделяется задаче картографирования группой роботов. Однако предложенные алгоритмы часто решают такую задачу “в лоб”, используя хорошо известные методы SLAM. При этом локальное взаимодействие роботов представлено только в виде обмена фрагментами карты друг с другом. Предложенные в работе механизмы локального взаимодействия, основанные на языковом взаимодействии, позволяют, как сократить время картографирования, так и повысить его точность. При этом повышение точности здесь является наиболее приоритетной задачей, так как парадигма групповой робототехники подразумевает использование роботов со слаборазвитой сенсорикой, что существенно влияет на качество построенных фрагментов карты.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** SLAM, навигация, картографирование, групповая робототехника, локальное взаимодействие.

В данной работе речь пойдет о классической задаче групповой робототехники, а именно задаче рекогносцировки местности. Вообще говоря, основная идея групповой робототехники заключается в том, что некоторые задачи, решаемые одним или несколькими роботами, которые имеют достаточно развитую сенсорикой, систему взаимодействия с внешним миром, мощный вычислительный блок, можно решать и с помощью большого количества относительно “простых” роботов [Карпов, 2011]. Под “простыми” роботами здесь понимаются роботы, которые не имеют развитой сенсорики, например, оперируют только инфракрасными дальномерами для поиска препятствий, имеют слабый вычислительный блок, локальные каналы связи между роботами имеют низкую

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №15-07-07483 и №15-01-07900

пропускную способность и т.д. То есть на каждого члена группы наложены существенные конструктивные ограничения, которые затрудняют получение качественных фрагментов общей карты.

Вполне естественно то, что данная задача совершенно не нова и существует целый ряд методов, позволяющих производить картографирование местности роботом или группой роботов, например SLAM. SLAM (от англ. Simultaneous Location and Mapping) – это метод, используемый роботами и автономными транспортными средствами для построения карты в неизвестном пространстве и обновления карты в заранее известном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути.

Стоит отметить тот факт, что такого рода задачи довольно успешно решаются группами роботов, где, в той или иной мере, используются методы SLAM [Dorigo, 2013], [Konolige, 2006], [Roumeliotis, 2000], [Nettleton, 2004] и др.

Однако в данных работах вызывает сомнение целесообразность обмена именно фрагментами карты между роботами в группе, так как это может потребовать существенные временные и вычислительные ресурсы. Кроме того, мало внимания уделяется именно локальному взаимодействию между членами группы, использование которого может не только сократить время картографирования и избежать необходимости передавать фрагменты карты, но и увеличить точность построения карты, что очень существенно в условиях слаборазвитой сенсорики каждого члена группы.

Таким образом, в работе будут рассматриваться механизмы локального взаимодействия в группе роботов, направленные на уменьшение времени картографирования и повышение точности данной операции, основанные на языковом общении роботов. Кроме того, в работе предложена концепция представления картографированных областей в виде градиентной сетки. Данная концепция позволяет экономить вычислительные ресурсы, необходимые для обмена фрагментами карты между членами группы.

## **1 Постановка задачи и описание коллектива**

Рассмотрим следующую задачу: есть полигон, на котором расположены объекты, представляющие собой препятствия для передвижения роботов. Пример данного полигона и объекты в виде модели представлены на рис. 1а. Коллектив виртуальных роботов должен построить его карту. Внешний вид реальных роботов, которые будут использоваться для отработки промоделированных алгоритмов, представлен на рис. 1б.

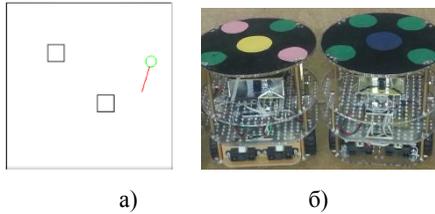


Рис. 1. а - виртуальная модель полигона, б - коллектив роботов.

Сенсорика виртуальных роботов представляет собой:

- Виртуальный аналоговый дальномер с определяемым расстоянием в диапазоне от 4 до 30 см. расположенных спереди по ходу движения робота. Необходим для оценки расстояния до объектов.
- Виртуальный энкодер. Необходим для определения собственного перемещения по полигону.

## 2 Метод решения

Рассмотрим следующие методы решения данной задачи:

- “Случайное” блуждание каждого члена группы. Фактически, каждый робот здесь независим друг от друга и исследует заданную область самостоятельно.
- Групповое картографирование. Группа роботов исследует область совместно, при встрече обмениваясь картами.
- Градиентный метод (ГМ). Представление картографированных областей в виде градиентной сетки. Позволяет не обмениваться именно картографированными областями, а передавать лишь общую информацию (например, “Справа от тебя область исследована”) о картографированных областях.
- Градиентный метод с использованием языкового общения (ГМО). Позволяет не только передавать лишь общую информацию о картографированных областях, но и формировать “области повышенного интереса” (Т.е. области локального минимума. Например, “В области, где я нахожусь, сложный характер препятствия, нужна помощь”) Два последних метода рассматриваются в работе.

Очевидно, что каждый из методов решает задачу SLAM на нижнем уровне управления. Однако второй, третий и четвертый методы реализуют тем или иным образом и локальное взаимодействие: второй в виде обмена карт, а третий и четвертый в виде обмена сообщениями о картографированных областях. Так как нижний уровень управления фактически у всех методов общий имеет смысл сначала рассмотреть

именно его.

На нижнем уровне решается классическая задача SLAM, где каждым роботом строится определенный фрагмент карты местности и выполняется процедура навигации. Рассмотрим основные методы решения задачи SLAM, т.к. представляется целесообразным на этапе картографирования каждым роботом использовать уже реализованные алгоритмы.

На данный момент большинство алгоритмов, реализующих SLAM, основывается на трех различных подходах: расширенный фильтр Калмана (EKF), фильтр частиц (Particle filter) и SLAM на графах.

Рассмотрим каждый из них более подробно.

**Расширенный фильтр Калмана (EKF).** Основан на фильтре Калмана – рекурсивном фильтре, который оценивает вектор состояния динамической системы и использует при этом ряд неполных, неточных измерений. Основным недостатком данного подхода является квадратичная зависимость сложности алгоритма от количества наблюдаемых ориентиров [Castellanos, 2004].

**Фильтр частиц.** Одним из ярких представителей методов, основанных на фильтрах частиц, является метод Монте-Карло (MCL). Данный метод используется для локализации робота в пространстве и оперирует коллекциями образов, также известных как “частицы” [Montemerlo, 2002].

**SLAM на графах.** В данном методе используется представление карты в виде разреженного графа. Узлами такого графа являются местоположения робота на карте и полученные с помощью дальномеров точки карты, а ребрами – связи между относительными положениями робота на карте и элементами карты, которые наблюдаются из данных положений. Такой подход имеет меньшую точность построения карты, по сравнению с предыдущими подходами [Thrun, 2006].

В связи с входными ограничениями на задачу, наиболее подходящими методами SLAM для групповой робототехники на данный момент представляются методы, основанные на графах. Это обуславливается их линейной зависимостью требуемой памяти от наблюдаемых элементов и относительно небольших вычислительных затратах при небольшом пройденном пути, который уменьшается с ростом числа членов коллектива.

Таким образом, становится понятно, как реализуются метод “случайного” блуждания, который использует лишь нижний уровень управления, и метод группового картографирования, позволяющий, кроме того, обмениваться фрагментами карты, существенно сокращая время исследования области.

Однако ГМ и ГМО работают несколько иначе.

На нижнем уровне управления фрагмент карты и

некартографированные области представляются роботом в виде градиентной сетки. Это происходит следующим образом: на картографированную область и некоторую область вокруг нее, где робот еще не был, с некоторым шагом  $\delta$  накладывается сетка. Клетки данной сетки, которые попадают на картографированные области, интерпретируются как локальные максимумы, а клетки, где робот еще не был – как локальные минимумы (рис. 2).

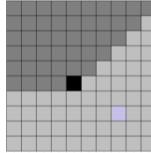


Рис. 2. Области локального минимума (светлые) и локального максимума (темные). Робот отмечен черным цветом.

Робот старается избегать области с локальными максимумами и стремится в области локального минимума. Это позволяет не только более рационально исследовать заданную область, но и, используя локальное взаимодействие на верхнем уровне управления, передавать роботам-соседям данные о тех областях, которые им следует либо избегать, так как там уже кто-то был, либо, наоборот, проявлять большее внимание.

Локальное взаимодействие на верхнем уровне управления представлено двумя механизмами, которые заключаются в следующем:

- При “встрече” роботы обмениваются сообщениями, характер которых позволяет роботу отметить области, где побывал его “коллега”. Данные области перестают быть приоритетными для исследования. При этом стоит отметить, что обмен картами не происходит, отсылается лишь сообщение, которое можно интерпретировать, например, как “Не ехать в область, находящуюся справа от тебя”. (ГМ).
- В процессе построения карты роботы могут послать сигнал о помощи, в случае если оценивают ситуацию, в которой они оказались как затруднительную. Например, сложный характер видимых роботом препятствий способствует оценке такой ситуации как затруднительной. (ГМО).

### 3 Эксперименты

**Эксперимент 1. Градиентный метод.** Рассмотрим пример, демонстрирующий обмен сообщениями между роботами с целью уточнения неприоритетных областей для исследования. На рисунке 3а

показан момент, когда два соседа (черный и белый квадраты) обменялись такого рода сообщениями. При этом ситуация рассматривается с точки зрения робота, отмеченного черным квадратом: робот, отмеченный буквой А, присылает сообщение “Не ехать в область сзади и справа от меня”, которые отмечены белым цветом (рис. 3а). Получив такое сообщение, адресат интерпретирует его у себя как области, в которых он уже побывал (рис. 3б).

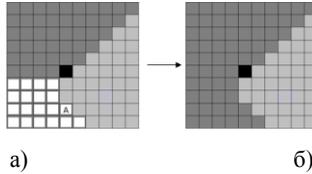


Рис. 3. а – белым помечена запретная область, б – интерпретация роботом-адресатом запретной области.

Данный механизм позволяет использовать процедуру обмена картами только один раз – когда все роботы оказались в ситуации, когда ехать больше не куда, т.е. все области оказались исследованы, и они собрались в точке сбора для обмена информацией. Кроме того, такой механизм позволяет роботам существенно реже попадать в уже исследованные области, т.е. не картографировать то, что уже нанесено на карту соседями, что снижает время исследования области.

**Эксперимент 2. Градиентный метод и языковое общение.** Рассмотрим пример использования сигнала о помощи роботом, вызванный ошибкой одометрии. Робот пытался нанести на карту некое препятствие (рис. 4а), но из-за проскальзывания на карте оно отразилось так, как представлено на рисунке 4б:

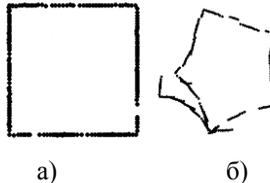


Рис. 4. а – реальное препятствие, б – картографирование препятствия с ошибкой одометрии.

В таком случае робот будет просить о помощи своих соседей (рис. 5).

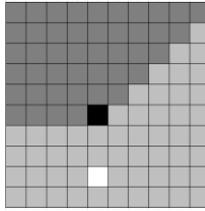


Рис. 5. Робот, отмеченный черным квадратом, принял сигнал о помощи. Область, откуда он его принял (белый квадрат) интерпретируется как область наивысшего интереса (локальный минимум).

Соседи, которые приняли данный сигнал, интерпретируют область, откуда они его приняли, как область локального минимума. Попав туда, образуется система между роботами с контролем движения: образуется связка “master-slave”, в которой master, получая сообщения о состоянии slave (например, “Двигаюсь вперед”), с помощью своей сенсорики пытается оценить насколько данное состояние корректно. В случае если полученное состояние и наблюдаемая картина не совпадают, master корректирует состояние slave специальным сигналом. В некоторых случаях данный механизм позволяет повысить точность картографирования, возникающих из-за ошибок одометрии.

**Эксперимент 3 Сравнение методов.** Была рассмотрена зависимость времени построения карты от количества роботов для различных методов (рис. 6). Время построения карты – это время, когда роботы построят полную карту заданного полигона. Для методов ГМ и ГМО этот момент наступает тогда, когда у всех роботов не остается зон с локальными минимумами. Количество экспериментов в серии равно 20.

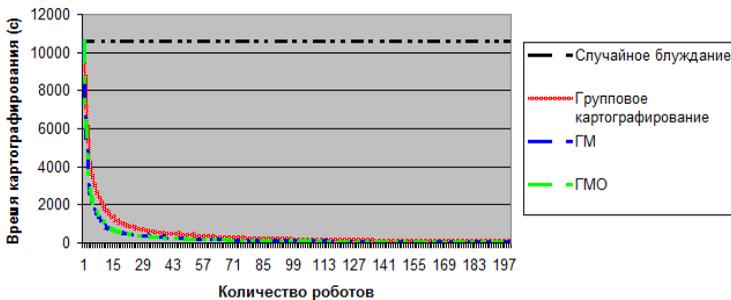


Рис. 6. Сравнение методов

В данном примере площадь полигона  $S=100\text{м}^2$ , скорость роботов  $V=2\text{м/с}$ , дальность датчиков  $R=30\text{см}$ . Максимальное количество

роботов – 200. Метод ГМ работает быстрее метода ГМО максимум на 14%.

## 4 Заключение

Таким образом, реализована процедура картографирования и навигации в группе роботов со слаборазвитой сенсорикой. Выбор такого рода роботов обосновывается тем, что они исследуют достаточно большие территории (линейные размеры робота отличаются минимум на два порядка от линейных размеров полигона). Кроме того, используется достаточно большие ( $\approx 100-150$  шт) группировки роботов. В части картографирования и навигации используются хорошо известные алгоритмы и методы, однако использование локального взаимодействия вместе с элементами языкового общения (просьба о помощи, обмен картами с целью уточнения маршрутов картографирования) позволяет уменьшить время выполнения данной процедуры и может увеличить его точность.

## Список литературы

- [Dorigo, 2013] Dorigo M., Floreano D., Gambardella L.M., Mondada F. et al. Swarmanoid: A Novel Concept for the Study of Heterogeneous Robotic Swarms // IEEE Robotics & Automation Magazine. - 2013. -Vol. 20, Issue 4. - P 60-71.
- [Konolige, 2006] Konolige K., Fox D., Ortiz C. et al. Centibots: Centibots: Very Large Scale Distributed Robotic Teams // Springer Tracts in Advanced Robotics. - 2006. - Vol. 21. - P 131-140.
- [Castellanos, 2004] Castellanos J.A., Neira J., Tardos J.D. Limits to the consistency of the EKF-based SLAM. In Intelligent Autonomous Vehicles (IAV-2004) (Lisboa, PT, July 2004).
- [Карпов, 2011] Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желанное и действительное // Современная мехатроника. Сб. научн. трудов Всероссийской научной школы (г.Орехово-Зуево, 22-23 сентября 2011), Орехово-Зуево: , 2011, с.35-51, -132с. (doc)
- [Montemerlo, 2002] Montemerlo M., Thrun S., Koller D., Wegbreit B. Fastslam: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In AAAI-2002 (Vancouver, BC, July 2002).
- [Thrun, 2006] S. Thrun and M. Montemerlo. The graph SLAM algorithm with applications to large-scale mapping of urban structures. Int. Journal of Robotics Research , 25(5-6):403, 2006.
- [Roumeliotis, 2000] S. I. Roumeliotis and G. A. Bekey. Synergetic localization for groups of mobile robots. In *IEEE Conference on Decision and Control*, volume 4, pages 3477–3482, 2000.
- [Nettleton, 2003] E. Nettleton, S. Thrun, H. Durrant-Whyte, and S. Sukkarieh. Decentralised SLAM with low-bandwidth communication for teams of vehicles. In *Field and Service Robotics (FSR)*, Japan, July 2003.

УДК 004.02

## ПОИСК НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Н.В. Ким (*nkim2011@list.ru*)Н.Е. Бодунков (*boduncov63@hotmail.com*)И.Г. Крылов (*Krylov\_I@mail.ru*)

Московский авиационный институт, Москва

**Аннотация.** Работа посвящена решению целевых задач наблюдения автономных беспилотных летательных аппаратов на основе использования бортовых систем технического зрения. Рассматриваются подходы, обеспечивающие повышение эффективности поиска наземных объектов.

### Введение

В современных разведывательных беспилотных летательных аппаратах (БЛА) одной из основных составляющих целевой нагрузки является система наблюдения или комплекс аппаратуры наблюдения: радиолокационной, телевизионной, тепловизионной или мультиспектральной.

Аппаратура наблюдения и бортовые вычислители, реализующие алгоритмы обработки и анализа видеоинформации, представляют систему технического зрения (СТЗ) БЛА. Основой поиска объектов интереса являются технологии обнаружения (распознавания) и оценки координат, базирующиеся на автоматической обработке и анализе видеоинформации.

Особенности поиска наземных объектов связаны с необходимостью выделения и идентификации признаков объектов интереса в различных условиях наблюдения и на фоне различных подстилающих поверхностей.

Расширение условий применения и усложнение решаемых БЛА целевых задач требует перспективного совершенствования функциональных возможностей СТЗ БЛА.

Рассмотрим, некоторые проблемы, снижающие эффективность применения СТЗ БЛА, и способы их решения.

#### *1. Неопределенные и изменяемые условия наблюдения.*

Суть данной проблемы состоит в том, что принятие решения об обнаружении или распознавании наблюдаемого объекта производится на основании сопоставления некоторых описаний (или совокупности признаков: распределения яркости, текстуры, формы и пр.) объектов на

принятом (текущем) изображении (ТИ) с запомненными ранее эталонными описаниями объекта, в частности, эталонным изображением (ЭИ) [Визильтер и др., 2010]. В случае изменения условий наблюдения ТИ и ЭИ одного и того же объекта будут отличаться и, соответственно, возрастут ошибки принятого решения.

2. *Недостаточная информативность атрибутов объектов поиска.*

В ряде ситуаций исходная информация о возможном положении объектов поиска, а также информативность их признаков на наблюдаемых ТИ, например, при частичном загораживании объекта, являются недостаточными для организации эффективного обнаружения.

3. *Недостаточная производительность поиска.*

Данная проблема возникает при необходимости обследования заданных областей поиска за ограниченное время, в сложных условиях наблюдения, например, при ведении поиска в городских условиях, при необходимости наблюдения (слежения) объектов, перемещающихся по различным траекториям, с различными скоростями и т.д.

## **1 Формирование адаптивных описаний объектов**

Решение 1-й проблемы может быть реализовано за счет использования эталонных описаний, адаптивных к изменению текущих условий наблюдения, в частности:

- С помощью использования подготовленного заранее набора ЭИ или словаря признаков для возможных условий наблюдения. Однако данный подход сложно реализуем, т.к. требует подготовки и препарирования слишком большого (даже для современных вычислительных средств) множества разноразмерных изображений объекта интереса на различных подстилающих поверхностях и при изменяемых условиях освещения;

- Другим вариантом является подход, основанный на моделировании возможных эталонных описаний искомых объектов. Сложность реализации подхода состоит в том, что необходимо формировать модели визуализации объектов наблюдаемой сцены (на основе известных физических законов) с учетом множества трудно формализуемых факторов, связанных с отражающими свойствами различных текстур, условиями освещенности и пр.

Здесь предлагается использовать подход к формированию адаптивных эталонных описаний на основе интерполяции имеющихся описаний, полученных для других условий. Для интерполяции описаний используется нейронечеткий подход. Преимуществами подхода являются: возможность получения описаний в широком диапазоне изменения текущих условий, существенное сокращение количества требуемых

эталонных описаний по сравнению с первым подходом и упрощение методики формирования текущих описаний по сравнению со вторым подходом.

Рассмотрим задачу распознавания объекта интереса [Форсайт и др., 2004].

Алфавит классов распознаваемых объектов (ориентиров) обозначается как:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_M),$$

а вектор признаков –

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n, \dots, y_N),$$

где  $M$  – количество распознаваемых классов,  $N$  – количество анализируемых признаков, при 2-х распознаваемых классах решается задача обнаружения.

Принятие решения о принадлежности объекта (или фрагмента изображения) к тому или иному классу производится на основании определения области, к которой относятся значения признаков объектов, полученных ТИ. Будем считать, что статистическая связь между полученными значениями признаков и классами определяется условными плотностями распределения  $p(Y|x_m)$ , которые и являются искомыми эталонными описаниями.

Пусть классами объектов являются: объект ( $x_2$ ) и фон ( $x_1$ ). Тогда условием обнаружения объекта  $x_2$  будет:

$$\lambda_0 = \frac{R_{21} P(x_1)}{R_{12} P(x_2)} \leq \frac{p(Y|x_2)}{p(Y|x_1)},$$

где  $\lambda_0$  – порог;  $R_{21}$ ,  $R_{12}$  – потери от неправильного обнаружения;  $P(x_1)$ ,  $P(x_2)$  – априорные вероятности наблюдения объектов  $x_1$ ,  $x_2$ .

При решении задач обнаружения или распознавания объектов возникает необходимость построения адаптивных плотностей распределения, учитывающих текущие условия наблюдения -  $p(Y|x_m, Q_k)$ , где  $Q_k = (q_1, q_2, \dots, q_r, \dots, q_R)$  – вектор -х условий наблюдения. Под условиями наблюдения могут пониматься различные факторы, например, характеристики освещенности наблюдаемой сцены, время года, регион и т.п.

Предлагаемый подход к построению адаптивных плотностей распределения  $p(Y|x_m, Q_k)$ , основанный на использовании нейронечетких систем, позволяет сократить набор требуемых типовых плотностей за счет использования экспертных правил и свойств нечетких систем, а также дает возможность их коррекции за счет использования механизмов обучения по ограниченной выборке.

## 2 Повышение эффективности обнаружения при недостаточной информативности атрибутов объектов

Компенсация недостаточной информативности атрибутов может быть реализована с помощью использования дополнительных поисковых средств, в частности, при организации согласованного наблюдения группой БЛА [Ким и др., 2014].

Пусть на полученном изображении выделен фрагмент неизвестного частично загороженного объекта. Этот фрагмент может принадлежать как объекту поиска, так и другому (ложному) объекту. Если возможные риски (потери) ошибочных решений выше допустимых, то необходимо использовать дополнительные источники информации.

В частности, увеличение объема принимаемой полезной информации может быть реализовано с помощью дополнительного использования других БЛА, оснащенных ТВ-камерами, или использованием систем наблюдения, работающих в других спектральных диапазонах.

На рис. 1 представлен пример поиска грузового автомобиля с помощью 3-х БЛА, наблюдающих один и тот же участок местности.

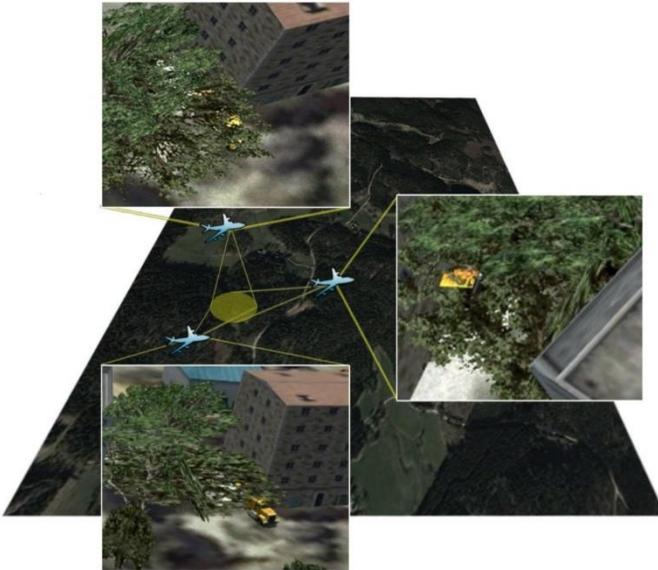


Рис. 1. Групповой поиск автомобиля

На верхнем левом и правом фрагментах показаны модельные изображения, получаемые БЛА<sub>1</sub> и БЛА<sub>2</sub> (индексы обозначают номер

соответствующего БЛА). Данные изображения недостаточно информативны, т.к. объект поиска (грузовой автомобиль) частично загорожен.

Существенно большую информативность содержит нижнее изображение, полученное на борту БЛА<sub>3</sub>.

Вероятность правильного обнаружения при групповом согласованном (разноракурсном) наблюдении вычисляется по формуле:

$$P_{по} = 1 - \prod_R (1 - P_{пор}),$$

где  $P_{по}$  – вероятность правильного обнаружения,  $R$  – количество БЛА с системами наблюдения,  $r = 1, \dots, R$  – индекс БЛА.

Так, при  $P_{по1} = 0,2$ ;  $P_{по2} = 0,4$ ;  $P_{по3} = 0,7$ , получим

$$P_{по} = 0,856.$$

Таким образом, разноракурсное наблюдение позволяет увеличить эффективность поиска, в частности, повысить вероятность правильного обнаружения объектов, а также ограничивает возможности целей при их попытках уклониться от наблюдений.

Последний фактор играет существенную роль при организации наблюдений с БЛА в городских условиях.

### 3 Повышение производительности поиска объектов

Повышение производительности поиска может быть получено за счет увеличения поисковых ресурсов - использование группы БЛА. При групповом применении БЛА увеличивается теоретическая производительность поиска:

$$W_{ТГ} = [2MД_{об} - Z(M - 1)]V_{БЛА},$$

где  $M$  – количество БЛА в группе;  $Z$  – перекрытие относительных полос поиска между смежными БЛА;  $V_{БЛА}$  – скорость БЛА.

Однако существенно увеличить производительность поиска возможно за счет согласованного взаимодействия БЛА в группе. В подобном варианте использования БЛА возможно одновременное обследование нескольких областей интереса, выбранных, например, по наибольшей вероятности присутствия объекта поиска. Согласованное применение БЛА обеспечивает эффективное слежение за несколькими объектами. При этом маршруты БЛА строятся согласованно, с учетом предотвращения столкновений. В случае появления новых областей интереса или выхода некоторых БЛА из строя, происходит перераспределения задач с учетом новых данных.

Еще одним подходом к повышению эффективности наблюдений является подход, основанный на анализе наблюдаемых сцен (ситуаций) [Kim и др., 2015], [Ким, 2012].

Результатом анализа сцен является формирование описаний сцены,

включающих описание объектов, их признаков и межобъектных отношений, в частности, каузальных, пространственно-временных и пр. В свою очередь описания отношений могут дать дополнительную полезную информацию о состоянии или положении объектов поиска.

Одними из важных признаков подвижных (мобильных) объектов являются их поведенческие признаки. В рамках данной работы под поведенческими признаками понимаются особенности движения объекта поиска (выбор траектории, скорость и пр.). Если при движении объекта можно выделить признаки, отличающие искомый объект от других участников движения, то эти признаки имеют полезную информативность. Оценка этих признаков позволяет уточнить вероятное положение объекта и, соответственно, повысить производительность поиска.

На рис. 2 а) представлен участок карты местности (КМ), на котором должен производиться поиск мобильного объекта – легкового автомобиля.

Для сокращения областей поиска целесообразно принять некоторую гипотезу о возможном положении объекта. В случае неизвестных целевых функций объекта и его поведенческих признаков, можно принять гипотезу о его вероятном положении на одной из дорог на КМ, например, с учетом загруженности дорог, их расположения и пр. (рис. 2 б, высота поверхностей соответствует вероятностям появления объекта). В рассматриваемом примере на основных магистралях был принят равновероятностный закон распределения.

Эти вероятности существенно изменяются, если известны целевые функции объекта, например, координаты конечного пункта маршрута (КПМ) (рис. 2 в) или стремление объекта к максимально скрытному движению (рис. 2 г).

В зависимости от получаемых законов распределения производительность поиска может быть существенно повышена. Так, для встречи с объектом с вероятностью близкой к 0,5 при принятии гипотезы о равновероятностном распределении объекта, необходимо обследовать участок почти в 1,5 раза длиннее, чем при гипотезе с известным КПМ.

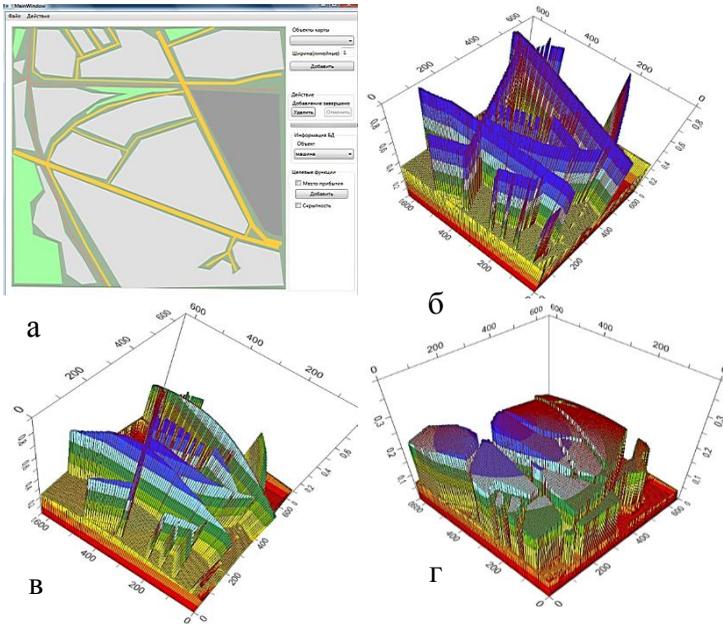


Рис. 2. Оценка вероятности наблюдения при различных целевых задачах объекта

## Заключение

Проблемами, снижающими эффективность использования СТЗ БЛА, можно считать: неопределенные и изменяемые условия наблюдения, недостаточную информативность атрибутов объектов поиска и недостаточную производительность поиска.

Для решения проблемы изменяемых условий наблюдения предложен подход к формированию адаптивных описаний объектов на основе нейронечетких систем. Данный подход при заданных заранее эталонных описаниях для некоторых опорных условий позволяет производить интерполяцию описаний для промежуточных условий. Таким образом, обеспечивается адаптация описаний при малом количестве исходных эталонов. Также к достоинствам подхода можно отнести простоту расчета и возможность дообучения, т.е. коррекции описаний в реальном времени.

Для решения проблемы недостаточной информативности атрибутов объектов рассматривается два подхода. Первый использует привлечение дополнительных поисковых средств, например, группы БЛА, что позволит

получить большее количество полезной информации за счет разноракурсного наблюдения. Второй подход основан на анализе наблюдаемой сцены. При этом дополнительная полезная информация получается при описании объектов сцены и межобъектных отношений.

Проблема недостаточной производительности поиска может быть решена на базе анализа ситуаций и использования группы БЛА.

## Список литературы

- [Визильтер и др., 2010] Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Осоков М.В., Моржин А.В. «Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения», 2010. 689-М.: Физматкнига.
- [Форсайт и др., 2004] Форсайт Дэвид А., Понс Жан. Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 928 с.: ил. Парал. тит. англ.
- [Ким и др., 2014] Ким Н.В., Крылов И.Г. Согласованное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов. Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014. Труды конференции. Т.3.- Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. 283-289с.
- [Kim и др., 2015] Nikolay Vladimirovich Kim, Nikolay Evgenievich Bodunkov & Roman Igorevich Cherkezov. Ensuring the Accuracy of Traffic Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles Vision Systems. Published by Canadian Center of Science and Education. Modern Applied Science; Vol. 9, No. 5; 2015.
- [Ким, 2012] Ким Н.В. Использование методов анализа ситуации при решении целевых задач беспилотных летательных аппаратов.// Техническое зрение в системах управления 2012. Сб. тр. научно-техн. конф. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 10 – 15.

УДК 621.391:621.397

## ВЫДЕЛЕНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В.Ю. Волков (*vl\_volk@mail.ru*)

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

Е.Г. Борисов (*begspb1967@mail.ru*)

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

**Аннотация.** Задача обнаружения и локализации протяженных мелких объектов различных размеров и формы встречается в радиотехнических системах наблюдения, которые используют радары с синтезированной апертурой, лидары, инфракрасные и телевизионные камеры. Основной трудностью обработки является интенсивный и нестационарный фон. Эта задача решается здесь с использованием ориентированной фильтрации, адаптивной пороговой обработки и морфологического анализа. Предложен усовершенствованный метод адаптации порога обнаружения, основанный на анализе изолированных фрагментов, остающихся на изображении после пороговой обработки. Метод позволяет решить задачу автоматизации принятия решений в бортовой системе наблюдения при управлении беспилотными транспортными средствами.

**Ключевые слова:** фильтрация, сегментация, адаптивная пороговая обработка.

### Введение

Задача обнаружения и локализации мелкомасштабных протяженных объектов на зашумленных изображениях возникает в радиотехнических системах наблюдения, использующих радары с САР, инфракрасные и лазерные системы, а также телевизионные камеры [Волков, 2013], [Волков, 2014], [Гонсалес и др., 2006], [Gao, 2010]. Эта задача является актуальной, поскольку указанные объекты обычно имеют искусственное происхождение и представляют первостепенный интерес. Часто эти объекты имеют малый размер на изображении, занимая несколько

пикселей, и практически не влияя на свойства всего изображения. Такая поисковая ситуация имеет место в бортовых системах наблюдения беспилотных транспортных средств.

При обнаружении, выделении и локализации таких объектов возникают существенные трудности построения эффективных алгоритмов и структур обработки, поскольку в принимаемых изображениях имеется интенсивный и нестационарный фон, также содержащий элементы, структурно подобные сигналам, отношение сигнал/фон обычно невелико, а само зарегистрированное цифровое изображение имеет невысокое качество, малое число уровней квантования, пятенный характер и нечеткие границы природных и искусственных структур (берегов рек, дорог, мостов, зданий). Статистика фона весьма отличается от гауссовской, распределения явно асимметричны, а хвосты распределений подобны логнормальной плотности или смешанной нормальной (contaminated-normal), и при малых объемах выборок идентифицируются с трудом.

Эти факторы определяют потребность создания автоматизированных алгоритмов обнаружения и выделения объектов интереса в бортовых системах наблюдения беспилотных транспортных средств.

Основными принципами, позволяющими решать указанную сложную задачу, является пространственно-ориентированная фильтрация, адаптивная пороговая обработка и селекция полезных объектов по связности соседних пикселей с учетом протяженности полезных структур [Волков, 2013], [Волков, 2014], [Гонсалес и др., 2006].

## **1 Постановка задачи и метод выделения объектов на изображениях**

Имеется изображение в цифровой форме, содержащее полезные объекты, которые имеют сравнительно небольшую протяженность по отношению к размерам всего изображения и произвольную ориентацию. Форма объектов интереса может быть линейной или пятенной, а их протяженность задается путем задания максимального размера или длины объекта в пикселях, причем задаются минимальная и максимальная границы для протяженности объектов. Особенностью задачи является то, что появление мелкомасштабных объектов интереса практически не влияет на интегральные характеристики изображения.

Общая структура цифровой обработки изображений включает предварительную фильтрацию, бинарное квантование (пороговую обработку), и последующую морфологическую обработку. Входное изображение после регистрации представляется в цифровой форме (двумерным массивом на прямоугольной сетке точек). Задача

автоматической установки порога в автономных информационно-управляющих системах беспилотных транспортных средств очень важна для сегментации [Волков и др., 2009], [Волков, 2014], [Гонсалес и др., 2006], [Sergin et al., 2004], [Volkov, 2009a], [Volkov, 2009b]. Хорошо известные методы установки глобальных и локальных порогов обычно используют гистограммы или локальные свойства точки на изображении [Гонсалес и др., 2006], [Sergin et al., 2004]. В данном случае пороговая обработка должна зависеть от результатов бинаризации.

Целью статьи является исследование адаптивного метода установки порога сегментации для обнаружения и выделения объектов, основанного на структурном разложении бинарного изображения на элементарные изолированные объекты, анализ влияния порогового уровня на результаты разложения, и разработка алгоритма для установки и изменения порога в соответствии с результатами разложения.

## 2 Предварительная фильтрация

Предварительная фильтрация имеет целью улучшение изображения и подчеркивание перепадов и границ. Предполагается, что полезные объекты всегда имеют более высокую интенсивность по отношению к фону. В данном случае применяются дифференцирующие фильтры, которые позволяют затем использовать глобальный порог для бинарного квантования по превышению интенсивности порога квантования [Волков, 2014], [Гонсалес и др., 2006].

При фильтрации ориентированных линейных объектов использовались пространственно-ориентированные маски фильтра следующего вида (Рис. 1 слева и в центре), которые позволили эффективно выделить конечные точки отрезков неизвестной длины. В данном случае коэффициенты  $a = 1$ ,  $b = -1$ .

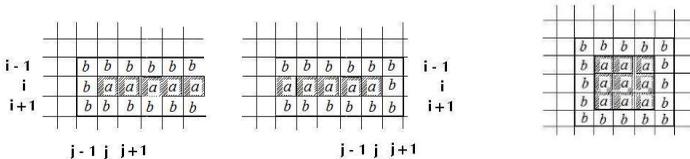


Рис. 1. Маски фильтров предварительной фильтрации

В случае объектов с неизвестной ориентацией организуется ряд каналов с соответствующими масками для выделения всех возможных мелких объектов. Для выделения небольших объектов пятенного характера применяются неориентированные маски фильтров (например, типа лапласиан), маска которого представлена на рис. 1 справа).

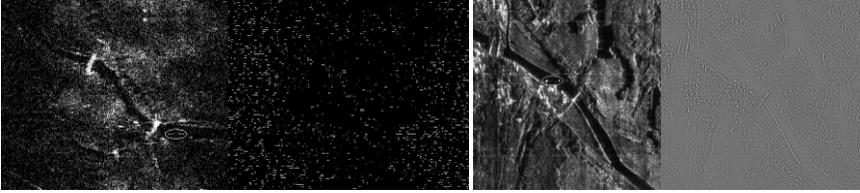


Рис. 2. Предварительная фильтрация изображений

Результаты использования усредняющих фильтров показаны на рис. 2, где приведены исходные изображения, и справа от них результаты предварительной фильтрации. Расположение полезных мелкомасштабных объектов выделено белым овалом.

### 3 Иерархия изолированных фрагментов на бинарном изображении

Основная идея установки и адаптивного регулирования порога бинарного квантования связана с учетом результатов сегментации. В этих целях предлагается иерархия видов изолированных фрагментов, возникающих на бинарном изображении, и для заданного вида изолированных фрагментов вводится эффективность их выделения, которая может быть использована для настройки порогового уровня [Волков и др., 2009], [Volkov, 2009a], [Volkov, 2009b].

Нашей целью является нахождение таких атрибутов бинарного изображения, которые характеризуют дополнительные свойства объектов, такие как их протяженность и смежность. Для характеристики протяженности используется *характеризационная маска* для изолированного фрагмента, определяемая как минимальная прямоугольная маска, которая полностью охватывает этот фрагмент.

На рис. 3 показано гауссовское шумовое поле (слева), и результат его бинаризации достаточно высоким порогом (в центре). Изолированные точки (пиксели) характеризуются маской  $1 \times 1$ , изолированные пары точек могут иметь характеризационную маску  $1 \times 2$ ,  $2 \times 1$  или  $2 \times 2$  в зависимости от их ориентации. Некоторые изолированные пары, тройки и четверки полностью накрываются маской  $2 \times 2$ . Более крупные фрагменты из трех точек имеют маски  $2 \times 3$  и  $3 \times 2$ . Линии из трех точек могут иметь маски  $1 \times 3$ ,  $3 \times 1$  или  $3 \times 3$  в зависимости от ориентации.

Имеются и другие более протяженные, но изолированные фрагменты различной формы и ориентации. Иерархия мелких изолированных фрагментов на бинарном изображении приведена на рис. 5, справа. В

левом верхнем углу находятся изолированные точки. Сложность изолированных фрагментов возрастают от левого верхнего к правому нижнему углу. Простейшая иерархия не учитывает ориентацию фрагментов и использует только квадратные характеристические маски  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  и т. д.

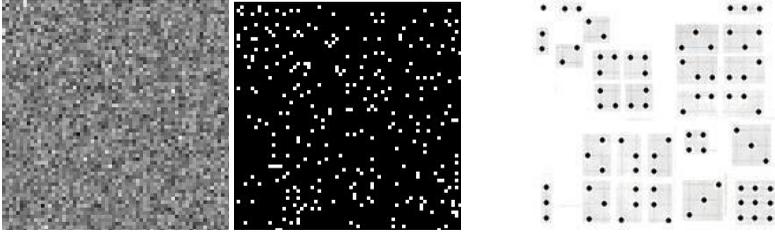


Рис. 3. Гауссовское шумовое поле, и результат его бинаризации

#### 4 Установка и регулировка порога с использованием анализа изолированных фрагментов на бинарном изображении

Легко убедиться, что число возникающих мелких объектов данного вида в бинарном изображении невелико как при очень низких, так и при высоких значениях порогов. При низких порогах мелкие фрагменты сливаются в более крупные, а при высоких остаются только очень мелкие объекты, в конечном счете только изолированные точки. Нас будут интересовать связные объекты, содержащие два и более пиксела. Для некоторого промежуточного значения порога количество таких мелкомасштабных связных объектов будет максимальным. В целом, с ростом значения порога уменьшается общее число пикселей, в которых интенсивность превышает порог, и поэтому так же уменьшается возможность образования связных структур.

Поэтому при анализе количества пикселей, содержащихся в тех или иных фрагментах необходимо нормировать это количество на общее число пикселей, в которых данный порог превышен. Такие нормированные числа можно рассматривать в качестве оценки эффективности выделения того или иного мелкомасштабного фрагмента при данном значении порога. Пусть после бинарного квантования с заданным значением порога  $T$  изображение содержало всего  $N(T)$  точек превышения порога. При последовательном выделении мелкомасштабных объектов с увеличивающейся в размерах характеристической маской, и их удалении из бинарного изображения на нем остаются все более и более крупные фрагменты. На каждом шаге удаления бинарное изображение теряет

$N_1(T)$ ,  $N_2(T)$ , ... и т. д. точек. Поскольку все эти числа зависят от порога квантования, то необходимо произвести нормировку, и рассматривать относительные значения  $N_1(T)/N(T)$ ,  $N_2(T)/N(T)$ , ... и т. д. Эти значения можно рассматривать как оценку *эффективности выделения* соответствующих структур при данном значении порога.

Для однородного гауссовского шумового поля со стандартным распределением вероятности можно рассчитать вероятности того, что интенсивность в каждом пикселе превышает пороговое значение:  $P(T) = 1 - \Phi(T)$ , где  $\Phi(T)$  – интеграл вероятности,  $P(T)$  – вероятность превышения порога  $T$  в любом пикселе изображения.

Вероятность получить изолированную точку в квадрате  $3 \times 3$  равна  $P_1(T) = \Phi^8(T)[1 - \Phi(T)]$ , а вероятность появления фрагмента с характеристической матрицей  $2 \times 2$  ограничена снизу значениями

$$P_2(T) = 2\Phi^{10}(T)[1 - \Phi(T)]^2[1 + \Phi^2(T)] + \Phi^{12}(T)[1 - \Phi(T)]^3[1 + 3\Phi].$$

Здесь учтены вероятности появления двух горизонтальных и двух диагональных пар, четырех троек и одной четверки единиц в соответствующих пикселах.

Нормированные значения эффективностей выделения  $E_k = P_k(T)/P(T)$ , для  $k = 1, 2, 3$ , т. е. для характеристических матриц  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$  и  $3 \times 3$ , приведены на рис. 4 слева. Заметим, что максимум в нормированных кривых отсутствует для изолированных точек. Начиная со связанных фрагментов, кривые эффективности имеют очевидный максимум, для двусвязных фрагментов он появляется при значении порога 1,3.

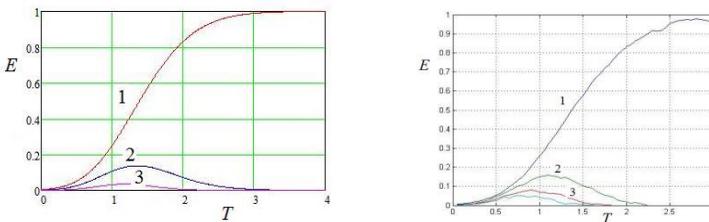


Рис. 4. Эффективности выделения мелкомасштабных фрагментов на шумовом изображении

Положение этого максимума соответствует непараметрической оценке среднеквадратического отклонения распределения вероятностей интенсивностей, при этом такая оценка привязана к размеру и форме удаляемого фрагмента. Этот порог является наилучшим для выделения таких объектов, с увеличением связности фрагментов максимум

эффективности слегка сдвигается в сторону более низких значений порога, однако эти значения сохраняют устойчивость при вариациях параметров гауссовского распределения.

Теоретические расчеты подтверждаются результатами моделирования процесса бинаризации шумового поля с нормальным распределением (рис. 4 справа).

## 5 Выделение мелкомасштабных объектов на реальных изображениях

Результаты выделения мелкомасштабных объектов на реальных радиолокационных изображениях представлены на рис. 5 для двух изображений, приведенных на рис. 2.

В верхнем ряду показаны выходы бинарных квантователей. Для бинаризации в обоих случаях использовались адаптивные пороги, которые выбирались по максимуму оценок эффективности выделения небольших связных фрагментов. Зависимости значений эффективности выделения фрагментов от порогового уровня представлены в среднем ряду, где цифры соответствуют размерам квадратной характеристизационной матрицы.

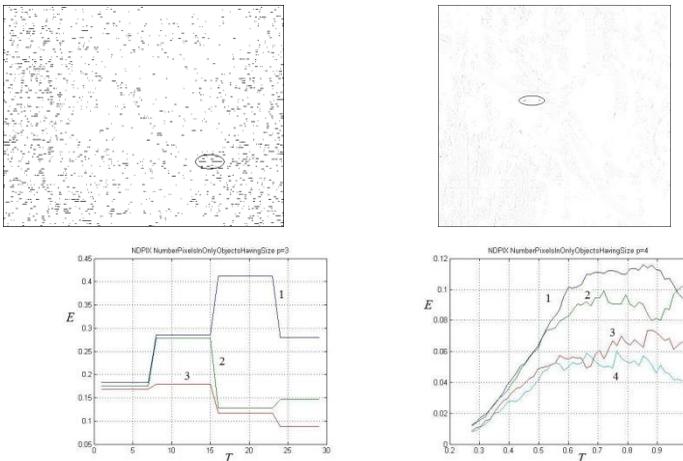


Рис. 5. Выделение мелкомасштабных объектов на изображениях, приведенных на рис. 2.

Морфологическая обработка заключалась в выделении объектов заданной протяженности. Она позволила оставить только объекты интереса.

## Заключение

Предложен новый способ выделения и локализации мелкомасштабных объектов, включающий предварительную фильтрацию, адаптивную пороговую обработку и морфологический отбор. Предложена иерархия изолированных фрагментов, которая используется для анализа связанных фрагментов. Тип мелкомасштабного протяженного объекта определяется его характеристической маской, полностью накрывающей этот объект. Наилучший пороговый уровень должен обеспечивать наибольшую эффективность выделения фрагментов данного типа. Метод позволяет автоматизировать процесс выделения объектов интереса в бортовых системах наблюдения беспилотных транспортных средств.

## Список литературы

- [Волков, 2013] Волков В.Ю. Методы дискретной фильтрации и задачи обработки изображений в радиотехнических системах наблюдения. – СПб.: СПбГУТ, 2013.
- [Волков, 2014] Волков В.Ю. Адаптивные и инвариантные алгоритмы обнаружения объектов на изображениях и их моделирование в Matlab. – Санкт-Петербург-Москва-Краснодар: Лань, 2014.
- [Волков и др., 2009] Волков В.Ю., Турнецкий Л.С. Пороговая обработка для сегментации и выделения протяженных объектов на цифровых изображениях // Информационно-управляющие системы. 2009. №5 (42). С. 10-13.
- [Гонсалес и др., 2006] Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М: Техносфера, 2006.
- [Gao, 2010] Gao G. Statistical modeling of SAR images: A Survey // Sensors. 2010. P. 775-795.
- [Sezgin et al., 2004] Sezgin M., Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation // Journal of Electronic Imaging. 2004. V. 13(1), P. 146-165.
- [Volkov, 2009a] Volkov V. Segmentation and Extraction of Extensive Objects on Digital Images // Proceedings 2009 International Conference on Image Processing, Computer Vision and Pattern Recognition. IPCV2009. V. II. Las Vegas, Nevada, USA. CSREA Press: 2009. P. 656-662.
- [Volkov, 2009b] Volkov V. Thresholding for segmentation and extraction of extensive objects on digital images // Proceedings 32 Annual German Conference on Artificial Intelligence. KI 2009. Paderborn, Germany, Springer, 623—630; Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 5803 LNAI. – <http://www.springer.com/computer/ai/book/978-3-642-04616-2>.

УДК 004.896

## ПОДХОД К НАСТРОЙКЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Е.А. Ивашина (*mkorlyakova@yandex.ru*)  
Калужский филиал МГТУ им.Н.Э.Баумана, Калуга

М.О. Корлякова (*mkorlyakova@yandex.ru*)  
Калужский филиал МГТУ им.Н.Э.Баумана, Калуга

А.Ю. Пилипенко (*mkorlyakova@yandex.ru*)  
Калужский филиал МГТУ им.Н.Э.Баумана, Калуга

А.А. Филимонков (*mkorlyakova@yandex.ru*)  
КБ-683, филиал ФГУП НПЦ АП им.Н.А.Пилюгина – «СПЗ»,  
Калуга

**Аннотация.** В статье рассмотрены возможности интеллектуализации систем управления беспилотными транспортными средствами за счет использования систем технического зрения и определены основные особенности и проблемы этого подхода. Рассмотрен нейросетевой подход к построению интеллектуальной модели формирования параметров алгоритма обработки кадров в процессе движения беспилотного наземного модуля в естественной среде. Сформулированы основные правила обучения и проведено моделирование движения с обучением и без обучения. Показано, что периодическое самообучение нейронной сети, проводимое на борту автономной беспилотной системы в процессе движения, позволяет повысить точность вычисления пройденного пути и координат в пространстве за счет постоянной адаптации к изменяющимся условиям среды.

**Ключевые слова:** нейронные сети, системы технического зрения.

### Введение

Беспилотные транспортные средства позволяют решать задачи наблюдения за территориями, транспортировки грузов и обеспечения безопасности людей. Повышение автономности беспилотных систем основано на построении качественной бортовой системы анализа внешней среды. Причем желательно иметь возможность вычислить свое положение и определить состав объектов внешней среды и их поведение. Например установить, что обнаруженное препятствие изменило свой цвет

(светофор). Следует отметить, что современные навигационные комплексы решают с высокой точностью задачи определения положения объекта и ориентации его основных осей в пространстве. Однако, с течением времени накапливающиеся ошибки снижают качество результатов и обычно могут характеризовать объекты среды только их положением относительно беспилотного транспортного средства. Кроме того, самые распространенные бортовые навигационные системы – бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) показывают растущие во времени ошибки и при нормальном движении платформы. Например, момент, когда беспилотное наземное мобильное устройство стоит или проскальзывает на месте, может быть интерпретирован измерителями как движение. Поэтому, как правило, применяют дополнительные методы коррекции результатов по пути следования. Объединение нескольких независимых источников измерительной информации позволяет существенно повышать качество ориентации и навигации в естественных условиях. Наиболее естественные средства наблюдения среды, с точки зрения человека, связаны с системами технического зрения (СТЗ), которые позволяют интерпретировать цвет, форму и расстояние-размеры объекта на основе анализа видеопотока. Кроме того, использование изображений сцены позволяет существенно повысить интеллектуальные возможности навигационной системы, т.к. позволяет идентифицировать однородные объекты сцены (например, отдельные автомобили в потоке) и предсказывать их поведение.

Проблемой СТЗ является их производительность и точность. В настоящее время использование обучаемых [Кокарева и др., 2012] и адаптируемых СТЗ(SLAM)[Montemerlo et al, 2002] позволяет снизить вычислительную сложность задачи визуального анализа сцены и повысить ее точность на этапе вычисления координат. Однако, работающая в естественных сценах СТЗ, подвергается существенным внешним воздействиям, что приводит к потере непрерывности измерений еще на этапе обработки кадра. В условиях реальных сцен на вид объектов оказывает влияние время суток и сезон, погода, искусственные источники света, состав объектов сцены и тому подобное. Поэтому СТЗ должна отслеживать эти изменения и уметь их запоминать, т.е. накапливать опыт. Таким образом, необходимо сформировать модель интеллектуальной настройки процедур обработки кадров.

## **1 Нейросетевая система технического зрения**

Рассмотрим более подробно особенности решения задачи одометрии в СТЗ. Определение перемещения автономного беспилотного объекта

обычно реализуется в моно или стерео камерной системе технического зрения и связано с обработкой последовательных кадров видеопотока. Примеры таких систем активно разрабатываются и внедряются (поиск препятствий на железнодорожных путях [Иванов, 2011], управление движением мобильного робота [Девятериков и др, 2013] и т.п.). С другой стороны, обучаемые модели принятия решений и распознавания образов позволяют решать сложные задачи обработки информации и распознавания образов за счет обобщения опыта. Примеры таких систем можно видеть в [Ozbay et, 2005, Кокарева и др., 2012]. Таким образом, для повышения интеллектуальности СТЗ и снижения ее вычислительной сложности с сохранением точности будем использовать нейросетевую реализацию СТЗ, общая схема обработки информации в которой выглядит следующим образом:

- получение пар кадров в момент времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$  на борту мобильного объекта;
- сжатие кадров к масштабу  $1/16$ ,
- поиск сопряженных пар точек в сжатых кадрах ( $N$  - число найденных пар) на основе последовательности операций:
  - линейное контрастирование,
  - выделение края (параметр  $g$  – уровень отсечения по модулю градиента изображения),
  - выделение угловых особенностей за счет нейросетевого фильтра [Корлякова и др, 2014],
  - сопоставление фрагментов за счет анализа уровня корреляции изображения ( $k$ ) для угловых особенностей по кадрам в момент времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$  [Сыряжкин и др, 2010].
- восстановление координат найденных пар точек до полного масштаба,
- повторный поиск сопряженных пар точек для окон размера  $32 \times 32$  вокруг каждой точки нижнего уровня поиска,
- определение трехмерных координат для пар точек в момент времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$  за счет нейросетевой стерео реконструкции [Кокарева и др., 2012],
- определение перемещения от момента времени  $t_i$  к  $t_{i+1}$  в виде параметров матрицы  $M$  - поворота-переноса СТЗ.

Проблема простой модели обработки в том, что даже незначительная разница в интенсивности фрагментов приводит к резкому снижению числа  $N$  – найденных сопряженных пар точек стереопары. Пример приведен на

рис.1, где рис.1.а соответствует  $N=107$  и фрагменты правых кадров а.2 и а.4 отличаются от левых (а.1 и а3), но близки между собой, а рис.1.б порождает  $N=0$  пар сопряженных точек, где б.4 резко отличен от остальных фрагментов.

Интеллектуализация СТЗ связана с адаптацией фильтров на этапе обработки кадров к текущей сцене [Соколов 2011]. Существенные различия кадров в видеопотоке возникают за счет резких изменений освещенности, появления «быстрых» объектов и т.п. Решение этой проблемы лежит либо в разработке сравнительно сложных фильтров и следующих за ними механизмов сопоставления кадров, либо в получении простого алгоритма обработки с изменяемыми параметрами.

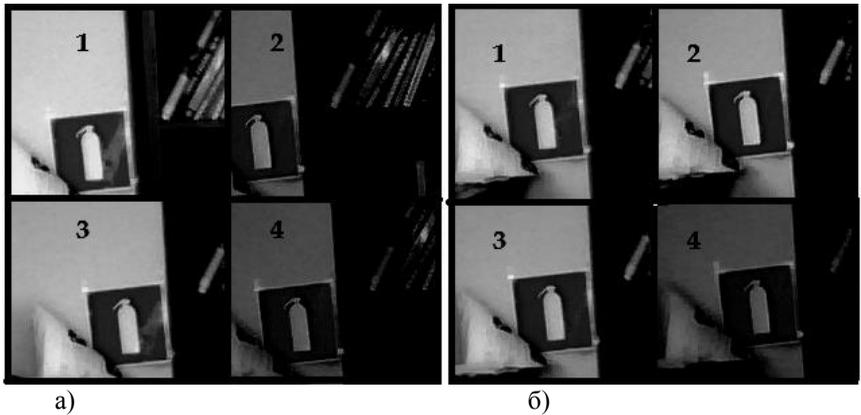


Рис. 1. Результаты поиска пар особых точек в моменты времени  $t_i$  (изображения 1 и 2) и  $t_{i+1}$  (изображения 3 и 4) для кадров а) близкой интенсивности и б) различной интенсивность правых кадров (2 и 4 изображения).

## 2 Формирование обучаемой модели настройки системы технического зрения

Процедура изменения параметров должна обеспечить необходимые значения выходных параметров для результатов обработки последовательных кадров. Для задачи навигации и ориентации беспилотной мобильной платформы основной выходной характеристикой обработки кадров стереопары является число обнаруженных сопряженных точечных особенностей изображения [Корлякова и др, 2014] и их точность. В рамках подхода к стерео реконструкции и поиску параметров перемещения СТЗ представленных в [Кокарева и др., 2012], необходимо

обеспечить не менее 100 пар сопряженных точек.

Для оценки качества обработки и поиска параметров алгоритма обработки кадров предлагается использовать обучаемую модель в составе:

- учитель  $T(Ip(n), n=1.C, P = \langle g, k, m1, m2, m3, m4 \rangle, A)$ , где  $P$  – вектор параметров алгоритма предобработки (в текущей модели  $g, k$  и  $\langle m1, m2, m3, m4 \rangle$  – значения сдвигов интенсивности кадров для выравнивания цвета фрагментов),  $A$  – алгоритм формирования обучающих пар и вектор входных признаков, который содержит интенсивность равномерной случайной выборки точек рассматриваемых кадров  $I1(\text{левый } t_i), I2(\text{правый } t_i), I3(\text{левый } t_{i+1}), I4(\text{правый } t_{i+1})$  на шаге  $n$ ,  

$$Ip(n) = \langle I1(x_i, y_i), I2(x_i, y_i), I3(x_i, y_i), I4(x_i, y_i), i = 1.256 \rangle$$
- нейронная сеть  $NN(Ip, P, W)$  на базе многослойного персептрона и алгоритма обучения градиентного типа, где  $W$  – множество параметров нейросети.

Основная задача такой модели в соответствии с особенностями конкретной стереосистемы камер проводить непрерывное обучение модели за счет поступающих кадров видеопоследовательности.

Алгоритм  $A$  – учителя включает в себя следующие шаги:

1. получение выборки  $Ip(n)$  на шаге  $n$ ,
2. вычисление начальных значений  $\langle m1, m2, m3, m4 \rangle$  как средних по фрагменту и первичное выравнивание фрагмента,
3. исполнение алгоритма предобработки с текущими параметрами,
4. проверка: если число формируемых сопряженных пар точек стереопары  $N \geq 200$ , то необходимо понижение порога  $k$  отсечения по условию корреляции фрагментов  $(k - \Delta k)$ , повышение порога отсечения фильтра края  $(g + \Delta g)$ , когда  $N \leq 100$ , то понижение порога отсечения фильтра края  $g - \Delta g$  и повышение порога  $(k + \Delta k)$ , если  $200 \geq N \geq 100$ , то сохраняем текущие параметры для обучения и переходим к следующим кадрам,
5. если сделано больше максимального повторов или параметры  $g, k$  перешли границы допустимых интервалов, то проводим несколько циклов обучения со случайными вариациями

$\langle m_1, m_2, m_3, m_4 \rangle$ ;

6. возврат к шагу 3;

Процедура работы учителя может занимать значительное время в начале обучения и носит практически переборный характер. Первые циклы работы учителя служат для получения начальной выборки примеров и могут быть выполнены до начала движения. Общее время поиска «хороших» параметров  $P$  для каждой пары кадров в начале обучения составляет 5-10 циклов полной обработки кадров, что не позволяет реализовать режим реального времени. Однако по мере настройки сети начальные значения все больше соответствуют требованиям сцены и в большинстве случаев не требуют повторов обработки кадров. Общий сценарий работы СИЗ с обучением выглядит следующим образом:

1. Запуск алгоритмов СТЗ с пустой или сохраненной с предшествующих запусков базой примеров для обучения сети настройки параметров обработки кадров;
2. Получение кадров стереопар и вычисление вектора входа нейронной сети  $I_p(n)$
3. Определение текущего значения параметров алгоритма обработки  $P$  в нейросети (в пустой сети до начала обучения это практически случайное состояние выходов);
4. Запуск учителя для определения «правильных параметров  $P$ » на основе переборного механизма;
5. Сохранение подобранных параметров  $P$  и входного вектора  $I_p(n)$ ;
6. Обучение сети  $NN(I_p, P, W)$ , которое проводим только при накоплении значительного числа новых векторов в  $P$ ;
7. Возврат к п.2 или остановка обработки, если остановлен видеопоток.

Рассмотрим обработку тестовых примеров в сцене на рис.1. Процедура настройки параметров предобработки для пар рис. 1.б занимает 5 циклов при работе с начальной моделью параметров и только 2 подбора при работе с предварительно обученной системой. По итогам адаптации для этой системы кадров построено  $N=126$  сопряженных точек. Тестовый пример на рис.2 содержит 7 измерений движения камер СТЗ вдоль предполагаемой оси  $X$  системы (шаги по 100 мм, 1 налево, 5 направо и 1 такт стоит на месте). Общее перемещение составило 300 мм направо по оси  $X$  при пройденном пути 600 мм. Без включения модели адаптации финальный сдвиг определен  $\Delta X = 223mm$ , а с включением настройки

(после 200 тактов работы)  $\Delta X = 333\text{mm}$ , промах в первом случае составил 77 мм, а во втором 33 мм.

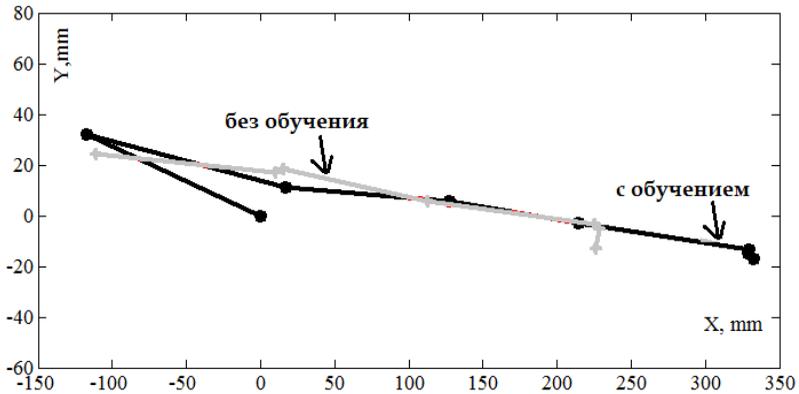


Рис. 2. Траектория движения СТЗ

Таким образом, очевидно, что некоторое усложнение модели обработки приводит к значительному повышению качества определения длины пройденного пути и координат положения беспилотной системы с навигацией на основе использования СТЗ.

## Заключение

Беспилотные мобильные системы требуют быстрой и интеллектуальной модели навигации. Такую навигацию могут обеспечить только многокомпонентные системы с использованием технического зрения.

Повышение быстродействия СТЗ возможно за счет использования непрерывно обучаемых нейронных сетей. Предложенная модель настройки СТЗ позволяет проводить выбор параметров предобработки кадров стереопары на основе обучения. Основными достоинствами такого подхода являются следующие моменты:

- решение будет приниматься на любом уровне обучения,
- с течением времени обучение будет улучшать качество настройки,
- время, затрачиваемое на выбор параметров на высоких уровнях обучения, сводится к прямому исполнению двухслойной нейронной сети,
- обучаемая настройка позволяет повысить качество результата.

Дальнейшая работа над моделью настройки СТЗ будет включать в себя

разработку механизма направленного поиска параметров выравнивания интенсивности фрагментов и реализацию ее бортового варианта.

## Список литературы

- [Девятериков и др, 2013] Девятериков Е.А., Михайлов Б.Б. : Управление движением мобильного робота с использованием данных визуального одометра // Робототехника и техническая кибернетика, №1,2013 стр.22-26.
- [Иванов, 2011] Иванов Ю.А. Технологии компьютерного зрения для наблюдения за объектами путевой инфраструктуры // Техника железных дорог, №4 (16), 2011, –С.57-61.
- [Жокарева и др., 2012] Жокарева Е.А., Корлякова М.О. Пилипенко А.Ю. Решение задачи стереорекострукции в нейросетевом базисе // XIV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2012»: Сборник научных трудов. В 3-х частях. Ч.1.- М:НИЯУ МИФИ, 2012 - стр. 160-169
- [Корлякова и др, 2014] Корлякова, М.О., Пилипенко, А.Ю Нейросетевой поиск особых точек в стереопарах // Тезисы НТК “Техническое зрение в системах управления - 2014” , Москва , 18-20 марта 2014 - с. 125-127 [http://tvcs2014.technicalvision.ru/docs/сборник\\_тезисов\\_ТЗСУ\\_2014.pdf](http://tvcs2014.technicalvision.ru/docs/сборник_тезисов_ТЗСУ_2014.pdf)
- [Соколов и др, 2011] Соколов, С.М. Богуславский, А.А. Интеллектуальные алгоритмы обработки изображений для решения задачи распознавания в реальном времени бортовыми системами // Тезисы докладов научно-технической конференции-семинара. Техническое зрение в системах управления мобильными объектами. – М.: КДУ. – 2011. – С.86-88.
- [Сыряжкин и др, 2010] Сыряжкин В.И., Шидловский В.С. Корреляционно – экстремальные радионавигационные системы. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2010. – 316 с.
- [Montemerlo et al, 2002] Montemerlo M., Thrun S., Koller D., Wegbreit B. FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem\ in Proc. AAAI National Conference on Artificial Intelligence, (Edmonton, Canada), AAAI, 2002. P. 593–598.
- [Ozbay et al, 2005] S. Ozbay and E. Ercelebi, Automatic Vehicle Identification by Plate Recognition A Neural Network// World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 9, (2005), pp.222-225

УДК 004.896:621.865

## МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ СЦЕН ДЛЯ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

А.Д. Московский (*moscowskyad@gmail.com*)  
Московский Физико-Технический Институт,  
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

**Аннотация.** В статье рассматривается задача навигации робота работающего на больших открытых пространствах в условиях ограниченности сенсорной базы. Описывается алгоритм навигации мобильного робота семейства SLAM, основанный на методе реконструкции сцен с использованием недоопределенных моделей. Приводятся результаты экспериментов на реальном техническом объекте.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** мобильная робототехника, навигация, SLAM, реконструкция сцен, недоопределенные модели.

### Введение

В области современной мобильной робототехники одной из базовых задач, является задача SLAM (simultaneous localization and mapping). Вычислительный процесс метода объединяет две разных задачи: построение карты и навигации в пространстве. Большинство вариантов алгоритма SLAM, призваны работать в «комнатной» среде, т.е. в человеческой среде обитания. С другой стороны есть класс задач, где требуется, что бы робот действовал на обширных, открытых пространствах, при этом без привязки к глобальной навигации (GPS/GLONAS), т.к. последняя в силу различных причин может быть не доступна. Примером такой задачи может быть задача дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Подтверждение точности получаемых результатов съемки происходит по следующей схеме: целевая аппаратура выполняет съемку калибровочного полигона и результаты сравниваются с характеристиками, зафиксированными наземными приборами. Получение наземных данных может быть автоматизировано несколькими путями. Одним из способов является создание наземной сети измерительных приборов, другим – использование подвижных платформ, несущих на себе

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 15-07-07483

измерительную аппаратуру.

## Постановка задачи

Робот для проведения подспутниковых измерений представляет собой подвижную платформу, оснащённую целевой аппаратурой для проведения измерений калибровочных площадок. Для нее требуется решить задачу навигации на местности. Следует брать в расчет и особенности окружающей среды, в которой действует робот. Полигон представляет собой большие открытые пространства, на которых расположены разного рода калибровочные площадки. Для решения задачи навигации требуется обозначать сенсорную базу робота. При работе на грунтовом покрытии, одометрия не дает приемлемых результатов, т.к. учащены случаи проскальзывания и пробуксовки. Также невозможно использовать сенсоры, основанные на инфракрасном излучении, т.к. солнечный свет создает помехи в их работе. Таким образом, минимальное количество сенсоров, определено следующим набором: камера со спаренным ультразвуковым дальномером и набором датчиков для рефлекторного поведения. Как можно заметить, данный набор сенсоров является достаточно скудным для того, что бы с абсолютной точностью позиционироваться в пространстве. Система управления робота состоит из двух уровней. На нижнем уровне обрабатываются базовые движения робота, рефлексы, тактическое планирование, распознавание объектов. На верхнем уровне же решаются задачи навигации, стратегического планирования, принятия решений. В стратегическое планирование входят самые общие поведенческие задачи, в случае с роботом для снятия показаний с полигонов они могут быть в виде «отправиться к полигону №3», «возвращение на базу» и т.п. Для такого вида планирования не требуется высокой точности позиционирования на местности. Поэтому в статье пойдет речь о методе, позволяющим ориентироваться на местности с точностью, достаточной для стратегического планирования.

**Сцены.** Любая задача навигации робота в пространстве требует задачи обнаружения элементов этого пространства. Элементы в свою очередь образуют сцены. Анализ сцен является хорошо известной задачей, введенной Марвином Минским в середине 70-ых годов [Minsky, 1975]. Сценой будем называть набор объектов и отношений между ними. Согласно [Карпов, 2011], к алгоритму реконструкции сцен можно подойти следующим образом. Обозначим за  $\Omega$  - все множество объектов в мире (генеральное множество),  $S(\Omega)$  – отношения между объектами, не меняющиеся от времени. В каждый момент робот наблюдает некое подмножество всех объектов  $O(t)$  и отношения между ними  $R(t)$ . В

каждый момент времени  $t$  алгоритм реконструкции можно описать следующими шагами:

1. Определение множества  $O(t)$
2. Дополнение множества  $\Omega$ .
3. Определение отношений  $R(t)$ .
4. Дополнение множества  $S(\Omega)$ .

Подобная задача идеологически похожа на задачу построения карты в алгоритмах семейства SLAM.

## SLAM с использованием сцен

SLAM это методы одновременной навигации и построения карты. Корректнее называть это общим подходом к решению задачи навигации, т.к. вариаций алгоритма достаточно много, но все обладают похожей последовательностью действий.

1. Смещение робота в пространстве.
2. Извлечение ориентиров из окружающего пространства.
3. Вычисление смещения в пространстве.
4. Дополнение карты.

Из распространенных можно назвать **классический SLAM**, основанный на расширенном фильтре Калмана, **GraphSLAM** [Thrun et al., 2005], off-line версия алгоритма, опирающаяся на GPS данные, **FastSLAM** [Montermero et al., 2002], быстрый алгоритм использующий фильтр частиц (particle filter), **LSD-SLAM** [Engel et al., 2009], алгоритм, строящий полную 3D-карту местности опираясь на видео-данные.

Большинство методов SLAM, в том числе приведенные, строят точную карту местности, однако в поставленной задаче это создать не возможно и не нужно, алгоритм создается с расчетом на глобальное планирование, что само по себе не требует высокой точности. Одним из механизмов, позволяющим работать в условиях невысокой точности значения является недоопределенные модели [Нариньяни и др., 1998]. Ключевыми понятиями являются:

- недоопределённое значение (H-значение) – непустое подмножество области определения классической переменной;

- недоопределенное расширение (H-расширение) – конечная система подмножеств произвольного универсального множества, замкнутая относительно операции пересечения и содержащая всю область определения и пустое множество. Существует несколько типов H-расширений, однако в этой работе уделяется внимание перечислимому и интервальному H-расширению.

Алгоритм реконструкции сцен идеологически похож на алгоритм построения карты в методах SLAM. Однако большинство методов SLAM

работают с координатным представлением карты, где каждому ориентиру сопоставляются его координаты. Когда точную карту построить невозможно следует перейти к другому способу представления карты: схематичному. На схематичной карте также представлены объекты, но вместо их координат указываются отношения между объектами.

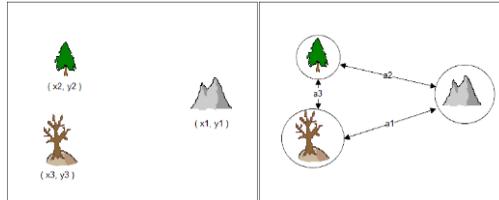


Рис. 1. Координатное и схематичное представление карты

На первом шаге большинства алгоритмов SLAM происходит выделение ориентиров из пространства. Робот выделяет в момент времени  $t$  множество объектов  $O(t)$ . Когда фильтрованное множество  $O(t)$  выделено, запускается алгоритм определения отношений между объектами  $R(t)$ . Механизм и характер отношений определяется, прежде всего, возможностями распознающего устройства. В общем случае отношение между объектами в целом является набором разного рода отношений. Некоторые, из которых могут быть определены весьма точно, другие же вообще не известны. Поэтому для заданий отношений полезно прибегнуть к  $N$ -значениям. Для хранения и работы с  $N$ -значениями будет использованы следующие типы  $N$ -расширений: точное значение — для случаев, когда возможно точно определить значение; полная неопределенность — про значение не известно ничего; интервал — значение лежит в известном интервале; перечислимое — для непрерывных (дискретных) величин, значение принадлежит известному набору. Итого отношение между объектами описывается набором:

$$R_i = \{r_i^1, r_i^2, r_i^3, \dots, r_i^n\}$$

где  $r_i^j$  — определенные отношения между объектами, распознаваемые системой.

## Представление сцен

Рассмотрим описание сцены в виде графа. В таком графе вершинами выступают объекты-ориентиры. Ребрами являются связи между объектами. Таким образом, и сцена, и карта описывается в алгоритме с помощью графов. После выделения объектов-ориентиров из среды и представления их в виде сцены, в рамках метода SLAM, требуется решить две задачи: построение общей карты (генеральной сцены) на основе

наблюдений робота (текущих сцен) и локализация робота на карте — сопоставление текущей сцены с генеральной. Первая задача является расширением второй. А так как сцены представимы в виде графов, то это выливается в задачу поиска подграфа. Для задачи поиска подграфов, требуется определить механизм сравнения длин ребер этого подграфа, которые определены многомерными недоопределенными величинами.

Для того, что бы сравнить два отношения  $R_i$  и  $R_j$ , нужно сравнить попарно все составляющие их отношения. Для этого введем величину степень похожести  $p$ . Эта величина представляет собой аналог разности для каждого вида переменной поделенной на область определения переменной  $D$ , а следовательно принимает значения от 0 до 1. Где 0 означает полное сходство, а 1 максимальное несоответствие. Степень похожести  $P$  для всего ребра, состоящего из  $N$  переменных, определим как:

$$P = \frac{\sum_i^N k_i p_i}{N}$$

Где  $k_i$  нормировочные коэффициенты и в простейшем случае равны 1.

## Поиск подграфа

Поиск текущей сцены на карте происходит в следующих шагах:

1. Выбор опорного элемента на сцене, наиболее отдаленного от центра графа и имеющего минимальное количество соседей.
2. Поиск на генеральной сцене аналогичных элементов.
3. Для аналогичного элемента происходит сравнение соседних элементов и ребер с соседями и ребрами опорного элемента. Для совпавших соседей алгоритм переходит на их соседей и т.д.
4. Рассчитывается критерий остановки алгоритма как отношение совпавших элементов сцены и карты ко всем элементам сцены. Если совпавших соседей больше нет, то в случае приемлемого критерия остановки текущая сцена считается локализованной. В противном случае алгоритм возвращается на третий шаг для другого идентичного элемента.

Сцена может содержать большее количество информации, чем представлено на карте. Поэтому после того как она локализована, запускается механизм доопределения. На карту наносятся объекты и связи, до этого на ней не присутствующие. Также если на сцене известная связь определена с большей точностью, то аналогичная связь на карте изменится в соответствии с этим значением. Таким образом, происходит локализация сцены на карте. Пример изображен на рисунке ниже.

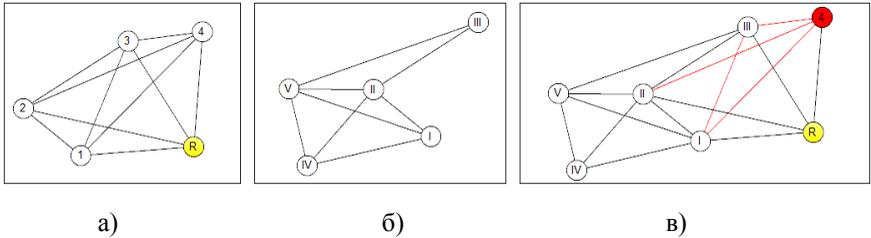


Рис 2. а) сцена, наблюдаемая роботом, б) карта до локализации и доуточнения, в) карта после локализации и доуточнения.

## 5. Модуль распознавания

Алгоритму нужно уметь выделять из окружающей среды объекты, это задача модуля распознавания. Объекты обладают набором признаков, такие как форма, цвет, размеры и д.р. Т.е. с точки зрения распознающего устройства, объект определяется набором атрибутов, которые это устройство умеет выделять. Т.е. объект из множества  $O(t)$  описывается похожим образом как связь на сцене.

$$O_i = \{o_i^1, o_i^2, \dots, o_i^m\}$$

По соответствию или различию одних атрибутов другим можно делать выводы о похожести или различии объектов. Таким образом, если есть комплекс анализаторов, способных выделить тот или иной атрибут объекта, то применяя их последовательно можно определять свойства объектов, насколько это позволяет анализаторная база.

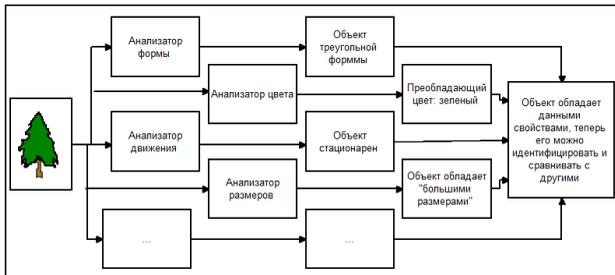


Рис. 3. Схема работы модуля распознавания

Свойства объектов также представимы с помощью  $N$ -переменных и сравнение объектов, обладающих множеством атрибутов, происходит по тому же методу, что и сравнение ребер графа, который описывает сцену. Причем аналогично доуточнению отношений объектов, применяется механизм доуточнения атрибутов объекта, если новые измерения обладают большей точностью.

## 6. Эксперименты

Эксперименты проводились на тестовой мобильной платформе. Платформа могла определять атрибуты объектов: примерные размеры, преобладающие цвета и форма. И отношения между объектами: примерное расстояние, взаимное положение в пространстве. Эксперимент проводился в помещении, в котором было расставлено 10 объектов, удобных для распознавания сенсорами робота: монотонные по цвету и имеющие простую геометрическую форму. В модуль распознавания была занесена информация об размещенных объектах, в т.ч. список атрибутов. Модуль выделял соответствующие объекты, после чего реконструировалась сцена. Также в эксперименте были введены вспомогательные объекты – ячейки координатной сетки. Сетка задавалась с шагом, равным средним размерам наблюдаемых объектов (ребро 40 см).

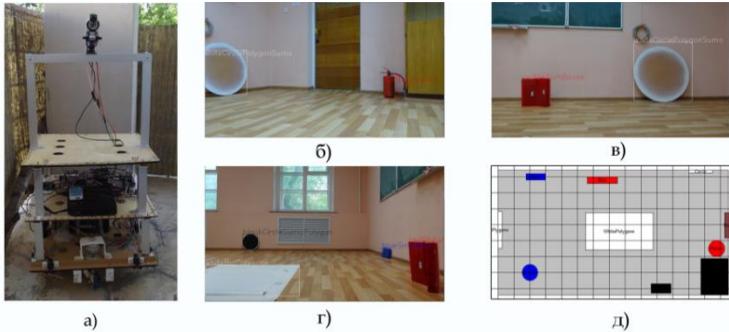


Рис. 4. а) фотография тестовой платформы, б)-г) ракурсы, заснятые роботом с обнаруженными объектами, д) схема помещения.

Такой подход полезен, как и для решения прикладных задач низкого уровня, так и для возможности оценки точности работы алгоритма. Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе карта уже была задана, в ходе эксперимента робот демонстрировал умение сопоставлять текущую сцену с картой. Положение робота определялось алгоритмом, как в терминах объектов, так и привязкой к координатным ячейкам. В первом случае система выдавала список объектов с карты, наблюдаемые роботом, а так же связи с ближайшими объектами, не попавшими в текущий кадр. В этом эксперименте на каждом шаге данное описание соответствовало действительности. Принадлежность к ячейке в данном эксперименте обладала высокой погрешностью (3-5 ячеек) в связи с невозможностью точно определить расстояния до объектов. Данный эксперимент показал возможность локализации робота в отсутствие высокой точности измерений. Второй этап эксперимента состоял в

проверке алгоритма построения карты. Случайно блуждая по помещению и распознавая связанные сцены, робот доопределял объекты и отношения, заносил их на карту. Был протестирован алгоритм доопределения, когда отношение, не распознанное на одном из ракурсов, распознавалась в дальнейшем и добавлялась в карту. В конечном итоге была построена карта, со всеми присутствующими объектами в помещении и отношениями, которые возможно было физически наблюдать. В то время когда схематичное представление карты соответствовало действительности, привязка к координатным ячейкам обладала высокой погрешностью, как и в первом эксперименте.

## 7. Заключение

Таким образом, было показано, что можно подойти к задаче построения карты в методах SLAM используя понятие схематичной карты. Для этого был использован механизм реконструкции сцен, а так же применён метод недоопределённых моделей. Проведённые эксперименты подтвердили возможности предложенного подхода. Целью дальнейших исследований является внедрение и апробация метода в реальной прикладной задаче, а также оптимизация методов.

## Список литературы

- [Minsky, 1975] Marvin Minsky, A Framework for Representing Knowledge, in: Patrick Henry Winston (ed.) // The Psychology of Computer Vision. McGraw-Hill, New York (U.S.A.), 1975.
- [Карпов, 2011] Карпов В.Э. «Об одном механизме реконструкции схем», // VI-ая Международная научно-практическая конференция "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте", Сб. науч. трудов. В 2-т., Т.1, М.: Физматлит, 2011, с.407-415.
- [Нариньяни и др., 1998] А.С. Нариньяни, В.В. Телерман, Д.М. Ушаков, И.Е. Швецов «Программирование в ограничениях и недоопределённые модели» // Информационные технологии № 7, Издательство «Машиностроение», Москва, 1998, с.13-22.
- [Montermero et al., 2002] M. Montermero, S. Thrun, D. Koller, B. Wegbreit, «FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem». // Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence, 2002.
- [Thrun et al, 2005] S. Thrun, M. Montemerlo, «The GraphSLAM Algorithm with Applications to Large-Scale Mapping of Urban Structures» // International Journal on Robotics Research, 2005, 25(5-6): p. 403.
- [Engel et al., 2014] Jacob Engel, Thomas Schops, Daniel Crempe, «LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM» // European Conference on Computer Vision (ECCV). 2014.

УДК 004.82

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЙ В ЗАДАЧАХ СОГЛАСОВАННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУППЫ БПЛА

А.И. Панов (*pan@isa.ru*)Федеральный исследовательский центр «Информатика и  
управление» Российской академии наук, Москва

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности представления пространственных и временных знаний автономными агентами в случае их коллективного взаимодействия на примере задачи согласованного перемещения группы беспилотных летательных аппаратов. Предлагается знаковый подход к описанию знаний агента, основанный на психологической теории деятельности и биологически правдоподобной иерархической модели распознавания. В предлагаемом подходе к представлению знаний необходимым образом используются как описания действий, так и процессы обучения на основе поступающей первичной информации. Приводится пример работы предлагаемого подхода в задаче совместного преодоления препятствий группой БПЛА.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** представление знаний, знак, иерархия автоматов, когнитивные процессы, группа БПЛА.

### Введение

Представление пространственных и временных знаний в задачах достижения общей цели группой автономных технических объектов, в том числе и беспилотных летательных аппаратов, обладает существенной спецификой по сравнению с описанием таких знаний для отдельного агента. Одним из существенных моментов является возможность коммуникации, то есть возможность передачи части собственных знаний агента с использованием некоторого протокола. Содержание сообщений, передаваемых с помощью такого протокола, должно быть представлено в форме, независимой от набора и свойств сенсоров, которыми обладают агенты, обменивающиеся сообщениями. Из данного свойства протокола обмена сообщениями вытекает следующая особенность: только некоторая часть представлений агента о пространственных и временных свойствах

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-07-31194 мол\_a).

среды должна быть коммуницируема и, по возможности, согласована с остальными участниками группы.

Ключевой особенностью модели представления знаний о пространстве и времени, которая будет рассматриваться в данной работе, является включение процесса обучения, то есть способность к построению отдельных элементов знания на основе поступающей сенсорной информации. Привязка элементов знания к реальным объектам и свойствам внешнего мира должна существенно повысить как эффективность, так и выразительную способность такой модели. Стоит отметить, что проблема привязки символов или проблема символизации (symbol grounding problem) поднимается достаточно давно [Harnad, 1990; Barsalou, 1999], однако роль обучения в рамках этой проблемы недооценивается.

В настоящей работе предлагается знаковый подход к построению модели представления пространственных и временных знаний агентов, участвующих в решении некоторой общей задачи на перемещение. Такая модель далее будет называться знаковой пространственно-временной картиной мира. Понятие знака формализуется на основе культурно-исторического подхода Выготского [Выготский, 2005] и теории деятельности Леонтьева [Леонтьев, 1975], которые позволяют раскрыть роль и функции знака в представлении знаний и в процессах обмена информацией. Для привязки знака к реальным объектам и свойствам среды (к денотатам знака) предлагается использовать специальный процесс обучения, результатом которого является готовая система распознавания, описываемая в терминах теории автоматов. В заключение статьи приводится модельный пример использования знакового представления знаний для согласованного перемещения группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

## **1 Существующие подходы к представлению знаний о пространстве и времени**

Моделей представления пространственных знаний для навигации, построения карты местности, планирования траекторий и других подобных задач существует большое количество. Многие из них создаются для решения частных практических задач и не претендуют на какую-либо универсальность. Другие модели, как например, широко известная модель 4D/RCS [Albus et al., 2007], применяются только для отдельных автономных технических объектов и в них не учитываются те особенности представления знаний, о которых говорилось во введении. Существующие модели представления пространственных и временных знаний, применимые в условиях группового взаимодействия, такие как

групповое расширение модели 4D/RCS [Яковлев и др., 2014], обычно не учитывают проблему привязки элементов знания к внешней среде и не подразумевают какого-либо сложного обучения, кроме манипуляции известными символами для составления карты местности.

Среди имеющихся работ стоит отметить близкую к настоящей статье работу Д. Роя [Roy, 2005], посвященную проблеме привязанного к внешней среде представления знаний, в том числе и пространственного характера. Рой использует идею знакового представления, где знак используется не в психологическом, а в философском смысле [Пирс, 2000]. Для описания объектов, действий и ситуаций используются так называемые схемы (см. для примера рис. 1). Схема согласуется с результатом обработки сенсорной информации (распознавание категорий) и с помощью определенных с помощью неё действий обновляет представления агента о внешней среде и одновременно производит изменения в этой среде.

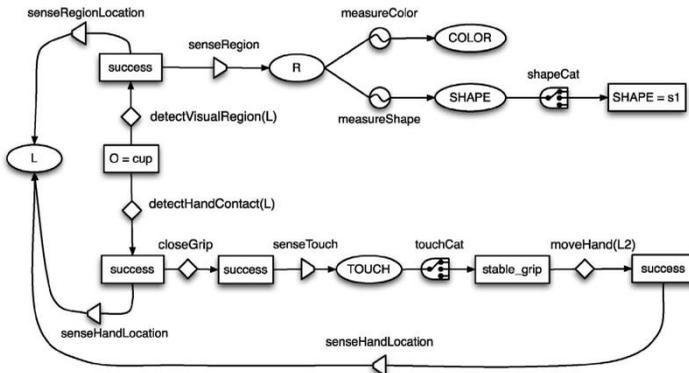


Рис. 1. Схема объекта чашка (cup) [Roy, 2005], для которого с помощью перцептивных процедур (detect, measure) определены свойства цвета (COLOR) и формы (SHAPE), а также определены действия по перемещению (Grip и move), зависящие от текущего положения чашки (L).

С помощью таких схем Рою удастся описать процесс коммуникации агентов, когда агент, имеющий привязку некоторого символа к внешней среде, сообщает информацию об этом символе другому агенту, не имеющему средств к проверке такой привязки. Несмотря на успешную реализацию на работе-манипуляторе, оперирующем объектами на столе, поход Роя обладает существенными недостатками. Во-первых, не используются процессы обучения, то есть все схемы задаются разработчиком, хотя и привязываются с помощью заранее известных сенсорных входов. Во-вторых, количество используемых Роем

пространственно-временных отношений довольно ограничено (отношения «содержится в», «соприкасается с», «предшествует»).

Стоит отметить, что в таких работах как [Herskovits, 1997; Kuipers, 2000; Allen, 1983] количество описываемых отношений, с помощью которых задаются такие свойства как топология, взаимное расположение, расстояние, относительное движение, следование во времени, пересечение во времени и др., намного больше и большинство из них необходимы для описания пространственного движения, более сложного, чем ограниченного движение манипулятора над столом.

В настоящей работе для задания пространственных и временных отношений, не зависящих от сенсорной привязки, используются подходы, разрабатываемые в рамках теории ситуационного управления [Поспелов, 1986]. Поспеловым и его учениками предложен ряд псевдофизических логик, задающих достаточно широкий спектр отношений, которые полностью покрывают все случаи, возникающие в задаче двумерного пространственного перемещения агентов. Логический подход позволяет не только описывать ситуацию, но и делать вывод, с помощью которого можно предсказывать следующие состояния системы и пополнять знания без наличия актуальной сенсорной информации.

## **2 Когнитивный подход к представлению пространственно-временных знаний**

Предлагаемая модель знаковой пространственно-временной картины мира опирается на работы прикладной семиотики [Осипов и др., 1999] и на формальное определение знака, предложенное в работах Осипова и коллег [Осипов и др., 2014; Осипов и др., 2015]. Знаковая картина мира позволяет строить модели высших когнитивных функций человека [Чудова, 2012], в том числе и сложных процессов коммуникации (например, в которых различаются операциональное и референтное значения сообщения), и применима в задачах управления БПЛА [Зубарев и др., 2013].

Знак  $s$  как элемент картины мира, опосредующий некоторый объект или свойство внешней среды, включает в себя четыре компоненты: имя  $n$ , образ  $p$  (процедура распознавания и категоризации объекта или свойства), значение  $m$  (согласованные в группе агентов роли данного объекта или свойства в общеизвестных действиях) и личностный смысл  $a$  (роль данного объекта или свойства в собственных действиях агента). В настоящей работе для описания пространственно-временной картины мира будут использоваться только имена, образы и значения знаков.

Пространственные и временные отношения определяются на множестве знаков, а точнее на именах знаков. Отношения на множестве

имен транслируются с отношений на множествах компонент знаков. На множествах рассматриваемых нами компонент (образов и значений) удастся определить свои семейства отношений [Осипов и др., 2014; Панов, 2012], такие как: отношения сходства, противопоставления, ситуационные и сюжетные отношения.

## 2.1 Распознающие автоматы

Для привязки знаков к опосредуемым объектам внешней среды используются распознающие автоматы [Панов, 2014]. Специальным образом определенная иерархия таких автоматов позволяет описать как процесс категоризации (распознавания) знака, так и определить участие знака в действиях агента [Осипов и др., 2015].

Каждый автомат  $R$  уровня иерархии  $i$  получает на вход последовательность векторов действительных чисел от 0 до 1 с нижнего уровня иерархии. Входной вектор  $q$  представляет собой веса входных признаков  $F$ , участвующих в распознавании выходных признаков  $F^*$ . В начальный момент работы автомата поступает управляющий вектор с верхнего уровня иерархии, задающий предсказание значений весов выходного вектора, которые должны получиться после завершения работы распознающего автомата (через время  $h$ ). В каждый момент времени  $t$  распознающий автомат вычисляет текущий весовой вектор выходных признаков длины  $l$  и управляющий вектор на нижний уровень иерархии длины  $q$ . Автоматы связаны иерархическим отношением, если выходные признаки (возможно, не все) дочернего автомата участвуют в распознавании выходных признаков родительского автомата (являются для последнего входными).

Состояние автомата  $R$  задается множеством битовых матриц предсказания  $Z$  размерности  $q$  на  $h$ . Каждому выходному признаку  $f^*$  соответствует свой набор матриц предсказания, в которых в столбце  $t$  единицы соответствуют необходимым для распознавания  $f^*$  в момент времени  $t$  входным признакам. Если с помощью некоторой процедуры  $A$  множество столбцов всех матриц распознавания для признака  $f_p$  разделяется на множество столбцов, содержащих всегда предшествующие признаки (условия), и множество столбцов, содержащих всегда последующие признаки (эффекты), то такой признак  $f_p$  называется процедурным и опосредует действия и процессы.

Если между множеством знаков и множеством признаков, распознаваемых всеми автоматами иерархии, установлено взаимно-однозначное соответствие (именование), то компоненты знака определяются следующим образом. Образом знака  $s$ , соответствующего признаку  $f$ , является множество всех признаков, участвующих в распознавании признака  $f$ . Значением знака  $s$ , соответствующего признаку

$f$ , является множество всех процедурных признаков, условия которых распознаются с помощью признака  $f$ .

## 2.2. Формирование состояний распознающего автомата

Привязка знака к внешним объектам и процессам осуществляется за счет того, что входными признаками распознающих автоматов нижнего уровня иерархии являются данные, поступающие с сенсоров. Формирование состояний автомата в процессе наблюдения агента происходит с помощью специального алгоритма обучения НТМ [George et al., 2009; Панов и др., 2015]. НТМ использует нейрофизиологические данные о строении некоторых участков коры головного мозга для формирования биологически правдоподобной схемы на формальных нейронах, либо с использованием марковских цепей и алгоритмов иерархической кластеризации. К основным принципам работы НТМ относятся: использование иерархии вычислительных узлов с восходящими и нисходящими связями, использование Хэббовских правил обучения, разделение пространственного и временного группировщиков, подавление активации для формирования разреженного представления.

Формируемые в результате работы алгоритма НТМ связи между компонентами вычислительного узла в рамках двух связанных иерархической связью узлов задают матрицу предсказания для некоторого выходного признака в модели распознающих автоматов.

## 3 Модельная задача

В качестве иллюстративного примера использования предлагаемой модели представления пространственных и временных знаний опишем модельную задачу по перемещению группы БПЛА на местности с различными типами препятствий. Пусть имеются два агента  $A_1$  и  $A_2$ , располагающиеся в координатах  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ , соответственно. Агент  $A_1$  обладает способностью разрушать препятствия типа  $C$  и большими размерами  $r_1$ , не позволяющими ему напрямую построить траекторию в целевую зону  $G$  с координатами  $(x_G, y_G)$ . Агент  $A_2$  обладает способностью разрушать препятствия типа  $B$  и небольшими размерами  $r_2$ , позволяющими ему напрямую построить траекторию до целевой зоны  $G$  (рис. 2). Карта полностью наблюдаема и доступна обоим агентам.

Агенты в своей картине мира опосредуют действия по перемещению знаками  $s_t$  (признаками  $f_t$ ,  $t$  – тип перемещения), которым соответствуют матрицы предсказания типа  $Z_t$ , состоящие из трёх столбцов  $z_1=(l_x, I)$ ,  $z_2=(l_y, d_u, E)$  и  $z_3=(l_y, I, t_v)$ , где  $l_x, l_y$  – признаки, соответствующие категории расстояния в пространственной логике [Поспелов, 1986] (например, *вплотную, близко, далеко* и др.),  $d_u$  – признак, соответствующий категории

направления в пространственной логике (например, *вперед*, *слева* и др.),  $t_v$  – признак, соответствующий категории времени во временной логике [Поспелов, 1986] (например, *скоро*, *в будущем* и др.),  $I$  – признак присутствия самого агента,  $E$  – признак отсутствия препятствия. В матрице типа  $Z_t$  столбцы  $z_1$  и  $z_2$  являются столбцами условий, а столбцы  $z_3$  – столбцом эффектов.

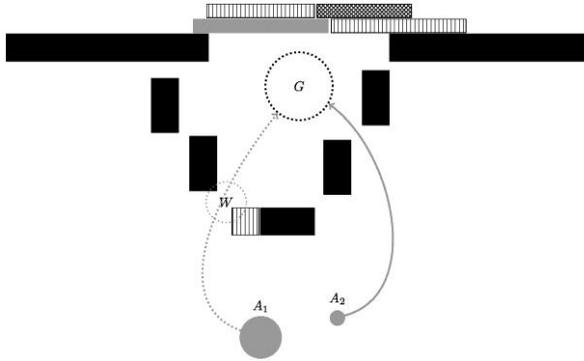


Рис. 2. Карта модельной задачи. Черные и серые прямоугольники – разрушаемые препятствия (тип  $A$ ), с вертикальной штриховкой – разрушаемые агентом  $A_2$  (тип  $B$ ), со штриховкой в клетку – разрушаемые агентом  $A_1$  (тип  $C$ ). Целевая область  $G$  напрямую достижима агентом  $A_2$  и не достижима агентом  $A_1$ .

Всем признакам из образа знака  $s_t$  в свою очередь соответствуют свои матрицы распознавания, полученные в результате обучения в процессе наблюдения агента за средой. В результате этого обучения и формируются дискретные категории расстояния, направления и времени, такие как: *слева*, *скоро*, *близко* и т.п.

В процессе планирования агент строит некоторый план по достижению цели  $G$  для чего необходимо выполнить действие  $s_i(I)$  (в котором, например,  $l_x$  – вплотную,  $l_y$  – далеко (категоризация расстояния между точками  $(x_1, y_1)$  или  $(x_2, y_2)$  и  $(x_G, y_G)$ ),  $d_u$  – вперед,  $t_v$  – скоро). Если для агентов доступны только действия типа  $s_i(2)$  ( $l_x$  – вплотную,  $l_y$  – очень близко,  $d_u$  – вперед, слева и т.п.,  $t_v$  – очень скоро), то происходит построение плана по перемещению, в котором строится последовательность из действий типа  $s_i(2)$ .

В случае агента  $A_1$  в виду его больших размеров, на некотором этапе признак  $E$  будет отсутствовать и условие очередного действия  $s_i(2)$  не будет выполнено. В таком случае, если агенту  $A_1$  доступно некоторое действие по передаче сообщения, то в план может быть включена посылка информации агенту  $A_2$  о препятствии в области  $W$  (см. рис. 2). Если у агента  $A_2$  имеется знак, опосредующий агента  $A_1$  (представление о другом

агенте), в образ которого входит его положение, то агент  $A_2$  сможет построить план по перемещению в область  $W$  и устранению препятствия.

В протоколе коммуникации сообщения не включают информацию об образах, используемых в сообщении знаков, которые могут не совпадать у агентов  $A_1$  и  $A_2$  (различные матриц предсказания одних и тех же признаков в виду несовпадения процессов обучения). За счет согласованности значений этих знаков (общее множество доступных действий), информация в сообщении может быть интерпретирована адресатом.

## 4 Заключение

Представление пространственных и временных знаний в задаче совместного взаимодействия группы агентов (беспилотных летательных аппаратов) имеет свою специфику. В статье предлагается знаковая модель пространственно-временной картины мира, которая позволяет с помощью специального алгоритма обучения осуществить привязку используемых элементов знания к реальным объектам и свойствам среды, а также позволяет агентам обмениваться сообщениями с согласованием только некоторой части доступной информации. Приводится модельная задача, иллюстрирующая возможности и область применения предложенного подхода.

## Список литературы

- [Выготский, 2005] Выготский Л. С. Психология развития человека.— М. : Издательство Смысл, 2005.— С. 1136.
- [Зубарев и др., 2013] Принципы построения многоуровневых архитектур систем управления беспилотными летательными аппаратами / Д. В. Зубарев, Д. А. Макаров, А. И. Панов, К. С. Яковлев // *Авиакосмическое приборостроение*.— 2013.— № 4.— С. 10–28.
- [Леонтьев, 1975] Леонтьев А. Н. Деятельность. Сознание. Личность.— М. : Политиздат, 1975.
- [Осипов и др., 1999] Осипов Г. С., Поспелов Д. А. Прикладная семиотика // *Новости искусственного интеллекта*.— 1999.— № 1.— С. 9–35.
- [Осипов и др., 2014] Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В. Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание // *Известия РАН. Теория и системы управления*.— 2014.— № 4.— С. 83–96.
- [Осипов и др., 2015] Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В. Управление поведением как функция сознания. II. Синтез плана поведения // *Известия РАН. Теория и системы управления*.— 2015.— № 5.
- [Панов, 2012] Панов А. И. Семейства отношений в знаковой картине мира // *Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ–2012 (16–20 октября 2012г., г. Белгород, Россия): Труды конференции*.— Белгород : Издательство БГТУ, 2012.— С. 301–309.

- [**Панов, 2014**] Панов А. И. Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия // Машинное обучение и анализ данных.— 2014.— № 7.— С. 863–874.
- [**Панов и др., 2015**] Панов А. И., Петров А. В. Иерархическая временная память как модель восприятия и её автоматное представление // Системный анализ и информационные технологии: труды VI Международной конференции: в 2т.— Т. 1.— Светлогорск, Россия, 15–20 июня 2015 г. : Издательство КалГУ, 2015.
- [**Пирс, 2000**] Пирс Ч. С. Начала прагматизма. Т. 2. Логические основания теории знаков.— СПб. : Алетейя, 2000.
- [**Поспелов, 1986**] Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика.— М. : Наука, 1986.— С. 288.
- [**Чудова, 2012**] Чудова Н. В. Концептуальное описание картины мира для задачи моделирования поведения, основанного на сознании // Искусственный интеллект и принятие решений.— 2012.— № 2.— С. 51–62.
- [**Яковлев и др., 2014**] Система навигации группы БЛА на основе маркеров / К. С. Яковлев, В. В. Хитыков, М. И. Логинов, А. В. Петров // Робототехника и техническая кибернетика.— 2014.— № 3.— С. 44–48.
- [**Albus et al., 2007**] Albus J., Barbera A. 4D/RCS reference model architecture for unmanned ground vehicles // Intelligent Vehicle Systems: A 4D/RCS Approach. — Nova Science Publishers, Inc., 2007. — P. 1–30.
- [**Allen, 1983**] Allen J. F. Maintaining knowledge about temporal intervals // Communications of the ACM. — 1983. — Vol. 26, no. 11. — P. 832–843.
- [**Barsalou, 1999**] Barsalou L. W. Perceptual symbol systems // The Behavioral and brain sciences. — 1999. — Vol. 22, no. 4. — P. 577–609; discussion 610–660.
- [**George et al., 2009**] George D., Hawkins J. Towards a Mathematical Theory of Cortical Micro-circuits // PLoS Computational Biology. — 2009. — Vol. 5, no. 10. — P. 1–26.
- [**Harnad, 1990**] Harnad S. Symbol Grounding Problem // Physica D. — 1990. — Vol. 42. — P. 335–346.
- [**Herskovits, 1997**] Herskovits A. Language, Spatial Cognition, and Vision // Spatial and Temporal Reasoning / Ed. by O. Stock. — Springer, 1997. — P. 155–202.
- [**Kuipers, 2000**] Kuipers B. Spatial semantic hierarchy // Artificial Intelligence. — 2000. — Vol. 119, no. 1. — P. 191–233.
- [**Roy, 2005**] Roy D. Semiotic schemas: A framework for grounding language in action and perception // Artificial Intelligence. — 2005. — Vol. 167, no. 1-2. — P. 170–205.

УДК 004.896, 004.414.2

## ОНТОЛОГО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ОБСТАНОВКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

С.В. Лебедев (*lebedev.sv.etu@gmail.com*)  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

М.Г. Пантелеев (*MPanteleyev@gmail.com*)  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

**Аннотация.** Предложен подход к проектированию подсистем оценки обстановки беспилотных транспортных средств с высокой степенью автономности (БТС ВСА), основанный на использовании онтологических моделей предметных областей и универсального вычислительного каркаса. Подход является инвариантным к различным типам БТС ВСА и позволяет сократить время разработки программного кода и повысить его качество на этапе прототипирования новых и перспективных образцов БТС ВТА. Представлен пример формализации фрагмента предметной области и использования предложенного подхода.

**Ключевые слова:** подсистема оценки обстановки, интеллектуальный агент, онтология проектирования.

### Введение

Развитие беспилотных транспортных средств (БТС) на современном этапе характеризуется двумя ключевыми тенденциями: динамичным расширением номенклатуры изделий, разрабатываемых для гражданских и военных применений, и повышением степени автономности за счет интеллектуализации бортовых алгоритмов. БТС с высокой степенью автономности (БТС ВСА) принято рассматривать в рамках концепции интеллектуальных агентов (ИА) [Gunetti et. al. 2010]. Разработка программного обеспечения (ПО) для таких систем является сложным трудоемким процессом, эффективность которого может быть повышена за счет использования средств автоматизации разработки ПО. Одним из ключевых требований к таким средствам, с учетом многообразия типов и конкретных образцов БТС, является обеспечение универсальности, т. е. поддержка процесса разработки ПО для БТС ВСА различного назначения,

функционирующих в различных средах. В последние годы активно развивается онтологический подход к автоматизации разработки и верификации ПО, позволяющий генерировать и настраивать ПО на конкретную предметную область (ПрО) с использованием онтологической модели соответствующей ПрО.

В настоящей работе рассматриваются теоретические основы и практические аспекты реализации онтологического подхода к проектированию одной из основных подсистем ИА — подсистемы оценки обстановки (ПОО). Подход позволяет сократить сроки и упростить процесс программной реализации ПОО на этапе прототипирования БТС ВСА различного назначения.

## 1 Место и функции ПОО в архитектуре ИА

В данной работе задача проектирования ПОО рассматривается в рамках обобщенной делиберативной архитектуры агента, представленной на рис. 1.

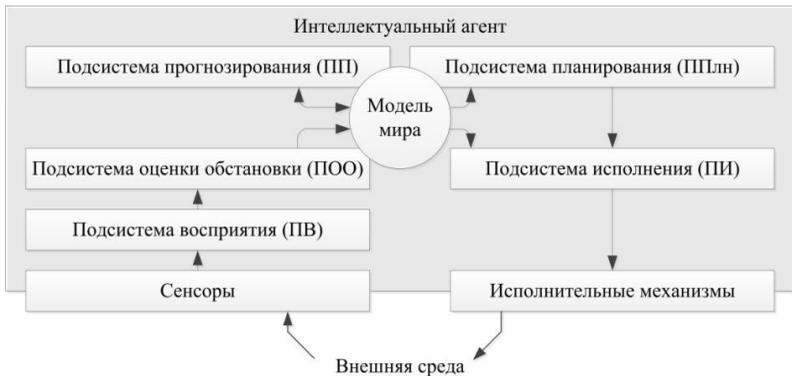


Рис. 1. Архитектура ИА РВ

Центральным компонентом данной архитектуры является модель мира (ММ), представляющая собой динамически формируемый агентом информационный образ среды, в которой он функционирует. Функция ПОО — построение и обновление ММ на основе текущих низкоуровневых сенсорных данных, поступающих от подсистемы восприятия (ПВ), их предыстории и априорных знаний.

Предполагается, что агент планирует и осуществляет целенаправленные действия в высокодинамичной многоагентной среде, в том числе в условиях активного противодействия. Таким образом, ММ содержит информационные образы объектов внешней среды, включая их

свойства (атрибуты) и отношения между ними.

Модели оценки обстановки активно разрабатываются в последние годы в рамках концепций слияния данных (Data Fusion) и ситуационной осведомленности (Situational Awareness).

Базовая модель ситуационной осведомленности [Endsley, 1995] разработана как когнитивная модель формирования ситуационной осведомленности у операторов сложных систем. Т.е. данная модель не ориентирована на разработку БТС ВСА.

Наиболее известной моделью слияния данных является JDL DF (Joint Directors of Laboratories Data Fusion) [Steinberg et al., 2009a]. Вопросы оценки обстановки с использованием данной модели рассмотрены, например, в [Steinberg, 2009b; Bowman et al., 2009]. Известные работы не ориентированы на решение проблем автоматизированной генерации программного обеспечения ПОО для конкретных БТС ВСА.

В [Kokar et al., 2009] рассмотрен основанный на ситуационной теории и модели Эндсли декларативный подход к созданию системы оценки обстановки. Подход использует онтологию для представления ситуаций и вывода новой информации с использованием дескриптивной логики и правил логического вывода. В отличие от данного подхода, предлагается совместить декларативный и процедурный подходы. Первый позволяет упростить работу со знаниями за счет специализированных редакторов и языков представления. Второй позволяет реализовать сложные алгоритмические решения.

В основе подхода лежит иерархическая модель потока вычисления элементов (объектов и отношений). На нулевом уровне на основе воспринятой и априорной информации вычисляются элементы первого уровня. Далее, на основе всей известной информации вычисляются элементы второго уровня и так далее до уровней элементов, требуемых для ППлн. В совокупности, полученная информация составляет ММ.

Такой подход позволяет сохранять вычислительные зависимости, обеспечивая возможность создания и обновления ММ при изменении элементов нижних уровней (в первую очередь, непосредственно воспринимаемых элементов).

## **2 Подход и базовая модель проектирования ПОО**

### **2.1 Подход к проектированию**

Предлагаемый подход к построению ПОО базируется на использовании инвариантного вычислительного каркаса и его онтологической настройки с учетом функционального назначения конкретного БТС ВСА, среды его функционирования, типов внешних

объектов, их существенных свойств и отношений.

В рамках данного подхода выделено два этапа проектирования:

1. Проектирование онтологической модели ПОО в соответствии с заданной ПрО, определяемой средой функционирования и функциональным назначением БТС ВСА;
2. Интеграция построенной онтологической модели в базовый вычислительный каркас.

Процесс проектирования при данном подходе может рассматриваться как отображение понятий ПрО на понятия вычислительного процесса ПОО. Данное отображение поддерживается рассмотренной ниже моделью вычислимости (см. п. 2.1). Сущности модели ПрО аннотируются сущностями модели вычислимости и полученная таким образом модель используется для построения модели процесса вычисления. На основе последней реализуется автоматизированная генерация программного кода.

Предполагается, что в подсистеме планирования реализован подход опережающего итеративного планирования, рассмотренный в [Пантелеев, 2012; Пантелеев, 2014].

## 2.2 Обобщенная модель ПОО

Обобщенная модель (ОМ) проектирования ПОО, соответствующая предложенному подходу, включает два компонента:

$$OM = \langle MPrO, MPP \rangle,$$

где MPrO – модель ПрО, MPP – модель процесса проектирования, формализующая структурные и функциональные аспекты ПОО.

MPP представлена тройкой:

$$MPP = \langle MP, MBч, MB \rangle,$$

где MP – модель представления, MBч – модель вычислимости, MB – модель вычисления.

MP предназначена для формализации понятий MPrO и включает следующие элементы:

$$MP = \langle O, P, GO, CO \rangle,$$

где O – множество объектов, P – множество отношений, GO – множество групповых объектов, где каждый объединяет группу объектов в рамках одного отношения, CO – множество системных объектов, где каждый объединяет группу объектов в рамках набора различных отношений (ролей). MP можно рассматривать как универсум для построения MM.

MB формализует процесс вычисления, схематично представленный на рис. 2, где  $L_k$  обозначает k-ый уровень вычисления (УрВ). Структура процесса вычисления динамически строится по мере получения новых восприятий и вычисления. Каждый УрВ содержит фрагмент MM, вычисленный на предыдущем уровне. На основе собственного фрагмента

и всех фрагментов ММ нижележащих уровней генератором создаются узлы вычисления (УзВ). УзВ вычисляет элемент ММ, записываемый в вышележащий уровень.

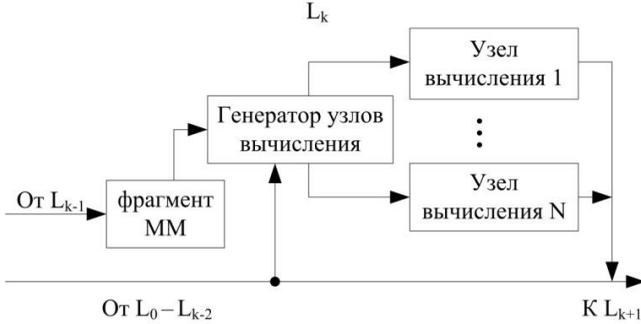


Рис. 2. Структура процесса вычисления

Для вычисления элемента к каждому УзВ присоединяется процедура, реализующая один из двух обобщенных шаблонов вычисления:

$$f_a : \langle o_1, o_2 \rangle \rightarrow r(o_1, o_2),$$

$$f_c : o_1 \rightarrow \langle o_2, r(o_1, o_2) \rangle.$$

Первый шаблон соответствует установлению отношения между двумя ранее вычисленными объектами. Второй – порождению нового объекта на основе ранее вычисленного объекта и априорно заданного между ними отношения.

Порождая новый элемент, УзВ связывает исходные элементы с порожденными, обеспечивая возможность реализации функции обновления при изменении исходных элементов.

МВч предназначена для отображения понятий МП на понятия МВ. Для этого используется понятие порождающего отношения, фиксирующего вычислительную зависимость между исходными и порождаемыми элементами. Само порождающее отношение однозначно связывается с УзВ.

Порождающие отношения позволяют отобразить единую МП на множество вариантов вычисления (например, когда один и тот же элемент может быть как воспринят, так и вычислен).

Гранулярность предложенной структуры вычисления позволяет компоновать в рамках каждой из итераций вычислительные задачи с учетом имеющихся ресурсов. Кроме того, для отдельных УрВ или УзВ может быть установлена приоритетность вычисления, отвечающая интересам подсистемы планирования.

### 2.3 Обобщенный метод проектирования ПОО

На основе предложенной ОМ сформулирован обобщенный метод проектирования ПОО, включающий следующие действия:

1. Формализовать МПрО в понятиях предложенной МП;
2. Задать порождающие отношения на данном множестве элементов ПрО, связывая исходные элементы с порождаемыми;
3. На основе полученных зависимостей породить структуру процесса вычисления, состоящую из узлов и уровней вычисления;
4. Реализовать и связать методы вычисления элементов с каждым из узлов вычисления;
5. На основе полученной модели сгенерировать программный код и интегрировать его в инвариантный каркас вычисления.

### 2.4 Онтология проектирования ПОО

На основе предложенной концептуальной модели в редакторе TopBraid Composer<sup>1</sup> была создана онтология проектирования ПОО. При ее создании использовались следующие спецификации: язык описания онтологий OWL<sup>2</sup>; язык запросов к онтологиям SPARQL<sup>3</sup>; язык, позволяющий связать понятия на языке OWL с запросами на языке SPARQL, – SPIN<sup>4</sup>. Выбранный редактор кроме средств описания, включает также средства выполнения SPARQL запросов.

Созданная онтология формализует на языке OWL понятия МПР, описанной в разделе 2.2. МП представлена следующими классами и подклассами: Entity, Object, GroupObject, SystemObject. Для представления отношений используются встроенные возможности языка OWL.

МВ представлена на рис. 3.

МВч представлена классами GenerativeRelation, Known, Percepted и Proposal. Known – родительский класс для представления априорно известных объектов, Proposal – класс для объектов-предложений порождающих отношений (см. раздел 2.4.1).

Класс GenerativeRelation связан с классом Entity отношениями gen\_rel\_base и gen\_rel\_derivative, фиксирующими соответственно исходные и порождаемые сущности.

---

<sup>1</sup> <http://www.topquadrant.com/tools/modeling-topbraid-composer-standard-edition/>

<sup>2</sup> <http://www.w3.org/TR/owl2-overview/>

<sup>3</sup> <http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>

<sup>4</sup> <http://spinrdf.org/>

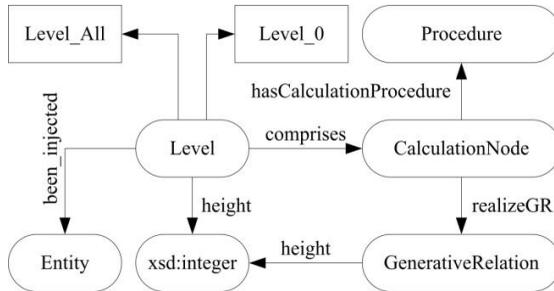


Рис. 3. Онтологическая модель вычислительного процесса

#### 2.4.1 Автоматизация процесса проектирования на базе правил

В рамках предложенной онтологии были реализованы запросы на языке SPARQL с использованием SPIN нотации. Запросы предназначены для частичной автоматизации процесса проектирования: формирование вариантов (предложений) порождающих отношений на основе объектов и отношений ПО; порождение уровней и узлов вычисления на основе порождающих отношений.

Кроме того, с помощью правил может быть реализована проверка на предмет того, что все элементы модели ПрО могут быть вычислены.

#### 2.4.2 Пример формализации

Рассмотрим простой фрагмент ПрО, онтологическая модель которого содержит классы «радар» (Р) и «батарея ПВО» (Б) и связывающее (Р) и (Б) отношение «выдавать целеуказание» (Ц).

Пример порождающего отношения – порождение (Б) на основе непосредственно воспринятого (Р). В этом случае нулевой УрВ ПОО включает в качестве фрагмента ММ (Р), а также УзВ для порождения (Б) и установления отношения (Ц) между (Р) и (Б). При этом (Б) будет относиться к фрагменту ММ первого УрВ. Соответствующие уровни и узел вычисления будут созданы в онтологии автоматически на основе данного порождающего отношения и соответствующего SPARQL запроса.

Другой пример порождающего отношения – установление отношения (Ц) между непосредственно воспринятыми (Р) и (Б). Соответствующий УзВ также будет включен в нулевой УрВ.

### 3 Заключение

Базовая онтология и основанный на ней подход позволяют упростить процесс проектирования и разработки ПОО БТС ВСА на этапе их прототипирования за счет автоматизации, использующей формальные представления артефактов проектирования и запросов на языке SPARQL.

Данный подход и онтология проектирования реализованы и апробированы при проектировании ПОО ИА, функционирующего в среде виртуального футбола.

В настоящее время ведется разработка средств генерации программного кода на заданном языке программирования на основе онтологии и средств его интеграции в инвариантный вычислительный каркас.

## Список литературы

- [**Gunetti et. al. 2010**] Gunetti P., Dodd T., Thompson H. A software architecture for Autonomous UAV Mission Management and Control //Proceedings of the AIAA InfoTech@Aerospace Conference. – 2010.
- [**Bowman et al., 2009**] Bowman C. L., Steinberg A. N. Systems Engineering Approach for Implementing Data Fusion Systems/ Llinas J., Hall D. L., Liggins M. E. (ed.). Handbook of Multisensor Data Fusion: Theory and Practice. – CRC Press, 2009. – С. 561-596
- [**Endsley, 1995**] Endsley M. R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems //Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society. – 1995. – Т. 37. – №. 1. – С. 32-64.
- [**Genesereth et al., 1987**] Genesereth M. R., Nilsson N. J. Logical Foundations of Artificial Intelligence. – Palo Alto: Morgan Kaufmann, 1987. – 406 с.
- [**Kokar et al., 2009**] Kokar, M.M., Matheus, C.J., Baclawski K. Ontology-based situation awareness //Information fusion. – 2009. – Т. 10. – № 1. – С. 83-98
- [**Steinberg et al., 2009a**] Steinberg A. N., Bowman C.L. Revisions to the JDL Data Fusion Model / Llinas J., Hall D. L., Liggins M. E. (ed.). Handbook of Multisensor Data Fusion: Theory and Practice. – CRC Press, 2009. – С. 44-67
- [**Steinberg, 2009b**] Steinberg A. N. Foundations of Situation and Threat Assessment / Llinas J., Hall D. L., Liggins M. E. (ed.). Handbook of Multisensor Data Fusion: Theory and Practice. – CRC Press, 2009. – С. 437-501
- [**Пантелеев, 2012**] Пантелеев М.Г. Концепция построения интеллектуальных агентов реального времени на основе модели опережающего итеративного планирования //Труды 12-ой национальной конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – Т 3. – С.25-33.
- [**Пантелеев, 2014**] Пантелеев М.Г. Формальная модель опережающего итеративного планирования действий интеллектуальных агентов реального времени //Труды 14-ой национальной конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014. – Казань: Физматлит, 2014. – Т 1. – С.323-334.

УДК 62.529+004.896+004.932.2+629.734.4

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ МУЛЬТИРОТОРНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОЛЕТА НАД ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ

М.М. Сурцук *(msurtsukov@gmail.com)*  
А.Д. Московский *(moscowskyad@gmail.com)*  
Московский физико-технический институт, НИЦ  
«Курчатовский институт», Москва

**Аннотация.** В статье описывается система управления и навигации мультироторным летательным аппаратом. Система разработана под управлением ROS и решает задачу движения летального аппарата вдоль заданной траектории, обозначенной пунктирной линией с помощью 4-х PID-регуляторов.

**Ключевые слова:** квадрокоптер, навигация, ROS, PID-регулятор.

### Введение

В последнее время расширяется использование мультироторов, в особенности квадрокоптеров. Рост вычислительной мощности вкупе с уменьшением размеров компьютеров и совершенствованием технологий беспроводной связи открыл путь к созданию небольших беспилотных летательных аппаратов в бытовых, коммерческих, а также военных целях. По сравнению с другими типами аппаратов, мультироторы обладают большей стабильностью полета при относительной простоте конструкции. Чтобы стимулировать развитие интереса у широкого круга любителей робототехники и выявлению интересных подходов решения задач в области навигации и управления мультироторными аппаратами, стали проводиться специализированные международные соревнования.

К ним относится RobotChallenge, являющийся одним из наиболее масштабных международных соревнований роботов (<http://www.robotchallenge.org/>). Одна из дисциплин в RobotChallenge - это AirRace - соревнование мультироторов, призванное показать способность роботов ориентироваться в пространстве и быстро и точно маневрировать. По регламенту нужно облететь 2 столба по заданной траектории максимальное количество раз за 10 минут, см. рис. 1.

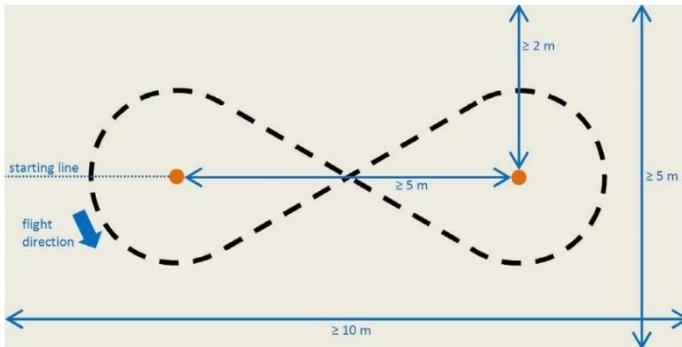


Рис. 1. Схема трассы

Засчитывается результат самого долгого непрерывного полета без участия человека. Контроль над полетом робота должен осуществляться с помощью ноутбука или джойстика для экстренного отключения в случае опасности. Для ориентировки робота в пространстве на земле на белом фоне нарисована черная пунктирная линия. Разрешается также наклеивать на трассу любые легко снимаемые метки.

Среди различных подходов участников соревнований к решению этой задачи можно выделить 3 основных:

1. С минимальной привязкой к трассе. Роботы летают «по памяти», изредка корректируя свое положение по различным самодельным меткам.
2. С абсолютным позиционированием себя на поле и использованием тэгов с изображения камер, различных дальномеров и т. д.
3. С ориентированием по пунктирной линии. Робот летает вдоль пунктирной линии, удерживаясь над ней.

Среди достоинств подходов первого типа можно выделить простоту их реализации и достаточно хорошую результативность на трассах с заранее известными траекториями. Главными же недостатками являются необходимость сложной подгонки алгоритма полета под конкретную трассу и, соответственно, невозможность полета по заранее неизвестным траекториям или при недостатке времени на подготовку. Также существует высокая вероятность слета с трассы вследствие накопления ошибки и невозможность возвращения на трассу.

Достоинствами подходов второго типа является их универсальность. Однако сложность реализации и довольно высокая вероятность сбоя в полете сильно препятствуют успешности их применения.

У подходов третьего типа основным достоинством является возможность полета по заранее неизвестным траекториям, несложная

настройка на конкретную трассу. Основным же недостатком является то, что это подходит только для круга задач с существующей заранее начерченной трассой.

## 1. Описание метода

Поскольку по условиям задачи можно пользоваться начерченной на земле траекторией, то был выбран подход третьего типа. В качестве летательного аппарата использовался квадрокоптер Parrot Ar.Drone 2.0. Аппарат размерами 52,5 x 51,5 см имеет на борту ЭВМ с операционной системой Linux; оснащен двумя видеокамерами, Wi-Fi модулем, рядом сенсоров; включает в себя компас, акселерометр, гироскопы, высотометр и др. В квадрокоптере уже реализованы алгоритмы стабилизации. Также разработчики предоставляют SDK (комплект средств разработки), позволяющий реализовать базовые функции управления, а также получать данные с квадрокоптера (показание сенсоров, видео).

В горизонтальной плоскости квадрокоптер симметричен относительно осей  $OX$ ,  $OY$ , из чего следует симметричность относительно точки  $O$ . Можно заметить, что естественным базисом, через который описывается любое движение квадрокоптера в пространстве, является движение вдоль осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  и поворот вокруг оси  $OZ$ , см. рис. 2. В модели управления пренебрегается наклонами вокруг осей  $OX$  и  $OY$ . Таким образом, управляющая скорость задается через сообщение скоростей по каждому из 4-х направлений в отдельности [Hoffman, 2007], что линеаризует задачу и позволяет до определенных пределов эффективно использовать PID-регуляторы.

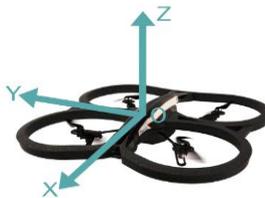


Рис. 2. Выделенные оси квадрокоптера

Таким образом, движение над линией сводится к использованию PID-регуляторов для каждого направления.

### 1.1 Описание программных модулей

Программный пакет был реализован в среде ROS [Quigley, 2010]. Он

состоит из 3 модулей, а также модуля **ardrone\_autonomy**, реализующего функцию приема/передачи данных.

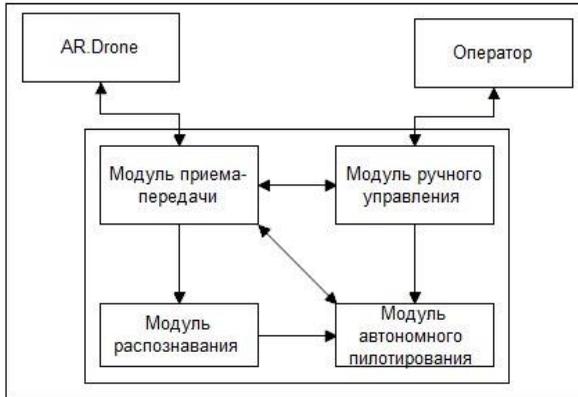


Рис. 3. Структура программного комплекса

В терминах ROS модуль - программный узел, модули взаимодействуют посредством, так называемых топиков, записывая (публикуя) в них сообщения заранее определенного формата. Модули, которые прослушивают эти топики – подписчики.

**Control – модуль, реализующий интерфейс взаимодействия квадрокоптера с человеком.** Этот модуль подписывается на топики, в которых `ardrone_autonomy` публикует навигационные данные. В нем реализуется возможность управления квадрокоптером с клавиатуры, запуска автономных режимов. Этот модуль позволяет экстренно отключить квадрокоптер, также выводит на экран вспомогательную информацию, такую как высота, скорость, заряд батареи, запускает окно с видео потоком от активной камеры на квадрокоптера.

**Video – модуль, обрабатывающий видеоданные квадрокоптера** с помощью библиотеки компьютерного зрения `OpenCV`. Модуль подписывается на специальный топик, в который `ardrone_autonomy` публикует изображения с активной камеры квадрокоптера, также создает топик для передачи распознанных параметров модулю управления. В модуле реализован алгоритм поиска прямоугольных ориентиров по следующей схеме:

1. Изображение преобразуется в черно-белое.
2. Размывается для устранения мелких помех и артефактов.
3. Преобразуется в двухцветное по некоторому порогу.
4. В отфильтрованном изображении ищутся контуры связанных областей [Фисенко, 2008].

5. Для каждого контура ищется обрамляющий прямоугольник с минимальной площадью.
6. Сравняются площади области и описывающего ее прямоугольника. Если площади отличаются более, чем на заранее подобранный параметр, то контур отбрасывается.

Далее список всех, распознанных объектов и их параметров (координаты, нормированные на единицу относительно размеров изображения, наклон, ориентацию) публикуется в созданный топик.

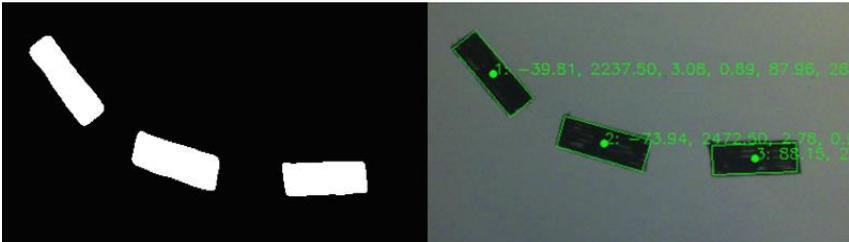


Рис. 4. Отфильтрованное изображение (слева) и обнаруженные контуры (справа)

**Pilot – модуль автономного пилотирования.** В задачи модуля входит формирование управляющего воздействия для квадрокоптера. Модуль поддерживает работу в нескольких режимах полета. Во всех режимах логика поведения различна, однако наибольший интерес имеет участок над линией. В этом режиме работа модуля основана на PID-регуляторах [Li, 2006]. Сначала найденные в **video** контуры дополнительно фильтруются: проверяется, чтобы площади контуров, а также отношения их высот к ширинам находились в заданных пределах, не подошедшие контуры также отсеиваются. Далее по центрам оставшихся контуров по методу наименьших квадратов строится прямая. Затем расстояние между этой прямой и началом координат (боковое смещение) и угол поворота в радианах (курсовой угол) прямой от вертикальной оси передаются в PID-регуляторы, см. рис. 5. Также в PID-регуляторы передаются отклонения от заданной высоты и скорость квадрокоптера.

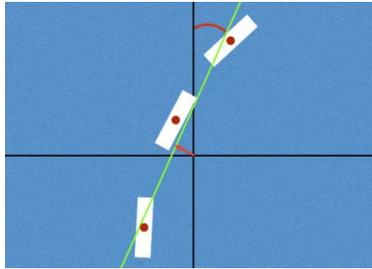


Рис. 5. Аппроксимирующая прямая, красная дуга – курсевой угол, красная стрелка – боковое смещение

Всего было реализовано 4 PID-регулятора на 4 базисных скорости, см. рис. 6:

1. Регулятор на курсовой угол  $A_z$ .
2. Регулятор на боковое отклонение  $L_y$ .
3. Регулятор на отклонение от заданной высоты  $L_z$ .
4. Регулятор на ошибку продольной скорости  $\Delta L_x$ .

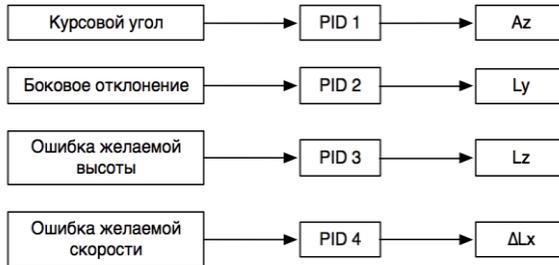


Рис. 6. Входные и выходные параметры PID-регуляторов

Начальные параметры PID-регуляторов были определены на основе математической модели квадрокоптера, построенной в среде Matlab. Далее они испытывались и корректировались на самодельном полноразмерном полигоне. При подборе PID-коэффициентов [Sellers, 2007] учитывалось следующее:

1. Камера 16:9 с углом обзора  $94^\circ$ , наклонена на  $5^\circ$  вперед, 30 FPS.
2. Координаты прямоугольников лежат в квадрате  $[-1;1]*[-1;1]$ .
3. За единицу принята скорость в 5 м/с.
4. Высота считается в метрах.
5. Скорости прохождения поворотов и прямых участков трассы слегка отличаются: 1.5 м/с и 2.5 м/с.

Таблица. 1. Параметры PID-регуляторов

<b>Параметр</b>	<b>P</b>	<b>D</b>	<b>I</b>
Боковое смещение от центра	0,14	60,0	0,017
Поворот	3,0	40,0	0,5
Недостаток заданной высоты	2,0	0,0	0,0
Недостаток продольной скорости	0,6	8,0	0,0

Для определения, на каком участке трассы находится квадрокоптер, используется подсчет прямоугольников и магнетометр. Для определения направления пролета над крестом прямоугольники разделяются на 2 множества по углу наклона, и учитывается только то множество, у которого модули углов меньше.

## 2. Эксперименты

Разработка и тестирование системы проводились на полномасштабном домашнем полигоне. Разработанная система показывает результаты в 46 кругов за 10 минут. Квадрокоптер стабильно держится над линией и не слетает с трассы при хорошем Wi-Fi соединении. Разброс значений времени отклика также достаточно мал, чтобы не учитывать его программно.

В ходе экспериментов выяснилось, что на искривленных участках конфликтуют PID-регуляторы на боковое смещение и поворот. При заходе на поворот с достаточно большой поперечной скоростью из-за бокового смещения эта скорость преобразуется в продольную, так как квадрокоптер поворачивается вдоль траектории. Таким образом, скорость может сильно колебаться на поворотах, однако настроенный PID-регулятор на продольную скорость позволяет нивелировать этот эффект. Также было выяснено, что вследствие довольно сильной инерционности квадрокоптера интегральный коэффициент обычно только мешает, вместо того чтобы сглаживать эффекты от случайных колебаний, он лишь добавляет инерционности. Влияние же дифференциального коэффициента наоборот делает поведение квадрокоптера менее инерционным.

**Встроенная система стабилизации квадрокоптера.** Система стабилизации и поддержания заданной скорости в самом квадрокоптере работает таким образом, что корректирующее ускорение пропорционально разности заданной скорости и текущей скорости, а значит, в краткосрочном плане переданная на квадрокоптер контролирующая скорость на самом деле будет восприниматься как ускорение (с предварительным вычитанием из заданной скорости текущей).

**Наклоны при сильных ускорениях.** Чем сильнее получившееся

корректирующее ускорение, тем сильнее квадрокоптер наклоняется, что означает также и наклон камеры в противоположную сторону. Для избегания такой ситуации рассчитывается смещение центра координат из-за наклона и вычитается из координат центров прямоугольников перед построением прямой.

Работа PID-регуляторов крайне сильно зависит от частоты кадров, поэтому для работоспособности системы частоту кадров необходимо поддерживать такой же, для которой настраивались PID-регуляторы (30 FPS).

## Заключение

Создана система, показывающая хорошие результаты (46 кругов) в несколько раз превосходящие лучшие результаты, которых добивались команды за всю историю этих соревнований (24 круга в 2015, 17 кругов в 2014, 13 кругов в 2013).

Опыт выступления на реальных соревнованиях показал, что основной уязвимостью является связь с квадрокоптером по каналу Wi-Fi. При плохой связи частота поступления изображений с квадрокоптера может снизиться и сильно нарушится настройка PID-регуляторов. Для избегания этого рассматриваются варианты переноса управляющего компьютера на борт квадрокоптера или переход к более мощному каналу связи с квадрокоптером.

## Список литературы

- [**Stafford, 2014**] Stafford, J. How a Quadcopter works | Clay Allen. // University of Alaska, Fairbanks. 2014.
- [**Hoffman, 2007**] Hoffman G., Huang H., Waslander S.L., Tomlin C.J. Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment // In the Conference of the American Institute of Aeronautics and Astronautics. Hilton Head, South Carolina. 20–23 August 2007.
- [**Quigley, 2010**] Quigley M., Gerkey B., Conley K., Faust J., Foote T., Leibs J., Berger E., Wheeler R., Ng. A. ROS: an open-source Robot Operating System. // 2010.
- [**Li, 2006**] Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. PID control system analysis and design - Problems, remedies, and future directions // IEEE Control Systems Magazine, 2006.
- [**Sellers, 2007**] Sellers D. An Overview of Proportional plus Integral plus Derivative Control and Suggestions for Its Successful Application and Implementation // 2007.
- [**Фисенко, 2008**] Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю., Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. // СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.

УДК 681.51

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБОТА С ПЕРЕМЕННЫМ ВЕКТОРОМ ТЯГИ

В.Е. Павловский (vlpavl@mail.ru)

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша  
Российской академии наук, МоскваС.Ф. Яцун, О.В.Емельянова, С.П.Стуканёва  
(teormeh@inbox.ru)ГОУ ВО "Юго-Западный государственный университет",  
Курск

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы математического моделирования движения робота – трикоптера с учетом массогабаритных свойств трёх электроприводов, снабженных редуктором. Приведена расчетная схема и составлены дифференциальные уравнения на основе общих теорем динамики, которые описывают взаимосвязанные электрические и механические процессы в электромеханической системе приводов винтов трикоптера. Предложенные нелинейные дифференциальные уравнения решаются совместно с кинематическими соотношениями, выражающие проекции угловой скорости тела на оси связанной системы координат через угловые скорости углов крена, тангажа и рысканья.

**Ключевые слова:** математическая модель, трикоптер, уравнения движения.

### Введение

Одной из перспективных конструкций беспилотных летательных роботов являются аппараты с изменяемым вектором тяги, называемые конвертопланами.

По конструктивному исполнению различают конвертопланы: с поворотным винтом (тилтроторы), с поворотным крылом (тилтвинг) и с винтами в кольцевых каналах.

Преимуществом конструкции конвертоплана с поворотными винтами перед остальными являются скоростные характеристики, получаемые за счёт того, что в режимах максимальных скоростей во время

горизонтального полёта винты тилтротора повернуты перпендикулярно направлению движения аппарата.

Рассмотрим конвертоплан типа трикоптер (рис.1) - это летательный аппарат с тремя несущими винтами из которых два вращаются в противоположных направлениях как показано на рисунке, а третий, расположенный на поворотном узле, позволяет отклонять его вектор тяги от вертикали и таким образом управлять полётом. Благодаря обтекаемой форме крыла, в горизонтальном полёте возникает подъёмная сила, удерживающая трикоптер в воздухе и аппарат может зависать, перемещаться в стороны, вверх и вниз.

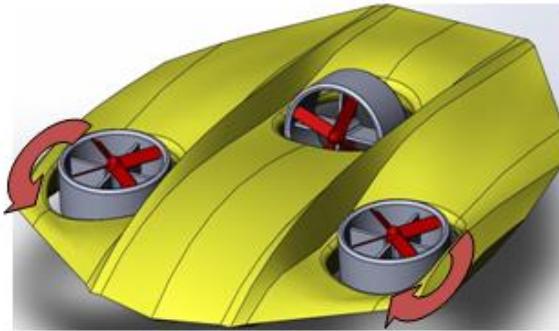


Рис.1. Общий вид трикоптера

Трикоптер является наиболее интересным аппаратом, поэтому разработка метода расчёта параметров системы управления на основе методов математического моделирования движения системы является актуальной.

## 1 Описание конструкции робота и принцип её действия

Трикоптер состоит из силового каркаса (рис. 2) на котором установлено основание 1, устройства вращения 2 и механизм поворота лопастей 3. На основании 1 закреплены блок питания, плата управления и приёмник сигнала, электрически связанные с приводами вращения лопастей 2 и 3.

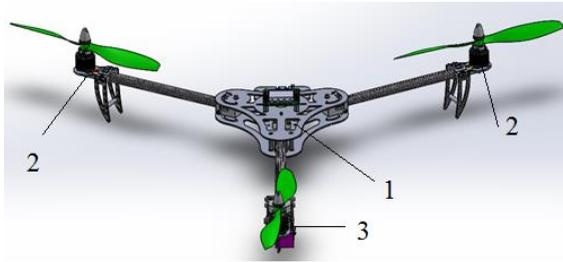


Рис.2. Общий вид силового каркаса трикоптера с изменяемым вектором тяги

## 1.1 Кинематика трикоптера

Рассмотрим основные координатные системы, используемые в работе для описания полета трикоптера (рис.3). Пусть положение центра масс трикоптера  $C$  совпадает с началом подвижной системы координат  $CX_1Y_1Z_1$ , связанной с корпусом коптера. В неподвижной декартовой системе координат положение центра масс коптера описывается координатами  $X, Y, Z$ .

Таким образом, матрица  $T_{10}$  получается путем перемножения трёх основных матриц вращения и имеет следующий вид [Павловский и др 2014а], [Павловский и др 1990, б]:

$$T_{10} = (\psi, \theta, \varphi) = R(Z_1, \psi)R(Y_1, \theta)R(X_1, \varphi) =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \cos \varphi \sin \psi & \sin \psi \sin \theta + \cos \psi \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta \sin \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & \cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \cos \psi \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

где  $\psi, \theta, \varphi$  - углы, определяющие ориентацию робота в пространстве.

Кинематические соотношения, выражающие проекции угловой скорости тела на оси связанной системы координат через угловые скорости указанных углов, могут быть представлены в виде [Павловский и др 2014а] :

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_{x1} \\ \omega_{y1} \\ \omega_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi} - \dot{\psi} \sin \theta \\ \dot{\theta} \cos \varphi + \dot{\psi} \cos \theta \sin \varphi \\ \dot{\psi} \cos \varphi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

где  $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$  – проекции угловой скорости тела на оси подвижной системы координат

Для изучения основных закономерностей движения трикоптера, особенностей системы управления, необходимо составить

математическую модель, описывающую пространственное движение летающего аппарата.

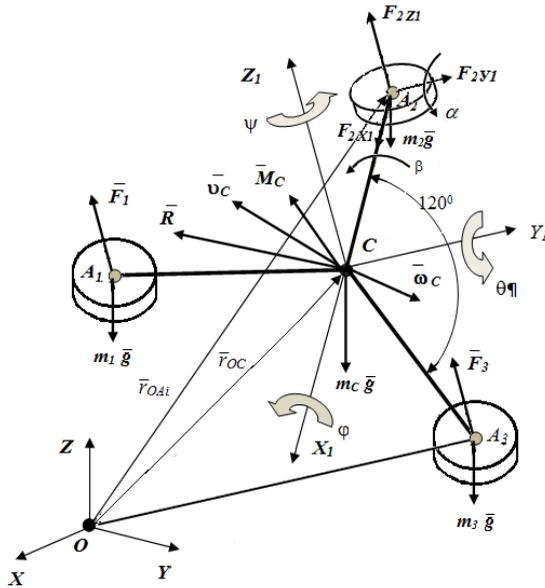


Рис.3. Расчетная схема трикоптера

## 2 Математическая модель трикоптера

Пусть трикоптер движется в неподвижной декартовой системе координат  $OXYZ$ , тогда  $CX_1Y_1Z_1$  – подвижные системы координат, проходящие через центр масс корпуса трикоптера  $C$  (рис.3).

В полёте на трикоптер действуют аэродинамические силы несущих винтов  $\vec{F}_i$ , приложенные к центрам масс роторов  $A_i$ , причем силы  $\vec{F}_i$  параллельны оси  $CZ_i$ . Силы тяжести корпуса  $m_Cg$  и роторов винтов  $m_i g$  приложены в точках  $C$  и  $A_i$  соответственно (рис. 3),  $\alpha, \beta$  - углы вращения поворотного узла ротора [Jatsun и др 2014a], [Попов и др 2014].

Кроме внешних сил  $\vec{F}_i$  на трикоптер, действуют внешние моменты  $M_i$ , создаваемые силами  $\vec{F}_i$  несущих винтов, сила сопротивления движению корпуса в воздушной среде  $\vec{R}_C^{(0)} = R_C(\vec{v}_C^{(0)})$ , а также подъёмная сила корпуса, характеризующаяся моментом вращению корпуса  $\vec{M}_C = \mu_C(\vec{\omega}_C)$ .

Здесь  $\mu_C$  – эмпирический коэффициент сопротивления,  $\vec{v}_C$  - скорость центра масс,  $\vec{\omega}_C$  – угловая скорость вращения центра масс аппарата.

На основании общих теорем динамики, по методике, изложенной в работах [Яцун и др 2014б], [Попов и др 2014], [Павловский и др 1990, б] получаем систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих изменение обобщенных координат трикоптера под действием внешних сил:

$$\begin{cases} \dot{v}_c^x = (\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi \sin \theta) \cdot (\sum F_i + R_x) / m \\ \dot{v}_c^y = (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \cos \psi \sin \varphi) \cdot (\sum F_i + R_y) / m \\ \dot{v}_c^z = \cos \varphi \cos \theta \cdot (\sum F_i + R_z) / m - g \\ \dot{\omega}_{x_1} = \left[ ((F_1 + F_3) \cdot l_0 \cdot \sin 60^\circ) - \omega_{y_1} \omega_{z_1} (J_i^{z_1} - J^{y_1}) - \omega_{y_1} \sum J_i^z \omega_i + M_{x_1}^c \right] / J^{x_1} \\ \dot{\omega}_{y_1} = \left[ -(F_1 + F_3) \cdot \sin 30^\circ \cdot l_0 + F_{2z} \cdot l_0 \right] - \omega_{x_1} \omega_{z_1} (J^{x_1} - J_i^{z_1}) + \omega_{x_1} \sum J_i^z \omega_i + M_{y_1}^c \Big/ J^{y_1} \\ \dot{\omega}_{z_1} = \left[ -(F_1 - F_3) \cdot d \right] - J_i^z \dot{\omega}_i - \omega_{x_1} \omega_{y_1} (J^{y_1} - J^{x_1}) + M_{z_1}^c \Big/ J^{z_1} \\ \dot{\varphi} = \omega_{x_1} - (\omega_{z_1} \cos \varphi + \omega_{y_1} \sin \varphi) \operatorname{tg} \theta \\ \dot{\theta} = \omega_{y_1} \cos \varphi - \omega_{z_1} \sin \varphi \\ \dot{\psi} = \frac{1}{\cos \theta} (\omega_{z_1} \cos \varphi + \omega_{y_1} \sin \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

В этих уравнениях:  $m$  – масса тела;  $v_c^x, v_c^y, v_c^z$  – проекции скоростей центра масс трикоптера на оси  $OX, OY, OZ$ ;  $J_{TP}$  – сумма моментов инерции вращения вокруг оси винта;  $I_x, I_y, I_z$  – осевые моменты инерции;  $d$  – аэродинамическая постоянная;  $l_0$  – расстояние между центрами конвертоплана и пропеллера.

### 3 Системы автоматического управления

Рассмотрим структурную схему управления трикоптером, представленную на рис. 4. В состав системы управления входят микроконтроллер (микрокомпьютер), логический регулятор, объект управления и обратные связи.

Управляющее напряжение питания ( $U_i=5B$ ) от микроконтроллера, через бесколлекторные драйверы, подается на каждый из двигателей (ОУ1, ОУ2, ОУ3) и сервоприводы (ОУ4, ОУ5), используемые для изменения вектора тяги поворотного винта. Управление приводами трикоптера генерируется бортовой системой управления по соответствующим алгоритмам.

В качестве датчиков обратной связи используются: акселерометр, магнитометр и гироскоп. Акселерометр показывает изменение скорости движения трикоптера в пространстве, магнитометр – положение в пространстве, гироскоп определяет значение углов поворота  $\varphi, \psi, \theta$ . Полученные данные приходят на микроконтроллер где сравниваются с требуемыми значениями параметров, которые сохранены в постоянном запоминающем устройством (ПЗУ). Величина ошибки по

соответствующим обобщенным координатам (функции  $x^*$ ,  $y^*$ ,  $z^*$ ) и углам (функции  $\varphi^*$ ,  $\psi^*$ ,  $\theta^*$ ), определяемые разностью между фактическими и заданными значениями, поступают на вход регулятора, который вычисляет значения управляющих напряжений  $U_1-U_5$ , подаваемых на электродвигатель, в соответствии с принятой стратегией  $U_i=U_i(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \Delta_\psi, \Delta_\theta, \Delta_\varphi)$ . При этом, важно обеспечить минимальное отклонение корпуса робота от заданной ориентации в пространстве.

Технически система "микроконтроллер и регулятор" может быть реализована на различной аппаратно-программной базе. Например, в качестве конкурентного решения может быть выбрана система РОБОКОН [В.Е.Павловский, В.В.Павловский 2013]. При необходимости реализации сложных вычислительных алгоритмов она может быть дополнена современным встраиваемым компьютером Raspberry Pi [Richard Grimmer 2014]. Он отличается малыми габаритами, низким энергопотреблением и большой вычислительной мощностью, может работать под ОС LINUX.

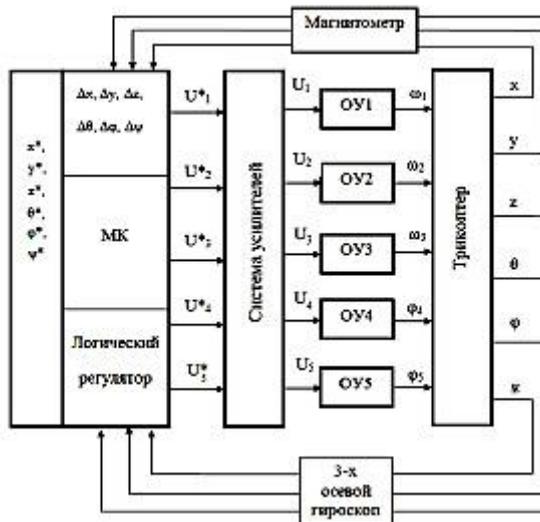


Рис 4. Структурная схема многоконтурной САУ

Заметим, в общем случае систему управления можно разделить на две части: первая - управление координатами центра масс трикоптера  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , вторая – управление углами рысканья  $\psi$ , тангажа  $\theta$  и крена  $\varphi$ .

## 4 Моделирование процесса полёта конвертоплана по траектории

Траектория полёта конвертоплана состоит из трех этапов: 1 – взлёт, 2 – движение по траектории, 3 – посадка, соответствующие результаты численного моделирования приведены на рисунках 5 и 6.

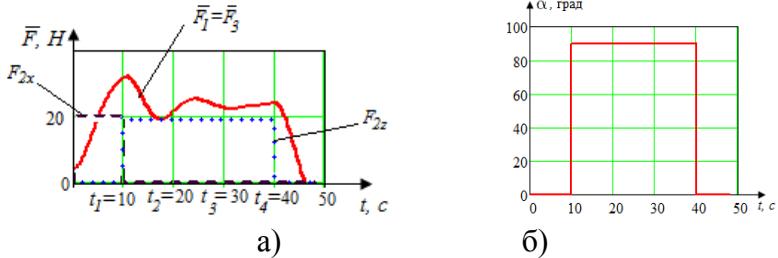


Рис. 5. Графики действия а - сил  $F_1$ - $F_3$  конвертоплана; б – угла поворота хвостового ротора от времени

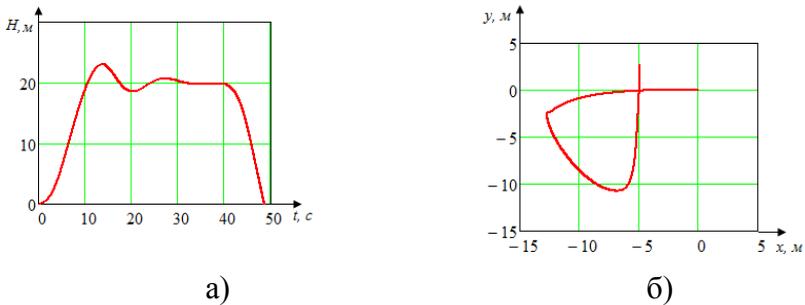


Рис.6. Графики режимов а - взлёта, висения и приземления (1 и 3 этапы); б – движения по траектории (2 этап) конвертоплана во времени

Моделирование показало ряд особенностей движения трикоптера. Так, установлено, что имеют место возникающие колебания в момент перехода системы из положения вертикального взлёта в положение горизонтального полёта, связанные с принятой стратегией интеллектуального управления.

## Выводы

Предложена расчетная схема и математическая модель пространственного движения конвертоплана, учитывающая гироскопические эффекты вращающихся винтов, массогабаритные свойства электроприводов, снабженных редукторами, кинематические

связи, свойства электродвигателей, алгоритмы выработки управляющих воздействий. Созданы инструментальные средства проектирования трикоптерных систем с изменяемым вектором тяги, позволяющие исследовать основные режимы и условия полёта аппарата с использованием различных методик стабилизации по трем углам  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ .

Трикоптеры могут эффективно дополнять группы известных квадрокоптерных аппаратов, например, в задачах контроля и инспекции территорий и других.

## Список литературы

- [Павловский и др 2014а] Павловский В.Е., Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Савицкий А.В. Моделирование движения квадроскопического летящего робота Моделирование и исследование процессов управления квадрокоптером. Робототехника и техническая кибернетика: научно-техн. журнал / Санкт-Петербург, №4(5)/2014. -С.49-57.
- [Jatsun и др 2014а] Jatsyn S.F., Pavlovsky V.E., Emelyanova O.V., Savitsky A.S. . Mathematical model of the quadrotor type unmanned aerial vehicle with neurocontroller. Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits: proceedings of the 18th International Conference on Circuits (CSCC'14) and proceedings of the 2014 International Conference on Mechatronics and Robotics, Structural Analysis (MEROSTA 2014), Santorini Island, Greece, 2014. - P. 46-50.
- [Яцун и др 2014б] Яцун С. Ф., Емельянова О.В., Савин А.И. Моделирование движения квадрокоптера при отклонении осей несущих винтов относительно корпуса // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2ч. Ч.1/ Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014.-С.329- 338.
- [Попов и др 2014] Попов Н.И., Емельянова О.В. Динамические особенности мониторинга воздушных линий электропередачи с помощью квадрокоптера // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/116-12773> (дата обращения: 16.04.2014).
- [Павловский и др 1990, б] Павловский М.А., Акинфеев Л.Ю., Бойчук О.Ф. Теоретическая механика. Динамика.-К.: Выща шк., 1990.-480 с.
- [В.Е.Павловский, В.В.Павловский 2013]. Масштабируемая система управления роботами РОБОКОН-1. // Информационно-измерительные и управляющие системы. М.: Издательство "Радиотехника" ISSN 2070-0814. №4, 2013, с.80-92.
- [Richard Grimmer 2014] Richard Grimmer. Raspberry Pi Robotics Projects. ПАСКТ, 2014, 278 p.

УДК 531.1

## ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ АВТОМОБИЛЕМ В ПРОЕКТЕ "АвтоНИВА"

В.Е. Павловский, В.Н.Огольцов  
([vlpavl@mail.ru](mailto:vlpavl@mail.ru))

Институт прикладной математики им.М.В.Келдыша  
Российской академии наук, Москва

И.А.Спиридонова  
Российский Государственный гуманитарный университет  
(РГГУ), Москва

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы создания беспилотных автомобилей, дан их обзор по материалам современной печати. Представлены результаты по созданию автоматической системы управления автомобилем "Нива", – описана система управления нижнего уровня, две зрительные системы, система обнаружения дорожных знаков и система обнаружения близких соседних автомобилей. Кратко представлены эксперименты с созданным автомобилем-роботом.

**Ключевые слова:** беспилотный автомобиль, система управления, нижний уровень управления, техническое зрение

### Введение

Современное состояние проблемы создания беспилотного автомобиля близко к ее полному решению. Научные группы и автопроизводители фактически уже предложили многое из того, что делает водителя не обязательным. Специалисты считают, на доведение "до ума" этих проектов будет достаточно ближайших пяти - десяти - двадцати лет (последнее – по осторожным оценкам).

Согласно литературным данным (Интернет, [<http://navya-technology.com/?lang=en>]) первый беспилотный автомобиль уже вышел на рынок. Это модель Navia (Induct Technologies, Франция), представляющая собой шаттл для перевозки пассажиров по территориям крупных предприятий или университетских кампусов (рис.1). Транспортное средство, продающееся с января 2014 года, движется со скоростью 20 км/ч и берет восемь человек. Эксплуатация этой машины уже доказала ее экономическую целесообразность, По оценкам экспертов

Navia снижает операционные расходы на 40-60%.



Рис.1. Navia от Induct Technologies, Франция



Рис.2. GoogleCar (США) на дороге общего пользования.

На рис.2 приведен хорошо известный другой пример – беспилотный автомобиль GoogleCar (на фото справа) корпорации Google (США). Отметим, приведенные примеры – это только весьма малая часть данных, имеющихся в литературе и Всемирной Сети Интернет.

*О задаче.* В настоящее время основные элементы системы беспилотного автомобиля прежде всего включают автоматiku управления. Кроме этого, по литературным данным ([dic.academic], [Д.А.Козорез, Д.М.Кружков. 2012], [В.П.Носков, И.В.Рубцов. 2013]) к ним нужно добавить еще несколько базовых элементов. Используя эти данные, перечислим базовые элементы, они указаны в п.1. Проект "АвтоНИВА", частично реализующий эти элементы, представлен в пп.2,3.

## 1 Задачи автоматического управления автомобилем

*Управление нижнего уровня.* Сюда относятся модули управления подсистемами и узлами автомобиля – двигателем, трансмиссией, рулем,

тормозами и т. п. Сейчас они могут основываться на микропроцессорных системах, которых уже множество устанавливается в серийные автомобили. Фактически, автоматика управления уже подготовлена.



Рис.3. Система ближнего и дальнего "зрения" машины. ИИ и зрение.

*Сенсоры автомобиля.* Все минимально необходимые сенсоры уже есть в распоряжении современных систем, это устройства автоматической парковки, активного круиз-контроля, системы удержания автомобиля в своей полосе, системы автоматического экстренного торможения и системы обнаружения пешеходов на проезжей части. Набор оборудования таков: радары, дальнометры и лидары (оптические радары), GPS. Следовательно, основной набор необходимых устройств уже серийно ставится на автомобили. Теперь главный вопрос - к программному обеспечению.

*ИИ в автомобиле.* ПО в автомобиле очевидно относится к области систем искусственного интеллекта (ИИ). Сегодня здесь основной элемент – системы зрения (рис.3). Мало уметь смотреть, надо видеть - то есть распознавать объекты и, исходя из этого, принимать решения. ПО автомобиля уже может распознавать дорожную разметку, дорожные знаки. Теперь вводятся системы для сопоставления наблюдаемых данных с информацией с карты (авто-локализация) и, при обнаружении расхождений между картой и реальностью, для корректировки своих алгоритмов поведения и карты (SLAM-алгоритмы). А далее участникам движения надо освоить связь между собой.

*Сети для автомобилей.* Сегодня системы "общения автомобилей" V2V (vehicle-to-vehicle) существуют только в виде прототипов, но к 2017 году в США уже могут быть утверждены требования об обязательном оснащении всех новых моделей таким оборудованием. Соответствующие стандарты связи — в разработке. Суть этих решений в том, что автомобили будут обмениваться с соседями по потоку движения информацией о своих географических координатах, скорости, а также

ускорении или торможении. Причем обмен данными будет происходить как минимум 10 раз в секунду. Это позволит "умным машинам" предугадывать опасные ситуации примерно за 300 м и самостоятельно предпринимать действия, чтобы их избежать.



Рис.4. Концепция V2V

*Умная дорога.* Следующий этап — это интерактивное взаимодействие машины с дорогой и окружением. Например, возможно, что дорожный знак сможет принудительно ограничивать скорость автомобиля. Но этим функции "умной дороги" не ограничиваются.

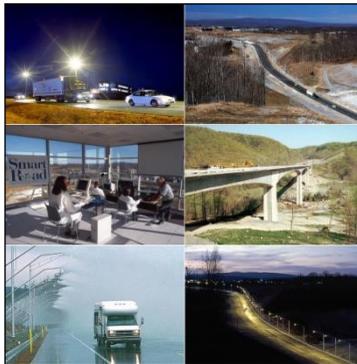


Рис 5. Элементы "умной дороги". Вирджиния, США

Дорога сможет контролировать и регулировать поток транспорта, давать команды машинам таким образом, чтобы они группировались в колонны, более эффективно используя дорожное полотно. Беспилотные машины могут двигаться на небольшой дистанции, и, при необходимости перегруппировываться наиболее рационально, тем самым

существенно увеличивая пропускную способность дороги. И это далеко не единственные концепции умной дороги.

*Взаимодействие участников движения.* Перечисленными элементами задачи автовождения не ограничиваются. В последнее время появились работы, изучающие характер и принципы взаимодействия роботов в большом коллективе. Автономные автомобили – один из ярких примеров этого направления. В указанной предметной области появилось, к примеру, направление РобоЭтика ([\[http://edurobotics.ru/archives/1028\]](http://edurobotics.ru/archives/1028)), определяющее правила взаимодействия роботов. И хотя начиналась РобоЭтика как свод этических правил взаимоотношения роботов и людей, по-видимому, РобоЭтика может быть распространена и на отношения роботов в робоколлективе и будет определять ПДД будущего и общее поведение робоавтомобилей на дороге [[www.theatlantic.com](http://www.theatlantic.com)].

## 2 "АвтоНИВА": система управления нижнего уровня

В Институте прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН разрабатывается система "АвтоНИВА" – комплекс аппаратных и программных средств автовождения для автомобиля НИВА ВА3-21214.

Общая структура автомобиля как автоматически управляемого транспортного средства может быть представлена в виде схемы, изображенной ниже на рис.6, в блоках СНУ и СВУ приведены примеры систем этих классов [В.Е.Павловский и др. 2013].



Рис 6. Система управления робота-автомобиля.

Для изучения проблемы управления автомобилем с механической трансмиссией в проекте "АвтоНИВА" разработана динамическая модель в среде MATLAB\Simulink с использованием библиотеки компонентов SimScare. Для задания характеристик модели использовались технические

характеристики автомобиля ВАЗ-21214 "НИВА". С помощью этой модели были решены следующие задачи:

- моделирование и исследование динамики автомобиля при заданном векторе управления трансмиссией;
- подбор параметров отдельных узлов для достижения заданных характеристик устройств управления;
- синтез алгоритмов контроллера трансмиссии.

Общая схема динамической модели автомобиля с механической трансмиссией представлена на рис.7 (обозначения даны в нотации Simulink).

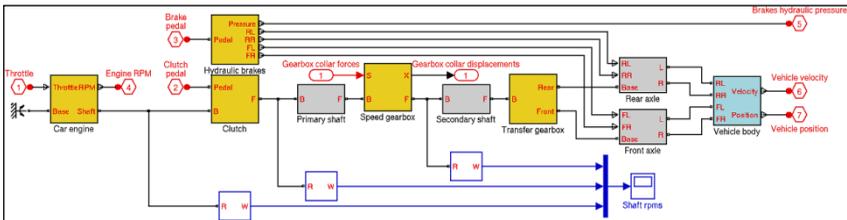


Рис 7. Полная динамическая модель автомобиля.

Все блоки модели детализированы как субмодели, разработаны контроллеры и устройства управления узлами трансмиссии. Примеры двух устройств приведены на рис.8 – показаны привод сцепления (тормоза) и привод руля.



Рис 8. Приводы сцепления (тормоза) и руля в "АвтоНИВе".

Проведенные эксперименты показали полную адекватность созданных моделей поставленной задаче. Автомобиль под управлением созданных устройств и алгоритмов обеспечивает точности движения, практически аналогичные достижимым при управлении от человека. Динамика трогания и движения на низших передачах также сохраняется.

### 3 "АвтоНИВА": зрительные системы опознавания дорожных знаков и соседних автомобилей

Для "АвтоНИВЫ" разработаны базовые системы распознавания объектов дорожной ситуации - автомобилей и дорожных знаков - на видео, получаемом с движущейся монокулярной камеры. Реализовано машинное обучение, для распознавания использованы каскадные классификаторы Хаара. Использовано распознавание по цвету и форме. Примеры приведены на рис.9 и 10.

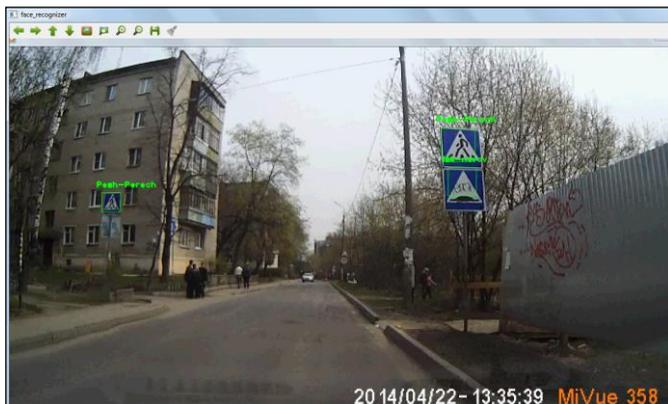


Рис 9. Распознавание знаков в реальной дорожной сцене.

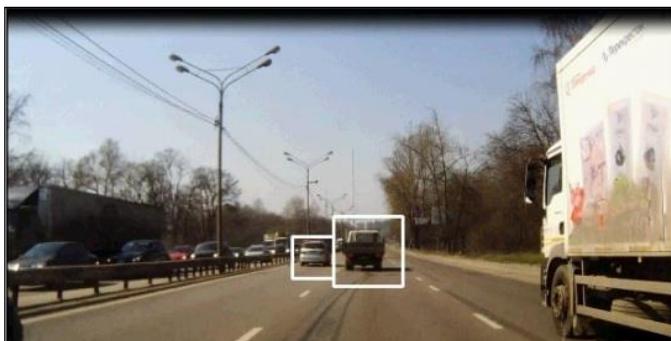


Рис 10. Распознавание автомобилей в реальной дорожной сцене.

Созданные системы достаточно эффективно решают представленные задачи.

## Выводы

Предложены реальные системы управления автомобилем "НИВА" в режиме, близком к автоматическому. Созданные системы относятся к первым базовым элементам систем автовождения, указанным выше в постановке общей задачи – системе управления нижнего уровня и системе автоматического зрения автомобиля-робота. Эксперименты показывают их достаточную эффективность и адекватность поставленным задачам.

По результатам экспериментов можно сделать вывод, что созданные системы могут служить базисом для развития комплексных систем беспилотного автомобиля.

Проект АвтоНИВА поддержан грантом РФФИ РАН 13-08-01118-а.

## Список литературы

- [<http://navya-technology.com/?lang=en>] <http://navya-technology.com/?lang=en>  
 [dic.academic] <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1619790>  
 [Д.А.Козорез, Д.М.Кружков. 2012] Д.А.Козорез, Д.М.Кружков. Состав и структура автономных систем навигации и управления роботизированного прототипа автомобиля. // Спецтехника и Связь. 2012, №3, с.15-18.  
 [В.П.Носков, И.В.Рубцов. 2013] В.П.Носков, И.В.Рубцов. Ключевые вопросы создания интеллектуальных мобильных роботов. // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2013. № 3(15).  
 [<http://edurobotics.ru/archives/1028>] <http://edurobotics.ru/archives/1028> Роботэтика: философские, социальные и этические последствия робототехники.  
 [www.theatlantic.com] <http://www.theatlantic.com/technology/archive/2013/10/the-ethics-of-autonomous-cars/280360/> The Ethics of Autonomous Cars.  
 [В.Е.Павловский и др. 2013]. В.Е.Павловский, В.Н.Огольцов, Н.С. Огольцов. Система управления нижнего уровня для автомобиля с механической трансмиссией. // Препринт ИПМ № 103, Москва, 2013 г. 28 с.

УДК 62-523.8

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ КОММУТАЦИЯ БОРТОВЫХ ПОСАДОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ БПЛА С ОТКРЫТЫМИ КОНТАКТНЫМИ ПЛОЩАДКАМИ ЗАРЯДНОЙ ПЛАТФОРМЫ

В.С. Фетисов (*v.fetisov@ieee.org*)Ш.Р. Ахмеров (*shamil1810@list.ru*)Р.В. Сизоненко (*roman.sizonenko9@gmail.com*)

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

**Аннотация.** В статье рассматриваются наземные зарядные станции для подзарядки электрических беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на основе открытых контактных площадок. Представлена одна из оригинальных разработок авторов – зарядная станция на основе матриц так называемых интеллектуальных контактов. Достоинствами разработки является возможность постановки БПЛА на зарядку в условиях неточной посадки, способность обеспечивать зарядку одновременно нескольких аппаратов, а также большая, относительно других известных решений, площадь контактирования.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, зарядка, аккумуляторная батарея, зарядная станция, посадочная платформа.

### Введение

Несмотря на серьезные технологические достижения в области повышения энергоемкости литий-полимерных аккумуляторов, являющихся на сегодняшний день основным типом бортовых источников питания для малых БПЛА, их зарядки хватает обычно на 30-40 мин полета для аппаратов вертолетного типа, или 3-4 часа для аппаратов самолетного типа. Для выполнения многих задач этого недостаточно. Поэтому регенерация источников питания БПЛА (замена или зарядка) является довольно острой проблемой, особенно для БПЛА вертолетного типа, которые более энергозатратны. Далее речь пойдет именно об аппаратах вертолетного типа – вертолетах, мультикоптерах, конвертопланах и других аппаратах, способных совершать вертикальные взлет и посадку (VTOL – Vertical Take-Off and Landing).

Проще всего регенерацию источников питания можно осуществлять на специальных наземных станциях (стационарных или мобильных),

расположенных вблизи зоны действия БПЛА или по маршруту его следования. Хотя существуют и другие способы, описанные например в [Фетисов и др., 2013]. Краткую классификацию и возможные варианты реализации наземных регенерационных станций можно найти в [Fetisov et al., 2012]. По выполняемым функциям эти станции можно разделить на станции замены источников питания и станции подзарядки аккумуляторов (на станциях замены источников питания часто реализуется также еще и функция зарядки снятых с аппаратов разряженных аккумуляторов).

Станции подзарядки можно классифицировать по способу подвода энергии к БПЛА на 3 типа:

- *контактные двухполюсные*, в которых передача энергии производится на постоянном токе посредством двух подводящих проводов, соответствующих полюсам бортового аккумулятора; при этом количество контактов, осуществляющих передачу напряжения, - минимум два, но может быть, как показано дальше, и гораздо больше;

- *контактные однопроводные*, в которых передача энергии осуществляется на переменном токе посредством одного электрода большой площади, на который и производится посадка БПЛА. Преобразование переменного тока в постоянный и управление процессом зарядки аккумулятора в этом случае должно производиться устройствами, расположенными на борту. Преимуществом такой посадочной платформы является отсутствие жестких требований к качеству контактирования бортового и наземного электродов;

- *бесконтактные*, в которых передача энергии от наземной платформы на борт летательного аппарата осуществляется посредством переменного магнитного поля, охватывающего витки приемного контура на борту и передающего контура на земле. Возможны различные варианты реализации такого способа: это может быть сделано, например, посредством связанных резонансных контуров [Kurs et al., 2007] или путем отбора энергии с линии электропередач с помощью разъемных кольцевых магнитопроводов [Marshall, 2008].

При посадке БПЛА на наземную зарядную платформу в силу разных причин сложно избежать различных погрешностей приземления и соблюдения точное позиционирование аппарата, при котором бы обеспечивалось правильное соединение друг с другом бортовых и наземных стыковочных элементов. Поэтому разработка зарядной станцией с такой посадочной платформой, на которой зарядка аппарата могла бы осуществляться при любом его положении – это актуальная задача. Более того, желательно, чтобы на такой платформе могло бы обслуживаться одновременно несколько аппаратов. Из трех перечисленных выше способов подвода энергии к БПЛА для решения данной задачи пригодны все, однако контактные двухполюсные зарядные

станции обладают наибольшим КПД передачи энергии. Кроме того, в этом случае, в отличие от двух других способов, нет необходимости размещать на борту БПЛА какие-либо дополнительные преобразователи и управляющие процессом зарядки устройства, - это все может быть расположено на земле. В данной статье речь идет именно о контактных двухполюсных зарядных станциях.

Контактирование соответствующих бортовых и наземных электродов может быть реализовано, например, с помощью штепсельных соединителей, однако в этом случае потребуются либо довольно точная посадка БПЛА, либо специальный механизм (например, колесное шасси) и подсистема управления, реализующие подход аппарата к штепсельному соединителю уже после посадки. Однако для малых БПЛА такой путь неоправданно сложен и приводит к утяжелению аппаратов. Авторами в качестве основной идеи для разработки была принята концепция открытых контактных площадок. Эта концепция состоит в формировании массива специальным образом организованных плоских контактных площадок, которые в совокупности со специальными электронными устройствами могут обеспечивать посадку одного или одновременно нескольких БПЛА с открытыми электродами бортового аккумулятора и следующую за этим подзарядку от наземного источника.

## **1 Принцип действия зарядной станции на основе матриц интеллектуальных контактов**

Посадочная платформа предлагаемой зарядной станции включает в себя большое количество контактных площадок-электродов, избыточное относительно простого двухполюсного соединения. Каждая площадка является т.н. "интеллектуальным контактом", поскольку к ней подсоединена электронная схема, в функции которой входит определение величины и полярности напряжения на этой площадке (если оно передано от приложенного бортового посадочного электрода) и подключение к этой контактной площадке соответствующего напряжения от наземного источника питания. Предположим, контактные площадки имеют квадратную форму и изолированы узкими промежутками. Если бортовые посадочные электроды, к которым подключены полюса аккумулятора бортсети, имеют плоскую прямоугольную форму ("лыжи"), то ширина этих электродов должна быть немного больше зазора между наземными контактными площадками, а расстояние между бортовыми электродами должно быть больше диагонали квадрата площадки (для избежания замыкания полюсов).

Каждый узел управления интеллектуальным контактом представляет собой функциональную связку "Усилитель – Анализатор – Коммутатор",

которая проще всего реализуется на основе стандартных микроконтроллеров. Фрагмент схемы управления подключением контактных площадок на основе микроконтроллера DD1 (ATMEGA32L-8AU) показан на рис.1. Один микроконтроллер может управлять подключением /отключением восьми контактных площадок.

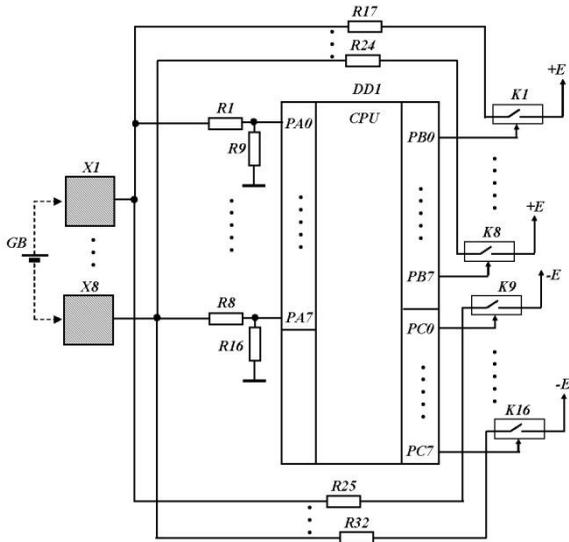


Рис.1. Схема управления подключением контактных площадок на основе микроконтроллера

Контактные площадки X1-X8 через резистивные делители R1, R9 – R8, R16 подключены к портам ввода аналоговых сигналов PA0 – PA7 микроконтроллера DD1. В дежурном режиме микроконтроллер производит циклический опрос этих портов и анализ их состояния. После посадки БПЛА на матрицу контактных площадок на отдельных из них появляется напряжение, имеющее относительно земли положительную или отрицательную полярность. Номера выявленных активных площадок и соответствующие полярности запоминаются, после чего обращения к портам PA0 – PA7 прекращаются, а на отдельные из цифровых портов вывода PB0 – PB7, PC0 – PC7 выдаются управляющие сигналы для подключения через ключевые элементы K1 – K16 и токоограничивающие резисторы того или иного полюса зарядного источника E. Команда на размыкание ключей формируется этим же контроллером по сигналам из других подсистем. Преимущество такой схемы управления состоит в том, что измерительная и исполнительная части разделены, непосредственная обратная связь между ними отсутствует, а следовательно, отсутствуют

предпосылки для случайных сбоев, обусловленные наличием такой связи. Кроме того, практически отсутствуют ограничения на количество одновременно коммутируемых контактных площадок.

Таким образом, после приземления на платформу часть площадок, находящихся под бортовыми электродами, будет активирована, т.е. подключена к соответствующему полюсу наземного зарядного источника (рис.2).

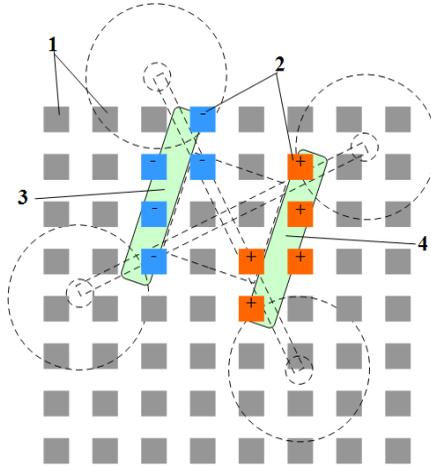


Рис.2. Схема подключения контактных площадок после приземления квадрокоптера на платформу: 1 – неактивированные площадки, 2 – активированные площадки, 3 – отрицательный бортовой электрод, 4 – положительный бортовой электрод

## 2 Функционирование бортового и наземного оборудования после посадки БПЛА на зарядную платформу

Рассмотрим более детально, как в рамках предложенного подхода может функционировать бортовое оборудование БПЛА и наземное оборудование на зарядной платформе после посадки аппарата на нее.

Пусть источником питания БПЛА является многосекционная литий-полимерная аккумуляторная батарея GB1 (рис. 3). Для безопасной зарядки таких батарей весьма желательно, кроме регулирования зарядного тока по определенной программе, выравнивать напряжения на отдельных секциях батареи. Это делается с помощью специальных контроллеров заряда батареи – балансеров. В данном случае такой контроллер ВС расположен на борту БПЛА. Регулирование тока зарядки осуществляется посредством управляемых низкоомных резисторов  $R_u$ . В функции

контроллера ВС входит мониторинг состояния не только при зарядке, но и в полете. Параметры состояния батареи через передатчик RTB периодически передаются на землю.

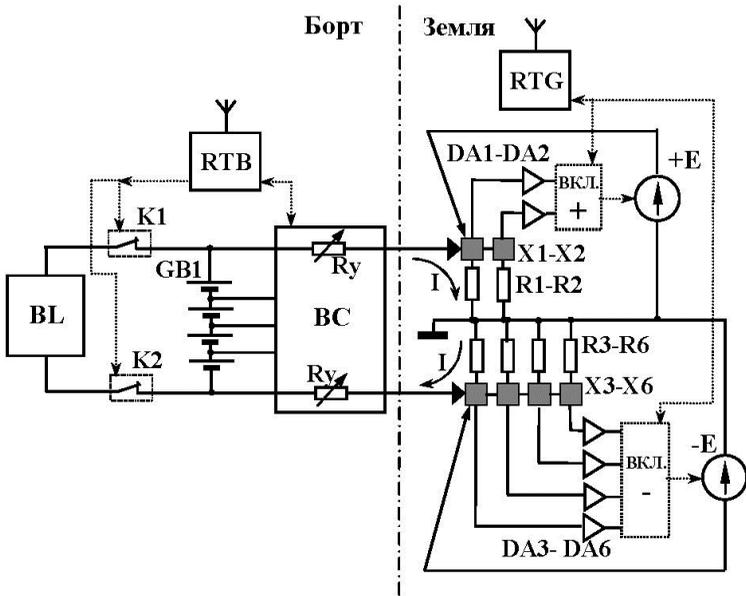


Рис.3. Схема функционирования бортового и наземного оборудования после посадки БПЛА на зарядную платформу

Предположим, при посадке под одним бортовым посадочным электродом оказались контактные площадки X1-X2, а под другим – X3-X6. Между связками этих контактных площадок будет приложено остаточное напряжение батареи GB1. Каждая из контактных площадок соединена с землей посредством соответствующего резистора сопротивлением порядка 100 кОм (R1-R2 и R3-R6). Таким образом, образуется замкнутая цепь "Батарея GB1 – низкоомные резисторы Ry – параллельное соединение резисторов R1-R2 - параллельное соединение резисторов R3-R6". Через указанные соединения резисторов протекает ток I, который создает соответствующие падения напряжения на связках площадок X1-X2 и X3-X6. Эти падения напряжения в общем случае не равны, и их соотношение зависит от количества площадок под каждым из бортовых электродов. Но полярность этих падений напряжений относительно земли всегда будет противоположной. Эти разнополярные напряжения усиливаются до уровней насыщения усилителями DA1-DA2 и DA3-DA6 (входят в состав микроконтроллера, показанного на рис.1). В

соответствии с выявленной полярностью напряжения, приложенного к контактным площадкам, схемы включения зарядных источников ("Вкл.+" и "Вкл.-") подключают к площадкам тот или иной источник (+Е или –Е). Для нормальной зарядки значение ЭДС последовательно включенных источников 2Е должно быть на несколько вольт больше напряжения на электродах максимально заряженной батареи GB1.

После подключения наземных зарядных источников через наземный приемопередатчик RTG на бортовой приемопередатчик RTB уходит команда на запуск процесса зарядки. Одновременно с этим посредством ключей K1, K2 от батареи GB1 отключаются основные бортовые потребители энергии. При этом маломощный RTB не обесточивается – он либо имеет свой собственный источник, либо не отключается от GB1, т.к. мало влияет на процесс зарядки. После завершения процесса зарядки контроллер батареи ВС формирует соответствующее сообщение для RTB, который инициирует подключение потребителей к батарее GB1 и передает команду для RTG на отключение зарядных источников от площадок. После этого с RTG на RTB может поступить команда на запуск двигателей.

## **2 Предпочтительные форма и расположение площадок**

Большой зарядный ток можно передать на БПЛА только, если площадь контакта бортовых и наземных электродов достаточна для его пропускания. Эта площадь взаимного контактирования зависит от формы контактных площадок, от величины зазора между ними, от размеров и формы бортовых посадочных электродов.

Аналитически оценить площадь контактирования при различных положениях электродов довольно сложно. Поэтому в среде LabView была написана специальная имитационная программа, позволяющая при заданных форме и размерах бортового посадочного электрода оценить площадь его контактирования с матрицей наземных контактных площадок для всевозможных вариантов расположения. Были проанализированы различные формы и расположения контактных площадок (рис.4).

Наиболее предпочтительны оказались квадратные площадки с укладкой со сдвигом. При увеличении зазоров между площадками разница между исследуемыми вариантами становится более резко выраженной. При уменьшении же зазоров разница между вариантами вполне ожидаемо становится меньше и в пределе исчезает (кроме вариантов с круглыми площадками).

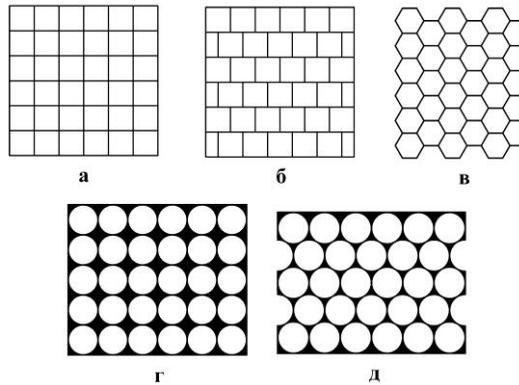


Рис.4. Варианты форм и укладки контактных площадок: а - квадратные с матричной укладкой, б - квадратные с укладкой со сдвигом, в - гексагональные, г - круглые с матричной укладкой, д - круглые с плотной укладкой

Качество контактирования сильно зависит от того, насколько бортовые и наземные электроды плотно прижаты друг к другу. Имеет смысл устанавливать наземные площадки на подпружиненные основания. Это позволяет создать максимально плотный контакт между плоским бортовым электродом и наземными площадками после посадки аппарата.

## Заключение

Относительная сложность платформ с матрицами интеллектуальных контактов компенсируется их очевидными достоинствами: возможностью посадки БПЛА в любой точке платформы и обслуживания группы БПЛА одновременно, а также большой площадью контактирования.

## Список литературы

- [Фетисов и др., 2013] Фетисов В.С., Тагиров М.И., Мухаметзянова А.И. Подзарядка электрических беспилотных летательных аппаратов: обзор существующих разработок и перспективных решений // *Авиакосмическое приборостроение*. - 2013. - № 11. – С. 7-26.
- [Fetisov et al., 2012] Fetisov V., Dmitriyev O., Neugodnikova L., Bersenyov S., Sakayev I. Continuous monitoring of terrestrial objects by means of duty group of multicopters // *Proceedings of XX IMEKO World Congress "Metrology for Green Growth"*, 9-14 Sept. 2012, Busan, Republic of Korea. P.86.
- [Kurs et al., 2007] Kurs A. et al., *Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances* // *Science*. - 2007. - Vol. 317. - № 6. - Pp. 83-86.
- [Marshall, 2008] Marshall P.T. Power line sentry charging. US Patent 7318564. Publ. 15.01.2008.

УДК 629.7.017.2

## ФОРМИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ БЕЗОПАСНОГО АВТОНОМНОГО ЗАВЕРШЕНИЯ ПОЛЕТА ДПЛА С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ СЕРТИФИКАЦИИ

В.М. Шибяев (v.shibaev@yahoo.com)  
Д.В. Аполлонов (d\_apollo@progtech.ru)  
В.А. Матвеев (mvamvv@yandex.ru)  
Т.Л. Кобцева (zaharova\_tl@mail.ru)  
ЦЭСАТ ЦАГИ, Жуковский

**Аннотация.** В работе рассмотрены примеры траекторий движения «квадрокоптера» в случаях вероятных функциональных отказов для выбора сценария завершения полета в режиме автоматического управления с целью обеспечения приемлемого уровня безопасности дистанционно пилотируемой авиационной системы (ДПАС) при аварийном завершении полета. В качестве параметров управления рассмотрена суммарная тяга комбинаций тяг двигателей, а в качестве критериев безопасности - расстояния, проходимые от точки вероятного отказа до места приземления, и значения кинетической энергии при приземлении.

**Ключевые слова:** дистанционно пилотируемый летательный аппарат (ДПЛА), квадрокоптер, отказ несущих двигателей ДПЛА.

### Введение

Применение дистанционно пилотируемых авиационных систем в едином воздушном пространстве возможно при условии достижения существующего уровня безопасности гражданской авиации.

Путем анализа реальных авиационных происшествий были выделены основные причины событий (аварии, катастрофы), которыми являются:

- Отказ маршевого двигателя или его систем;
- Отказ элементов бортовой системы управления (вычислитель, доплеровский измеритель скорости и угла сноса, радиовысотомер малых высот);
- Превышение установленных ограничений, связанных с эксплуатацией ДПАС в целом;
- Некорректный учет комплекса случайных эксплуатационных

- факторов, влияющих на практические летные характеристики.
- Некорректный учет факторов, влияющих на безопасность маневров в вертикальной плоскости при огибании рельефа местности или искусственных сооружений [Гулевич и др., 2011], [Распопов, 2010].

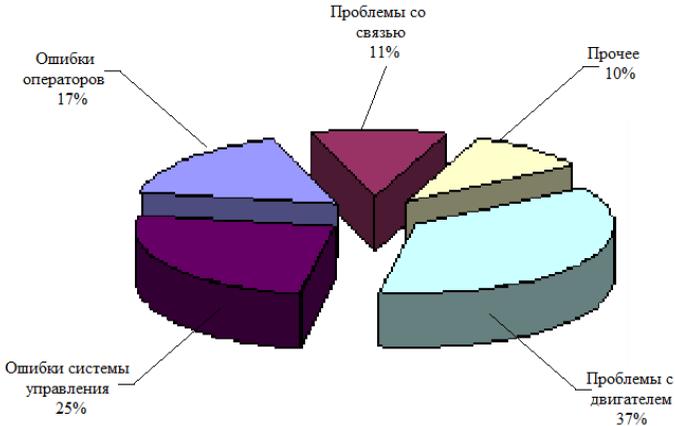


Рисунок 1. Основные причины потерь ДПЛА.

Задача обеспечения требуемого уровня безопасности ДПАС, равного уровню безопасности пилотируемой авиации, распадается на ряд подзадач, связанных с наземным комплексом управления, каналом связи и собственно дистанционно пилотируемым летательным аппаратом. В данной работе рассмотрен отказ в работе несущих двигателей ДПЛА.

## 1 Математическая модель объекта исследований

Траектория движения ДПЛА при нескольких видах отказов была рассмотрена на примере движения «квадрокоптера».

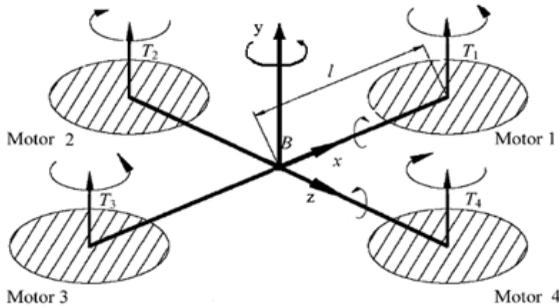


Рисунок 2. Схема летательного аппарата типа квадрокоптер (с четырьмя несущими винтами).

Движение «квадрокоптера» рассматривается в постановке задачи движения твердого тела с шестью степенями свободы. Соответственно описание движения осуществляется шестью независимыми дифференциальными уравнениями (1). Линейные перемещения описываются в земной системе координат для удобства отслеживания траектории движения аппарата. [Bouabdallahetal, 2009]

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{X} = (\sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{Y} = -g + (\cos \vartheta \cos \gamma) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{Z} = (\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma) \frac{U_1}{m} \\ \dot{\omega}_x = -\frac{I_{ZZ} - I_{YY}}{I_{XX}} \omega_y \omega_z + \frac{J_{TP}}{I_{XX}} \omega_z \Omega + \frac{U_2}{I_{XX}} \\ \dot{\omega}_y = -\frac{I_{XX} - I_{ZZ}}{I_{YY}} \omega_x \omega_z + \frac{U_4}{I_{YY}} - M_y^{\omega_y} \cdot \omega_y \\ \dot{\omega}_z = -\frac{I_{YY} - I_{XX}}{I_{ZZ}} \omega_x \omega_y - \frac{J_{TP}}{I_{ZZ}} \omega_x \Omega - \frac{U_3}{I_{ZZ}} \end{array} \right. \quad \text{Система (1),}$$

В системе уравнений (1):  $U_1$ - суммарная сила тяги всех винтов [Н];  $U_2, U_3, U_4$ -моменты сил, создаваемых тягой винтов «квадрокоптера» [Н м] относительно осей OX, OZ, OY, соответственно,  $\Omega$  - результирующая угловая скорость вращения пропеллеров, определяющая гироскопический момент вращающихся винтов [ $c^{-1}$ ],  $I_{XX}, I_{YY}, I_{ZZ}$  - главные моменты инерции [ $H \cdot m \cdot c^2$ ],  $J_{TP}$  - суммарный момент инерции вращающихся винтов

относительно их осей  $[Н \cdot м \cdot с^2]$ ,  $M_y^{\omega y}$  - коэффициент демпфирования, относительно оси ОУ. Выражения для величин  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$ ,  $\Omega$  представлены в следующей системе:

$$\begin{cases} U_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ U_2 = lb(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ U_3 = lb(-\Omega_1^2 + \Omega_3^2) \\ U_4 = d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ \Omega = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4, \end{cases} \quad (2),$$

где  $l$  - расстояние от центра масс «квадрокоптера» до центра пропеллера,  $b$ ,  $d$  - коэффициенты, определяющие зависимость силы тяги и реактивного момента винтов от квадрата угловых скоростей вращения винтов.

В работах, связанных с моделированием движения «квадрокоптера», обычно принимается, что тяга винта двигателя  $T_i = b \cdot \Omega_i^2$ .

Чтобы учесть влияние движения винта вдоль оси, следует принять во внимание зависимость тяги от поступи, описываемой в классической теории аэродинамики винта [Александров, 1951]:

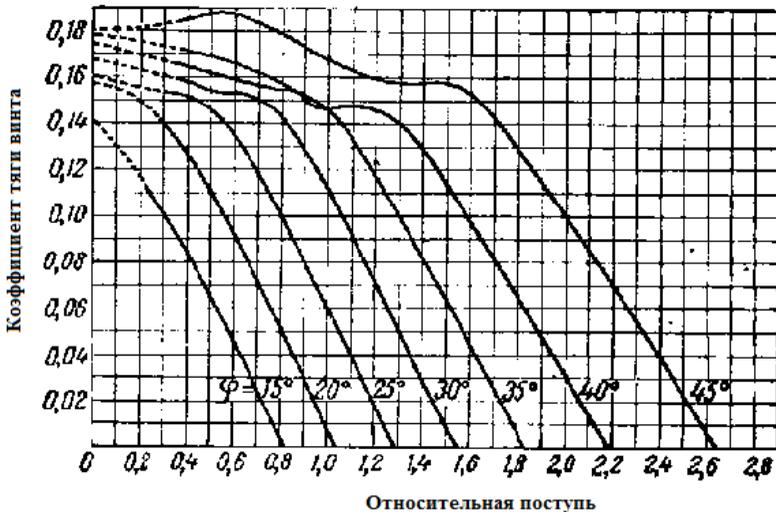


Рисунок 3. Зависимость коэффициента тяги винта от относительной поступи для семейства винтов с разными углами установки.

В формуле вычисления реальной силы тяги «квадрокоптера» учтена зависимость силы тяги пропеллеров от скорости движения несущего винта вдоль оси вращения:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= b\left(\frac{1}{4b}U_1 - \frac{1}{2bl}U_3 - \frac{1}{4d}U_4\right)\left(1 - \frac{k}{\max \Omega_1}(V_y + \omega_z l)\right) \\
 T_2 &= b\left(\frac{1}{4b}U_1 - \frac{1}{2bl}U_2 + \frac{1}{4d}U_4\right)\left(1 - \frac{k}{\max \Omega_2}(V_y - \omega_x l)\right) \\
 T_3 &= b\left(\frac{1}{4b}U_1 + \frac{1}{2bl}U_3 - \frac{1}{4d}U_4\right)\left(1 - \frac{k}{\max \Omega_3}(V_y - \omega_z l)\right) \\
 T_4 &= b\left(\frac{1}{4b}U_1 + \frac{1}{2bl}U_2 + \frac{1}{4d}U_4\right)\left(1 - \frac{k}{\max \Omega_4}(V_y + \omega_x l)\right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $k = 20$  – коэффициент линейной зависимости тяги несущего винта от относительной поступи,  $V_y$  – вертикальная скорость квадрокоптера в связанной системе координат.

## 2 Алгоритм реализации управления квадрокоптером.

В качестве входных (управляющих) параметров задается полная тяга  $U_j$  и моменты сил, действующих на квадрокоптер со стороны двигателей,  $U_2, U_3, U_4$ .

Значения углов Эйлера (4) используются в системе уравнений движения (1) при получении компонентов скорости «квадрокоптера» в связанной системе координат  $V_x, V_y, V_z$ , координат  $x, y, z$  и угловых скоростей аппарата  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ .

$$\left\{ \begin{aligned}
 \dot{\gamma} &= \omega_x - \dot{\psi} \sin \vartheta \\
 \dot{\theta} &= \omega_z \cos \gamma + \omega_y \sin \gamma \\
 \dot{\psi} &= \frac{\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma}{\cos \vartheta}
 \end{aligned} \right. \tag{4}$$

Для моделирования в качестве основных параметров аппарата были взяты параметры одного из существующих «квадрокоптеров» [Bresciani, 2008]:

Используя вышеприведенные уравнения, создана математическая модель аппарата, блок-схема которой имеет замкнутый характер с обратными связями.

В качестве примера, на рисунке 4 показаны результаты моделирования ситуаций отказа одного двигателя (Motor 1), отказа двух двигателей (Motor 1 и Motor 3), в случае, если дополнительное вмешательство системы управления отсутствует, а также отказ одного двигателя (Motor 1) с последующим увеличением тяги остальных двигателей.

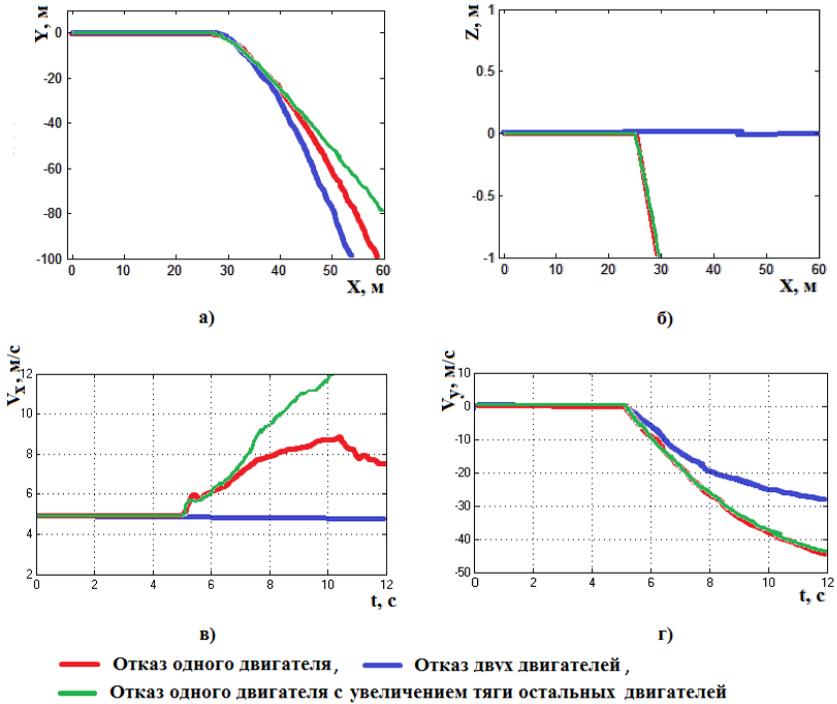


Рисунок 4. а) траектория движения вдоль осей  $OX, OY$ , б) траектория движения вдоль осей  $OX, OZ$ , в) зависимость скорости движения в земной системе координат от времени, г) зависимость скорости движения в земной системе координат от времени.

Из результатов расчета видно, что в случае отказа двух двигателей «квадрокоптер», совершая падение с высоты 100 м, перемещается вдоль направления оси  $X$  на расстояние 30 м, относительно оси  $Z$  – перемещение отсутствует. При отказе одного двигателя «квадрокоптера» траектория его движения предсказуема и имеет уклонение от направления первоначального движения, но в случае увеличения тяги работающих двигателе может оказаться предпочтительней по пройденному расстоянию от точки отказа до приземления.

При отказе двух двигателей, величина поступательной скорости  $V_x$  в земной системе координат не изменяется до соприкосновения с землей (уменьшается на 0,2 м/с). Компонента скорости  $V_y$  вырастает при отказе одного из двигателей значительней, чем при одновременном отключении двух противоположных двигателей.

Сценарий аварийного автоматизированного завершения полета путем

выключения симметричного двигателя может быть использован при рассмотрении случая отказа одного из двигателей.

На основании результатов можно прогнозировать, что в случае отказа двигателя летательного аппарата типа «квадрокоптер» на высоте 100 метров можно избежать столкновение с объектами, находящимися внутри зоны 70м по направлению полета и слева от точки траектории в момент отказа.

На основании результатов выполнения данной работы формируется алгоритм («сценарий») закона управления, позволяющий сократить опасную область в случае отказа одного или двух двигателей путем программного изменения тяги оставшихся двигателей и, тем самым, целенаправленно сместить точку касания в желаемом направлении.

## Заключение

Проведенные расчеты иллюстрируют особенности траектории движения «квадрокоптера» и позволяют выбрать сценарий управления двигателями при типовых отказах, чтобы уменьшить риск неблагоприятного столкновения при приземлении.

Предложенная модель рассматривает замкнутый контур управления, который позволяет выбрать реализацию сценария избегания нежелательного столкновения вследствие отказа одного двигателя.

Ожидаемым результатом работы будет алгоритм выбора закона управления при отказах одного или более двигателей обеспечивающего управляемое снижение и безопасное завершение полета летательного аппарата типа «квадрокоптер».

## Список литературы

- [Александров, 1951] Александров В. Л.. Воздушные винты. // Государственное издательство оборонной промышленности, Москва, 1951.
- [Гулевич и др., 2011] Гулевич С. П., Веселов Ю. Г.. Системный анализ факторов, влияющих на безопасность полета беспилотных летательных аппаратов. Формирование перечня аварийноопасных режимов полета беспилотных летательных аппаратов. // Безопасность полетов, Москва, 2011.
- [Распопов, 2010] Распопов В. Я.. Микросистемная авионика: учебное пособие. – Тула: «Гриф и К», 2010.
- [Bouabdallahetal, 2009] Samir Bouabdallah, Roland Siegwart. Full Control of a Quadrotor. // Autonomous System Lab, Swiss Federal Institute of Technology, ETHZ, Zurich, Switzerland, 2009.
- [Bresciani, 2008] Tommaso Bresciani. Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter. Department of Automatic Control. Lund University, October, 2008.

УДК 004.02

## АЛГОРИТМЫ ЦЕЛОЧИСЛЕННОЙ АРИФМЕТИКИ В ЗАДАЧАХ РАСЧЕТА ТРАЕКТОРНОГО ДВИЖЕНИЯ

М.В. Хачумов (*khmike@inbox.ru*)

Институт системного анализа РАН, Москва

**Аннотация.** В статье описаны целочисленные алгоритмы отработки прямолинейных движений и поворотов. Эта группа операций составляет основу обобщенного геометрического преобразования, связанного с управлением траекторным движением. За основу взят базовый алгоритм Брассини, который использует только целые числа и операции над ними.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** алгоритм Брассини, целочисленный алгоритм, поворот, управление, роботизированная система.

### Введение

В задачах управления роботизированными системами, например, звеньями манипуляторов, бортовыми поворотными видеокерами, перемещениями летательных аппаратов и др. возникает необходимость расчета положения и ориентации твердых тел в дискретные моменты времени. Передаваемые команды управления содержат код каждого из заранее определенных маневров, параметры указанного маневра, данные о моменте начала маневра и его окончания. Объекты совершают сложное пространственное движение, которое рассматривается как комбинация поступательного и вращательного движений некоторой точки или совокупности точек. Из-за ограничений на производительность бортовых вычислительных ресурсов малых подвижных автономных средств, возникают задачи быстрой отработки аффинных преобразований [Абрамов и др., 2014], [Абрамов и др., 2013] достаточно простыми средствами. Один из подходов к решению задачи расчета движений связан, например, с использованием алгоритмов семейства CORDIC [Хачумов, 2014], [Байков и др., 1986], позволяющих выполнять быстрые аффинные преобразования на аппаратном уровне. Здесь скорость обработки находится в прямой зависимости от разрядности операндов.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-07-31020 и 15-07-00925).

Недостатком подхода является необходимость нормализации результатов поворота путем масштабирования. В настоящей работе рассматривается альтернативный подход к реализации алгоритмов поворота связанный с использованием целочисленной арифметики. Среди множества алгоритмов, способных решить эту задачу можно особо выделить алгоритмы Брассини [Braccini, 1995], которые активно используются зарубежными исследователями и инженерами, например, для аппаратной реализации вращений [James, 1996] и ряда других приложений. Укажем на некоторые относительно новые работы этого направления. Так в статье [Eberly, 2008] изыскиваются пути рациональной реализации операции поворота, в том числе с приближением функций синуса и косинуса для набора углов рациональными числами. Отметим работу, представленную на сайте с открытыми кодами Leptonica [Rotation, 2011], в которой рассматривается алгоритм поворота на произвольный угол. В работе [Eberly, 2014] рассмотрено решение задачи и приведен псевдокод алгоритма преобразования системы координат с помощью операции поворота.

В настоящей работе рассматривается способ решения задачи плоского целочисленного поворота общего вида на основе базового алгоритма Брассини для генерации прямых линий.

## 1 Постановка задачи

Пусть движение материальной точки реализуется в следующей последовательности: поворот вокруг оси OZ на угол  $\alpha$ , поворот вокруг оси OY на угол  $\beta$ , поворот вокруг оси OX на угол  $\gamma$ ; перенос на величины  $[x_t, y_t, z_t]$ . После умножения исходного вектора положения объекта  $[x \ y \ z \ 1]$ , представленного в однородных координатах, на обобщенную матрицу преобразования получаем результирующий вектор  $[X_R \ Y_R \ Z_R \ 1]$ . С учетом выбранного порядка действий имеем следующую группу преобразований поворота:

$$\begin{aligned} Z_1 &= y \sin(\gamma) + z \cos(\gamma), \quad Y_1 = y \cos(\gamma) - z \sin(\gamma), \\ X_1 &= Z_1 \sin(\beta) + x \cos(\beta), \quad Z_2 = Z_1 \cos(\beta) - x \sin(\beta), \\ Y_2 &= X_1 \sin(\alpha) + Y_1 \cos(\alpha), \quad X_2 = X_1 \cos(\alpha) - Y_1 \sin(\alpha). \end{aligned} \quad (1)$$

Заключительная группа операций обобщенного геометрического преобразования связана со смещением объекта и имеет вид:  $X_R = X_2 S_x + x_t$ ,  $Y_R = Y_2 S_y + y_t$ ,  $Z_R = Z_2 S_z + z_t$ , причем  $S_x = S_y = S_z = 1$ . Известно, что кинематические уравнения, связывающие проекции  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  вектора абсолютной угловой скорости тела с углами поворота

$\phi_x, \phi_y, \phi_z$  (углы Эйлера-Крылова), определяющими угловое положение относительно базовой системы координат, имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_x = \frac{1}{\cos(\varphi_y)}(\omega_x \cos(\varphi_z) - \omega_y \sin(\varphi_z)); \\ \dot{\phi}_y = \omega_x \sin(\varphi_z) + \omega_y \cos(\varphi_z); \\ \dot{\phi}_z = \frac{1}{\cos(\varphi_y)}(\sin(\varphi_y)[\omega_y \sin(\varphi_z) - \omega_x \cos(\varphi_z)] + \omega_z \cos(\varphi_y)). \end{cases}$$

Система уравнений позволяет вычислять угловые скорости для последовательности поворотов объекта на углы  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  при известных оценках текущих значений  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  по информации специального измерителя. Вычисления на основе операций поворота целесообразно вести в следующей последовательности:

$$\begin{aligned} x &= \omega_x \cos(\varphi_z) - \omega_y \sin(\varphi_z), \quad \dot{\phi}_y = \omega_x \sin(\varphi_z) + \omega_y \cos(\varphi_z), \\ z &= -x \sin(\varphi_y) + \omega_z \cos(\varphi_y), \quad \dot{\phi}_x = \frac{x}{\cos(\varphi_y)}, \quad \dot{\phi}_z = \frac{y}{\cos(\varphi_y)}. \end{aligned}$$

Представляет практический интерес задача нацеливания видеокамеры, которая ставится следующим образом: по известным начальному направлению камеры  $(\alpha_1, \beta_1)$  и координатам искомого объекта на плоскости изображения  $(x_2, y_2)$ , определить параметры управления камерой в виде двух углов поворота  $\alpha, \beta$ , необходимых для перевода вектора наблюдения из начальной точки в конечную. Решение задачи требует выполнение двух операций поворота и содержится в работе [Абрамов и др., 2013].

Из рассмотренных задач видно, что операции поворота и смещения являются ключевыми в расчетах траекторного движения. Обобщенное преобразование применяется многократно и позволяет выполнять манипуляции над объектами. Повороты и смещения, как правило, осуществляются на малые величины, что обеспечивает необходимую плавность перемещения. Скорость выполнения подобных операций, связанных с вычислением тригонометрических функций в реальном времени для решения задач определения местоположения и ориентации должна соответствовать требованиям реального времени. Таким образом, ставится задача быстрого расчета и обработки движений в бортовых ЭВМ на основе целочисленных алгоритмов.

## 2 Алгоритм Брассини для генерации точек линии

Рассмотрим алгоритм, реализующий прямолинейное движение с использованием только целочисленных операндов. В соответствии с предложением работы [Braccini, 1995] точка с целыми координатами  $(X, Y)$  принадлежит прямой линии, выходящей из начала координат с коэффициентом наклона  $K = (\Delta Y / \Delta X)$ , если выполняется условие:

$$|Y - (\Delta Y / \Delta X \cdot X)| \leq \varepsilon,$$

где  $|\varepsilon| \leq 1/2$ . Используя только целочисленные переменные  $X, Y, \Delta X, \Delta Y$ , получим следующее условие принадлежности точки искомой линии:

$$-\Delta X \leq 2\Delta Y \cdot X - 2\Delta X \cdot Y \leq \Delta X.$$

Тогда для возрастающей последовательности значений  $X$ , отличающихся на единицу, соответствующие значения  $Y$  можно найти на основе проверки выполнения приведенного соотношения.

Соответствующий целочисленный алгоритм генерации точек линии первой четверти приведен на рис. 1. Здесь  $k$  – количество выводимых точек.

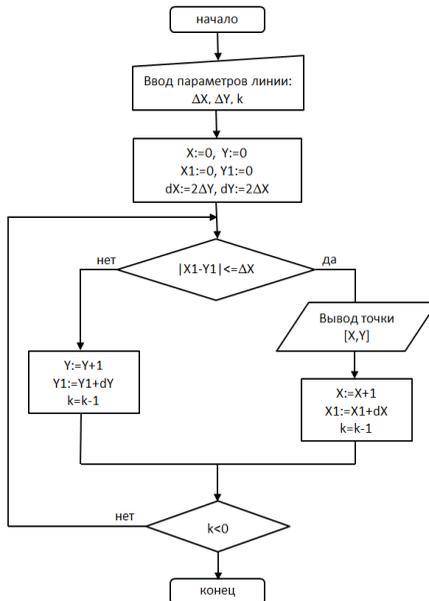


Рис. 1 – Целочисленный алгоритм генерации отрезка прямой линии

Применительно к задаче управления, алгоритм может быть

использован для расчета трассы движения объекта под любым заданным углом в реальном масштабе времени.

### 3 Операция поворота на основе алгоритма Брассини

Без потери общности будем рассматривать задачу плоского поворота. Исходный объект (твердое тело) представляется в общем случае в виде матрицы элементов - системы физических точек, причем в простейшем случае имеем единственную точку  $(X, Y)$ . Требуется выполнить поворот системы точек на заданный угол.

Предлагаемый алгоритм поворота основан на использовании модели Брассини [Braccini, 1995]. Новые координаты  $(X', Y')$  точки  $(X, Y)$  определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} X' &= (M/L) \cdot X + (N/L) \cdot Y, \\ Y' &= -(N/L) \cdot X + (M/L) \cdot Y, \end{aligned}$$

При выполнении преобразования поворота, в общем случае, угол поворота  $\alpha$  задается тройкой  $(M, N, L)$  целых чисел, причем  $L^2 = M^2 + N^2$ ,  $M/L = \cos(\alpha)$ ,  $N/L = \sin(\alpha)$ . Таблица синусов и косинусов в виде отношений целых чисел вычисляется заранее и хранится в памяти системы управления поворотом.

Для последовательности значений координат  $X$  и  $Y$ , соответствующие значения  $X'$  и  $Y'$  можно найти на основе проверки выполнения соотношения:

$$\begin{aligned} |2LX' - 2MX - 2NY| &\leq L, \\ |2LY' + 2NX - 2MY| &\leq L. \end{aligned}$$

Время выполнения алгоритма поворота оценивается, как  $O(k)$ , где  $k$  — число точек объекта.

Автором написана программа, реализующая целочисленный алгоритм выполнения геометрических преобразований над матрицей точек на плоскости и проведена серия экспериментов. Программа использует только операции алгебраического сложения, сдвига и сравнения целых чисел, что снижает требования к аппаратным средствам и может дать ускорение при микропрограммной реализации в бортовой ЭВМ. Описанный метод решения задач плоского прямолинейного движения и поворота может быть расширен для выполнения пространственных преобразований над трехмерными объектами.

### Заключение

Решение траекторных задач требует расчета положения и ориентации

подвижного объекта при задании управления в виде аффинной процедуры преобразования исходной системы координат. В настоящей работе рассмотрен алгоритм быстрого преобразования поворота на основе предложений Брассини для генерации линий. Алгоритм использует для своей реализации только целые числа и операции над ними, не опирается на прямое вычисление тригонометрических функций, что обеспечивает целесообразность его применения в системах управления камерой в мобильных подвижных системах при ограничениях на вычислительные ресурсы. Предполагается, что целочисленные алгоритмы лягут в основу полнофункциональных средств управления траекторным движением беспилотного летательного аппарата и наведения на заданную цель бортовых средств технического зрения. Кроме того, встраиваемое в бортовой вычислитель программное обеспечение обеспечит определение углов ориентации и параметров движения; навигацию и управление при полете по заданной траектории; стабилизацию углов ориентации в полете.

## Список литературы

- [Абрамов и др., 2014] Абрамов Н.С., Хачумов М.В. Моделирование управления бортовой видеокамерой беспилотного летательного аппарата // Авиакосмическое приборостроение, №3, 2014, с. 9-16
- [Абрамов и др., 2013] Абрамов Н.С., Ромакин В.А. Методы управления поворотной видеокамерой // Известия Южного федерального университета. Технические науки, №7 (144), 2013, с. 173-179.
- [Хачумов, 2014] Хачумов В.М. Программно-аппаратное управление поворотной видеокамерой летательного аппарата // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики. Материалы 3-й научно-практической конференции. – Ульяновск: SIMJET, 2014, с. 413-419.
- [Байков и др., 1986] Байков В.Д., Вашкевич С.Н. Решение траекторных задач в микропроцессорных системах ЧПУ. – Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986.
- [Braccini, 1995] Braccini C., Cocurullo F., Lavagetto F. A Fast Algorithm for High Quality Vector Quantization Codebook Design // Proceeding ICIAP '95 Proceedings of the 8th International Conference on Image Analysis and Processing – Springer-Verlag London, UK, 1995, ISBN: 3-540-60298-4, pp. 643-648.
- [James, 1996] James T.C. Kaba, Jackson N. J. Method and apparatus for rotating and scaling images // United States Patent № 5,568,600, Oct. 22, 1996.
- [Eberly, 2008] Eberly D. Integer-Based Rotations of Images. – Geometric Tools, LLC, 2008. – <http://www.geometrictools.com/Documentation/IntegerBasedRotation.pdf>.
- [Rotation, 2011] Rotation. – <http://www.leptonica.com/rotation.html>.
- [Eberly, 2014] Eberly D. Converting Between Coordinate Systems. – Geometric Tools, LLC, 2014.

## Авторский указатель

Аполлонов Д.В. ....	123	Магид Е.А. ....	18
Афанасьев И.М. ....	18	Матвеев В.А. ....	123
Ахмеров Ш.Р. ....	115	Московский А.Д. ....	66, 91
Бодунков Н.Е. ....	42	Огольцов В.Н. ....	107
Боковой А.В. ....	26	Павловский В.Е. ....	99, 107
Борисов Е.Г. ....	50	Панов А.И. ....	74
Буйвал А.К. ....	10	Пантелеев М.Г. ....	83
Волков В.Ю. ....	50	Пилипенко А.Ю. ....	58
Воробьев В.В. ....	34	Сагитов А.Г. ....	18
Данилов И.Ю. ....	18	Сизоненко Р.В. ....	115
Добрынин Д.А. ....	6	Спиридонова И.А. ....	107
Емельянова О.В. ....	99	Стуканёва С.П. ....	99
Ивашина Е.А. ....	58	Сурцуков М.М. ....	91
Ким Н.В. ....	42	Фетисов В.С. ....	115
Кобцева Т.Л. ....	123	Филимонков А.А. ....	58
Корлякова М.О. ....	58	Хачумов М.В. ....	130
Крылов И.Г. ....	42	Шибяев В.М. ....	123
Лебедев С.В. ....	83	Яцун С.Ф. ....	7, 99









**ВТОРОЙ ВСЕРОССИЙСКИЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР  
«БЕСПИЛОТНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ  
СРЕДСТВА С ЭЛЕМЕНТАМИ  
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА»**

**в рамках международной научно-технической конференции  
«Экстремальная робототехника (ЭР-2015)»**

9 октября 2015

г. Санкт-Петербург, Россия

**Труды семинара**

ISBN 978-5-906782-78-6



9 785906 782786

Подписано в печать 24.09.2015

Формат 60x84/16. Печать – цифровая.

Тираж 200 экз. Объем 8,75 п.л.

Бумага офсетная. Заказ №716.

Отпечатано в типографии «Политехника-сервис»  
с оригинал-макета заказчика.