

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ МУЛЬТИКОПТЕРА В ПРОСТРАНСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Э.Р. Алиев¹, И.М. Ахмедов¹, У.К. Курбанлы¹, А.Ш. Алмасов¹, Ф.М.
Салманов¹

¹Институт Систем Управления Министерства Науки и Образования
Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджан
e-mail: elchin@sinam.net, islam@sinam.net, uzeyir@sinam.net, askar.almasov@sinam.net,
fuad.salmanli@sinam.net

Абстракт. Существующие системы противодействия БПЛА и средства радиоэлектронной борьбы составляют сегодня большую угрозу не только для автопилотирования мультикоптеров, но и для удаленного их управления, что, помимо всего, также таит в себе определенные проблемы, связанные с отказами связи, ошибками оператора, задержками и неточностями в управлении. Для решения этих проблем предлагается использовать систему автопилотирования мультикоптера на новых принципах, подразумевающих размещение на борту дополнительных средств резервного управления и обеспечения полёта по заданной траектории. Система автопилотирования для типового мультикоптера проектируется в виде обособленного модуля, который отличается транспарентностью с точки зрения интерфейса управления. В статье на базе нечеткого полетного контроллера предлагается алгоритм формирования траектории движения мультикоптера в условиях активной работы систем противодействия БПЛА и средств радиоэлектронной борьбы. В качестве входных характеристик базовой нечеткой модели рассматриваются результаты распознавания изображений с маршрутной карты в шести секторах поверхности Земли.

Ключевые слова: Мультикоптер, Траектория полета, Признак распознавания, Нечеткое множество, Система нечеткого вывода, Нечеткий контроллер.

AMS Subject Classification: 94D05, 93C42.

1. Введение

Широкое применение беспилотных технологий с начала 21-го века существенно актуализировало развитие средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), особенно их применению в особо контролируемых зонах. В результате это инициировало проведение активных научных исследований в этом направлении, что подтверждается многочисленными научными публикациями на протяжении последнего десятилетия [7] и целым рядом концептуальных разработок по созданию систем и технологий противодействия БПЛА в виде CUAV (Counter Unmanned Aerial Vehicles), CUAS (Counter Unmanned Aircraft Systems),

CUAV-system, AUDES (Anti-UAV Defence System), Counter-Drone Systems, ADT (Anti-Drone Technology) и Counter-UAVs Technologies [2].

Оставляя за скобками огневые средства поражения, в статье рассматривается проблема автопилотирования типового мультикоптера в условиях применения обозначенных выше систем противодействия БПЛА, в том числе и средств радиоэлектронного подавления (РЭП). Анализ публикаций в области противодействия БПЛА, показывает, что «глубоких» статей по данной тематике довольно мало. Еще меньше научных публикаций посвящены многоаспектной проблематике разработки эффективных методов преодоления средств противодействия БПЛА, обеспечивающих автопилотирование мультикоптеров. Исходя из этих предпосылок, становится очевидной важность и актуальность разработки новых подходов к автопилотированию мультикоптеров в условиях активной работы систем противодействия БПЛА.

2. Система автопилотирования типового мультикоптера

Типовой мультикоптер, как БПЛА вертолетного типа, является сложным, многосвязным техническим устройством, обладающим немоделируемой динамикой и подверженным влиянию внешних возмущений [13]. Мультикоптер обладает несколькими несущими винтами, вращающимися в противоположные направления. В зависимости от числа винтов, которое, как правило, кратно двум, различают несколько видов мультикоптеров массового применения: квадрокоптеры (4 винта), гексокоптеры (6 винтов) и октокоптеры (8 винтов).

Управление мультикоптерами базируется на достаточно простом принципе: вектор движения устанавливается путем изменения частоты вращения (числа оборотов) одного или нескольких роторов одновременно, что, соответственно, обеспечивает повышение или понижение подъемной силы в точках приложения (точках крепления роторов). Управление тягами осуществляется по средствам вмонтированных в конструкцию аппарата микроконтроллерных плат, обеспечивающих преобразование сигналов от «пользователя» в управляющее воздействие на двигатели мультикоптера.

Определение текущего местоположения мультикоптера в пространстве входит в обязанность его инерциальной системы, которая включает в себя 3-х осевой акселерометр, гироскоп и магнитометр. Коррекция мультикоптера в пространстве осуществляется микроконтроллером управления, который на основе необходимой информации генерирует сигнал для каждого электронного контроллера каждого двигателя мультикоптера, что обеспечивает изменение частоты вращения соответствующего несущего пропеллера.

Система автоматического пилотирования мультикоптера включает типовой набор, включающий:

- управляющую плату на основе микроконтроллера;
- набор датчиков;

- канал радиосвязи;
- GPS приёмник [5].

Мультикоптер, оснащенный системой автоматического пилотирования, обязан осуществлять независимое автопилотирование не только в открытом пространстве, где нет препятствий, но и в замкнутом, например, в закрытом помещении. Для этого мультикоптер должен быть оснащен автономной микроконтроллерной платой, которая должна имитировать стандартные действия, производимые оператором через в процессе дистанционного управления.

Одной из функций микроконтроллерной платы является стабилизация пространственной ориентации мультикоптера (по углам Эйлера: крену, тангажу и рысканию). Достижение пространственной стабилизации мультикоптера и удерживание ее в течение определённого промежутка времени обеспечивается соответствующим запросом с управляющего модуля. При этом, команда на стабилизацию формируется системой определения текущего состояния мультикоптера, в состав которой входят датчики расстояния, модуль определения координат, например, по стандартам GPS, а также алгоритм, реализующий автопилотирование по некоторому маршруту, привязанному к карте местности.

Встроенная в мультикоптер типовая система автоматического пилотирования в первую очередь должна реализовать следующие основные функции:

- взлёт и поддержание заданной высоты;
- движение в направлении, заданным соответствующими командами управляющего микроконтроллера;
- плавная посадка.

В замкнутых помещениях или в условиях наземного мониторинга, отличающихся наличием природных и/или рукотворных препятствий, возможно реализовать алгоритмы выхода из лабиринта [16] или, соответственно, нечеткий алгоритм выхода из тупика [12]. Кроме того, на основе встроенной фотокамеры можно реализовать построение карты местности¹ и траектории полёта [1,4], что гарантировало бы возврат мультикоптера в исходную точку в случае его поражения системами противодействия БПЛА или средствами радиоэлектронной борьбы.

3. Постановка задачи

Высокая уязвимость мультикоптеров от различных факторов внешнего, в том числе и «рукотворного» воздействия, обусловлена их низкой «интеллектуальностью» в автономном режиме полета, обусловленная отсутствием способности оперативного принятия решений, все еще является

¹ Данную процедуру можно осуществить и на основе показаний инерциальной системы, внутреннего таймера и датчиков расстояния – по аналогии с существующими решениями в области наземных подвижных платформ.

актуальной проблемой. Нерешенность этой проблемы снижает эффективность применения мультикоптеров в условиях активной работы систем противодействия БПЛА и средств радиоэлектронной борьбы.

Одним из способов решения такой задачи лежит в плоскости управления полетом мультикоптера по заданной траектории, который реализуется при наличии ограничений по времени, скорости, угловой скорости, высоте, а также ограничения в контрольных точках по времени, скорости [6,8-10] и пространственной ориентации мультикоптера. Среди перечисленных наиболее серьезными являются пространственные ограничения, нарушение которых становятся фатальными для аппарата. Одной из причин такого нарушения является потеря сигнала со спутников, обслуживающих приемники GPS. В этом случае навигация осуществляется через инерциальные датчики [7], которые постепенно накапливают ошибки в определении координат местоположения мультикоптера. Актуальной становится задача автоматического ориентирования в пространстве с использованием средств компьютерного зрения [11] или, более конкретно, с применением методов распознавания.

Предположим, что мультикоптер, снабженный фотокамерой с высокой разрешающей способностью, в процессе своего полета производит контрольные снимки поверхности Земли и формирует последовательность изображений, характеризуемых признаками распознавания F_1, F_2, \dots , где F_1 – признак распознавания начального изображения. После очередного фотографирования местности и фиксации контрольного признака распознавания изображения F_n мультикоптер, оказавшись в зоне поражения системы противодействия БПЛА и/или средства радиоэлектронной борьбы, отключается от сигнала GPS и, тем самым, дезориентируется в пространстве. В сложившихся условиях необходимо, чтобы навигационная система мультикоптера обеспечила его автопилотирование посредством распознавания изображений, где отправным является изображение с признаком распознавания F_n . Задача состоит в формировании траектории полета по маршруту, определяемого набором контрольных точек P_n, P_{n-1}, \dots, P_1 в Декартовой системе координат (x, y, z) , где P_n – начальная точка, а P_1 – конечная точка маршрута [19]. В данном случае, траекторией полета будет ломаная, каждая узловая точка которой P_k ($k=1 \div n$) произвольно устанавливается в пространстве над изображением местности с признаком распознавания F_k . При этом, узловые точки ломаной являются контрольными, в которых мультикоптер вынужден будет полностью останавливать свое поступательное движение для поиска следующей контрольной точки. Очевидно, что в отличие от гладких траекторий, формируемых с учетом маневренности мультикоптера, ломаная траектория не является оптимальной по времени.

4. Формирование траектории полета мультикоптера по заданному маршруту

Типовой мультикоптер, как и любое физическое тело, имеет 6 степеней свободы, что указывает на его возможность совершать геометрические движения в трёхмерном пространстве, а именно: двигаться вперёд/назад, вверх/вниз, влево/вправо (в Декартовой трёхмерной системе координат), а также совершать повороты Эйлера вокруг каждой из трёх взаимно перпендикулярных осей (рыскание, тангаж, крен), без вращения и без дополнительных векторов.

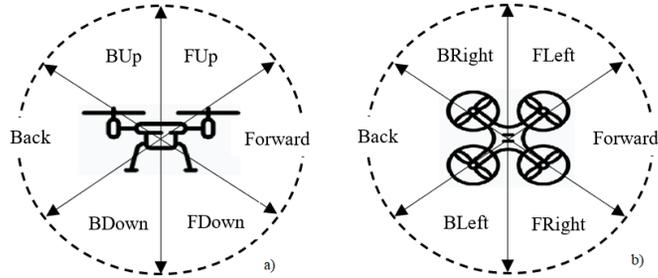


Рис. 1. Геометрические движения мультикоптера в трёхмерном пространстве: а) вид сбоку; б) вид сверху

Перемещение типового мультикоптера по любому вектору в пространстве можно представить в виде суммы трёх элементарных перемещений по базовым векторам вдоль каждой из осей Декартовой системы координат, причём каждое такое элементарное перемещение не выводится из двух других. Произвольный поворот мультикоптера в пространстве также может быть задан последовательностью поворотов вокруг каждой из осей (по Эйлеру). Кроме того, что движение мультикоптера вдоль каждой из трёх осей не зависит от движения по остальным двум и вращения вокруг любой из осей.

В случае дезориентации мультикоптера в пространстве, вызванной, например, отключением от сигнала GPS, навигационная система мультикоптера должна обеспечить его возвращение по обратному маршруту с траекторией полета в виде непрерывной кривой $T_1(u) = \{(x(u), y(u), z(u))\}$, $u \in [0, 1]$, проходящей через контрольные точки P_n, P_{n-1}, \dots, P_1 , причём $T_1(0) = P_n$ и $T_1(1) = P_1$. При этом, каждая контрольная точка пространства P_k ($k=1 \div n$) должна соответствовать признаку распознавания F_k ($k=1 \div n$) соответствующего изображения местности, которое зафиксировано фотокамерой в процессе полета по маршруту с траекторией полета в виде непрерывной кривой $T_0(v) = \{(x(v), y(v), z(v))\}$, $v \in [0, 1]$, проходящей через контрольные точки Q_1, Q_2, \dots, Q_n , где $T_0(0) = Q_1$ и $T_0(1) = Q_n$. Основным подходом заключается в том, чтобы, стабилизировавшись на некоторой высоте, мультикоптер мог осуществлять поиск изображения местности с признаком F_k ($k=1 \div n$) и попеременное измерение расстояния до него с последующим движением к искомой контрольной точке P_k , исключая возможность столкновения с другими объектами.

Стабилизацию мультикоптера на определенной высоте осуществляет управляющий микроконтроллер, который в классическом понимании работает по принципу конечного автомата [20]: системный таймер платы управления, например, раз в 40 мс выдает команду на измерение расстояния до поверхности Земли, после чего осуществляется управление двигателями посредством ПИД-регулятора [3]. После каждого замера текущей высоты относительно поверхности происходит коррекция скорости вращения винтов мультикоптера. Далее, осуществляется замер расстояния по направлению движения к искомой контрольной точке P_k , и в течение некоторого интервала времени в один из каналов регулирования углов подаётся сигнал, вынуждающий плату стабилизации изменить скорости вращения несущих пропеллеров. Осуществив линейное перемещение к искомой контрольной точке пространства, мультикоптер снова занимает горизонтальное положение.

Решение задачи автоматического ориентирования в пространстве опирается на использование средств компьютерного зрения. Программное обеспечение компьютерного зрения мультикоптера реализовано по принципам классического распознавания изображений (или двумерных сигналов) на основе поиска ключевых точек, выделения границ объектов, сегментации и геометрического преобразования. Соответствующий алгоритм распознавания *a priori* требует значительно меньшую базу изображений, что на деле означает достаточность снимков местности, которые произвела фотокамера мультикоптера² по пути его движения вдоль траектории $T_0(v) = \{(x(v), y(v), z(v))\}, v \in [0, 1]$.

Система автоматического управления мультикоптера обеспечивает поддержку его функционирования в соответствии с поставленной целью. На каждом шаге вычислительного цикла контроллер системы управления получает входную информацию из окружения и обрабатывает ее. Результаты обработки формируют условия для передачи управляющих сигналов, воздействующих на двигатели мультикоптера. Архитектура системы управления представляется набором требований, каждое из которых определяет один из вариантов функционирования встроенной программы и имеет следующую имплицативную структуру:

$\langle \text{условие } 1 \rangle, \langle \text{условие } 2 \rangle, \dots, \langle \text{условие } n \rangle \Rightarrow \langle \text{действие } 1 \rangle, \dots, \langle \text{действие } m \rangle.$ (1)

Условиями являются: управляющие состояния, получаемые сообщения, логические выражения. Действиями являются: простые операторы, вызовы программ, посылаемые сообщения и итоговые управляющие состояния. Семантика требования следующая: «Если в текущий момент времени выполняются все условия в левой части требования, то последовательно исполняется набор действий в правой части». В контексте решения

² Для фотографирования местности вдоль полета мультикоптера применяется камера Sony технологии A7Piv, с высоким уровнем разрешимости, определяемым спецификацией Lightweight 61MP RGB or 12MP 10 Band Multispectral plus 320x258 pixels IR by TOPODRONE.

поставленной задачи <условия> из левой части (1) составляют результаты распознавания изображений местности в шести секторах обзора поверхности Земли (см. Рис. 1, b), а под <действиями> из правой части (1) будем понимать команды управления на предмет поворота в горизонтальной плоскости, изменения высоты и скорости полета.

Исходя из этой парадигмы, для автономного пилотирования мультикоптера по обратной траектории полета (см. Рис. 2) следующие рассуждения приняты за основу:

e_1 : «Если впереди ведущих винтов обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты³, то при сохранении высоты полета и, не меняя углов в горизонтальной плоскости, чуть увеличить скорость»;

e_2 : «Если слева от ведущих винтов обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то при сохранении высоты полета немного повернуть влево и чуть увеличить скорость»;

e_3 : «Если справа от ведущих винтов обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то при сохранении высоты полета немного повернуть вправо и чуть увеличить скорость»;

e_4 : «Если слева от тыльной стороны обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то при сохранении высоты полета резко повернуть вправо и чуть увеличить скорость»;

e_5 : «Если справа от тыльной стороны обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то при сохранении высоты полета резко повернуть влево и чуть увеличить скорость»;

e_6 : «Если сзади от ведущих винтов обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то при сохранении высоты полета максимально повернуть влево (или вправо) и чуть увеличить скорость»;

e_7 : «Если ни в одном секторе обзора поверхности Земли не распознано последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то, не меняя углов в горизонтальной плоскости, немного увеличить высоту»;

e_8 : «Если впереди ведущих винтов на среднем удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то, не меняя углов в горизонтальной плоскости, увеличить скорость до среднего»;

e_9 : «Если слева от ведущих винтов на среднем удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то при сохранении высоты полета немного повернуть влево и увеличить скорость до среднего»;

e_{10} : «Если справа от ведущих винтов на среднем удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то при сохранении высоты полета немного повернуть вправо и увеличить скорость до среднего»;

³ После каждого достижения воображаемой контрольной точки вдоль обратной траектории полета $T_1(u)$, соответствующее ей изображение автоматически снимается с списка изображений дорожной карты, и статус «последний» присваивается следующему изображению по обратной цепи признаков F_n, F_{n-1}, \dots, F_1 .

e_{11} : «Если слева от тыльной стороны на среднем удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то при сохранении высоты полета резко повернуть вправо и увеличить скорость до среднего»;

e_{12} : «Если справа от тыльной стороны на среднем удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то при сохранении высоты полета резко повернуть влево и увеличить скорость до среднего»;

e_{13} : «Если сзади от ведущих винтов на среднем удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то при сохранении высоты полета максимально повернуть влево (или вправо) и увеличить скорость до среднего»;

e_{14} : «Если впереди ведущих винтов на большом удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то, не меняя углов в горизонтальной плоскости, немного уменьшить высоту и увеличить скорость до максимума»;

e_{15} : «Если слева от ведущих винтов на большом удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то немного повернуть влево, немного уменьшить высоту и увеличить скорость до максимума»;

e_{16} : «Если справа от ведущих винтов на большом удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то немного повернуть вправо, немного уменьшить высоту и увеличить скорость до максимума»;

e_{17} : «Если слева от тыльной стороны на большом удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то резко повернуть вправо, немного уменьшить высоту и увеличить скорость до максимума»;

e_{18} : «Если справа от тыльной стороны на большом удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то резко повернуть влево, немного уменьшить высоту и увеличить скорость до максимума»;

e_{19} : «Если сзади от ведущих винтов на большом удалении обнаружено последнее изображение из списка изображений дорожной карты, то максимально повернуть влево (или вправо), немного уменьшить высоту и увеличить скорость до максимума».

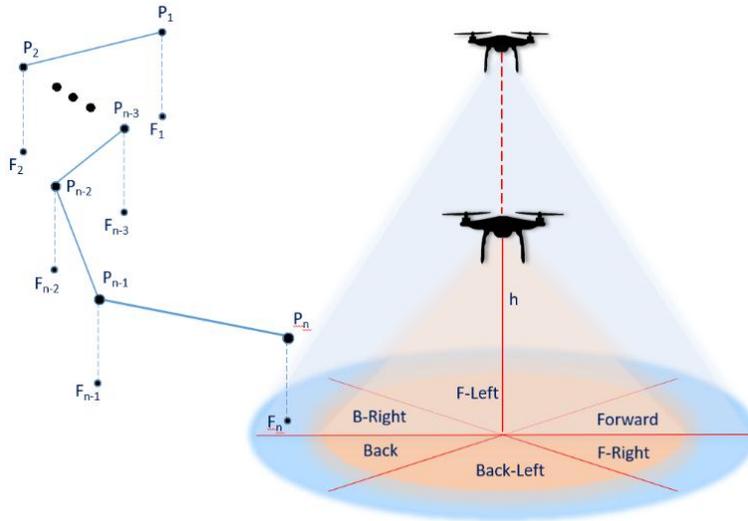


Рис. 2. Автономное пилотирование мультикоптера по обратной траектории полета

Основанная на вербальном регламенте возврата мультикоптера по обратной траектории полета $T_1(u)$, представленного в виде информационных фрагментов $d_1 - d_{19}$, концептуальная нечеткая модель управления в трехмерном пространстве содержит шесть входных лингвистических переменных: x_1 – впереди ведущих винтов (Front), x_2 – слева от ведущих винтов (FLeft), x_3 – справа от ведущих винтов (FRight), x_4 – слева от задних винтов (BLeft), x_5 – справа от задних винтов (BRight), x_6 – сзади ведущих винтов (Back); и три выходные лингвистические переменные: y_1 – угол поворота в горизонтальной плоскости (Rotation), y_2 – скорость (Velocity), y_3 – высота (Height). Для создания системы нечеткого вывода, реализующую данную модель на основе вербальных суждений $d_1 - d_{19}$, применяются средства пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB [14]. Графический интерфейс редактора MATLAB\FIS для системы нечеткого вывода типа Мамдани с шестью входными и тремя выходными характеристиками представлен на Рис. 3.

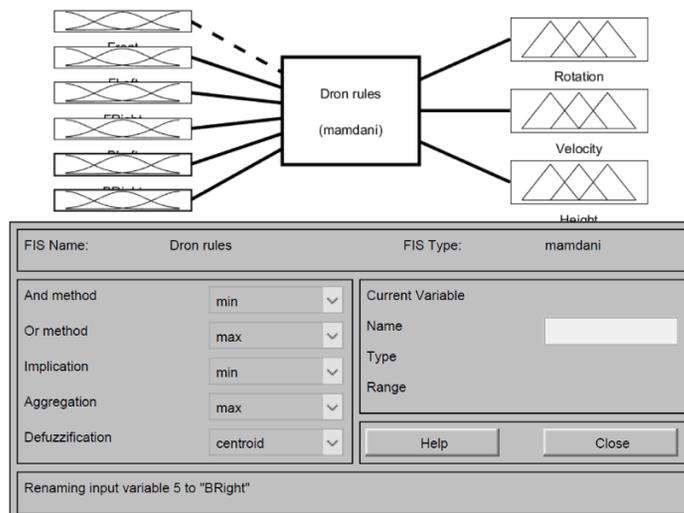


Рис. 3. Концептуальная нечеткая модель в нотации пакета MATLAB

Каждая входная лингвистическая переменная соответствует сектору обзора поверхности Земли под мультикоптером, в пределах которых анализируется наличие изображения из списка изображений дорожной карты и расстояние до него. Воздействия на выходные переменные позволяют мультикоптеру двигаться по обратному маршруту $T_1(u)$ через воображаемые контрольные точки пространства P_n, P_{n-1}, \dots, P_1 путем изменения угла поворота в горизонтальной плоскости, высоты полета и скорости движения.

Значения входных лингвистических переменных x_i ($i = 1 \div 6$) принимаются среди вербальных элементов терм-множества {ОКОЛО, СРЕДНЕЕ УДАЛЕНИЕ, БОЛЬШОЕ УДАЛЕНИЕ, ОТСУТСТВУЕТ}, или, более компактно, {NEAR, MIDDLE, FAR, ABSENT}. Согласно [10, 9], для описания каждого значения лингвистической переменной из заданного терм-множества посредством подходящего нечеткого множества в качестве универсального множества (универсума) выбран континуум $[0, 1]$. В частности, для входной лингвистической переменной x_4 (BLeft) функции принадлежности нечетких множеств, описывающих соответствующие ее термы, в нотации пакета MATLAB посредством редактора MATLAB\FIS представлены на Рис. 4.

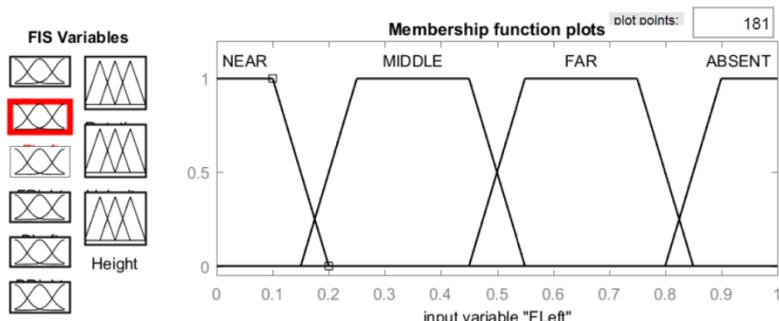


Рис. 4. Функции принадлежности входной лингвистической переменной x_4 (FLeft)

Для выходных лингвистических переменных y_j ($j = 1 \div 3$), соответствующими терм-множествами являются:

- y_1 (Rotation) – {LEFT FULL, LEFT BIG, LEFT SMALL, MAINTAIN, RIGHT SMALL, RIGHT BIG, RIGHT FULL};
- y_2 (Velocity) – {MIN, SLOW, FULL};
- y_3 (Height) – {UP SMALL, MAINTAIN, DOWN SMALL}.

При этом, в качестве универсума для фаззификации термов переменных y_1 и y_3 выбран континуум $[-0.5, 0.5]^4$, а для лингвистической переменной y_2 – континуум $[0, 1]$. Для удобства, выявленные полные наборы входных и выходных лингвистических переменных сведены в Таблицу 1.

Система правил в символьной форме будет иметь следующий вид:

- $e_1: (x_1=X_{11}) \Rightarrow (y_1=Y_{14}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_2: (x_2=X_{21}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_3: (x_3=X_{31}) \Rightarrow (y_1=Y_{15}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_4: (x_4=X_{41}) \Rightarrow (y_1=Y_{16}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_5: (x_5=X_{51}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_6: (x_6=X_{61}) \Rightarrow (y_1=Y_{11}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_7: (x_1=X_{14}) \& (x_2=X_{24}) \& \dots \& (x_5=X_{54}) \& (x_6=X_{64}) \Rightarrow (y_1=Y_{14}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{31});$
 $e_8: (x_1=X_{12}) \Rightarrow (y_1=Y_{14}) \& (y_2=Y_{22}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_9: (x_2=X_{22}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{22}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_{10}: (x_3=X_{32}) \Rightarrow (y_1=Y_{15}) \& (y_2=Y_{22}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_{11}: (x_4=X_{42}) \Rightarrow (y_1=Y_{16}) \& (y_2=Y_{22}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_{12}: (x_5=X_{52}) \Rightarrow (y_1=Y_{11}) \& (y_2=Y_{22}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_{13}: (x_6=X_{62}) \Rightarrow (y_1=Y_{11}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{32});$
 $e_{14}: (x_1=X_{13}) \Rightarrow (y_1=Y_{14}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$
 $e_{15}: (x_2=X_{23}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$
 $e_{16}: (x_3=X_{33}) \Rightarrow (y_1=Y_{15}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$
 $e_{17}: (x_4=X_{43}) \Rightarrow (y_1=Y_{16}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$
 $e_{18}: (x_5=X_{53}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$
 $e_{19}: (x_6=X_{63}) \Rightarrow (y_1=Y_{11}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33}).$

Таблица 1. Переменные системы нечёткого вывода

Входы	x_1	Имя переменной	Front
		Терм-множество	{ $X_{11} = \text{NEAR}$, $X_{12} = \text{MIDDLE}$, $X_{13} = \text{FAR}$, $X_{14} = \text{ABSENT}$ }

⁴ Угол поворота мультикоптера в горизонтальной плоскости из диапазона $[-180^\circ, +180^\circ]$ простым отображением трансформируется в условную единицу из интервала $[-0.5, 0.5]$.

Выходы	x ₁	Универсум	[0, 1]	
		Имя переменной	FLeft	
		Терм-множество	{X ₂₁ = NEAR, X ₂₂ = MIDDLE, X ₂₃ = FAR, X ₂₄ = ABSENT}	
	x ₂	Универсум	[0, 1]	
		Имя переменной	FRight	
		Терм-множество	{X ₃₁ = NEAR, X ₃₂ = MIDDLE, X ₃₃ = FAR, X ₃₄ = ABSENT}	
	x ₃	Универсум	[0, 1]	
		Имя переменной	BLeft	
		Терм-множество	{X ₄₀ = ABSENT, X ₄₁ = NEAR, X ₄₂ = MIDDLE, X ₄₃ = FAR}	
	x ₄	Универсум	[0, 1]	
		Имя переменной	BRight	
		Терм-множество	{X ₅₁ = NEAR, X ₅₂ = MIDDLE, X ₅₃ = FAR, X ₅₄ = ABSENT}	
	x ₅	Универсум	[0, 1]	
		Имя переменной	Back	
		Терм-множество	{X ₆₁ = NEAR, X ₆₂ = MIDDLE, X ₆₃ = FAR, X ₆₄ = ABSENT}	
	x ₆	Универсум	[0, 1]	
		y ₁	Имя переменной	Rotation
			Терм-множество	{Y ₁₁ = LEFT FULL, Y ₁₂ = LEFT BIG, Y ₁₃ = LEFT SMALL, Y ₁₄ = MAINTAIN, Y ₁₅ = RIGHT SMALL, Y ₁₆ = RIGHT BIG, Y ₁₇ = RIGHT FULL}
Универсум	[-0.5, 0.5]			
y ₂	Имя переменной	Velocity		
	Терм-множество	{Y ₂₁ = MIN, Y ₂₂ = SLOW, Y ₂₃ = FULL}		
	Универсум	[0, 1]		
y ₃	Имя переменной	Height		
	Терм-множество	{Y ₃₁ = UP SMALL, Y ₃₂ = MAINTAIN, Y ₃₃ = DOWN SMALL}		
	Универсум	[-0.5, 0.5]		

Функции принадлежности нечетких множеств, описывающих термы соответствующих выходных лингвистических переменных, в нотации пакета MATLAB посредством редактора MATLAB\FIS представлены на Рис. 5⁵.

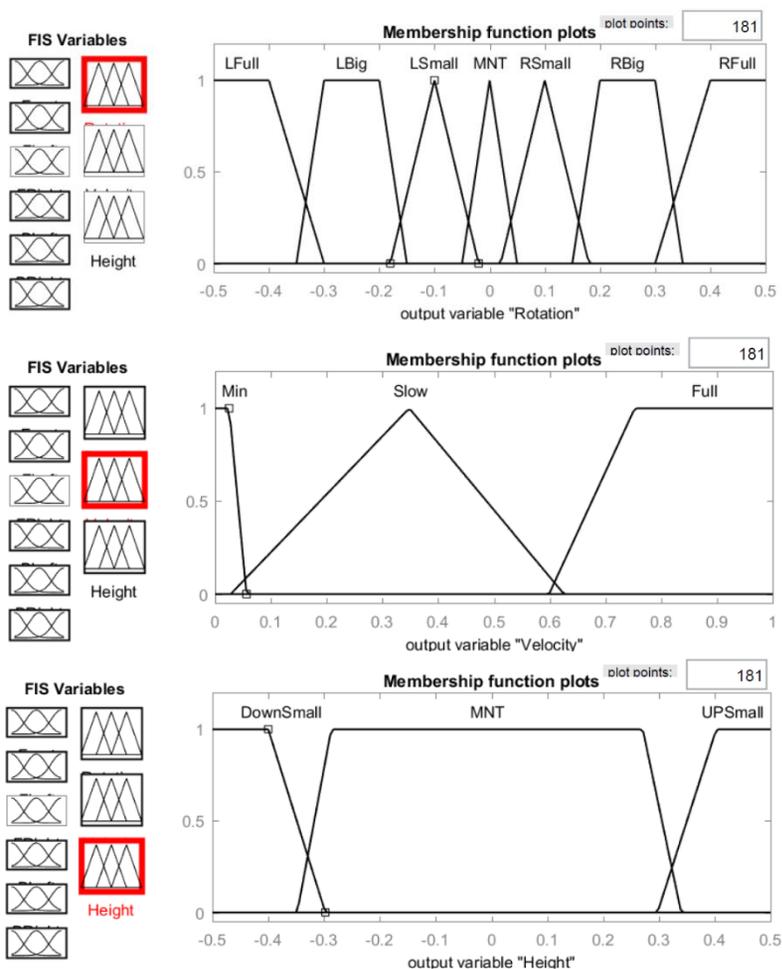


Рис. 5. Функции принадлежности выходных лингвистических переменных

Далее, после того, как заданы все переменные, функции принадлежности и правила нечеткой базы знаний, можно приступить к формированию различных сценариев автопилотирования мультикоптера с применением интерактивного окна графического интерфейса редактора

⁵ Следует отметить, что приведенные функции принадлежности установлены эмпирическим путем и в определенной степени обеспечивают адекватное решение задачи. Однако, идентификацию этих функций целесообразно проводить в контексте структурной и параметрической оптимизации системы нечеткого вывода в логическом базисе многослойной нейронной сети.

MATLAB\FIS (Рис. 6). Реализация правил посредством этого интерфейса дала продукцию, которая сведена в Таблицу 2.

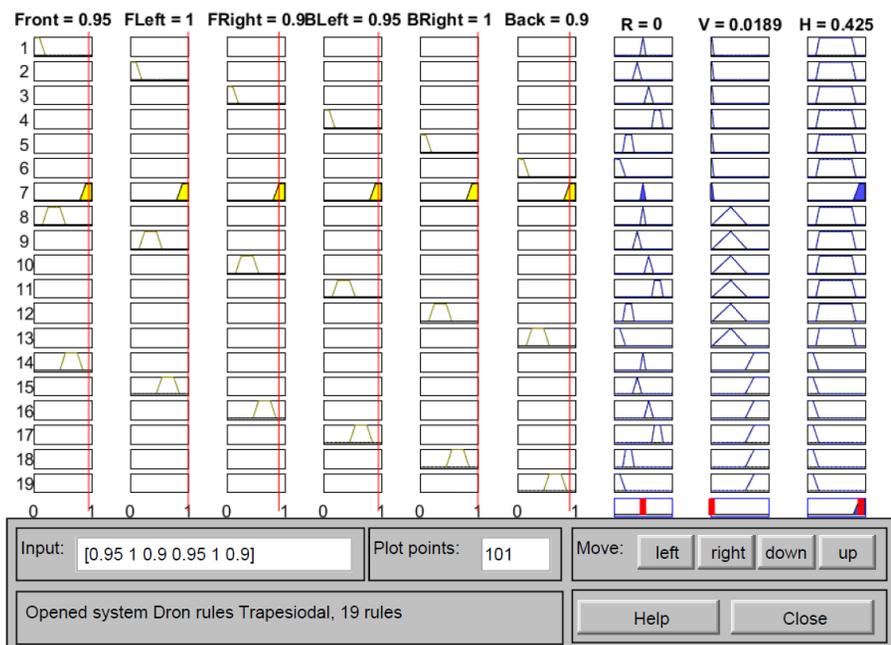


Рис. 4. Графический интерфейс редактора MATLAB\FIS для просмотра правил (7-я продукция, см. Таблицу 2)

Таблица 2. Продукция системы нечёткого вывода, регламентирующей полет мультикоптера на основе распознавания изображений из дорожной карты

№	Входные характеристики						Выходные характеристики		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y_1	y_2	y_3
	Front	FLeft	FRight	BLeft	BRight	Back	Rotation	Velocity	Height
1	0.075	0.9	0.95	1.00	0.9	1.00	0.000	0.0189	-0.0059
2	0.95	0.08	1.00	1.00	0.9	0.95	-0.100	0.0189	-0.0059
3	0.90	1.00	0.10	1.00	0.95	1.00	0.100	0.0189	-0.0059
4	1.00	0.90	1.00	0.09	1.00	0.90	0.250	0.0189	-0.0059
5	1.00	0.95	0.90	1.00	0.08	1.00	-0.250	0.0189	-0.0059
6	0.90	1.00	0.90	1.00	0.90	0.075	-0.425	0.0189	-0.0059

7	0.95	1.00	0.90	0.95	1.00	0.90	0.000	0.018 9	0.4250
8	0.30	1.00	0.95	0.90	1.00	0.95	0.000	0.334 0	-0.0059
9	0.90	0.35	1.00	0.95	0.90	1.00	-0.100	0.334 0	-0.0059
10	1.00	0.90	0.40	1.00	0.95	1.00	0.100	0.334 0	-0.0059
11	0.90	0.95	1.00	0.35	1.00	0.90	0.250	0.334 0	-0.0059
12	1.00	0.90	0.95	1.00	0.40	0.90	-0.250	0.334 0	-0.0059
13	1.00	0.95	0.90	1.00	0.90	0.30	-0.425	0.334 0	-0.0059
14	0.60	0.95	0.90	1.00	0.90	1.00	0.000	0.837 0	-0.4240
15	1.00	0.70	1.00	0.90	0.95	1.00	-0.100	0.837 0	-0.4240
16	0.95	1.00	0.65	1.00	0.90	0.95	0.100	0.837 0	-0.4240
17	1.00	0.90	1.00	0.60	1.00	0.90	0.250	0.837 0	-0.4240
18	0.90	0.95	0.90	1.00	0.70	1.00	-0.250	0.837 0	-0.4240
19	1.00	1.00	0.95	0.90	1.00	0.60	-0.425	0.837 0	-0.4240

5. Заключение

Сложность, много связность, нелинейность, наличие неопределенных параметров, то есть все, чем отличается мультикоптер, предопределяет необходимость поиска новых методов и способов решения задач управления. Это особенно актуально в условиях активной работы систем противодействия БПЛА и средств радиоэлектронной борьбы, одним из результатов действия которых становится дезориентация мультикоптера в пространстве.

Предлагаемый в статье подход опирается на наличие у мультикоптера системы искусственного (технического) зрения, которая предусматривает возможность остановки движения при отключении мультикоптера от сигнала GPS, набора высоты и поиска (распознавания) обратной траектории полета по средствам сенсоров, определяющих расстояние до последнего изображения дорожной карты. Состав системы технического зрения может отличаться типами и количеством датчиков, а также математическими алгоритмами работы и взаимодействия между этими датчиками. В частности, система технического зрения мультикоптера может включать набор

следующих сенсоров: стереоскопические (датчик изображения), инфракрасные или ультразвуковые дальномеры и 3D-лидары (Flash-LiDAR Time-of-Flight), которые с алгоритмами одновременной навигации и построения карты (SLAM) позволяют строить 3D-модель окружающего пространства.

Сформулированный в статье нечеткий полетный контроллер в силу своей простоты способен демонстрировать высокую вычислительную способность, что позволяет ему в режиме реального времени аккумулировать и обрабатывать данные с сенсоров, постоянно сканирующих окружающую среду, и, тем самым, определять направление полета мультикоптера по обратному маршруту в условиях отключения от сигнала GPS. Дальнейшие исследования в этом направлении лежат в плоскости структурной и параметрической оптимизации предложенной системы нечеткого вывода. В частности, оптимизация нечеткого полетного контроллера может быть осуществлена с применением методов нейронного и нейро-нечеткого моделирования.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Науки Азербайджана – Грант №АЕФ-МСГ-2023-1(43)-13/03/1-М-03.

Литература

1. Abbasov A.M., Aliev F.A., Hajiyeva N.S. Sweep method for solution of linear quadratic optimization problem with constraint in the form of equalities on control, Informatics and Control Problems, V.44, N.1, (2024), pp.3-8.
2. Aliev F.A., Maharramov R.R. The detection of small unmanned aerial vehicles (UAV) by the radar stations, Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications, V.II, (2022), pp.72-74.
3. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Tunik A.A., Velieva N.I., Rasulova U.Z., Mirsaabov S.M. Constructing an optimal controller for maneuver of quadrotor in 3-D space, TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics, V.13, N.2, (2022), pp. 211-221.
4. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Velieva N.I., Huseynova N.Sh. Mathematical modeling and control of quadcopter motion, Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications, V.I, (2022), pp.81-83.
5. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Velieva N.I., Safarova N.A., Jafarov A.G. Algorithms for solving the stabilization problems of the quadcopter motion by GPS data, Applied and Computational Mathematics, V.22, N.4, (2023), pp. 520-527.
6. Aliev F.A., Sushchenko O.A., Mutallimov M.M., Javadov N.G., Mammadov F. F., Maharramov R.R. Algorithm for quadcopter motion stabilization taking into account data of inertial navigation system, TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics, V.14, N.2, (2023), pp. 278-289.

7. Beard R.W. Quadrotor dynamics and control, Brigham Young University, (2008)
8. Hajiyeva N.S., Mutallimov M.M. Construction of optimal program trajectories and controls for vertical motion of a quadcopter, Proceedings of IAM, V.12, N.2, (2023), pp. 166-180.
9. Hoffman G.M., Waslander S.L., Tomlin C.J. Quadrotor helicopter trajectory tracking control, In proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, (2008).
10. Mirsaabov S.M. Aliev F.A., Larin V.B., Tunik A.A., Mutallimov M.M., Velieva N.I. Problems of modeling in problems of development of algorithms for controlling spatial motion of quadcopter, Proceedings of the Institute of Applied Mathematics, V.10, N.2, (2021), pp. 96-112.
11. Shen S., Mulgaonkar Y., Michael N., Kumar V. Vision-based state estimation and trajectory control towards high-speed flight with a quadrotor, Proceedings of Robotics: Science and Systems IX, June, (2013).
12. Аббасов А.М., Рзаев Р.Р., Ахмедов И.М., Алмасов А.Ш., Габиббейли Т.Х. Управление квадрокоптером в условиях наземного мониторинга с применением нейро-сетевых и нечётких методов моделирования. Нечёткие системы и мягкие вычисления, Том 18, №1, (2023), с.47-62.
13. Белоглазов Д.А., Коберси И.С., Косенко Е.Ю., Соловьев В.В., Шадрина В.В. Анализ особенностей практического использования регуляторов систем автоматического управления квадрокоптерами, Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», N.3, (2015) URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3078>
14. Леоненков А. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб: БХВ-Петербург. (2003), 736 с.
15. Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко А.С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения. Системы управления, связи и безопасности, N.1, (2020), с.109-146.
16. Мозговой М.В. Занимательное программирование: Самоучитель., СПб: Питер, (2005), 208 с.
17. Рзаев Р.Р. Аналитическая поддержка принятия решений в организационных системах, Saarbruchen (Germany): Palmerium Academic Publishing, (2016), 306 с.
18. Рзаев Р.Р. Интеллектуальный анализ данных в системах поддержки принятия решений, Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. Kg, (2013), 130 с.
19. Тумуров Э.Г., Шелехов В.И. Требования к системе управления квадрокоптером, Системная информатика, N.5, 2015. – ИСИ СО РАН, Новосибирск, сс.39-54.
<http://persons.iis.nsk.su/files/persons/pages/QuadReq.pdf>
20. Шелехов В.И. Разработка автоматных программ на базе определения требований, Системная информатика, N.4, (2014), ИСИ СО РАН,

Новосибирск, сс.1-29.

http://persons.iis.nsk.su/files/persons/pages/req_tech.pdf

ABOUT ONE PROBLEM OF AUTOMATIC ORIENTATION OF A MULTICOPTER IN SPACE USING COMPUTER VISION TOOLS

E.R. Aliev¹, I.M. Akhmedov¹, U.G. Gurbanli¹, A.Sh. Almasov¹, F.M. Salmanov¹

¹Institute of Control Systems of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

e-mail: elchin@sinam.net, islam@sinam.net, uzeyir@sinam.net, askar.almasov@sinam.net, fuad.salmanli@sinam.net

Abstract. Existing counter-UAV systems and electronic countermeasure equipment form a great threat not only to the autopilot of multicopters, but also to their remote control, which, in addition, also is fraught with certain problems associated with communication failures, operator errors, delays and inaccuracies in control. To solve these problems, it is proposed to use a multicopter autopilot system based on new principles, implying the placement on board of additional means of backup control and ensuring flight along a given trajectory. The autopilot system for a typical multicopter is designed as a separate module, which is transparent in terms of the control interface. The paper proposes an algorithm for forming the trajectory of a multicopter under active operation of counter-UAV systems. The algorithm involves the use of a fuzzy flight controller built on the basis of the Fuzzy Inference System. The results of image recognition from a route map in six sectors of the Earth's surface view are considered as input characteristics of the basic fuzzy model.

Keywords: multicopter, flight trajectory, recognition feature, fuzzy set, fuzzy inference system, fuzzy controller

References

1. Abbasov A.M., Aliev F.A., Hajiyeva N.S. Sweep method for solution of linear quadratic optimization problem with constraint in the form of equalities on control, *Informatics and Control Problems*, V.44, N.1, (2024), pp.3-8.
2. Aliev F.A., Maharramov R.R. The detection of small unmanned aerial vehicles (UAV) by the radar stations, *Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications*, V.II, (2022), pp.72-74.
3. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Tunik A.A., Velieva N.I., Rasulova U.Z., Mirsaabov S.M. Constructing an optimal controller for maneuver of quadrotor in 3-D space, *TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics*, V.13, N.2, (2022), pp. 211-221.

4. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Velieva N.I., Huseynova N.Sh. Mathematical modeling and control of quadcopter motion, Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications, V.I, (2022), pp.81-83.
5. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Velieva N.I., Safarova N.A., Jafarov A.G. Algorithms for solving the stabilization problems of the quadcopter motion by GPS data, Applied and Computational Mathematics, V.22, N.4, (2023), pp. 520-527.
6. Aliev F.A., Sushchenko O.A., Mutallimov M.M., Javadov N.G., Mammadov F. F., Maharramov R.R. Algorithm for quadcopter motion stabilization taking into account data of inertial navigation system, TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics, V.14, N.2, (2023), pp. 278-289.
7. Beard R.W. Quadrotor dynamics and control , Brigham Young University, (2008).
8. Hajiyeva N.S., Mutallimov M.M. Construction of optimal program trajectories and controls for vertical motion of a quadcopter, Proceedings of IAM, V.12, N.2, (2023), pp. 166-180.
9. Hoffman G.M., Waslander S.L., Tomlin C.J. Quadrotor helicopter trajectory tracking control , In proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, (2008).
10. Mirsaabov S.M. Aliev F.A., Larin V.B., Tunik A.A., Mutallimov M.M. ,Velieva N.I. Problems of modeling in problems of development of algorithms for controlling spatial motion of quadcopter, Proceedings of the Institute of Applied Mathematics, V.10, N.2, (2021), pp. 96-112.
11. Shen S., Mulgaonkar Y., Michael N., Kumar V. Vision-based state estimation and trajectory control towards high-speed flight with a quadrotor, Proceedings of Robotics: Science and Systems IX, June (2013).
12. Abbasov A.M., Rzaev R.R., Akhmedov I.M., Almasov A.Sh., Gabibbeyli T.Kh. Upravlenie kvadrokopterom v usloviyakh nazemnogo monitoringa s primeneniem neyro-setevykh i nechetkikh metodov modelirovaniya. Nechetkie sistemy i myagkie vychisleniya, V.18, N.1, (2023), s.47-62. (Abbasov A.M., Rzaev R.R., Akhmedov I.M., Almasov A.Sh., Gabibbeyli T.H. Quadcopter control under overland monitoring using neural network and fuzzy modeling methods. Fuzzy Systems and Soft Computing, V.18, N.1, (2023), pp.47-62.)
13. Beloglazov D.A., Kobersi I.S., Kosenko E.Yu., Solov'ev V.V., Shadrina V.V. Analiz osobennostey prakticheskogo ispol'zovaniya regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya kvadrokopterami, Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Inzhenernyy vestnik Dona», N.3, (2015). URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3078> (Beloglazov D.A., Kobersi I.S., Kosenko E.Yu., Solovyov V.V., Shadrina V.V. Analysis of the features of the practical use of regulators of automatic control systems for quadcopters. Electronic scientific journal “Engineering Bulletin of the Don”, N.3, (2015). <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3078>)

14. Leonenkov A. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. SPb: BKhV-Peterburg. (2003), 736 s. (Leonenkov A. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH. St. Petersburg: BHV-Petersburg. (2003), 736 p.)
15. Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasil'chenko A.S. Analiz sredstv i sposobov protivodeystviya bespilotnym letatel'nyim apparatam. Chast' 1. Bespilotnyy letatel'nyy apparat kak ob"ekt obnaruzheniya i porazheniya. Cistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti, N.1, (2020.) s.109-146. (Makarenko, S.I., Timoshenko, A.V., Vasilchenko, A.S.: Counter unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction. Systems of Control, Communication and Security, N.1, (2020), pp.109–146, DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105)
16. Mozgovoy M.V. Zanimatel'noe programmirovaniye: Samouchitel'. – SPb: Piter, (2005), 208 s. (Mozgovoy M.V. Entertaining programming: Self-instruction manual. – St. Petersburg: Peter, (2005), 208 p.)
17. Rzaev R.R. Analiticheskaya podderzhka prinyatiya resheniy v organizatsionnykh sistemakh. – Saarbruchen (Germany): Palmerium Academic Publishing, 2016, 306 s. (Rzaev R.R. Analytical decision support in organizational systems. Saarbruchen (Germany): Palmerium Academic Publishing, (2016), 306 p.)
18. Rzaev R.R. Intellektual'nyy analiz dannykh v sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy. – Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. Kg, (2013), 130 s. (Rzayev, R.R. Neuro-Fuzzy Modeling of Economic Behavior. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, (2013), 130 p.)
19. Tumurov E.G., Shelekhov V.I. Trebovaniya k sisteme upravleniya kvadrokopterom, Sistemnaya informatika, N.5, (2015). ISI SO RAN, Novosibirsk, s.39-54.
<http://persons.iis.nsk.su/files/persons/pages/QuadReq.pd> (Tumurov E.G., Shelekhov V.I. Requirements for the quadcopter control system, System Informatics, N.5, (2015), pp.39–54
<http://persons.iis.nsk.su/files/persons/pages/QuadReq.pdf>)
20. Shelekhov V.I. Razrabotka avtomatnykh programm na baze opredeleniya trebovaniy, Sistemnaya informatika, N.4, (2014), Novosibirsk, s.1-29.
http://persons.iis.nsk.su/files/persons/pages/req_tech.pdf (Shelekhov, V.I.: Development of automatic programs based on requirements definition. System Informatics, N.4, (2014), pp.1–29
http://persons.iis.nsk.su/files/persons/pages/req_tech.pdf)