

ОБЗОР ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ РОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Поляков Р.Г., оператор 4 научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА»».

Аннотация

Неуклонно растет использование «роя» для решения каких-либо задач. Эту динамику характеризует падение на рынке цен на БПЛА, а также улучшение производительности средств связи и обработки информации. Ключевой технологией, позволяющей создавать «рой», является семейство алгоритмов, которые позволяют отдельным членам «роя» общаться и распределять задачи между собой, планировать траектории и координировать свой полет таким образом, чтобы общие цели «роя» были эффективно достигнуты. Эти алгоритмы, часто организованные иерархически, наделяют «рой» автономией на каждом уровне, а роль оператора-человека в принципе может быть сведена к взаимодействиям на более высоком уровне без непосредственного вмешательства. Эта технология зависит от умного и инновационного применения теоретических инструментов, контроля и оценки. В этой статье рассматривается современное состояние этих теоретических инструментов, в частности, особое внимание уделяется тому, как они были разработаны и применены для воздушного «роя».

Ключевые слова: воздушный «рой» БПЛА, методы управления «роем», беспилотные летательные аппараты, многоагентные системы, модели «роя», уравнение Эйлера-Лагранжа, модель Рейнольдса, лидер «роя», управление «роем» БПЛА в 3D пространстве, синхронизация с лидером, формирование траектории и планирование движения «роя».

Введение

Воздушные робототехнические комплексы стали объектами интенсивных исследований в области робототехники и управления. Автономные воздушные роботы могут выгодно себя показать в трехмерном воздушном пространстве в апломбе, часто оснащенные возможностями вертикального взлета и посадки с использованием распределенных электрических вентиляторов с нулевым уровнем выбросов. «Рой» таких воздушных роботов или автономных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) становится прорывной технологией, позволяющей создавать высоко реконфигурируемые, по требованию, распределенные интеллектуальные автономные системы, оказывающие сильное влияние на многие области науки, техники и общества, включая системы слежения, контроля и транспортировки. Ожидается, что в любом приложении автономные воздушные рои будут более эффективными, чем один большой аппарат, предлагая значительно лучшую гибкость и надежность [1].

Современные потребности в области «роя» воздушных робототехнических комплексов накладывают на данную технологию ряд требований, так «рой» должен автономно работать в сложном трехмерном мире, включающем городские каньоны и воздушное пространство, которое все больше заполняется беспилотниками и коммерческими самолетами. Успех в выполнении поставленных задач воздушным «роем», летящим в трехмерном пространстве, основан на распределенных и синергетических возможностях управления индивидуальными и коллективными движениями воздушных робототехнических комплексов с ограниченными ресурсами бортовых вычислений, мощностями, связи, обнаружения и приведения в действие. Главная цель исследований в этой области заключается в том, чтобы разработать и предоставить унифицированную структуру для анализа трехстороннего компромисса между эффективностью вычислений для большого скопления робототехнических

комплексов, стабильностью и надежностью алгоритмов управления ими, а также оптимальной производительностью системы.

Эксперты выделяют ряд отличительных характеристик воздушного «роя» робототехнических комплексов, которые сводятся к следующему:

3-D автономность потока и «роя». Методы планирования движения и управления воздушным «роем» робототехнических комплексов основаны на автономно генерируемых трехмерных транспортных потоках, которые не имеют четко прочерченного маршрута. Управление полетом в реальном времени и эксплуатация «роя» должны также учитывать высокоточные динамические модели полета с шестью степенями свободы, изменения движения, погоду и другие изменяющиеся во времени эксплуатационные условия, встречающиеся в многолюдных городских условиях.

Масштабируемость через иерархию и мультимодальности. Для обеспечения автономной работы «роя» в сложной среде требуются теоретически обоснованные, вычислительно эффективные и масштабируемые алгоритмы. Это может быть реализовано посредством использования иерархических архитектур для децентрализованного планирования, рассуждения, обучения и восприятия, которые учитывают масштабируемость и управление информацией в присутствии неопределенности. Иерархические подходы распространены как в области обучения, так и в области управления машиной для решения сложных задач и высокой размерности.

В этой статье будут рассматриваться технологии и алгоритмы по контролю «роя» робототехнических комплексов, основанных на иерархической архитектуре. Организация работы «роя» в целом, согласно данной архитектуре показана на рис. 1.

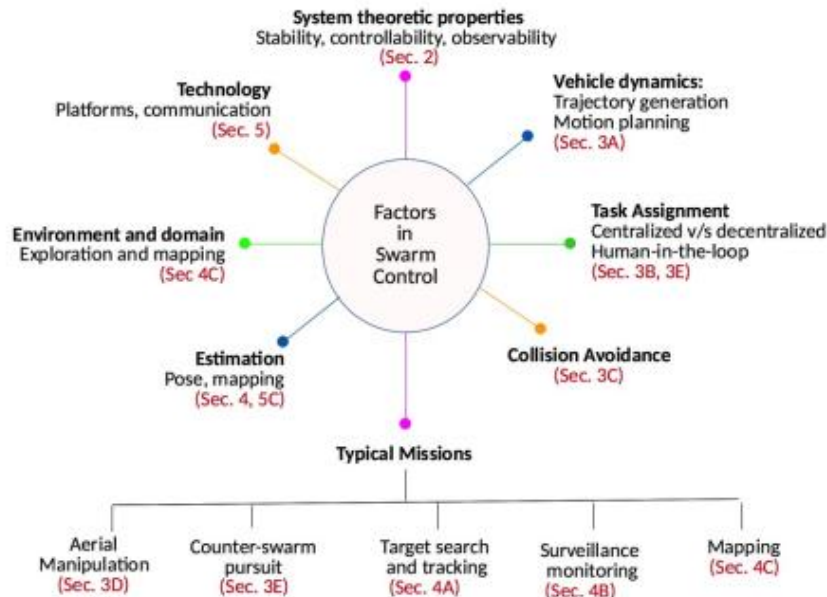


Рисунок 1 - Основные аспекты по контролю и организации роя

Модели, устойчивость и управляемость роя

Типы многоагентных систем.

В таблице 1 представлена классификация многоагентных систем, которые находятся в зависимости от количества агентов в системе и их сферы применения. Они имеют прямое взаимоотношение в зависимости от того, как моделируются системы: выбор основного уравнения, предположения, о возможном соединении между собой, характере управления входной информацией, а также обмене ей.

В «группе», поведение и стратегии каждого агента построено на стремлении максимизировать выполнение локальной задачи. В некоторых случаях, это может привести к тому, что агенты будут конкурировать друг с другом, в то время как в других случаях локально оптимальное поведение может также максимально привести к «победе».

В отличие от команды, «формация» почти всегда состоит из кооперативных взаимодействий, и отношения между состояниями агентов четко определены, например, для таких целей, как энергоэффективность.

«Рой», обычно, относится к группе, в которой отображается поведение, возникающее в результате локальных взаимодействий между агентами. Местное взаимодействие может быть конкурентным или кооперативным. Хотя «рой», обычно, подразумевает большую группу агентов.

Таблица 1 Классификация многоагентных систем

Тип	Сфера применения	Размер
Команда	Обычно небольшие группы; каждый агент отвергает индивидуальные цели в кооперативе или конкуренцию	≤ 10
Формация	Каждому агенту обычно назначается определенная подзадача, роль или место размещения	≤ 10
Рой	Обычно большая группа из не играющих особой роли агентов; из-за непредсказуемого поведения рождаются особые возможности применения	большой

Модели «роя».

Одна из самых ранних инженерных моделей для фlocksирования - это модель Рейнольдса, которая использовалась им для создания реалистичной визуализации стаи с помощью компьютерной графики. Правила Рейнольдса охватывают основные взаимодействия между соседями: нелинейная функция, которая регулирует устойчивое разделение между агентами, и обратная связь по скорости, которая стремится гарантировать, что скорость каждого агента отслеживает среднее число своих соседей. Модель Рейнольдса задается как (1):

$$\ddot{x} = \dot{v}_i = \sum_{j \in N_i} k_s \nabla W(x_j - x_i) + k_a(v_j - v_i) + f_i \quad (1)$$

где x_i и v_i обозначают положение и скорость i -го агента; $W(x_j - x_i)$ - функция связи; N_i это соседи i -го агента; и f_i обозначает внешнее влияние на агента, например, такое как влияние лидера «роя» или объекта противника.

Еще в одной своей ранней работе Рейнольдс изучал «стаю», которая движется в двумерном пространстве и дискретное время с использованием для его перемещения следующего уравнения (2):

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= x_i(t) + v_i(t)\Delta t \\ \theta_i(t+1) &= \frac{1}{\text{card}(N_i)} \sum_{j \in N_i} \theta_j(t) + \Delta\theta_i(t) \end{aligned} \quad (2)$$

где шум $\Delta\theta_i(t)$ обычно распределяется во множестве $[-\eta, \eta]$. Важно отметить, что скорость v_i является постоянной величиной для каждого i и t , в $\Delta\theta_i(t)$.

В скором времени появилась новая единая нелинейная континуальная модель, отличная от моделей на основе дискретно определенных агентов на графе. В общем виде она задается как (3):

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} &= \alpha \mathbf{v} - \beta \|\mathbf{v}\|^2 \mathbf{v} - \nabla P(\rho) \\ + D_L \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) + D_1 \nabla^2 \mathbf{v} + D_2 (\mathbf{v} \cdot \nabla)^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \\ \frac{d\rho}{dt} &= \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Изначально, данная модель по своему поведению напоминает птичью стаю для двумерного пространства, хотя в действительности модель не ограничена по числу измерений и может быть применена для стаи в трехмерном пространстве. Константы β , $D_{\{i\}}$ положительные; член $\alpha > 0$ соответствует постоянному состоянию скорости, при этом $\alpha < 0$ приводит к неупорядоченной фазе. Давления $P = \sum_k \sigma_k (\rho - \rho_0)^k$, где σ_k является константой, а ρ_0 - средняя локальная плотность. Наконец, \mathbf{f} обозначает отклонения, смоделированные как гауссовый шум.

Увеличение значения шума в (2) приводит к тому, что стая спонтанно выбирает упорядоченное состояние, где критическое значение шума коррелирует с числом агентов в ней. Предполагается, что это связано с диффузным потоком информации в стае; т.е. агенты, взаимодействуя с изменяющимся во времени множеством соседей и, в долгосрочной перспективе это порождает распространение информации по всей стае. Эта гипотеза была подтверждена в [2] для стаи объектов в двумерном пространстве, в котором нелинейные условия конвекции в (3) отвечают за стабилизацию состояния группы в течении большого промежутка времени.

В контексте изучения «роя» интересуют вопросы устойчивости и конвергенции состояния, каждого отдельно взятого агенты. Для такого

анализа обычно используют систему линейные уравнения, простейшим из которых является система (4):

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= \sum_{j \in N_i} \omega_{ij}(x_j - x_i), \quad i = 1, \dots, n \\ \Leftrightarrow \quad \dot{x} &= -(\mathcal{L} \otimes I_p)x, \mathcal{L}_{ij} = \begin{cases} \omega_{ij} \\ 0 \end{cases}\end{aligned}\tag{4}$$

Матрица \mathcal{L} или $(\mathcal{L} \otimes I_p)$ называется матрицей Лапласа и удовлетворяет $\mathcal{L}1_n = 0$, где $1_n \in \mathbb{R}^n$ является вектором. Очевидно, что константа \mathcal{L} соответствует фиксированной топологии связи; когда топология связи изменяется во времени, то используется изменяющаяся во времени $\mathcal{L}(t)$. Данный параметр можно выделить из (2).

Для проблем, связанных с маршрутизацией, помогает модель, рассматривающая окружающую среду, как совокупность «функциональных контейнеров», вместе с условиями доступности, которые ограничивают переход агентов между разными «контейнерами». Конечная цель - назначить n агентов множеству «контейнеров», где каждый из них может разместить до $p_i \geq 1$ ($m < n; i = \{1, 2, \dots, m\}$) агентов. За каждый агент i и «контейнер» j , достижимое множество E_{ij} неявно учитывает динамику агента, а также геометрические ограничения, которые налагает окружающая среда. Такая модель позволяет контролировать форму «роя» с вероятностным изменением карты между «контейнерами» [3], а также контролировать формирования квадрокоптеров согласно детерминированным законам перехода [4], [5].

Физические модели для роботизированных агентов.

Предоставляется возможность построить обобщенные линейные системы, аналогичные (4), для которых динамика может быть заменена на

нелинейную. Для подобных систем “роя” интересными являются уравнения на основе уравнений Эйлера-Лагранжа (5):

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + g_i(q_i) = \tau_i(q_i, \dot{q}_i, q_d, q_{j \in N_i}, \dot{q}_{j \in N_i}) \quad (5)$$

где $q_i \in \mathbb{R}^p$ - обобщенные состояния i -го агента; $q_d(t)$ желаемая траектория или виртуальный лидер за которым движется «рой»; τ_i - внешние силы, которые являются источником связи между агентами. Если используется линейная диффузионная связь, τ_i будет представлять \mathcal{L} аналогично (4). Уравнение Эйлера-Лагранжа обычно применяются в робототехнике при изучении движения твердого тела манипуляторов и космических или летательных аппарат, часто имеющих сочлененные крылья.

Для изучения «роя» воздушных РТК с неподвижными крыльями возможно производить моделирование воздушных роботов в виде точечных масс с динамикой скорости, которое описывается (6):

$$\begin{aligned} [\dot{x}, \dot{y}, \dot{h}] &= V[\cos \gamma \cos X, \cos \gamma \sin X, \sin \gamma] \\ m\dot{V} &= T \cos \alpha - D(V, \alpha) - mg \sin \gamma \\ mV\dot{\gamma} &= \frac{1}{mV} (L(V, \alpha) + T \sin \alpha) \cos \mu - W \cos \gamma \\ mV\dot{X} &= (L + T \sin \alpha) \frac{\sin \mu}{\cos \gamma} \end{aligned} \quad (6)$$

где L , D и T - подъем, сопротивление и тяга соответственно. В воздушных крылатых роботах T дополнительно выполняет функции V и α . Модель трехмерного воздушного робота может быть эффективно использован для уменьшения вычислительной нагрузки на систему

планирования движения и генерировании траектории, которая будет оптимальной и безопасной.

Хотя L , D и T были представлены в виде управляющих входов в (6), важно отметить, что их значения могут быть противоречивыми в «рое» воздушных РТК, из-за соседних устройств. Когда воздушный робот испытывает неудачи и не может удерживать свою позицию, это может оказать негативный эффект на возможность поддержания строя. Этот вид взаимодействия основанный на физики является уникальным для воздушных устройств.

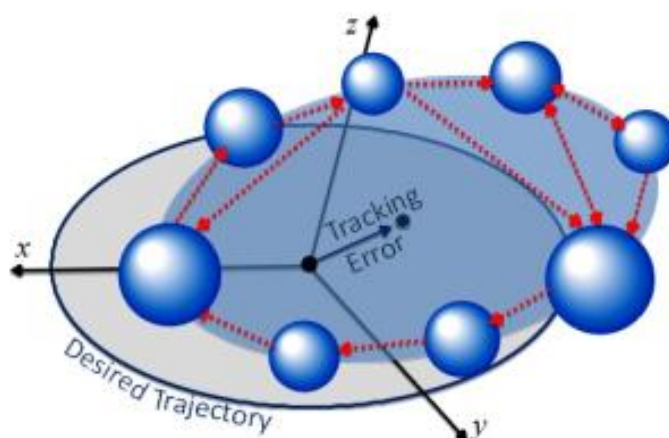


Рисунок 2 - Рой разнородных устройств, сходящихся возле условного лидера в эллипс.

Синхронизация с лидером.

Для облегчения контроля над «роем», иногда полезно определить физического или виртуального лидера, за которым будут следовать остальные агенты роя (см. рис. 2). Движение лидера может быть дано априори или контролироваться отдельно напрямую. В качестве альтернативы желаемая траектория может вычисляться с помощью алгоритмов оптимального управления. Остальные агенты контролируются через взаимодействие между соседями [7] или через действия с лидером [8],

[9]. Проблема отслеживания траектория виртуального лидера или желаемого поведения группы агентов с сильной нелинейной динамикой могут быть адресованы проблеме синхронизации с соседними агентами [6]. Эта единая структура, основанная на времени, объединяет отслеживание траектории с экспоненциально-стабилизирующим контроллером, который синхронизирует относительные движения роя быстрее, чем движение лидера.

Помимо этого, также ведутся работы по той же проблеме постановки задачи, которая связана с синхронизацией нелинейных динамических систем одновременно с отслеживанием траектории перемещения различных РТК. Для решения подобного рода проблемы возможно использовать одновременную синхронизацию нескольких виртуальных лидеров различных групп для создания сложного, изменяющегося во времени «роя», являющегося многочисленной гетерогенной системой. При реализации вышеописанного необходимо определить количество виртуальных лидеров, и определить какие именно агенты подходят под роль лидеров.

Выбор лидера и размещение датчиков.

Когда динамика агентов воздушного «роя» идентична, управляемость из заданного набора узлов-лидеров зависит от топологии графа, а также веса отдельных ребер. Система, определенная на графе, называется структурно управляемой, когда она управляема почти для всех весов ребер, и сильно структурно управляемой, когда она контролируема для всех весов ребер.

Для выбора лидера необходимо измерить влияние кандидата по фактическим задачам управления и оценкам. Если целью является оптимизация целевой функции, как представлено в (7), можно решить задачу определения лидера узла с использованием методов из суб-модульной оптимизации. Максимизация суб-модульной функции сложны,

однако существуют жадные алгоритмы, которые могут дать приближенное решение с гарантированной оптимальностью используя не более $O(n^2)$ вычислений целевой функции.

Управление “роем” в 3-D пространстве

Типичные задачи, для которых используется «рой», включают в себя сенсорное зондирование, поиск и спасение, визуализацию с использованием методы разнесенной апертуры. Эти проблемы могут быть разделить на два отдельных класса: один, где среда должна быть изучены, и где среда должна быть пройдена с заданным целевым состоянием. Для эффективного выполнения любой из этих задач «рой» должен быть способен планировать путь для всех членов группы, а также безопасно и точно достичь конечного пункта назначения. Каждый отдельный робот должен уметь избегать столкновений со статическими и динамическими препятствиями в окружающей среде, а также избегать столкновения друг с другом. Помимо того, в сложных средах роботы должны упорядочивать свое движение, чтобы избежать создание преграды для других членов группы.

Формирование траектории и планирование движения «роя».

Подходы к генерации траектории могут быть классифицированы на основании того, генерируются ли траектории или нет в связи с проблемой распределения задач.

Быстрый рост вычислительной мощности в сочетании с алгоритмическими усовершенствованиями позволил разработать инструменты, способные решать ограниченные задачи оптимизации в режиме реального времени, которые могут лучше предоставить явно или приблизительно решение задачи оптимального управления (7):

$$\sum_{j=1}^N (h(t_f^i, x^i(t_f^j)) + \int_{t_0^j}^{t_f^j} L(\gamma^j(t), u^j(t), \alpha^j(t), t) dt) \quad (7)$$

где $\gamma^j(t)$ обозначает траекторию робота j , $h(\cdot)$ обозначает стоимость, $\alpha^j(\cdot)$ обозначает набор параметров в режиме операции, а $L(\cdot)$ - функционал, требующий затрат.

При условии:

- 1) Действительная цель и назначение задачи;
- 2) Динамика робота, возможности и входные ограничения;
- 3) Государственные ограничения.

Другой подход к многоагентному планированию в условиях неопределенности — это использовать децентрализованный частично наблюдаемый Марковский процесс принятия решений.

Оптимальность в задаче планирования траектории с несколькими роботами (7) может быть применена в отношении любого количества различных целей, включая интегрированной попытки управления, максимально пройденной дистанции одним роботом, последнего времени прибытия и общего расстояния, а также времени. Прямой оптимальный подходом будет являться привидение динамики в ограниченное равенства между состояниями в последовательных временных шагах для оптимизации.

Также целью проектирования траектории и планирования движения может являться их добавление в проектирование законов управления робототехнических средств. Одним из прямых способов получения значений управляющих входных данных это повторное решение задачи генерации траектории с параметрами «управления с прогнозирующими моделями» (7) и применение нового оптимального входного значения управления.

Генерация траектории, зачастую, требуется иерархического «модель-ориентированного» подхода, когда требования к движению вытекают из конкретной задачи, поставленной перед «роем». Для этого может быть применена “физико-ориентированная” модель для решения нахождения относительного пути движения РТК, в то время как план глобального пути может быть построен с использованием любого из известных алгоритмов планирования пути [13].

Должны быть спроектированы специализированные контроллеры для того, чтобы роботы, летящие в энергоэффективном построении, могли удерживать свой строй независимо от появляющихся неисправностей у отдельных роботов [14]. Эти контроллеры полезны в аэродинамических моделях, в которых помогают оценить влияние соседних устройств на управляемость отдельно взятого робота.

Еще одной проблемой помимо предотвращения столкновений, является малый срок службы батареи БПЛА. Для продления сроков выполнения задач, может быть использована «совместная» группа наземных устройств выполняющих роль мобильных зарядных станций [15]. В таком случае БПЛА будут планировать путь так, чтобы они могли выполнять поставленную задачи с сохранением заряда батареи.

Предотвращение столкновений и движения без столкновений.

Проблема предотвращения столкновений становится является очень актуальной в управлении «роем». Помимо препятствий, с которыми сталкиваются РТК, для избегания столкновения следует учитывать и других членов «роя». Наиболее очевидными методами избегания столкновения являются регулируются скорости [16] и последовательное перепланирование траекторий [12] без изменения назначения в рамках оптимального управления (7). В частности, смешанные целочисленное линейное программирование успешно применимо для получения оптимального движений без столкновений, и оно применяется к мобильным

роботам, космическим кораблям и беспилотникам [10], [11], [17]. В последнее время последовательное выпуклое программирование используется для аппроксимации областей без столкновений путем рисования гиперплоскостей, и продемонстрировано в моделировании и экспериментах над «роем» [25], [12].

Более прямой подход к предотвращению столкновений в «рое» предполагает использование искусственных потенциальных полей [18] - [21] или барьерные функции [22], [23]. Следует отметить, что модель Рейнольдса (1) также включает в себя градиент потенциальной функции. Потенциальные поля, в вычислительном отношении, легко использовать с целью предотвращения столкновений, не обязательно для планирования пути. Более того, искусственные потенциальные поля напрямую связывают динамику отдельных роботов, и это может негативно влияет на стабильность роя, если выбрана неправильная топология связи.

Существует подход, аналогичный потенциальным полям, основанный на использование градиента функции Ляпунова, которая неявно учитывает возможность столкновений. Такие законы управления были построены с использованием подхода дифференциальной игры [24], [25] и одновременно решают проблему жадной оптимизации.

Манипуляции в воздушной среде.

«Рой» воздушных роботов имеет возможность транспортировать объекты двумя способами:

- 1) каждый отдельный робот способен нести объект;
- 2) несколько роботов, способны поднять один объект.

В любом случае объект может быть поднят с помощью кабеля, который прикреплен к роботу [26] - [30] или жестко прикреплен к роботам [31] - [34]. БПЛА, которые жестко закреплены за объектом используют различные захваты, например, основанные на трении, основанные на проникающем воздействии [31] или на магнитном воздействии [33].

Когда каждый робот способен захватить объект, это позволяет «рою» таких устройств быстро переносить большое количество объектов. Это может быть использовано для таких задач, как доставка посылок [30], [34] или в строительстве.

Когда для перемещения одного объекта требуется несколько роботов, небольшие группы РТК могут быть использованы для его совместной перевозки [26] - [29], [31] - [33]. Эта задача требует некоторой связи между роботами. Это как правило, делается явным образом, но также может быть сделано косвенно, рассчитывая тяговооруженность роботов, действующих на перевозимый объект [29]. «Рой» также стремится минимизировать тягу, так как это является предметом повышенного потребления энергии [32].

Внешнее управление воздушным роем.

Управление «роем» может сводиться к одной из двух ситуаций:

1) «Роем», режиме реального времени, назначаются цели внешним пользователем, обычно оператор.

2) Некоторые или все члены «роя» взаимодействуют с противником или враждебным агентом, который, в свою очередь, находится в пределах контроля пользователя.

На самом простом уровне, оператор отправляет команды «рою». Для снижения когнитивной нагрузки на оператора необходимо минимизировать количество входов, которые должны быть предоставлены оператору для управления. Для этого, можно контролировать направление движения «роя» с помощью одного виртуального лидера, а также контролировать размер и форму «роя» [35]. Человек может также дать команду на языке, который предназначен для управления «роем».

Следующим уровнем сложности являются команды человека, использующие естественный язык, оставаясь вне алгоритмического цикла, контролирующего «рой». Здесь проблема заключается в понимании конкретной команды оператора. Высочайший уровень сложности -

использование компьютера для понимания человеческой речи. Здесь человек неотъемлемой частью алгоритмического цикла: алгоритм, который контролирует «рой» активно ищет информацию от человека о поставленной задаче.

Заключение

В ближайшее время ожидается, что наше воздушное пространство будет заполнено различными «роями» воздушных средств, выполняющих сложные задачи, которые будут невозможны для одного устройства. В этой статье акцентируется внимание на иерархической интеграции управления синхронизированным «роем» с оптимизацией и назначением безопасной траектории, кооперативной оценкой и контролем. Кроме того, подчеркивается важность в компромиссе между вычислительной эффективностью, стабильностью и надежностью, а также оптимальной производительностью системы. Чтобы по-настоящему решить этот компромисс, необходимо выйти за рамки методов, которые в настоящее время используются в автономных дронах и «роевой» робототехники для реализации долгосрочных автономных систем воздушного «роя».

Важной областью дальнейшего изучения является развитие обучения и архитектуры принятия решений, которые будут предоставлять «рою» БПЛА высокий уровень автономности и гибкости. Кроме того, вычисления и связь в рое должны быть достаточно быстрыми, чтобы обеспечить стабильность при изменениях модели и спецификаций миссии на различных временных отрезках.

Еще одним важным направлением является разработка строгих методологий для обнаружения неисправностей, изоляции и восстановления, для обработки различных потенциальных неисправностей, возникающих на уровне подсистем, отдельных систем и уровне «роя».

Поскольку «рой» разработан, в большей степени, для агрессивных или гибких автономных миссии, необходимым создать средства для осуществления некоторой формы состязательного контроля «роя». Такие методы борьбы с роем также могут быть использованы в гражданских целях, таких как поддержание правопорядка или пасти птиц и животных вдали от опасностей окружающей среды, таких как наводнения или лесные пожары. Открытыми остаются вопросы о типе маневров, которые необходимо выполнить, чтобы быстро оценить местонахождение и цель роя; оценить внутреннюю динамика воздушного роя; определить задачу и роль назначения в пределах «роя»; определить основного лидера и чувствительные узлы.

Таким образом, многие открытые проблемы исследований в воздушном «рое» БПЛА включают в себя характеристику взаимозависимости между динамическими свойствами отдельно взятой машины в «рое», свойствами неопределенностей и применяемыми методами обучения и контроля. Понимая эти взаимозависимости, путем тщательной идентификации системы и интегрированной системы проектирования, можно полностью сказать, что «рой» является автономным.

Литература

1. F. Y. Hadaegh, S.-J. Chung, and H. M. Manohara, “On development of 100-gram-class spacecraft for swarm applications,” *IEEE Sys. J.*, c. 673–684, 2016.
2. J. Toner and Y. Tu, “Long-range order in a two-dimensional dynamical xy model: How birds fly together,” *Phys. Rev. Lett.*, c. 4326–4329, 1995.
3. S. Bandyopadhyay, S.-J. Chung, and F. Y. Hadaegh, “Probabilistic and distributed control of a large-scale swarm of autonomous agents,” *IEEE Trans. Robot.*, c. 1103–1123, 2017.

4. M. Turpin, N. Michael, and V. Kumar, “An approximation algorithm for time optimal multi-robot routing,” in *Algorithmic Foundations of Robotics XI*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics, c. 627–640.

5. D. Morgan, G. P. Subramanian, S.-J. Chung, and F. Y. Hadaegh, “Swarm assignment and trajectory optimization using variable-swarm, distributed auction assignment and sequential convex programming,” *Int. J. Robot. Res.*, c. 1261–1285, 2016.

6. S.-J. Chung and J.-J. E. Slotine, “Cooperative robot control and concurrent synchronization of Lagrangian systems,” *IEEE Trans. Robot.*, c. 686–700, 2009.

7. J. Jadbabaie, J. Lin, and A. S. Morse, “Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules,” *IEEE Trans. Autom. Control*, c. 88–1001, 2003.

8. H. Su, X. Wang, and Z. Lin, “Flocking of multi-agents with a virtual leader,” *IEEE Trans. Autom. Control*, c. 293–307, 2009.

9. S. Ghapani, J. Mei, W. Ren, and Y. Song, “Fully distributed flocking with a moving leader for Lagrange networks with parametric uncertainties,” *Automatica*, c. 67–76, 2016.

10. M. G. Earl and R. D’andrea, “Iterative MILP methods for vehicle-control problems,” *IEEE Trans. Robot.*, c. 1158–1167, 2005.

11. A. Richards, T. Schouwenaars, J. P. How, and E. Feron, “Spacecraft trajectory planning with avoidance constraints using mixed-integer linear programming,” *J. Guid. Control Dyn.*, c. 755–764, 2002.

12. D. Morgan, S.-J. Chung, and F. Y. Hadaegh, “Model predictive control of swarms of spacecraft using sequential convex programming,” *J. Guid. Control Dyn.*, c. 1725–1740, 2014.

13. A. Yamashita, T. Arai, J. Ota, and H. Asama, “Motion planning of multiple mobile robots for cooperative manipulation and transportation,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, c. 223–237, 2003.

14. Z. Yu, Y. Qu, and Y. Zhang, “Safe control of trailing uav in close formation flight against actuator fault and wake vortex effect,” *Aerospace Science and Technology*, c. 189–205, 2018.

15. K. Yu, A. K. Budhiraja, and P. Tokekar, “Algorithms for routing of unmanned aerial vehicles with mobile recharging stations,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1704.00079>

16. S. B. Mehdi, V. Cichella, T. Marinho, and N. Hovakimyan, “Collision avoidance in multi-vehicle cooperative missions using speed adjustment,” in *Proc. IEEE Conf. Decis. Control*, c. 2152–2157, 2017.

17. S. Akella and S. Hutchinson, “Coordinating the motions of multiple robots with specified trajectories,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, c. 624–631, 2002.

18. O. Khatib, “Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,” *Int. J. Robot. Res.*, c. 90–98, 1986.

19. E. Rimon and D. E. Koditschek, “Exact robot navigation using artificial potential functions,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, c. 501–518, 1992.

20. N. E. Leonard and E. Fiorelli, “Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups,” in *Proc. IEEE Conf. Decis. Control*, c. 2968–2973, 2001.

21. M. T. Wolf and J. W. Burdick, “Artificial potential functions for highway driving with collision avoidance,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, c. 3731–3736, 2008.

22. L. Wang, A. D. Ames, and M. Egerstedt, “Safety barrier certificates for collisions-free multirobot systems,” *IEEE Trans. Robot.*, c. 661–674, 2017.

23. D. Panagou, D. M. Stipanović, and P. G. Voulgaris, “Distributed coordination control for multi-robot networks using lyapunov-like barrier functions,” *IEEE Trans. Autom. Control*, c. 617–632, 2016.

24. T. Mylvaganam, M. Sassano, and A. Astolfi, "A differential game approach to multi-agent collision avoidance," *IEEE Trans. Autom. Control*, c. 4229–4235, 2017.
25. T. Mylvaganam and M. Sassano, "Autonomous collision avoidance for wheeled mobile robots using a differential game approach," *European J. Control*, c. 53–61, 2018.
26. N. Michael, J. Fink, and V. Kumar, "Cooperative manipulation and transportation with aerial robots," *Autonomous Robots*, c. 73–86, 2011.
27. T. Lee, K. Sreenath, and V. Kumar, "Geometric control of cooperating multiple quadrotor UAVs with a suspended payload," in *Proc. IEEE Conf. Decis. Control. IEEE*, c. 5510–5515, 2013.
28. S. Dai, T. Lee, and D. S. Bernstein, "Adaptive control of a quadrotor UAV transporting a cable-suspended load with unknown mass," in *Proc. IEEE Conf. Decis. Control. IEEE*, c. 6149–6154, 2014.
29. M. Tognon, C. Gabellieri, L. Pallottino, and A. Franchi, "Aerial co-manipulation with cables: The role of internal force for equilibria, stability, and passivity," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2018.
30. "Project wing project wing," 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://x.company/wing/>
31. D. Mellinger, M. Shomin, N. Michael, and V. Kumar, "Cooperative grasping and transport using multiple quadrotors," in *Distributed Autonomous Robotic Systems*. Springer, c. 545–558, 2013.
32. G. Loianno and V. Kumar, "Cooperative transportation using small quadrotors using monocular vision and inertial sensing," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, c. 680–687, 2018.
33. G. Loianno, V. Spurny, J. Thomas, T. Baca, D. Thakur, D. Hert, R. Penicka, T. Krajník, A. Zhou, A. Cho et al., "Localization, grasping, and transportation of magnetic objects by a team of mavs in challenging desert-like environments," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, c. 1576–1583, 2018.

34. “Amazon prime air.” [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>

35. D. Lee, A. Franchi, H. I. Son, C. Ha, H. H. Bühlhoff, and P. R. Giordano, “Semiautonomous haptic teleoperation control architecture of multiple unmanned aerial vehicles,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, c. 1334–1345, 2013.