

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-5-137-148

*Дуюн И.А., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: duyun77@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ ДРОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТКРЫТОЙ ПЛАТФОРМЫ GYM-PYBULLET-DRONES

Аннотация. В данной работе рассмотрена симуляционная среда *gym-pybullet-drones*, являющаяся открытой платформой, ориентированной на специалистов в области робототехники, как инструмент для моделирования динамики квадрокоптеров и разработки алгоритмов управления. Проведено моделирование динамики движения группы дронов с целью проверки работоспособности и устойчивости управления PID-контроллера. Моделирование выполнялось по двум сценариям: движение трех дронов по круговой траектории на разных высотах в одном направлении и движение двух дронов по синусоидальной траектории на разных высотах в противоположных направлениях. В обоих сценариях учитывалось влияние аэродинамических эффектов (*downwash effect*) на динамику исследуемых объектов. Проведенный анализ показал, что PID-контроллер обеспечивает стабильное удержание траектории, но с учетом внешних возмущений, таких как аэродинамические эффекты, наблюдаются корректирующие колебания параметров движения. Исследование влияния нисходящих воздушных потоков продемонстрировало значительное воздействие на нижний квадрокоптер, выраженное в скачках высоты, углов ориентации и изменении скоростей вращения двигателей. Результаты работы подтверждают возможность использования *gym-pybullet-drones* для оценки и оптимизации систем управления дронами, что особенно актуально при разработке многоагентных систем беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: квадрокоптеры, моделирование, PID-контроллер, симуляционная среда, *gym-pybullet-drones*, машинное обучение, управление дронами, *downwash effect*, аэродинамические эффекты, многоагентные системы.

Введение. В последнее время наблюдаются значительные достижения в области проектирования, разработки систем управления и навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1, 2]. Современные БПЛА нашли широкое применение в различных сферах: решение задач логистики и мониторинга окружающей среды, спасательные и военные операции [3, 4]. Выполняемые БПЛА задачи становятся все сложнее, а к системе их управления предъявляют все более жесткие требования: адаптация к меняющимся условиям полета и нестабильности внешних факторов, обход динамических препятствий [5]. В связи с этим усилия исследователей направлены на решение ряда актуальных задач: расчет и управление траекторией движения [6, 7], моделирование движения, в том числе группы аппаратов [8, 9], совершенствование систем управления [10]. Для успешного развития этих направлений требуется создание и совершенствование инструментов, поддерживающих проектирование роботизированных систем, используемых в БПЛА [11, 12]. Симуляции являются важным этапом в разработке как робототехнических платформ, так и систем их управления, особенно в тех случаях, когда создание физических прототипов сопряжено с высокими затратами и рисками [13]. Современные симуляторы, такие как Gazebo и Webots, а также их интеграция с

ROS, широко используются в робототехнике, однако возможности их применения в ряде задач управления, особенно связанных с удаленным или параллельным выполнением, ограничены [14]. В ряде работ рассматриваются методы оптимизации управления роем дронов, включая использование матриц Адамара и алгоритмов самоорганизации, что позволяет повысить вычислительную эффективность и стабильность полета группы аппаратов [15]. Кроме того, в исследованиях уделяется внимание моделированию движения БПЛА с учетом внешних факторов, что позволяет повысить точность навигации и управления [16, 17]. В ряде работ рассматриваются методы адаптации параметров ПИД-регулятора с использованием нейронных сетей, что позволяет повысить точность управления движением БПЛА. В частности, предлагаются алгоритмы оптимальной настройки коэффициентов регулятора на основе моделей прямого и обратного распространения, обеспечивающие снижение ошибок стабилизации по крену и тангажу, что имеет особое значение для работы в сложных условиях полета [18].

Инструментарий OpenAI Gym созданный в 2016 году, был направлен на решение проблемы отсутствия стандартизации среди эталонных задач, применяемых в робототехнических исследованиях, он предоставляет как набор эталонных

задач, так и набор способов и правил (Application Programming Interface, API) для создания новых сред. За пять лет он стал одним из наиболее упоминаемых инструментов в научных публикациях, получив более 2000 цитирований. Помимо стандартного API OpenAI Gym предлагает широкий спектр задач. Простейшие из них, такие как «Classical control» и «Box2D», представляют собой двумерные задачи с дискретными пространствами действий. Более сложные задачи, такие как «Robotics» и «MuJoCo», включают управление роботизированными манипуляторами и моделями движения роботов в трёхмерных пространствах (Swimmer, Hopper, HalfCheetah и другие). Для их реализации используется проприетарный физический движок MuJoCo.

Физический движок MuJoCo также лежит в основе набора задач DeepMind's dm control. Хотя среды dm control не поддерживают API Gym, их структура аналогична, и набор задач DeepMind охватывает управление локомоцией и манипуляцией с объектами. Однако упрощения, такие как сглаживание контактов, ограничивают реалистичность этих сред, что затрудняет перенос разработанных алгоритмов на физические роботы.

Необходимость лицензирования MuJoCo привела к разработке открытых альтернатив, таких как DART от Georgia Tech/CMU и Google's Bullet Physics с его Python-библиотекой PyBullet. На основе движка Bullet были созданы задачи управления и локомоции, которые доступны в pybullet-gym. Помимо этого, сообщества разработчиков создали среды Gym, например, gym-minigrid, представляющие собой двумерные задачи с сеточными пространствами. Эти среды широко использовались в научных исследованиях, получив более 30 упоминаний в публикациях с 2018 по 2021 год.

Среди Gym-сред для квадрокоптеров популярностью пользуется gymfc. Она ориентирована на переносимость алгоритмов управления на физическое оборудование, предлагая инструменты для обучения контроллеров ориентации квадрокоптеров, которые превосходят PID-контроллеры в симуляциях Gazebo. Схожий подход описан в [19], где рассматривается обучение нейронной сети для стабилизации квадрокоптера Crazyflie 2.x в реальных условиях. Однако, gym-pybullet-drones является первой универсальной средой Gym, предназначенной для задач многоагентного обучения с использованием квадрокоптеров.

Поскольку RL тесно связано с задачами управления, большинство симуляций фокусируются на типичных примерах, таких как балансировка маятника. Однако высокая вычислительная

трудоемкость алгоритмов RL требует использования упрощённых моделей, что снижает реализм симуляций. Это создает проблему, так как алгоритмы, обученные в подобных условиях, могут плохо коррелировать с реальными робототехническими задачами.

Рассмотрим подробнее известные симуляторы квадрокоптеров. RotorS является популярным симулятором для моделирования квадрокоптеров, построенным на базе ROS и Gazebo. Он поддерживает несколько моделей многороторных систем AscTec и симулирует работу датчиков, таких как IMU. Однако RotorS не предлагает встроенных интерфейсов для задач обучения с подкреплением, а его зависимость от Gazebo ограничивает возможности параллельного выполнения задач и использования в приложениях, основанных на визуальных данных. Расширением RotorS является CrazyS, разработанный специально для работы с нано-квадрокоптером Bitcraze Crazyflie 2.x. Благодаря доступности и популярности этой платформы в научных исследованиях, Crazyflie также был выбран в качестве основной модели квадрокоптера в gym-pybullet-drones. Однако CrazyS сталкивается с теми же ограничениями, что и RotorS, делая его менее удобным для задач обучения с подкреплением.

AirSim от Microsoft представляет собой один из наиболее известных симуляторов, поддерживающих различные типы транспортных средств, включая автомобили и квадрокоптеры. Он предоставляет фотореалистичную визуализацию благодаря использованию Unreal Engine 4, что делает его отличным инструментом для разработки приложений автономного управления. Однако высокие вычислительные требования и упрощенная физика столкновений (использующая FastPhysicsEngine в режиме многороторного управления) ограничивают его пригодность для задач обучения управления. Кроме того, AirSim не предлагает встроенного интерфейса Gym, хотя сообщество разработало инструменты, позволяющие управлять квадрокоптерами с помощью команд скорости.

Наиболее близким к gym-pybullet-drones является симулятор Flightmare, разработанный в ETH и основанный на Unity. Flightmare предоставляет как фотореалистичную визуализацию, так и высокоскоростную параллельную динамику. Он поддерживает API Gym и рабочий процесс для задач одноагентного RL. Однако в отличие от gym-pybullet-drones, Flightmare не включает среды Gym с наблюдениями на основе визуальных данных, совместимых с многоагентным RL, что ограничивает его возможности в области коллективного управления.

Методика. В данной работе рассматривается методика применения среды `gym-pybullet-drones`, разработанной как открытая платформа для определения задач управления одним или несколькими квадрокоптерами. Она ориентирована на специалистов в области робототехники и машинного обучения, предоставляя удобный инструмент для реализации RL-алгоритмов. Основные преимущества `gym-pybullet-drones` включают:

- реализм: учёт столкновений, аэродинамических эффектов и возможность расширения динамической модели;
- гибкость: поддержка многоагентных систем RL, задач визуального обучения и других сценариев;
- параллельность: одновременное выполнение нескольких симуляций;
- простота использования: наличие встроенных контроллеров PID и поддержка библиотек RL, таких как `Stable Baselines3`.

Рассмотрим подробнее возможности и особенности применения среды `gym-pybullet-drones`.

Инструментарий `OpenAI Gym` создан для стандартизации разработки задач и алгоритмов обучения с подкреплением (RL) на Python. В рамках стандартной модели Маркова (MDP) класс среды принимает действие, использует его для обновления своего внутреннего состояния (шага) и возвращает новое состояние (наблюдение), а также соответствующее вознаграждение. Этот процесс напоминает простой контур обратной связи, где контроллер подает управляющий сигнал объекту, чтобы получить (возможно, зашумленные) измерения на выходе.

Кроме того, `OpenAI Gym` предоставляет дополнительную информацию о терминальных состояниях (`done`) и стандартный API для сброса среды между эпизодами, а также для получения информации о пространстве действий и наблюдений. Эти возможности делают `Gym` универсальным инструментом для разработки и тестирования RL-алгоритмов.

Данная среда имеет физический движок, который является незаменимым инструментом для исследований в робототехнике и машинном обучении: ускоряет процесс разработки и тестирования новых приложений, обеспечивает генерацию больших наборов данных для обучения алгоритмов. В ней использован открытый физический движок `Bullet Physics`. Его выбор обусловлен следующими факторами: высокоэффективная система управления столкновениями, поддержка рендеринга как на CPU, так и на GPU, совместимость с унифицированным форматом описания

роботов (URDF). Возможность пошагового выполнения физики позволяет синхронизировать рендеринг и кинематику, а также управлять ими с произвольной частотой. Эти преимущества делают `Bullet Physics` отличным выбором для симуляции сложных сценариев.

Для моделирования сил и моментов, действующих на квадрокоптеры, в среде `gym-pybullet-drones` используется библиотека `PyBullet`. Этот инструмент позволяет рассчитывать и обновлять кинематические параметры всех транспортных средств на основе их взаимодействий с окружающей средой. Физический движок обеспечивает точное моделирование поведения квадрокоптеров, учитывая как их аэродинамические свойства, так и взаимодействия с поверхностями и препятствиями.

Стандартной моделью квадрокоптера, используемой в `gym-pybullet-drones`, является `Bitcraze Crazyflie 2.x`. Благодаря своей популярности и доступности эта платформа позволяет использовать данные идентификации системы и результаты реальных экспериментов для задания параметров. Основные характеристики квадрокоптера, такие как длина рычага L , масса m , инерционные свойства J , физические константы и форма модели для столкновений, задаются в файлах URDF. Эти параметры подготовлены как для конфигурации в виде креста, так и для конфигурации с прямыми лучами. Помимо этого, предоставлены URDF-файлы для более крупной модели квадрокоптера, основанной на конструкции `Hummingbird`.

`PyBullet` позволяет задавать ключевые параметры симуляции, включая ускорение свободного падения g и частоту шагов выполнения физики, которая может быть значительно выше частоты управления в `Gym`. В дополнение к физическим константам `PyBullet` использует данные из URDF-файлов для загрузки CAD-моделей квадрокоптера.

Силы, прикладываемые к каждому из четырёх моторов, а также момент, возникающий вокруг вертикальной оси квадрокоптера, зависят от квадратов скоростей моторов в оборотах в минуту (RPM). Эти параметры линейно связаны с сигналами широтно-импульсной модуляции (PWM), которые используются для управления моторами. Для упрощения считается, что управление моторами осуществляется практически мгновенно. В процессе полета могут возникать дополнительные аэродинамические эффекты, вызванные взаимодействием с окружающей средой. Это особенно заметно при полете вблизи земли или при взаимодействии с другими летательными аппаратами. `PyBullet` предоставляет

возможность моделировать такие эффекты отдельно и интегрировать их в общую физическую систему.

Каждый раз, когда *gym-pybullet-drones* выполняет шаг симуляции, включающий несколько шагов физического движения, система возвращает вектор наблюдений. В кодовой базе среды предусмотрено несколько вариантов представления наблюдений, однако все они включают основную кинематическую информацию. Эта информация представлена в виде словаря, где ключи соответствуют индексам дронов, а значения содержат: позиции x, y, z ; кватернионы q ; углы крена (*roll*), тангажа (*pitch*) и рыскания (*yaw*); линейные (v) и угловые (ω) скорости; скорости двигателей (*RPM*).

Используя интеграцию *PyBullet* с *TinyRenderer* и *OpenGL3*, *gym-pybullet-drones* поддерживает создание наблюдений в виде видеоизображений с перспективы каждого дрона. Эти наблюдения могут включать: RGB-видео, глубинные карты, сегментацию объектов. Эти данные формируются в направлении положительной локальной оси каждого аппарата и могут быть полезны для задач визуального обучения.

Для выполнения шага в *gym-pybullet-drones* необходимо передать действие, представляющее собой управляющий ввод. Поскольку различные робототехнические задачи требуют разных уровней абстракции (например, стабилизация или планирование траектории), в среде реализовано несколько вариантов пространств действий. Стандартное пространство действий *gym-pybullet-drones* представлено в виде словаря, где ключами выступают индексы дронов, а значениями — массивы скоростей четырех двигателей, выраженных в оборотах в минуту (*RPM*). Альтернативно, управление может осуществляться через словарь, содержащий векторы желаемой скорости. В этом случае PID-контроллер переводит входные скорости в сигналы ШИМ (широтно-импульсной модуляции) для управления моторами. Этот контроллер включает подпрограммы, реализующие позиционное и угловое управление, что позволяет учитывать особенности траектории движения и стабилизации квадрокоптера.

Основная часть. В данной работе были выполнены две сессии вычислительного эксперимента посредством симуляции динамики полета группы квадрокоптеров с использованием среды *gym-pybullet-drones* с целью проверки работоспособности PID-регулятора, который управляет квадрокоптерами, осуществляющими движение по круговой траектории в плоскости X-Y на разных высотах и учитывает возмущающие факторы в виде аэродинамических эффектов.

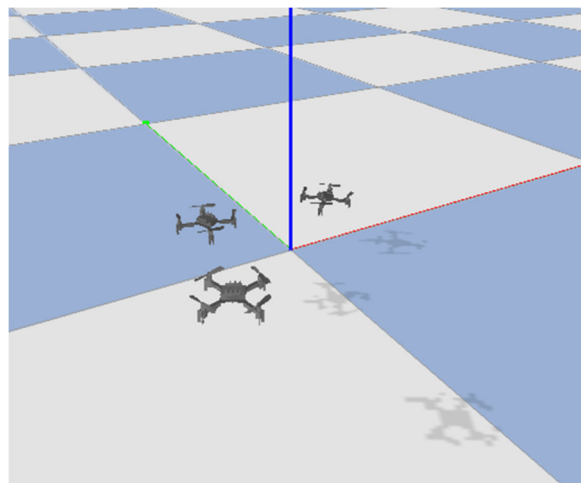


Рис.1. Расчетная схема траекторий движения квадрокоптеров первой сессии

В качестве основных входных условий при проведении первой сессии вычислительного эксперимента (расчетная схема на рис. 1) приняты следующие характеристики:

в симуляции участвуют три квадрокоптера, каждый из которых следует по круговой траектории вокруг заданной центральной точки;

дроны двигаются на разных высотах, что позволяет оценить влияние вертикального расположения на точность траектории;

управление осуществляется PID-контроллером (*DSLPIIDControl*), который корректирует углы наклона и скорость двигателей для точного следования траектории;

контроллер использует кинетические данные (позиции, углы ориентации, скорости перемещения) и корректирует управление на каждом временном шаге.

Выходными параметрами первой сессии вычислительного эксперимента являются следующие данные:

- графики траекторий движения (позиция, скорость движения, углы ориентации);
- стабильность движения — анализируется, насколько точно дроны следуют заданной траектории.
- колебания и устойчивость PID-регулятора, отображенные в динамике управления.

На рис.2 представлены графики координатного положения квадрокоптеров, которые отображают движение по заданной траектории и позволяют оценить насколько стабильно удерживается траектория. На графиках видно, что все три дрона движутся по круговой траектории в плоскости X-Y на разных высотах, движение выглядит плавным, но не является идеальным, присутствуют небольшие отклонения, что связано с

влиянием аэродинамических эффектов и коррекцией PID-контроллера, движение по вертикальной оси стабильное, каждый дрон сохраняет свой уровень высоты. На рис.3 представлены графики углов ориентации, которые описывают наклон и поворот дрона в воздухе: roll (r) и pitch (p) - колебания вокруг осей X и Z, yaw (y) - поворот вокруг вертикальной оси. Видно, что roll (r) и pitch (p) демонстрируют характерные колебания, что связано с реакцией на изменение траектории, они остаются в пределах небольшого диапазона, что подтверждает стабильность управления. Yaw (y) практически стабилен, что говорит о том, что дроны не вращаются вокруг своей оси.

На рис. 4 и рис. 5 изображены соответственно угловые и линейные скорости движения квадрокоптеров. Графики угловых скоростей имеют существенные колебания, это типично для систем, в которых контроллер активно компенсирует небольшие ошибки положения. Линейные скорости V_x и V_y изменяются плавно, что соответствует движению дронов по круговой траектории, скорость V_z (по оси z) остается практически нулевой после начального этапа полета, что указывает на стабильное удержание высоты, небольшие изменения V_z можно заметить в начале полета, что связано с выходом дронов на заданные высоты.

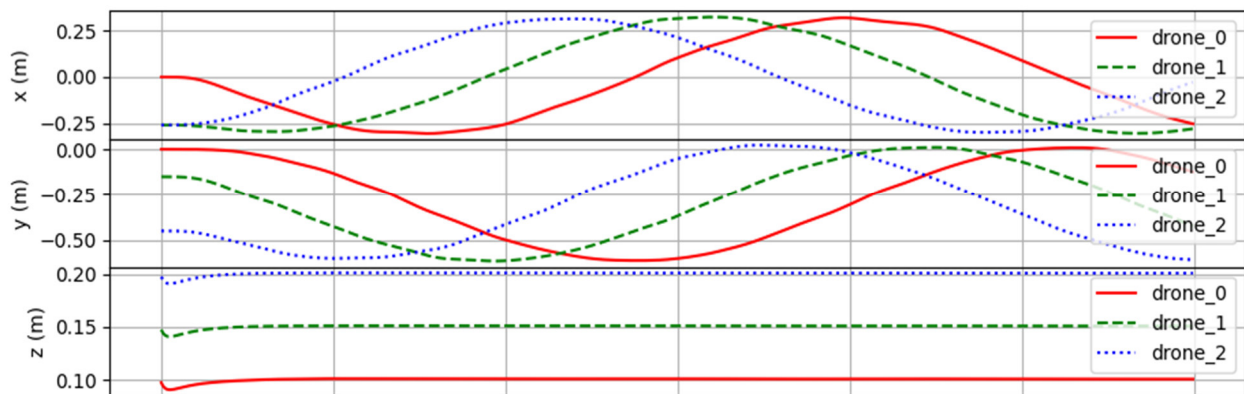


Рис. 2. Траектории движения дронов трех в пространстве

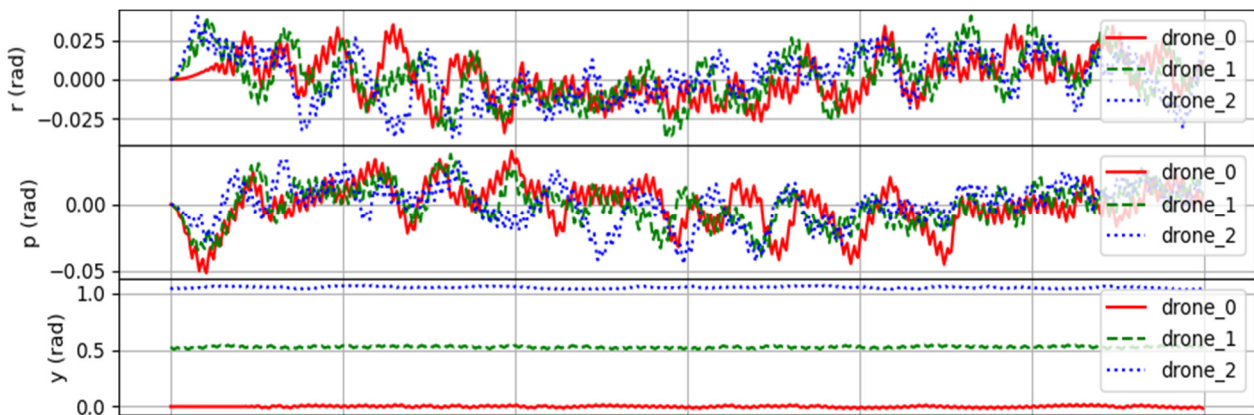


Рис. 3. Углы ориентации трех дронов в пространстве

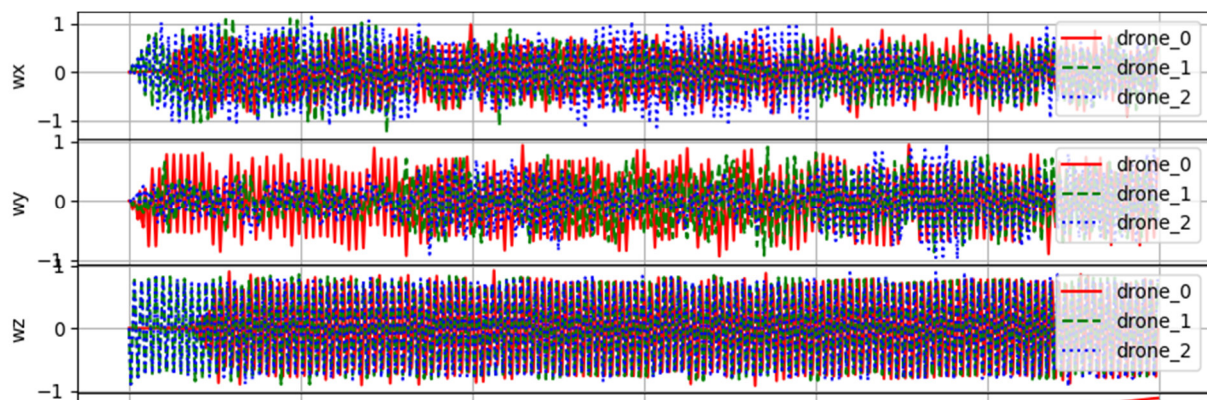


Рис. 4. Угловые скорости движения трех квадрокоптеров

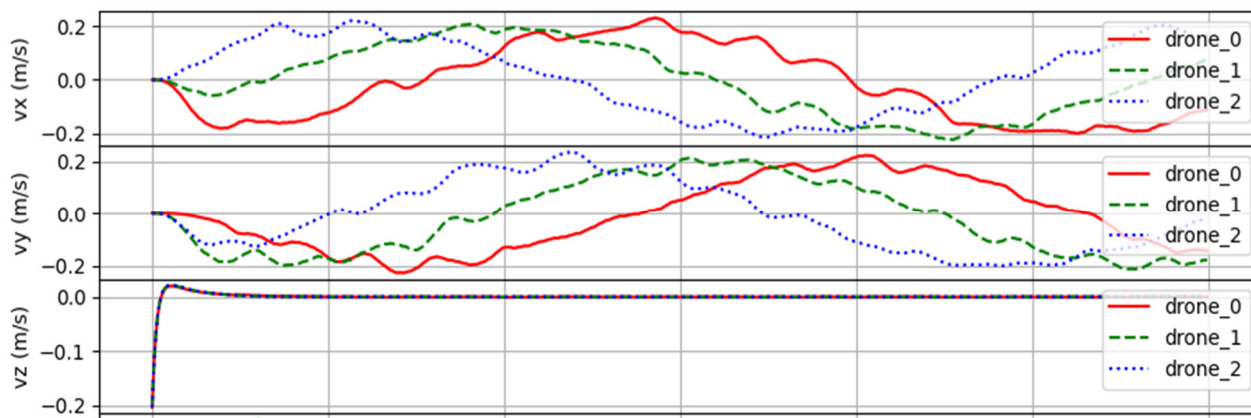


Рис. 5. Линейные скорости движения трех квадрокоптеров

На рис. 6 и рис. 7 соответственно изображены графики крутящего момента, прикладываемые к дрону для его ориентации, и скорости вращения четырех двигателей для каждого дрона.

Можно заметить, что двигатели работают в разном режиме, компенсируя аэродинамические эффекты. Это означает, что контроллер адаптирует работу моторов в ответ на возникающие возмущения.

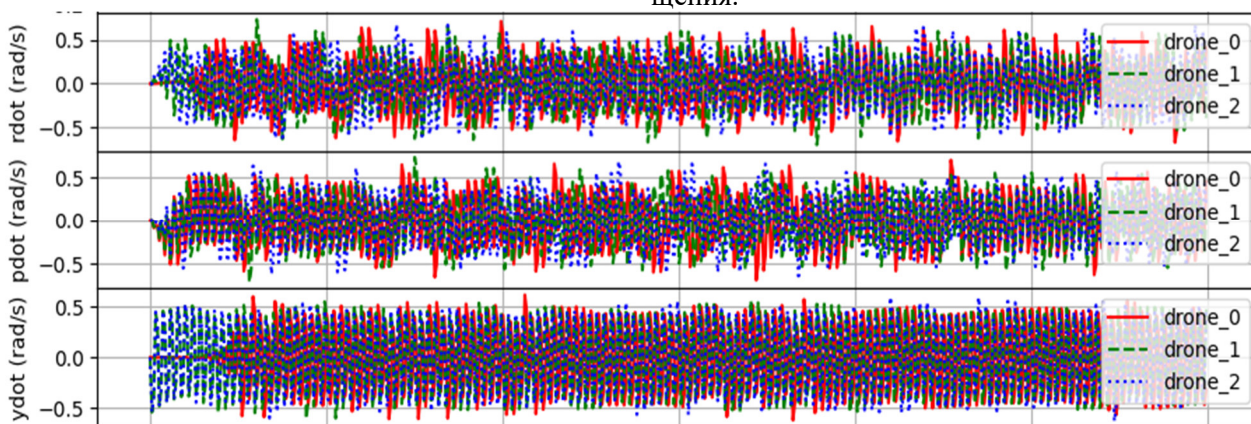


Рис. 6. Крутящие моменты, прикладываемые для ориентации трех квадрокоптеров

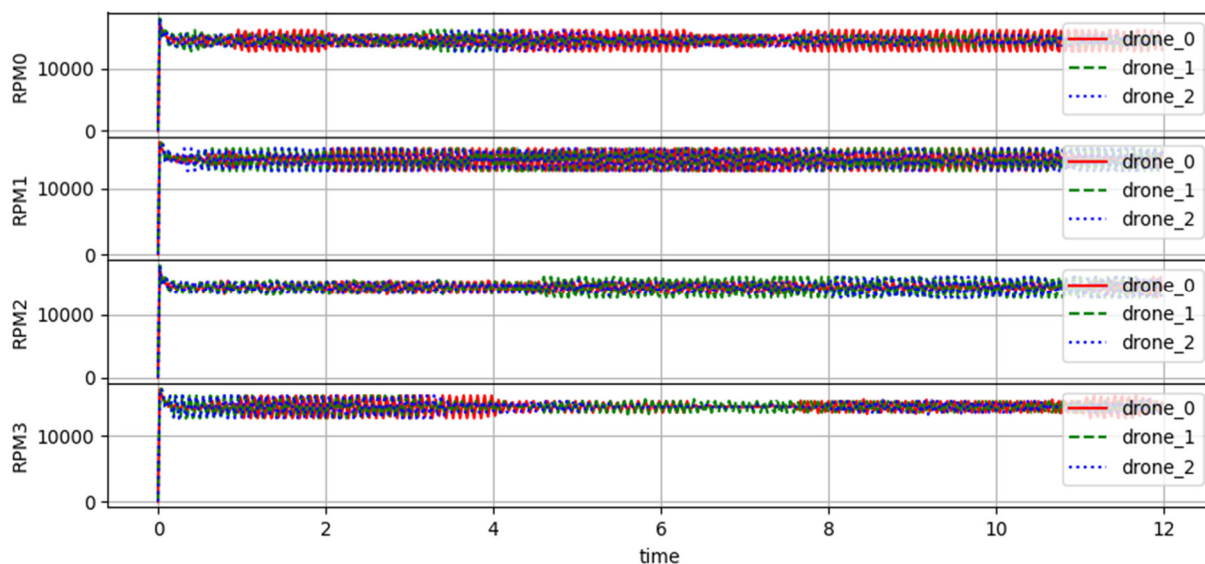


Рис. 7. Скорости вращения двигателей трех квадрокоптеров

В целом по результатам первой сессии вычислительного эксперимента можно сделать следующие выводы:

- PID-контроллер успешно удерживает траекторию, но с небольшими отклонениями, которые корректируются в процессе полета;
- присутствуют колебания параметров, особенно в угловых скоростях, но не превышают

критических значений, что говорит о стабильности системы;

- скорость в зависимости от высоты ведет себя ожидаемо: при стабилизации по вертикальной оси линейная скорость равна нулю, что подтверждает успешное удержание высоты.

Целью проведения второй сессии вычислительного эксперимента являлось исследование влияния нисходящих воздушных потоков, создаваемых одним квадрокоптером, на движение другого квадрокоптера, находящегося ниже.

В качестве основных входных условий при проведении второй сессии вычислительного эксперимента (расчетная схема на рис. 8) приняты следующие характеристики:

- в симуляции участвуют два квадрокоптера, движущиеся вдоль оси X-Z в противоположных направлениях;

- квадрокоптеры имеют разную высоту полета: один летит на высоте 1 метр, а второй — на высоте 0,5 метра;

- управление осуществляется PID-контроллером (DSLPIControl), который регулирует движение обоих дронов;

- физическая модель PyBullet с эффектом downwash (Physics.PYB_DW) используется для учета аэродинамических взаимодействий.

Выходными параметрами второй сессии вычислительного эксперимента являются следующие данные:

- траектории движения дронов, которые позволяют оценить, как эффект аэродинамических взаимодействий (downwash) влияет на движение нижнего квадрокоптера;

- скоростные характеристики позволяют анализировать влияние вихревых потоков на изменение вертикальной скорости нижнего дрона;

- отклонения от идеальной траектории позволяют оценить, насколько сильным является влияние верхнего дрона.

Этот эксперимент наглядно показывает, как взаимодействие дронов изменяет их поведение в

полете, что особенно важно при разработке алгоритмов координации и управления группами беспилотников.

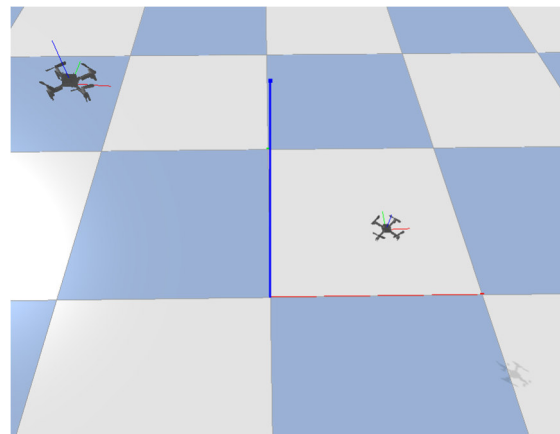


Рис. 8. Расчетная схема траекторий движения квадрокоптеров второй сессии

На рис. 9 и рис. 10 представлены графики, характеризующие удержание траектории: координатные положения и углы наклона соответственно. График по оси X характеризует движение дронов по синусоидальной траектории, как и было запрограммировано. Однако видны небольшие отклонения в движении нижнего дрона (drone_1), что связано с действием аэродинамического эффекта (downwash). Из графика по оси Z можно сделать вывод, что высота нижнего дрона нестабильна, что обусловлено влиянием вихревых потоков, которые вызывают периодические изменения в его вертикальном положении. По графикам рис.10 можно судить об угловых отклонениях при отработке траектории: крен (γ), тангаж (ρ), рыскание (ψ). Верхний дрон (drone_0) демонстрирует стабильные углы наклона. Нижний дрон (drone_1) испытывает заметные колебания, особенно по углам тангажа и рыскания. В момент максимального сближения с верхним дроном происходит скачкообразное изменение углов, как следствие влияния воздушных потоков. Таким образом, можно сделать вывод, что нижний квадрокоптер испытывает значительное аэродинамическое воздействие, что приводит к нестабильности его ориентации.

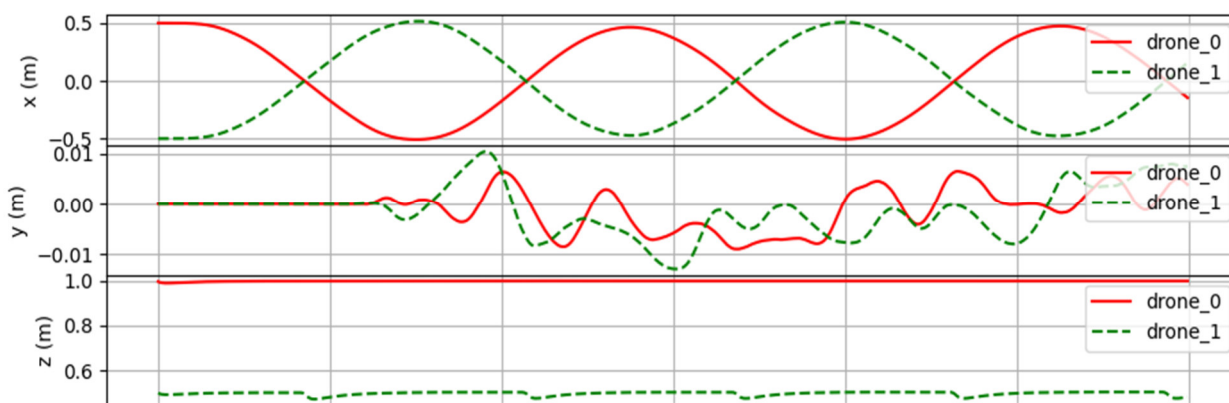


Рис. 9. Траектории движения двух дронов в пространстве

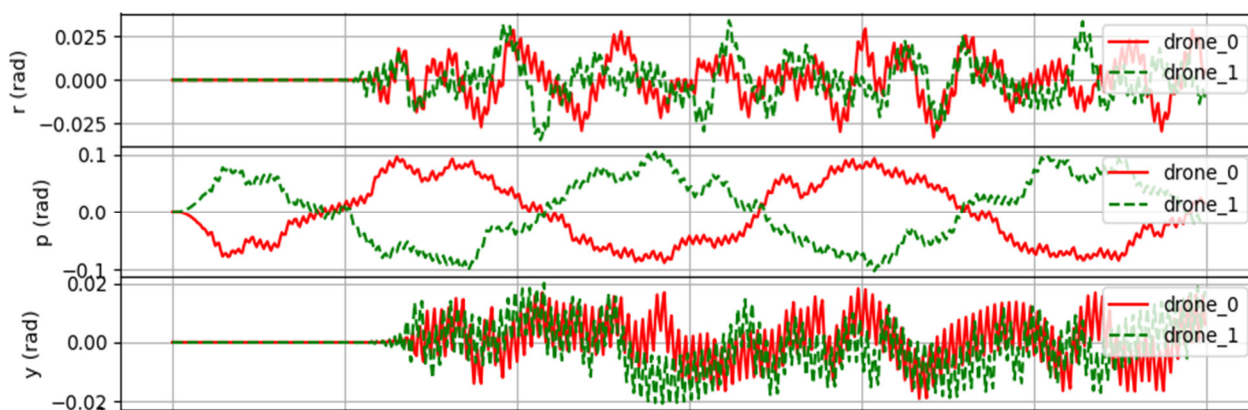


Рис. 10. Углы ориентации двух дронов в пространстве

Графики рис. 11 позволяют оценить влияние аэродинамического эффекта на линейную скорость дронов. Скорости V_x обоих дронов совпадают, что ожидаемо, так как они движутся по синусоиде. Относительно скорости V_z наблюдаются всплески отрицательной скорости у нижнего дрона, когда он проходит под верхним дроном. Это подтверждает, что он теряет подъемную

силу из-за нисходящих потоков. Верхний дрон при этом не испытывает значительных изменений в вертикальной скорости. Таким образом, можно сделать вывод, что аэродинамический эффект замедляет подъем нижнего дрона, вызывая кратковременные потери высоты.

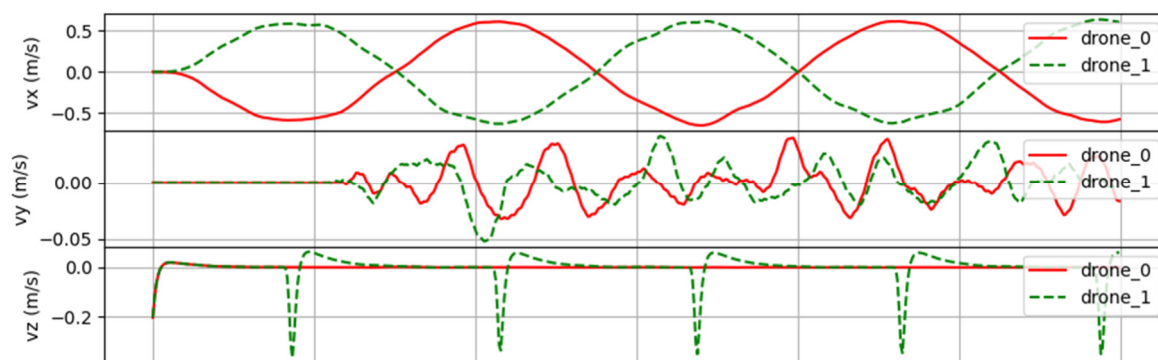


Рис. 11. Линейные скорости движения двух квадрокоптеров

Графики рис.12 позволяют оценить влияние совместного движения на работу моторов дронов. В моменты прохождения нижнего дрона под верхним видны пики скорости роторов, что является следствием работы алгоритма управления, который компенсирует потерю подъемной силы,

увеличивая мощность двигателей. В остальное время значения RPM остаются стабильными и синхронизированными между двумя дронами, контроллер корректирует работу моторов, компенсируя влияние вихревых потоков.

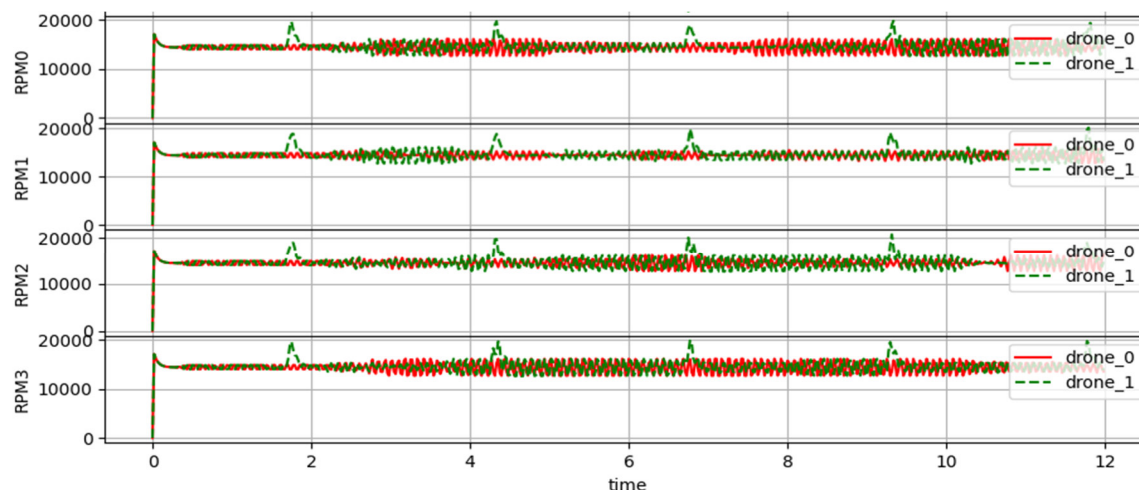


Рис. 12. Скорости вращения двигателей двух квадрокоптеров

Результаты второй сессии вычислительного эксперимента подтверждают заметное влияние нисходящих потоков (downwash effect) на нижний квадрокоптер. Этот эффект приводит к неустойчивости высоты (скачки на графике Z), колебаниям углов ориентации (особенно тангаж и рыскание), дополнительной нагрузке на моторы (скачки RPM), снижению подъемной силы у нижнего дрона (падение Vz).

Эти данные важны при разработке алгоритмов управления многоагентными системами дронов, так как позволяют учитывать аэродинамические эффекты и корректировать управление для предотвращения неустойчивости.

Выводы. В данной работе проведено моделирование динамики движения группы квадрокоптеров с использованием симуляционной среды gym-bullet-drones. В рамках вычислительного эксперимента были исследованы две ключевые задачи: анализ эффективности PID-контроллера при управлении группой дронов, движущихся по круговой траектории в плоскости X-Y и исследование влияния аэродинамических эффектов (downwash effect) на движение дронов, летящих на разных высотах.

Результаты первой сессии эксперимента показали, что PID-контроллер успешно поддерживает заданную траекторию движения квадрокоптеров, обеспечивая их стабильное положение и скорость. Однако были выявлены небольшие отклонения, вызванные корректирующими действиями контроллера и влиянием аэродинамических эффектов. Анализ графиков движения, углов ориентации и скоростей дронов подтвердил, что контроллер эффективно стабилизирует систему, минимизируя ошибки и обеспечивая предсказуемое поведение аппаратов.

Во второй сессии эксперимента исследовано влияние нисходящих воздушных потоков, создаваемых верхним дроном, на движение нижнего аппарата. Полученные данные демонстрируют, что эффект downwash оказывает значительное влияние на стабильность полета нижнего квадрокоптера, вызывая периодические изменения его высоты, углов ориентации и увеличенную нагрузку на моторы. Данные эффекты были зафиксированы в виде скачков скорости вращения двигателей, а также временных потерь подъемной силы, что подтверждает необходимость учета аэродинамических взаимодействий при проектировании систем управления группами беспилотных аппаратов.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает эффективность среды gym-bullet-drones для моделирования и анализа динамики квадрокоптеров в условиях реального

аэродинамического воздействия. Полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов управления беспилотными летательными аппаратами, а также при оптимизации параметров контроллеров для обеспечения стабильности и точности движения дронов в сложных сценариях.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках проекта РНФ «Интеллектуальное управление интегрированными и автономными роботизированными системами на основе данных с обеспечением надежности и безопасности» (соглашение № 24-49-02073).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дрозд О.В., Бордюгов С.И. Функциональное моделирование испытательного стенда беспилотных летательных аппаратов // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. №12. С. 52–56. DOI: 10.18127/j20700784-201912-08.
2. Харченко В.П., Кузьменко Н.С. Минимизация отклонений траектории беспилотного летательного аппарата во время облета препятствий сложной формы // Вестник Национального Авиационного Университета. 2012. Т. 2. №51. С. 18–21.
3. Сурмин В.И., Аникеев Е.А. Оптимизация маршрутов и управления траекториями беспилотных летательных аппаратов с помощью алгоритмов искусственного интеллекта // Моделирование информационных систем и технологий: материалы Международной научно-практической конференции, Воронеж, 2 апреля 2024 года. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2024. С. 448–454. DOI: 10.58168/MoInSyTe2024_448-454.
4. Воронов С.В., Дементьев В.Е., Логинов С.С. Разработка алгоритмов и программных средств управления беспилотным летательным аппаратом // Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. КИИ-2014: труды конференции, Казань, 24–27 сентября 2014 года. Т. 3. Казань: РИЦ «Школа», 2014. С. 249–255.
5. Набиев Т.К., Шиманчук Д.В. Расчёт траекторий движения группы БПЛА в строю // Процессы управления и устойчивость. 2024. Т. 11. №1. С. 121–128.
6. Вагизов М.Р., Хабаров С.П., Соловьев И.Б. Клиент-серверная архитектура модели системы формирования программных траекторий движения БПЛА // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. №2(42). С. 22–29.
7. Шашихин В.Н., Мерзляков К.Д. Синтез стабилизирующего управления квадрокоптером

на основе линейных матричных неравенств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. №7. С. 376–383. DOI: 10.17587/mau.23.376-383.

8. Вольников М.И. Моделирование движения беспилотных летательных аппаратов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №3(21). С. 42–48. DOI: 10.30987/2658-6436-2023-3-42-48.

9. Гиргидов Р.А. Имитационное моделирование роя с использованием произведения Адамара // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2023. №3. С. 10–22. DOI: 10.55959/MSU/0137-0782-15-2023-47-3-10-22.

10.Малинина Н.В. Управление БПЛА при помощи искусственного интеллекта // Инновации. Наука. Образование. 2021. №32. С. 1408–1418.

11.Liu C.K., Negrut D. The role of physics-based simulators in robotics // Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems. 2021. Vol. 4. No. 1. DOI: 10.1146/annurev-control-072220-093055.

12.Song Y., Naji S., Kaufmann E., Loquercio A., Scaramuzza D. Flightmare: A flexible quadrotor simulator // Proceedings of the 4th Conference on Robot Learning. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2009.00563.

13.Panerati J., Zheng H., Zhou S., Xu J., Prorok A., Schoellig A.P. Learning to Fly — a Gym Environment with PyBullet Physics for Reinforcement Learning of Multi-agent Quadcopter Control // arXiv preprint. 2021. Vol. 2103.02142. DOI: 10.48550/arXiv.2103.02142.

14.Badia A.P., Piot B., Kapturowski S., Sprechmann P., Vitvitskyi A., Guo Z.D., Blundell C.

Agent57: Outperforming the Atari human benchmark // Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. 2020. Vol. 119. Pp. 507–517. DOI: 10.48550/arXiv.2003.13350.

15.Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Свиридова И.В. Методика настройки оптимальных параметров ПИД-регулятора для управления траекторией беспилотного летательного аппарата с использованием нейронных сетей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. №3. С. 115–121. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.3.017.

16.Доржиев А.С. Обучение с подкреплением для беспилотных летательных аппаратов // Научные тенденции: вопросы точных и технических наук: сборник научных трудов по материалам XXIX международной научной конференции, Санкт-Петербург, 12 июля 2020 года. Санкт-Петербург: Центр Научных Публикаций Международной Объединенной Академии Наук, 2020. С. 5–8. DOI: 10.18411/sciencepublic-12-07-2020-02.

17.Неретин Е.С., Головин Д.А., Сухомейло Н.Я. Разработка математической модели задачи поиска и сопровождения объекта группой беспилотных летательных аппаратов с применением глубокого обучения с подкреплением // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия отечественной гражданской авиации, Иркутск, 12–13 октября 2023 года. Иркутск: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2023. С. 282–290.

18.Powers C., Mellinger D., Kumar V. Quadrotor Kinematics and Dynamics // Springer Netherlands. 2015. Pp. 307–328. DOI: 10.1007/978-90-481-9707-1_71.

Информация об авторах

Дуюн Иван Александрович, студент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем. E-mail: duyun77@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рыбак Лариса Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.02.2025 г.

© Дуюн И.А., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А., 2025

*Duyun I.A., Duyun T.A., Rybak L.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

*E-mail: duyun77@mail.ru

MODELING THE DYNAMICS OF A DRONE GROUP USING THE OPEN GYM-PYBULLET-DRONES PLATFORM

Abstract. This study examines the gym-pybullet-drones simulation environment as a tool for modeling quadcopter dynamics and developing control algorithms. Two scenarios were simulated: the movement of a drone group along a circular trajectory using a PID controller and the study of aerodynamic effects (downwash effect) on quadcopters flying at different altitudes. The analysis showed that the PID controller ensures stable trajectory tracking, but in the presence of external disturbances such as aerodynamic effects, corrective oscillations in motion parameters were observed. The investigation of downwash effects demonstrated a significant impact on the lower quadcopter, leading to altitude fluctuations, orientation angle variations, and changes in motor rotation speeds. The results confirm the feasibility of using gym-pybullet-drones for evaluating and optimizing drone control systems, which is particularly relevant for the development of multi-agent unmanned aerial vehicle systems.

Keywords: quadcopters, modeling, PID controller, simulation environment, gym-pybullet-drones, machine learning, drone control, downwash effect, aerodynamic effects, multi-agent systems.

REFERENCES

1. Drozd O.V., Bordyugov S.I. Functional Modeling of a Test Stand for Unmanned Aerial Vehicles. *Advances in Modern Radioelectronics*. 2019. No. 12. Pp. 52–56. DOI: 10.18127/j20700784-201912-08. (rus)
2. Kharchenko V.P., Kuzmenko N.S. Minimization of UAV Trajectory Deviations During Obstacle Avoidance. *Bulletin of the National Aviation University*. 2012. Vol. 2. No. 51. Pp. 18–21. (rus)
3. Surmin V.I., Anikeev E.A. Optimization of UAV Route Planning and Trajectory Control Using Artificial Intelligence Algorithms. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modeling of Information Systems and Technologies"*, Voronezh, 2024. Pp. 448–454. DOI: 10.58168/MoInSyTe2024_448-454. (rus)
4. Voronov S.V., Dementiev V.E., Loginov S.S. Development of Algorithms and Software Tools for UAV Control. *Proceedings of the 14th National Conference on Artificial Intelligence with International Participation*, Kazan, 2014. Vol. 3. Pp. 249–255. (rus)
5. Nabiev T.K., Shimanchuk D.V. Calculation of Group UAV Trajectories in Formation. *Control Processes and Stability*. 2024. Vol. 11. No. 1. Pp. 121–128. (rus)
6. Vagizov M.R., Khabarov S.P., Solovyev I.B. Client-Server Architecture of a UAV Trajectory Formation System. *Information Technologies and Systems: Management, Economics, Transport, Law*. 2022. No. 2(42). Pp. 22–29. (rus)
7. Shashikhin V.N., Merzlyakov K.D. Synthesis of Stabilizing Control of a Quadcopter Based on Linear Matrix Inequalities. *Mechatronics, Automation, Control*. 2022. Vol. 23. No. 7. Pp. 376–383. DOI: 10.17587/mau.23.376-383. (rus)
8. Volnikov M.I. Modeling the Motion of Unmanned Aerial Vehicles. *Automation and Modeling in Design and Control*. 2023. No. 3(21). Pp. 42–48. DOI: 10.30987/2658-6436-2023-3-42-48. (rus)
9. Girgidov R.A. Simulation of a Drone Swarm Using Hadamard Matrices. *Bulletin of Moscow University. Series 15: Computational Mathematics and Cybernetics*. 2023. No. 3. Pp. 10–22. DOI: 10.55959/MSU/0137-0782-15-2023-47-3-10-22. (rus)
10. Malinina N.V. UAV Control Using Artificial Intelligence. *Innovations. Science. Education*. 2021. No. 32. Pp. 1408–1418. (rus)
11. Liu C.K., Negrut D. The Role of Physics-Based Simulators in Robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2021. Vol. 4. No. 1. DOI: 10.1146/annurev-control-072220-093055.
12. Song Y., Naji S., Kaufmann E., Loquercio A., Scaramuzza D. Flightmare: A Flexible Quadrotor Simulator. *Proceedings of the 4th Conference on Robot Learning*. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2009.00563.
13. Panerati J., Zheng H., Zhou S., Xu J., Prorok A., Schoellig A.P. Learning to Fly – a Gym Environment with PyBullet Physics for Reinforcement Learning of Multi-Agent Quadcopter Control. *arXiv preprint*. 2021. Vol. 2103.02142. DOI: 10.48550/arXiv.2103.02142.
14. Badia A.P., Piot B., Kapturowski S., Sprechmann P., Vitvitskyi A., Guo Z.D., Blundell C. Agent57: Outperforming the Atari Human Benchmark. *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning*. 2020. Vol. 119. Pp. 507–517. DOI: 10.48550/arXiv.2003.13350.

15. Bashkurov A.V., Khoroshailova M.V., Sviridova I.V. Methodology for Optimizing PID Controller Parameters for UAV Trajectory Control Using Neural Networks. Bulletin of Voronezh State Technical University. 2024. Vol. 20. No. 3. Pp. 115–121. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.3.017. (rus)

16. Dorzhiev A.S. Reinforcement Learning for Unmanned Aerial Vehicles. Scientific Trends: Issues of Exact and Technical Sciences. Proceedings of the XXIX International Scientific Conference, St. Petersburg, 2020. Pp. 5–8. DOI: 10.18411/sciencepublic-12-07-2020-02. (rus)

17. Neretin E.S., Golovin D.A., Sukhomeyeilo N.Ya. Development of a Mathematical Model for Object Search and Tracking by a UAV Group Using Deep Reinforcement Learning. Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference on Civil Aviation, Irkutsk, 2023. Pp. 282–290. (rus)

18. Powers C., Mellinger D., Kumar V. Quadrotor Kinematics and Dynamics. Springer Netherlands. 2015. Pp. 307–328. DOI: 10.1007/978-90-481-9707-1_71.

Information about the authors

Duyun, Ivan A. Student. E-mail: duyun77@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duyun, Tatyana A. Doctor of Engineering Sciences. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Rybak, Larisa A. Doctor of Engineering Sciences. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 15.02.2025 г.

Для цитирования:

Дуюн И.А., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А. Моделирование динамики движения группы дронов с применением открытой платформы GYM-PYBULLET-DRONES // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 137–148. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-5-137-148

For citation:

Duyun I.A., Duyun T.A., Rybak L.A. Modeling the dynamics of a drone group using the open GYM-PYBULLET-DRONES PLATFORM. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 137–148. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-5-137-148