УДК 004.896

ИНТЕГРАЦИЯ ROS2, GAZEBO И PX4 ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ РОЕМ АГЕНТОВ

Д.С. Позднякова[1]

[1]*Самарский университет, г. Самара*
e-mail: darya_pozdnyakova01@mail.ru

Аннотация

Разработка и тестирование алгоритмов управления для роевых беспилотных летательных аппаратов требуют наличия воспроизводимой и реалистичной среды симуляции. В данной работе представлена программа для децентрализованного управления роем агентов, построенная на интеграции ROS2 Jazzy [1], Gazebo Harmonic [2] и PX4 SITL [3], позволяющая создать моделируемую среду, в которой данные с датчиков могут быть реалистично эмулированы и обработаны. Проведен эксперимент на сценарии с одновременным движением четырёх агентов. Все проверки качества пройдены успешно.

Ключевые слова: ROS2, Gazebo, PX4, искусственный интеллект, управление роем, симуляция.

Введение

Важным фактором тестирования программ навигации роя автономных агентов является возможность сбора реалистичных наборов сенсорных данных в контролируемых динамических средах [4, 5]. Однако, сбор данных в реальных экспериментах сопряжён с проблемой: исследователи должны собирать разнообразные и репрезентативные наборы данных для создания надежных и эффективных программ. Моделирование данных датчиков играет важную роль в этой работе, позволяя исследователям и инженерам оценивать алгоритмы, тестировать методы управления и проектировать производительность робототехнических систем.

1. Генерация и обработка сенсорных данных

Архитектура системы построена по принципу разделения ответственности, где каждый компонент выполняет строго определённую функцию в общем потоке обработки данных. В разработанном программном решении функции между компонентами распределены следующим образом: 1) Автопилот PX4 SITL выполняет расчёт динамики полёта каждого агента на основе управляющих команд и предоставляет телеметрическую информацию, включая локальное положение в пространстве, одометрию, статусные данные и счётчики сбросов оценки положения. 2) Среда физической симуляции Gazebo обеспечивает моделирование взаимодействия аппаратов с окружающей средой и генерирует первичные сенсорные данные с помощью встроенных плагинов. В частности, плагин лидара симулирует распространение лазерных лучей и их отражение от объектов, а плагин глубинной камеры генерирует облака трёхмерных точек, представляющих геометрию сцены. 3) Фреймворк ROS2 обеспечивает передачу данных от Gazebo и PX4 к узлам обработки, а также доставку управляющих команд к исполнительным модулям.

Плагин лидара, встроенный в среду Gazebo, симулирует последовательное испускание 72 лазерных лучей от каждого агента. Максимальная дальность обнаружения составляет 8 метров. Угловое разрешение между соседними лучами составляет 5 градусов. Установлен временной порог устаревания данных лидара, равный 0,7 секунды. Каждый луч распространяется в пространстве до тех пор, пока не достигнет какого-либо объекта - другого агента, элемента статических препятствий или границы сцены. Плагин вычисляет расстояние до объекта по времени возвращения отражённого сигнала. На основе полученных измерений формируется сообщение, содержащее массив расстояний для каждого из семидесяти двух угловых направлений.

Плагин глубинной камеры симулирует работу стереопары или сенсора глубины, генерируя облако трёхмерных точек, представляющих геометрию сцены перед агентом. Каждая точка облака характеризуется тремя координатами в системе координат, связанной с сенсором. Полученное облако точек передается ROS2 в виде специализированного сообщения, содержащего структурированное представление набора трёхмерных координат. Затем для каждого углового сектора, производится поиск ближайшей к сенсору точки из облака. В результате формируются два массива: массив минимальных расстояний до объектов в каждом направлении и маска валидности, указывающая на наличие хотя бы одной точки в данном секторе.

PX4 SITL, получая управляющие команды, вычисляет изменение состояния аппарата во времени на основе модели динамики полёта БПЛА. Результатом вычислений являются оценки локального положения, ориентации, линейной и угловой скорости аппарата. При обнаружении положительного изменения любого из счётчиков сбросов оценки положения фиксируется событие сброса, что инициирует переход в режим повторной привязки координатной системы.

Алгоритм обнаружения соседей выполняет кластеризацию лидарных возвратов, группируя соседние угловые направления, в которых были обнаружены объекты. Порог объединения двух измерений в один кластер определяется максимальным расстоянием между соседними точками, составляющим 0,7 метра. Для каждого сформированного кластера определяется точка, находящаяся на минимальном расстоянии от сенсора.

Для каждого обнаруженного кластера запускается механизм трекинга, сопоставляющий новые измерения с ранее отслеживаемыми траекториями соседних агентов. Сопоставление осуществляется на основе геометрической близости с использованием воротного фильтра, пропускающего измерения, отклоняющиеся от предсказанной позиции трека не более чем на 1,5 метра. Каждому треку присваивается уникальный идентификатор, сохраняющийся на протяжении всего времени существования трека. Трек считается активным в течение 1 секунды после последнего подтверждённого измерения.

На основе обработанных сенсорных данных и результатов трекинга соседей формируется структурированное сообщение наблюдения, содержащее следующие компоненты: собственное положение аппарата в глобальной системе координат, вектор линейной скорости, ориентацию, массив расстояний до препятствий, список обнаруженных соседей (каждый с идентификатором, дистанцией, направлением и относительной скоростью), относительное положение целевой точки, а также метаданные - источник данных о собственном положении, состояние отслеживания координатной системы и значения счётчиков сбросов. Сформированное сообщение передается узлу, реализующему управление.

2. Эксперимент: полет к цели с избежанием столкновений

Целью эксперимента является проверка работоспособности разработанной программы на задаче децентрализованного управления роем БПЛА. В рамках эксперимента оценивается способность программы генерировать и обрабатывать реалистичные сенсорные данные в условиях движения нескольких агентов. Для проведения эксперимента выбран сценарий, в котором агенты стартуют на окружности, а целевые точки каждого агента расположены в ее центре. Статические препятствия в сцене отсутствуют. В эксперименте участвуют четыре БПЛА, стартовые позиции которых равномерно распределены по окружности. Высота полёта поддерживается в диапазоне от 1,6 до 2,7 метра. Продолжительность активной фазы эксперимента составляет 30 секунд.

На каждой итерации цикла для каждого агента выполняются следующие операции: 1) узел формирования наблюдений собирает текущие лидарные измерения, данные глубинной камеры и телеметрию автопилота; 2) обранные данные проходят этапы предварительной обработки, преобразования координат, кластеризации и трекинга соседей, формируя структурированное локальное наблюдение; 3) формированное наблюдение передаётся узлу, реализующему политику управления; 4) политика управления на основе правил вычисляет командные значения линейной и угловой скорости; 5) командные значения транслируются через коммуникационный мост в формат, воспринимаемый автопилотом, и отправляются в PX4; 6) автопилот вычисляет новое состояние аппарата на основе полученных команд и модели динамики; 7) Gazebo обновляет визуальное отображение положения и ориентации аппарата в соответствии с вычисленным состоянием.

По истечении установленной продолжительности эксперимента (30 секунд) эпизод принудительно завершается независимо от достижения целевых точек. В ходе выполнения система сохраняет результаты в виде набора артефактов, включающего формальный отчёт об эпизоде, журнал состояний и агрегированные метрики, используемые для последующего анализа.

По результатам эксперимента доля временных отсчётов, в которых имелась информация о собственном положении агента, составила 100% для всех четырёх аппаратов. Доля отсчётов, в которых источником информации о положении служила телеметрия автопилота PX4, составила от 99,4% до 100% в зависимости от агента. Доля отсчётов, в которых одометрическая информация была непрерывной, составила от 98,8% до 99,4%. Доля времени, в течение которого автопилот находился в режиме внешнего управления, составила от 99,3% до 100%. Начальная дистанция от каждого агента до его целевой точки составляла приблизительно 22 метра. По завершении эксперимента остаточная дистанция составила от 5,48 до 6,39 метра в зависимости от агента. Таким образом, средний прогресс в направлении цели составил 16,3 метра, что соответствует 74% от начальной дистанции. Анализ метрики избежания столкновений показал, что в процессе движения для каждого агента был зафиксирован один эпизод опасного сближения. Минимальная дистанция между агентами в отдельных случаях снижалась до 0,18 м, что свидетельствует о нарушении безопасного порога и указывает на ограниченную эффективность используемой rule-based политики избегания столкновений.

Заключение

Разработано программное решение для эмуляции и обработки сенсорных данных в моделируемой среде, построенное на интеграции ROS2, Gazebo и PX4 SITL. Эксперимент подтвердил возможность генерации и обработки реалистичных сенсорных данных, а также устойчивую работу системы в условиях коллективного движения. Полученные результаты демонстрируют высокий уровень надёжности симуляции. В рамках дальнейшей работы планируется исследование и внедрение более эффективных алгоритмов управления, в частности методов обучения с подкреплением и других адаптивных подходов, направленных на повышение качества координации агентов, достижение целевых точек в ограниченное время и снижение числа опасных сближений. Кроме того, предполагается проведение экспериментов на различных сценариях полёта, включая более сложные условия с препятствиями и увеличенным числом агентов, с целью всесторонней оценки устойчивости и масштабируемости разработанной системы.

Список использованных источников

1. Robot Operating System 2 (ROS2): официальный сайт. – URL: https://docs.ros.org/en/jazzy/index.html (дата обращения: 01.04.2026).

2. Gazebo Simulator: официальный сайт. – URL: https://gazebosim.org/home (дата обращения: 01.04.2026).

3. PX4 Autopilot: официальный сайт. – URL: https://px4.io/ (дата обращения: 02.04.2026).

4. Liu, X. Intelligent UAVs trajectory optimization from space-time for data collection in social networks / X. Liu, H. Song, A. Liu // IEEE Transactions on Network Science and Engineering. – 2020. – V. 8, № 2. – P. 853–864.

5. Wakode, M. S. Role of AI and Big Data Analytics in UAV-Enabled IoT Applications for Smart Cities / M. S. Wakode // Unmanned Aerial Vehicles for Internet of Things (IoT) Concepts, Techniques, and Applications. – 2021. – P. 193–205.

INTEGRATION OF ROS2, GAZEBO AND PX4 FOR DECENTRALIZED SWARM AGENT CONTROL

D.S. Pozdnyakova[1]

[1]Samara National Research University, Samara
e-mail: darya_pozdnyakova01@mail.ru

Abstract

The development and testing of control algorithms for swarms of unmanned aerial vehicles require a reproducible and realistic simulation environment. This paper presents a software system for decentralized swarm control based on the integration of ROS2 Jazzy, Gazebo Harmonic, and PX4 SITL. The proposed approach enables the creation of a simulated environment in which sensor data can be realistically emulated and processed. An experiment involving the simultaneous motion of four agents was conducted to evaluate the system. The results demonstrate the successful operation of the simulation framework and confirm its reliability for generating and processing sensor data.

Keywords: ROS2, Gazebo, PX4, artificial intelligence, swarm control, simulation.