

Использование 3D-симулятора CoppeliaSim для управления группой взаимосвязанных объектов

Ж. Б. Нгуа Ндонг Авеле¹✉, В. К. Орлов¹, Д. А. Карап²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² «Кор-технологии», Нальчик, Россия

✉ avelejacques@yahoo.fr

Аннотация. В CoppeliaSim управление взаимосвязанными объектами часто включает в себя управление их иерархическими отношениями и динамическими свойствами. Рассматривается проблема реализации планового формирования группы взаимосвязанных объектов даже в случае выхода из строя основных объектов, обеспечивающих передачу информации другим объектам. Предложена алгоритмическая система, применяющая методы автономных систем для обеспечения самоорганизации группы объектов. Разработана алгоритмическая система управления тремя взаимосвязанными объектами в симуляторе CoppeliaSim 3D. Впоследствии с использованием той же программной платформы в сочетании со скриптом Python была создана алгоритмическая система, способная поддерживать и восстанавливать структуру объектов в случае повреждения главных объектов, которые передают информацию другим объектам. Это начинание предполагает интеграцию методов автономных алгоритмов для достижения эффективного контроля и поддержания формирования группы с одновременным преодолением препятствий, тем самым повышая общую устойчивость и адаптивность системы. На базе возможностей технологий автономной навигации разработана надежная и автономная система управления группой взаимосвязанных подвижных объектов, способная эффективно реагировать на неожиданно возникающие вызовы, демонстрируя при этом высокую адаптивность и устойчивость в условиях динамического взаимодействия.

Ключевые слова: группы взаимосвязанных объектов, автономная навигация, алгоритмическая система, организация управления группой взаимосвязанных объектов, 3D-симулятор CoppeliaSim, ведущие объекты для передачи информации, ведомые объекты для получения информации

Для цитирования: Нгуа Ндонг Авеле Ж. Б., Орлов В. К., Карап Д. А. Использование 3D-симулятора CoppeliaSim для управления группой взаимосвязанных объектов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 1. С. 25–34. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-1-25-34.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Using the 3D Simulator CoppeliaSim to Control a Group of Interconnected Objects

Ж. Б. Нгуа Ндонг Авеле¹✉, В. К. Орлов¹, Д. А. Карап²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Cor-technologies, Nalchik, Russia

✉ avelejacques@yahoo.fr

Abstract. In CoppeliaSim, managing interconnected objects often involves managing their hierarchical relationships and dynamic properties. The problem of implementing the planned formation of a group of interconnected objects, even in the event of failure of the primary objects that provide information transfer to other objects, is considered. An algorithmic system using autonomous systems methods to ensure self-organization of a group of objects is proposed. An algorithmic system for controlling three interconnected objects in the CoppeliaSim 3D

simulator has been developed. Subsequently, using the same software platform in combination with a Python script, an algorithmic system was created that was capable of maintaining and restoring the structure of objects in the event of damage to the main objects that transmit information to other objects. This endeavor involves integrating autonomous algorithmic techniques to achieve effective control and maintenance of group formation while simultaneously overcoming obstacles, thereby enhancing the overall robustness and adaptability of the system. Using the capabilities of autonomous navigation technologies, a reliable and autonomous control system for a group of interconnected moving objects has been developed, capable of effectively responding to unexpected challenges, while demonstrating high adaptability and stability in conditions of dynamic interaction.

Keywords: groups of interconnected objects, autonomous navigation, algorithmic system, organization of control of a group of interconnected objects, 3D simulator CoppeliaSim, leading objects for transmitting information, slave objects for receiving information

For citation: Ngoua Ndong Avele J. B., Orlov V. K., Karaf D. A. Using the 3D Simulator CoppeliaSim to Control a Group of Interconnected Objects // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 1. P. 25-34. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-1-25-34.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Групповое управление взаимодействующими объектами становится все более распространенной тенденцией в спасательных миссиях или в гражданской сфере, например в сфере автономного интеллектуального транспорта. Управление группой взаимосвязанных объектов – это управление значительным количеством объектов, выполняющих автономные задачи в соответствии со своей основной задачей. Группа объектов может использоваться в гражданских целях для автономного мониторинга сельского хозяйства, в лесном хозяйстве, в спасательных операциях и т. д. Управление группой взаимосвязанных объектов, а также их формирование и самоорганизация сложны, потому что группы объектов, выполняющие совместные миссии, обладают потенциалом, превосходящим возможности отдельных объектов. Именно поэтому для сложных задач, предполагающих использование объектов в группе, теперь рекомендуется использовать технологии управления группой взаимосвязанных объектов. Для повышения эффективности управления группой взаимосвязанных объектов необходимо усовершенствовать их системы связи. Например, применение квантовых коммуникаций, связанных с управлениями группы объектов, позволяет объектам всегда оставаться на связи даже на больших расстояниях [1]. Другими словами, это – применение принципа запутанности фотонов, связанного с телекоммуникационными технологиями и технологиями групповой навигации объектов. Однако на сегодня одна из основных проблем, возникающих в технологии управления группы взаимосвязанных объектов, – реорганизация или самоорганизация объектов в процессе управления в случае возникновения проблем со связью или отказа одного из объектов в группе, а точнее, сами главные объекты, которые

передают информацию другим объектам. Следуя математической модели, мы знаем, что логически ведомые объекты, получающие информацию, позиционируются по относительным координатам в соответствии с ведущими объектами, поскольку последние представляют собой основу системы управления в группе. Чтобы противостоять возможным проблемам связи между объектами, некоторые ученые предлагают разработать искусственные нейронные сети, способные управлять автономными объектами [2]. Со своей стороны, авторы предлагают разработать алгоритм, который позволит объектам в группе самоорганизоваться в случае выхода из строя главных объектов, которые передают информацию другим объектам. Внедрение методов искусственного интеллекта позволит увеличить автономность групп объектов, сделав каждый объект независимым в случае выхода из строя одного из объектов в группе [3]. Группы объектов могут использовать три различных режима работы. Централизованное управление, при котором один или несколько операторов управляют транспортными средствами индивидуально, наименее сложно. Необходимо разработать алгоритм, который позволит нескольким объектам выполнять задание и самоорганизовываться в случае выхода из строя главных объектов, которые передают информацию другим объектам при управлении или возникновении проблем со связью. При разработке алгоритма самоорганизации и обучения на случай поломки главных объектов при управлении использовались только 3 объекта. Для моделирования управления группой объектов применялась программа CoppeliaSim. Преимущество автономного режима работы заключается в том, что для выполнения запрограммированной задачи требуется минимальное вмешательство человека.

Постановка задачи. В ходе проведения исследования на основе анализа сведений о существующих решения разрабатывались:

– математическая модель управления одним дроном;

– временной сетевой анализ, соответствующий обмену информацией между взаимодействующими объектами;

– алгоритм автономной координации трех взаимосвязанных объектов;

– алгоритм автономной координации двух объектов после выхода из строя главного объекта, который передает информации другим объектам.

1. Разработка математической модели управления одним объектом. Описание управления тремя взаимосвязанными объектами в группе начинается с расчета углов поворота при навигации одного объекта [4]:

$$R_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix};$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix};$$

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \sin \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для управления объектами понимание матриц поворота вокруг осей x , y , z ($R_x(\varphi)$, $R_y(\theta)$, $R_z(\psi)$) фундаментально. Эти матрицы позволяют описать ориентацию объекта в трехмерном пространстве и служат ключевыми компонентами в системах навигации и управления полетом. Углы φ , θ , ψ соответствуют крену, тангажу и рысканию соответственно и представляют собой углы Эйлера, используемые для описания ориентации твердого тела.

Для вычисления углов φ , θ , ψ применяется общая матрица поворота 3×3 [4]:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix};$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos_y \sin_z & \cos_z \sin_x \sin_y - \sin_x \sin_z + & \sin_x \sin_y - \cos_x \sin_z \sin_y \\ \cos_y \sin_z & \cos_x \cos_z + & \cos_x \sin_z \sin_y - \cos_z \sin_x \\ -\sin_y & \cos_y \sin_x & \cos_x \cos_y \end{bmatrix}.$$

Таким образом, элементы r_{ij} матрицы поворота 3×3 напрямую связаны с тригонометрическим функциями углов поворота вокруг осей x , y , z и их конкретные выражения зависят от выбранной последовательности вращения.

Теперь можно найти углы φ , θ , ψ [4]:

$$\varphi = \text{atan2}(r_{32}, r_{33});$$

$$\theta = \text{atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2});$$

$$\psi = \text{atan2}(r_{21}, r_{11}).$$

Пусть m – минимальная допустимая дистанция между объектами; d – текущая дистанция между объектами; L – радиус видимости каждого объекта, тогда можно сделать вывод, что минимально допустимое расстояние m между объектами должно быть меньше текущего расстояния d между ними и что это расстояние должно быть меньше радиуса видимости L каждого объекта [4]:

$$m < d < L.$$

2. Временной сетевой анализ, соответствующий обмену информацией между взаимодействующими объектами. Временной сетевой анализ применяется для понимания динамического обмена информацией внутри группы взаимосвязанных объектов. В целом, в отличие от статических сетевых моделей, временные сети явно учитывают изменяющуюся во времени природу связей, что имеет решающее значение для высокомобильных систем – таких, как взаимосвязанные объекты в групповой навигации. Однако в этом контексте взаимосвязанные движущиеся объекты представлены как узлы, а линии связи между ними – как ребра, которые появляются и исчезают со временем. Обмен информацией при навигации взаимосвязанных движущихся объектов сталкивается со многими серьезными проблемами [4]–[5]:

- Мобильность и нестабильная топология: постоянное движение взаимосвязанных мобильных объектов, включая изменения высоты и скорости, приводит к нестабильной топологии сети. Эта мобильность может привести к прерываниям беспроводной связи, эффекту Доплера и трудностям с юстировкой антенн, что снижает качество соединения.

- Нарушения беспроводного канала: связь между взаимосвязанными объектами подвержена различным сбоям в работе беспроводного канала, таким как масштабное и мелкомасштабное затухание сигнала. Факторы окружающей среды – здания, деревья, атмосферные условия и др., могут оказывать значительное влияние на силу и надежность сигнала.

• Ограничения ресурсов: взаимосвязанные объекты, как правило, ограничены в ресурсах, особенно в плане энергии и вычислительной мощности. Для продления их жизненного цикла и решения сложных задач, таких как распознавание изображений, необходимы эффективные протоколы связи и стратегии разгрузки вычислений.

• Проблемы безопасности: работа на открытом пространстве и использование беспроводной инфраструктуры делают связь между взаимосвязанными объектами уязвимой для вредоносных атак, помех и утечек информации, что создает серьезные проблемы безопасности.

Как показано на рис. 1, главный объект, который передает информацию другим объектам, обозначенный как O1, инициирует коммуникацию, передавая информацию первому ведомому объекту O2. Затем O2 передает эту информацию второму ведомому объекту O3, показывая согласованное распространение информации между взаимосвязанными объектами.

Вообще, процесс передачи информации в группе взаимосвязанных мобильных объектов идет через последовательность перемещений и установления/разрыва связей объекта O2. Каждый момент времени t представляет собой моментальный снимок состояния системы, где положение объектов и их взаимоотношения определяют возможности обмена информацией.

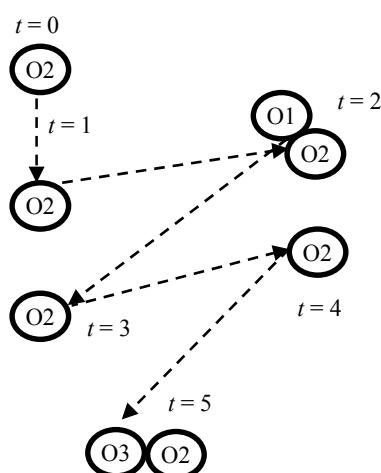


Рис. 1. Иллюстрация теоретических основ передачи информации в группе взаимосвязанных мобильных объектов

Fig. 1. Illustration of the theoretical foundations of information transmission in a group of interconnected mobile objects

На рис. 2 показана временная сеть, соответствующая обмену информацией между взаимодействующими объектами. Круг вокруг объектов – это зона взаимодействия. При перемещении

объекта O1 объект O2 взаимодействует с ним (при $t = 2$) и с объектом O3 (при $t = 5$).

Вообще, ключевое различие между простой линией и стрелкой в сети заключается в направлении и характере взаимодействия. Простая линия между объектами указывает на наличие взаимодействия. Стрелка же, напротив, указывает на направленное взаимодействие, где один объект оказывает влияние на другой. Другими словами, стрелка на рис. 2 четко показывает обмен информацией.

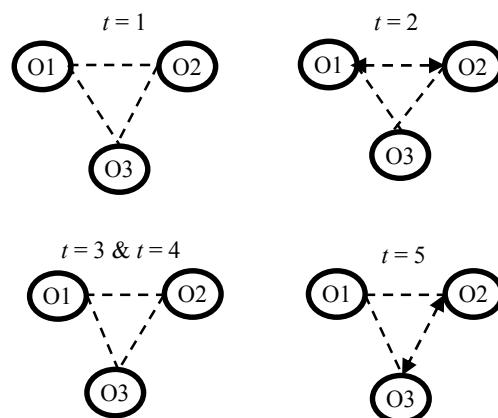


Рис. 2. Иллюстрация временной сети, соответствующей передаче информации в группе взаимосвязанных мобильных объектов

Fig. 2. An illustration of the temporal network corresponding to the transfer of information in a group of interconnected mobile objects

3. Анализ алгоритма автономной координации трех взаимосвязанных объектов. Группа взаимосвязанных объектов управляет автономно. Она состоит из лидера O1 и двух ведомых O2 и O3. Сначала необходимо определить координаты области, которую будет охватывать группа взаимосвязанных объектов [6]. Базовый подвижный объект O1, отвечающий за всю миссию, первым начинает навигацию и ожидает несколько секунд на определенном расстоянии, чтобы получить сигнал, который должны получить следующие подвижные объекты O2 и O3, соединенные с базовым подвижным объектом O1. После выполнения условия расстояния между объектами O2 и O3 они, оснащенные интеллектуальным программным обеспечением, должны рассчитать свои относительные координаты касательно базового подвижного объекта O1.

Чтобы эффективно управлять группой взаимосвязанных объектов и контролировать взаимодействие между ними, необходимо решить два очень важных вопроса [7]:

– проблема навигации и планирования траектории движения каждого объекта при недостатке информации об окружающем пространстве, поскольку в постоянно меняющейся среде помимо неподвижных препятствий в группе присутствуют и другие объекты, столкновений с которыми необходимо избегать;

– задача, требующая учета воздушных потоков, создаваемых взаимосвязанными объектами при их сближении, чтобы они не отклонялись от своей траектории.

Взаимосвязанные объекты должны поддерживать условия дистанции на протяжении всего полета. На рис. 3 показан алгоритм автономной координации трех взаимосвязанных объектов в группе.

Алгоритм 1: Алгоритм автономной координации трех взаимосвязанных объектов в группе в 3D CoppeliaSim

Инициализация 1: определим объект O1 как главный объект, а объекты O2 и O3 – как ведомые:

for pos: = [post1, post2, post3, post4] наша миссия навигации:

if pos is defined **then**

if лидер-объекта O1 определен **then**

print 'Ведомая цель получила начальное положение ведущего объекта O1'

end

Инициализация 2: определим координаты навигации ведущего объекта O1 и ведомых O2 и O3:

if posO1 равно 1 **then**

print 'Рассчитаем относительные координаты ведомого объекта O2'

if координаты ведомого объекта O2, posO2: = [new_pos [0], new_pos [1] +1,2.5] рассчитывается **then**
 print 'Рассчитаем координаты ведомого объекта O3'

if координаты ведомого объекта O3, posO3: = [new_pos [0], new_pos [1] +2,2.5] рассчитывается **then**

 Установить расчет углов поворота объектов во время полета ϕ : = atan2 (R_32; R_33), θ : = atan2 (-R_31; $\sqrt{R_{33}^2}$), Ψ : = atan2 (R_21; R_11)

if углы поворота ϕ , θ , Ψ вычислены **then**

 Установим m – минимально допустимое расстояние, которое меньше d – текущего расстояния между объектами, и меньше L – радиуса видимости каждого объекта.

if вычислить относительные координаты ведомых объектов O2 и O3 и углы поворота объектов во время навигации **then**

if задано условное расстояние между объектами **then**
 Набор объектов O1, O2 и O3 может передвигаться

Rис. 3. Алгоритм автономной координации трех взаимосвязанных объектов в группе в 3D CoppeliaSim

Fig. 3. An algorithm for autonomous coordination of three interconnected objects in group in 3D CoppeliaSim

4. Анализ алгоритма автономной координации двух объектов после выхода из строя главного объекта, который передает информацию другим объектам. Методы автономной навигации играют центральную роль в обеспечении авто-

номной самоорганизации группы взаимосвязанных объектов. Применяя алгоритмы и методы, заимствованные из автономной навигации, группы взаимосвязанных объектов могут адаптироваться к сложным ситуациям – уничтожение или выход из строя основного объекта O1 либо потеря связи между ведущим объектом O1 и ведомыми объектами O2 и O3. В таких случаях группы взаимосвязанных объектов должны быстро реструктурироваться и назначить новый главный объект или принять стратегию децентрализованного управления для продолжения выполнения задания. Алгоритмы – такие, как распределенные протоколы консенсуса и механизмы выбора главного объекта, часто основанные на теории графов и теории управления, позволяют объектам-ведомым (например, O2 и O3) обнаруживать отсутствие главного объекта и инициировать плавный переход. Например, распространен подход, когда каждый объект поддерживает локальную оценку статуса лидера и при обнаружении его сбоя инициирует процесс голосования или предопределенную иерархию для избрания нового лидера.

В нашем случае при выходе из строя главного объекта O1, отвечающего за связь с двумя ведомыми объектами O2 и O3, выгодно применить автономные алгоритмы самоорганизации. Эти алгоритмы не только позволяют объектам O2 и O3 самостоятельно формировать, но и продолжать лучше определять положение и скорость каждого объекта. Другими словами, в случае поломки главного объекта O1, который передает информацию о положении другим объектам, если это произошло не очень далеко от начальной точки навигации, объектам O2 и O3 придется вернуться назад и самоорганизоваться. Математическое представление трех взаимосвязанных объектов в группе в начальный момент и после выхода из строя ведущего объекта O1 можно увидеть на рис. 4 и 5.

В нашей системе начальное положение головного объекта O1 после взлета может быть произвольным. Предположим, что в момент начала наблюдения он находится в точке $(x_1(t), y_1(t))$. После того как ведомые объекты O2 и O3 переместились к ведущему объекту O1, их координаты будут зависеть от текущего положения этого объекта. Тогда можно представить, что объекты O2 и O3 находятся в пределах некоторого радиуса от ведущего объекта O1 в точках $(x_1(t) + \Delta x_1,$

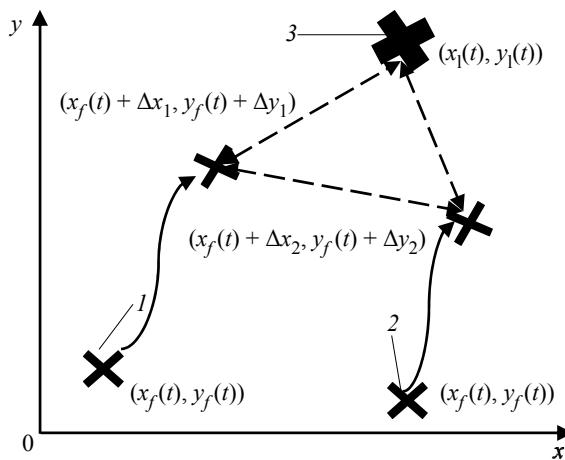


Рис. 4. Математическая иллюстрация навигации двух ведомых мобильных объектов O2 и O3 в зависимости от ведущего мобильного объекта O1: 1 – ведомый мобильный объект O2; 2 – ведомый мобильный объект O3; 3 – ведущий мобильный объект O1

Fig. 4. Mathematical illustration of the navigation of the two slave mobile objects O2 and O3 as a function of the leader mobile object O1: 1 – follower mobile object O2; 2 – follower mobile object O3; 3 – leader mobile object O1

$y_f(t) + \Delta y_1)$ и $(x_f(t) + \Delta x_2, y_f(t) + \Delta y_2)$ соответственно. Вообще, параметры $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2$ обозначают малые смещения. Эти смещения различны для каждого объекта, чтобы объекты не накладывались друг на друга.

Отказ центрального координирующего объекта (объект O1 в системе, состоящей из O1, O2 и O3) требует надежного и адаптивного реагирования со стороны оставшихся компонентов. Традиционные централизованные системы управления уязвимы к единичным точкам отказа, что приводит к сбоям в работе всей системы. Алгоритмы автономной самоорганизации предлагают децентрализованное решение, которое позволяет выжившим объектам реконфигурироваться и сохранять функциональность без внешнего вмешательства. Эти алгоритмы особенно полезны в динамичных и непредсказуемых средах, где постоянная связь с центральным узлом может быть ненадежной или невозможной. Например, в случае применения групповой робототехники, если ведущий робот теряет электропитание, ведомые роботы могут использовать принципы самоорганизации для назначения нового лидера или распределения обязанностей лидера, обеспечивая продолжение выполнения миссии.

Но существуют и другие методы. Например, распространенный подход использует распределенные алгоритмы консенсуса, где O2 и O3

напрямую обмениваются информацией для согласования нового обучения и обновления своих оценок состояния. Они могут использовать вариант фильтра Калмана или расширенный фильтр Калмана для оценки состояния, где каждый объект обрабатывает данные своих датчиков и обменивается оценками с другими объектами. Полученные в результате обмена оценки затем можно объединить с помощью различных методов, например ковариационного пересечения или федеративной фильтрации Калмана, для получения более точной и надежной оценки глобального состояния.

На рис. 5 взаимодействия между объектами O2 и O3, а также O3 и O1 выражены в виде ребер в сети связи.

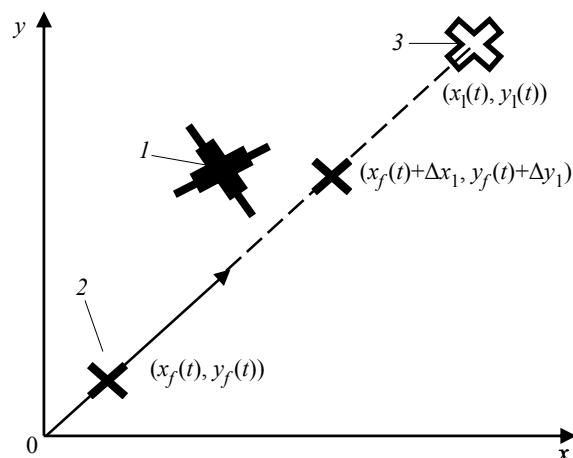


Рис. 5. Математическая модель навигации двух ведомых мобильных объектов O2 и O3 после выхода из строя ведущего мобильного объекта O1: 1 – отказ ведущего мобильного объекта O1; 2 – ведомый мобильный объект O3; 3 – ведущий мобильный объект O2

Fig. 5. Mathematical model of navigation of two slave mobile objects O2 and O3 after the failure of the leading mobile object O1: 1 – failure of the master mobile object O1; 2 – slave mobile object O3; master mobile object O2

Алгоритм автономной координации в 3D CoppeliaSim для трех взаимосвязанных объектов в группе после выхода из строя ведущего объекта O1 представлен на рис. 6.

В нашем случае крайне важно сначала обнаружить отказ O1. Это может быть достигнуто за счет потери сигналов связи от O1 или превышения заданных тайм-аутов связи. После этого O2 и O3 устанавливают прямые соединения, потенциально образуя одноранговую сеть. Таким образом, если лидер все еще востребован, O2 и O3 могут выбрать нового лидера на основе заранее определенных критерии. В качестве альтернативы они могут работать без лидера, полностью распределенно.

На основе обновленных оценок состояния О2 и О3 совершают маневр для восстановления желаемого строя, потенциально возвращаясь в назначенное «безопасное место» или «место встречи», если вблизи исходной навигационной точки произойдет сбой.

В этом сценарии идея заключается в том, что каждый агент работает автономно, координируя свои действия с другими агентами посредством прямого взаимодействия и обмена информацией о состоянии, без необходимости в центральном управлении. Таким образом, данный подход может быть особенно надежным в высокодинамичных средах, где поддержание единого лидера может быть затруднительным или создавать новую единую точку отказа.

Поэтому авторы считают, что эта автономная способность самоорганизации значительно повышает надежность и адаптивность многоагентных систем, делая их более устойчивыми к одиноч-

ным сбоям и обеспечивая непрерывную работу в динамических и непредсказуемых средах.

Иначе можно сказать, что благодаря способности самостоятельно обнаруживать сбои, перенастраивать коммуникацию, адаптировать роли руководства и восстанавливать строй эти системы становятся более устойчивыми к единичным сбоям. Эта устойчивость обеспечивает непрерывную работу даже в динамичных и непредсказуемых условиях, где сбои отдельных агентов вполне вероятны.

Обсуждение результатов. В ходе работ проводились испытания беспилотных летательных аппаратов О1, О2 и О3 с предварительным математическим моделированием. Для этого использовались программа 3D-моделирования CoppeliaSim и язык программирования Python. Это специализированное решение для применения интеллектуального алгоритма для наблюдения за территорией до и после выхода из строя ведущего объекта О1. Одним из важнейших факторов при управлении группой взаимосвязанных объектов служит поддержание дистанции между ними для предотвращения столкновений между объектами. Отсюда опыт нашего моделирования, позволяющий узнать, соблюдают ли объекты О1, О2 и О3 эти условия до и после отказа ведущего объекта О1. Результаты моделирования до и после отказа ведущего объекта О1 представлены в таблице.

Обозначения в таблице:

n – количество объектов в группе;

T_1, T_2 – время полета объектов до позиций на первой и второй территориях соответственно;

D_1, D_2 – демонстрация этих расстояний;

Также было рассчитано среднее время полета каждого объекта за 10 итераций до первой и второй позиций.

Равномерное распределение данных до и после выхода из строя ведущего объекта: расстояние и среднее время каждого агента

Uniform distribution of data before and after the failure of the leading object: distance and average time of each agent

n	$\sum_{i=1}^{10} T_1 / 10, \text{ с}$	$\sum_{i=1}^{10} D_1 / 10, \text{ м}$	$\sum_{i=1}^{10} T_2 / 10, \text{ с}$	$\sum_{i=1}^{10} D_2 / 10, \text{ м}$
<i>До выхода из строя ведущего объекта</i>				
1	0.47	3.76	1.78	14.23
2	0.43	3.46	0.77	6.21
3	0.47	3.80	1.10	8.81
<i>После выхода из строя ведущего объекта</i>				
2→1	0.42	3.41	0.77	6.12
3→2	0.47	3.75	1.08	8.68

Алгоритм 2: Алгоритм автономной координации в 3D CoppeliaSim трех взаимосвязанных объектов в группе после выхода из строя ведущего мобильного объекта О1

```

Инициализация: начальная команда и общие параметры миссии отправляются на объект О1 с начальной точки.
for каждый объект i находится в исходном положении в начальной точке
  if not received state from object O1 then
    if не получено состояние от объекта O1, then
      if объект O1 сломан, then
        O1 равен 0
        Set объект O2 ведущим
        Set объект O3 ведомым
      if объект O2 является лидером, then
        def control_copterO2 (handle_copt, new_pos, status, handle_copterO2)
        posO2 равен [new_pos[0]], new_pos[1]-1, 2.5]
        posO3 равен [new_pos[0]], new_pos[1]-2, 2.5]
      if объект O3 является последователем объекта O2 then
        Set объект O3, необходимо соблюдать дистанцию
        if объект O3 рассчитал относительные координаты объекта O2 handle2, handle3 - init_coordO2 then
          Set объект O2 и O3, чтобы продолжить их движение (handle, quad)
        if status [0] равен 1 и status [1] равен 1, then
          Set объекты O2 и O3, чтобы они могли правильно двигаться к цели control_copter_main (handle, path, handle2, handle3)
          if объекты O2 и O3, чтобы они могли правильно двигаться к целям then
            Set объекты O2 и O3, чтобы они могли выполнить миссию до конца.
          land (handle, platf_pos)

```

Rис. 6. Алгоритм автономной координации в 3D CoppeliaSim трех дронов в рое после выхода из строя ведущего дрона О1

Fig. 6. Autonomous coordination algorithm in 3D CoppeliaSim for three drones in a swarm after the failure of the lead drone O1

Представленные результаты описывают среднюю дальность полета до и после выхода из строя ведущего дрона. Для этого среднее время полета каждого объекта до достижения первой и второй позиций было рассчитано за 10 итераций. В эксперименте использовались три объекта: один ведущий O1 и два ведомых O2 и O3. Основной целью было предотвратить столкновения между объектами как до, так и после выхода из строя ведущего объекта O1. Аспект самоорганизации был сосредоточен на том, что подчиненные объекты брали на себя руководящие роли без заранее назначенного лидера. За среднее время полета до позиций 1 и 2 объекты проходили следующие расстояния:

Позиция 1:

Ведущий объект O1: 3.76 м за 0.47 с.

Ведомый объект O2: 3.46 м за 0.43 с.

Ведомый объект O3: 3.80 м за 0.47 с.

Позиция 2:

Ведущий объект O1: 14.23 м за 1.78 с.

Ведомый объект O2: 6.21 м за 0.77 с.

Ведомый объект O3: 8.81 м за 1.10 с.

Эти значения представляют собой среднее время, необходимое каждому объекту для достижения конкретных точек на траектории полета. Относительно близкие значения для каждой позиции указывают на скоординированное движение, при котором все объекты стремятся достичь одних и тех же точек, с небольшими различиями во времени прибытия. Цель – предотвращение столкновений в ходе этих испытаний, по-видимому, была достигнута.

После выхода из строя ведущего объекта система продемонстрировала самоорганизацию. Первый ведомый объект взял на себя роль нового ведущего, а второй ведомый дрон стал единственный ведомым. За среднее время полета до позиций 1 и 2 объекты проходили следующие расстояния:

Позиция 1:

Новый лидер (ранее первый ведомый объект O2): 3.41 м за 0.42 с.

Единственный ведомый объект (ранее второй ведомый объект O3): 3.75 м за 0.47 с.

Позиция 2:

Новый лидер (ранее первый ведомый объект O2): 6.12 м за 0.77 с;

Единственный ведомый объект (ранее второй ведомый объект O3): 8.68 м за 1.08 с.

Сравнивая эти результаты со сценарием «до сбоя», становится очевидно, что система успешно перенастроилась. Новые ведущий и ведомый объекты продолжали достигать назначенных пози-

ций, хотя и с несколько иным средним временем. Например, время нового лидера на позиции 1 (3.41 с) немного быстрее, чем его предыдущее время в качестве последователя (3.46 с), а также быстрее, чем время первоначального лидера (3.76 с). Это свидетельствует об эффективном механизме самоорганизации и более простом пути для нового лидера. Время, показанное только последователями, также сопоставимо со временем предыдущих последователей, что говорит о том, что общий ход задания был сохранен, несмотря на потерю лидера.

Выводы и заключение. Получена информация о надежности и возможностях предотвращения столкновений групп объектов в условиях моделируемых отказов. Использование CoppeliaSim для имитационного моделирования и язык программирования Python для программирования позволило создать сложную и контролируемую среду для тестирования алгоритма территориального наблюдения. Такой подход особенно актуален там, где отказ одного устройства может иметь негативные последствия для всего роя.

- Эффективность предотвращения столкновений: моделирование подтверждает, что система группы объектов способна поддерживать безопасное расстояние между объектами в различных условиях, избегая тем самым столкновений как при нормальном функционировании, так и в случае отказа ведущего объекта.

- Надежность самоорганизации: механизм самоорганизации, при котором ведомый объект принимает на себя роль ведущего, показал свою эффективность. Это значительно повышает отказоустойчивость системы и ее способность продолжать выполнение миссии даже при потере ключевого элемента.

- Адаптивность к условиям: различия в расстоянии между первой и второй позициями демонстрируют приспособляемость системы к разным эксплуатационным требованиям, будь то потребность в большой пространственной свободе или, наоборот, в более компактном построении.

- Среднее время полета: расчет среднего времени полета за 10 итераций до первой и второй позиции – важный показатель стабильности и повторяемости результатов, что подтверждает надежность полученных данных.

Эти результаты открывают перспективы для разработки автономных систем группы объектов, способных к самоорганизации и отказоустойчивости, что крайне важно для выполнения сложных задач в динамичных и непредсказуемых условиях.

В дальнейших исследованиях планируется проверить смоделированные результаты посредством физических экспериментов с объектами и изучить различные режимы отказов и стратегии восстанов-

ления. Для этого необходима разработка нейронной сети для повышения эффективности связи между объектами в группе, чтобы избежать потерь связи между ведущим и ведомыми объектами.

Список литературы

1. Lahmeri M.-A., Kishk M. A., Alouini M.-S. Artificial Intelligence for UAV-Enabled Wireless Networks: A Survey // IEEE Open J. of the Communications Soc. Saudi Arabia: IEEE, 2021. Vol. 2. P. 1015-1040. doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3075201.
2. Ngoua-Ndong Avele J. B., Angoue Avele M. B. Simulation of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm control system // Proc. VI Congreso XoveTIC: impulsando el talento científico. Coruña, Spain: Universidade da Coruña, 2023. P. 3-8. doi: 10.17979/spudc.000024.01.
3. Нгуа-Ндонг Авеле Ж. Б., Горяинов В. С. Докстанция для БПЛА: исследование построения автономной взлетно-посадочной платформы для беспилотных летательных аппаратов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 9. С. 38-48. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-9-38-48.
4. Нгуа-Ндонг Авеле Ж. Б. Разработка программно-алгоритмического обеспечения и системы коммуникации взаимодействия для управления роем беспилотных летательных аппаратов, выполняющих миссию по мониторингу в группе // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 9. С. 66-76. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-9-66-76.
5. Security challenges for drone communications: Possible threats, attacks and countermeasures / M. Krichen, W. Y. H. Adoni, A. Mihoub, M. Y. Alzahrani, T. Nahhal // Proc. 2nd Intern. Conf. of Smart Syst. and Emerging Technol. (SMARTTECH). Riyadh, Saudi Arabia: IEEE, 2022. P. 184-189. doi: 10.1109/SMARTTECH54121.2022.00048.
6. Placement and drone flight path mapping of agricultural soil sensors using machine learning / P. Goodrich, O. Betancourt, A. C. Arias, T. Zohdi // Comp. and Electron. in Agriculture. 2023. Vol. 205, no. 1. P. 107591. doi: 10.1016/j.compag.2022.107591.
7. New approach of UAV movement detection and characterization using advanced signal processing methods based on UWB sensing / A. Digulescu, C. Despina-Stoian, D. Stănescu, F. Popescu, F. Enache, C. Ioana, E. Rădoi, I. Rîncu, A. Șerbănescu // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 20. Art. 5904. P. 1-18. doi: 10.3390/s20205904.

Информация об авторах

Нгуа Ндонг Авеле Жак Бернис – аспирант кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: avelejacques@yahoo.fr
<https://orcid.org/0009-0004-6564-0743>

Орлов Владимир Константинович – канд. техн. наук, зам. зав. кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: vkorlov@etu.ru

Караф Далья Амер – инженер и руководитель проектов в компании «Кор-технологии», Ул. Осетинская 125 д. 78, Нальчик, 360022, Россия.
E-mail: daliakaraf6@gmail.ru

References

1. Lahmeri M.-A., Kishk M. A., Alouini M.-S. Artificial Intelligence for UAV-Enabled Wireless Networks: A Survey // IEEE Open J. of the Communications Soc. Saudi Arabia: IEEE, 2021. Vol. 2. P. 1015-1040. doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3075201.
2. Ngoua-Ndong Avele J. B., Angoue Avele M. B. Simulation of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm control system // Proc. VI Congreso XoveTIC: impulsando el talento científico. Coruña, Spain: Universidade da Coruña, 2023. P. 3-8. doi: 10.17979/spudc.000024.01.
3. Ngoua-Ndong Avele Zh. B., Gorjainov V. S. Dokstanija dlja BPLA: issledovanie postroenija avtonomnoj vzletno-posadochnoj platformy dlja bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2023. Т. 16, № 9. С. 38-48. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-9-38-48. (In Russ.)
4. Ngoua-Ndong Avele Zh. B., Razrabotka programmnno-algoritmicheskogo obespechenija i sistemy komunikacii vzaimodejstvija dlja upravlenija roem bespilotnyh letatel'nyh apparatov, vypolnajushhih missiju po monitoringu v gruppe // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2023. Т. 16, № 1. С. 66-76. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-1-66-76. (In Russ.)
5. Security challenges for drone communications: Possible threats, attacks and countermeasures / M. Krichen, W. Y. H. Adoni, A. Mihoub, M. Y. Alzahrani, T. Nahhal // Proc. 2nd Intern. Conf. of Smart Syst. and Emerging Technol. (SMARTTECH). Riyadh, Saudi Arabia: IEEE, 2022. P. 184-189. doi: 10.1109/SMARTTECH54121.2022.00048.

6. Placement and drone flight path mapping of agricultural soil sensors using machine learning / P. Goodrich, O. Betancourt, A. C. Arias, T. Zohdi // Comp. and Electron. in Agriculture. 2023. Vol. 205, no. 1. P. 107591. doi: 10.1016/j.compag.2022.107591.

7. New approach of UAV movement detection and characterization using advanced signal processing methods based on UWB sensing / A. Digulescu, C. Despina-Stoian, D. Stănescu, F. Popescu, F. Enache, C. Ioana, E. Rădoi, I. Rîncu, A. Ţerbănescu // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 20. Art. 5904. P. 1-18. doi: 10.3390/s20205904.

Information about the authors

Jacques Bernice Ngoua Ndong Avele – Postgraduate student of the Department of Radio Engineering Systems. Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: avelejacques@yahoo.fr

<https://orcid.org/0009-0004-6564-0743>

Vladimir K. Orlov – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Department of Radio Engineering Systems. Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vkorlov@etu.ru

Dalya Amer Karaf – Engineer and Project manager of Cor-Technologies, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia. St. Osetinskaya 125 d. 78, 360022.

E-mail: daliakaraf6@gmail.ru

Статья поступила в редакцию 07.10.2025; принята к публикации после рецензирования 27.11.2025; опубликована онлайн 29.01.2026.

Submitted 07.10.2025; accepted 27.11.2025; published online 29.01.2026.
