Dina Oralbekova – PhD, associate professor, Senior Researcher of Institute of information and computational technologies, Kazakhstan; e-mail: dinaoral@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-6493.

Received 01.05.2026
Revised 25.06.2026
Accepted 29.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-9

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 55.30.31

Е.А. Тулешов[1], Қ.М. Абуталипов[1], М.Ж. Куатова[2], П.М. Рахметова[1]*
[1]Satbayev University, 050000, Республика Казахстан, г.Алматы, ул. Сатпаева 22
[2]Институт Механики Машиноведения им. Академика У.А. Джолдасбекова,
050010, Республика Казахстан, г.Алматы, ул. Шевченко 28
*e-mail: p.rakhmetova@gmail.com

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ АРХИТЕКТУРЫ КООРДИНАЦИИ ФЛОТА МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ НАВИГАЦИИ

Аннотация: *В статье предложена и формализована гибридная архитектура управления флотом мобильных роботов, в которой централизованный уровень MAPF/CBS формирует согласованный дискретный план движения, а децентрализованный уровень ROS2/Nav2 обеспечивает непрерывное исполнение и локальную адаптацию в среде Gazebo. В отличие от полностью централизованных схем, чувствительных к росту вычислительной сложности и отклонениям исполнения, а также от Nav2-only режима, не имеющего глобального механизма предотвращения межроботных конфликтов, предложенная архитектура вводит промежуточный Fleet Manager. Данный модуль преобразует дискретный план в последовательность waypoint-команд, контролирует прогресс, выявляет задержки и инициирует перепланирование при нарушении условий движения. Сформулирована математическая постановка задачи на графе G=(V,E), заданы конфликтные ограничения по вершинам и рёбрам, целевые критерии makespan и sum-of-costs, а для непрерывного исполнения приведена кинематическая модель Ackermann-типа. Экспериментальная проверка выполнена на двух уровнях: в дискретной MAPF/CBS-модели и в симуляционной среде ROS2/Gazebo/Nav2. Для эталонного режима R1 показано, что при увеличении числа агентов на карте A с N=1 до N=8 время планирования возрастает с 0,095823 до 15,709505 с, SOC – с 3 до 40, а makespan – с 2 до 4 тактов. Полученные результаты подтверждают необходимость гибридного переноса централизованного плана в локально адаптивное исполнение и задают воспроизводимый контур оценки масштабируемости, устойчивости и конфликтности многороботной системы.*

Ключевые слова: *гибридная архитектура управления; многоагентные робототехнические системы; MAPF; Conflict-Based Search; ROS2; Nav2; Gazebo; автономная навигация.*

Введение

Автономные мобильные роботы становятся ключевым элементом складской, производственной и внутрилогистической автоматизации, где требуется согласованное перемещение грузов, материалов и сервисных платформ в общем рабочем пространстве [1-3]. При увеличении числа агентов растёт плотность движения, возникают пересечения траекторий, очереди в узких проходах, взаимные блокировки и локальные тупиковые состояния. Поэтому качество многороботной системы определяется не только автономной навигацией отдельного робота, но и способностью всей группы поддерживать глобально согласованный порядок движения.

Существующие архитектуры управления обычно опираются на две предельные парадигмы. Децентрализованные системы хорошо масштабируются и устойчивы к локальным изменениям среды, поскольку каждый робот принимает решения на основе собственных

©Е.А. Тулешов, Қ.М. Абуталипов, М.Ж. Куатова, П.М. Рахметова, 2026

сенсоров, локальной карты и навигационного стека [3, 6]. Однако отсутствие глобального координатора приводит к неоптимальному распределению проходов, конкуренции за узкие зоны и росту времени выполнения задач. Централизованные системы, напротив, способны строить согласованные планы движения для всего флота, но требуют полной информации о состоянии среды и становятся вычислительно более затратными при росте числа агентов [2, 4, 5].

Формальной основой централизованной координации является задача Multi-Agent Path Finding (MAPF), в которой необходимо построить набор траекторий для группы агентов без пространственно-временных конфликтов. Одним из наиболее интерпретируемых алгоритмов решения MAPF является Conflict-Based Search (CBS): верхний уровень выявляет конфликт и порождает ограничения, а нижний уровень перестраивает индивидуальные маршруты с учётом этих ограничений [4, 5, 11]. Такая схема обеспечивает строгую трактовку конфликтов по вершинам и рёбрам, но при увеличении числа агентов и необходимости частого перепланирования её вычислительная нагрузка быстро возрастает.

Практическая проблема состоит в том, что дискретный бесконфликтный план MAPF не является готовой траекторией для физического робота. В непрерывной среде необходимо учитывать габариты платформы, кинематические ограничения, ошибки локализации, задержки связи, динамические препятствия и параметры локальной навигации. Сравнительные исследования централизованных и децентрализованных схем, распределённой координации, ресурсного планирования и кооперативной локализации показывают, что наиболее устойчивые решения требуют сочетания глобального согласования и локальной автономии [7-10]. Поэтому перспективным является гибридный подход, при котором централизованный уровень задаёт порядок движения и предотвращает конфликты на уровне флота, а децентрализованный уровень обеспечивает устойчивое исполнение средствами ROS2/Nav2 и локальных costmap [12-14].

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная оценка гибридной архитектуры управления мобильными роботами, объединяющей MAPF/CBS-координацию, Fleet Manager и децентрализованное исполнение на базе Nav2 в ROS2/Gazebo. Научная новизна заключается в формализованном связывании дискретного координационного плана с непрерывным исполнением через waypoint-представление, контроль прогресса и событийное перепланирование. Вклад работы включает: математическую постановку задачи, корректную кинематическую модель Ackermann-типа, описание экспериментального стенда, систему метрик и количественную оценку эталонного CBS-режима.

Методология

Методология исследования основана на иерархическом представлении многороботной системы. На верхнем уровне рабочее пространство описывается дискретной картой или графом, на котором решается задача MAPF/CBS. На среднем уровне Fleet Manager преобразует дискретный план в последовательность целей и контролирует ход исполнения. На нижнем уровне каждый робот выполняет движение в непрерывной среде средствами ROS2/Nav2, используя локализацию, локальное планирование, costmap и механизмы восстановления.

Формальная постановка задачи

Пусть рабочая зона представлена графом, заданным формулой (1):

$$G = (V, E), \quad (1)$$

где V – множество допустимых дискретных позиций, E - множество переходов между соседними позициями.

Для флота из N роботов заданы стартовые вершины s_i и целевые вершины g_i, i=1,...,N. Дискретная траектория i-го робота задаётся формулой (2), где начальная и конечная вершины соответствуют поставленной задаче перемещения.

$$\pi_i = \langle v_i(0), v_i(1), \dots, v_i(T_i) \rangle, \; v_i(0) = s_i, \; v_i(T_i) = g_i \quad (2)$$

Допустимое решение должно исключать два базовых типа конфликтов: вершинный конфликт и рёберный конфликт. Эти ограничения представлены формулами (3) и (4). В качестве критериев качества используются makespan и sum-of-costs, определяемые

формулами (5) и (6). Для гибридного режима дополнительно учитываются суммарный фактический пробег, число перепланирований и доля успешных запусков.

$$v_i(t) \neq v_j(t), \ \forall\, i \neq j \tag{3}$$

$$(v_i(t), v_i(t+1)) \neq (v_j(t+1), v_j(t)), \ \forall\, i \neq j \tag{4}$$

$$T_make = \max_\{i = 1, \ldots, N\}\, T_i \tag{5}$$

$$SOC = \Sigma_\{i = 1\}\hat{}\{N\}\, T_i \tag{6}$$

Обобщённая целевая функция задаётся формулой (7):

$$J = \alpha T_{make} + \beta SOC + \gamma N_{replan} + \eta D_{sum}, \tag{7}$$

где коэффициенты alpha, beta, gamma и eta определяют приоритеты между скоростью завершения, компактностью маршрутов, адаптационной нагрузкой и фактической длиной движения.

В дискретном эталонном режиме R1 оптимизируются T_make и SOC; в непрерывных режимах R2 и R3 основное внимание уделяется времени завершения, успешности выполнения, блокировкам и фактическому пробегу по одометрии.

Алгоритм гибридного управления

Гибридный цикл выполняется следующим образом: 1) формируются start/goal-пары и дискретная карта; 2) CBS строит бесконфликтный план; 3) Fleet Manager сжимает коллинеарные участки и преобразует узлы плана в waypoint-цели; 4) Nav2 исполняет цели в отдельных ROS2 namespace каждого робота; 5) по обратной связи оцениваются достижение цели, отсутствие прогресса, ошибки Nav2 и превышение таймаута; 6) при нарушении условий инициируется локальное или глобальное перепланирование. Такая организация отделяет стратегическое разрешение конфликтов от реактивного исполнения движения. Внешний вид 3D-модели робота в симуляторе представлен на рисунке 1.

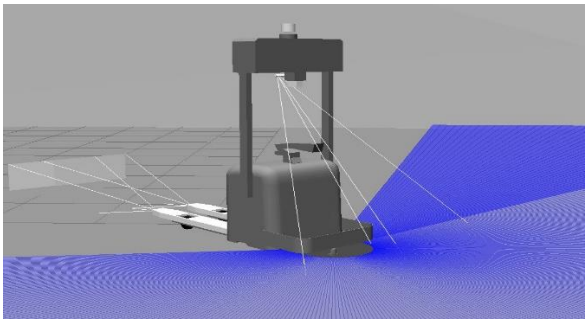


Рисунок 1 – Внешний вид 3D-модели робота в симуляторе (Gazebo)

Для непрерывного исполнительного уровня использована кинематическая модель Ackermann-типа. Она отражает связь между линейной скоростью робота v, углом поворота рулевого колеса δ, базой робота L и изменением позы q=(x,y,θ) в плоскости. Модель минимизирует боковое проскальзывание и является достаточной для передачи ограничений движения в контроллер и систему одометрии; её уравнения приведены в формуле (8). Схематическое изображение кинематики с обозначением переменных показано на рисунке 2.

$$\dot{x} = v\cos\theta, \quad \dot{y} = v\sin\theta, \quad \dot{\theta} = \left(\frac{v}{L}\right)\tan\delta, \tag{8}$$

где x,y – координаты центра робота в плоскости; theta – угол ориентации; v – линейная скорость; delta – угол поворота рулевого механизма; L – расстояние между передней и задней осями.$(x, y)\theta L$

Одометрия вычислялась численным интегрированием скоростей и угла рулевого механизма, после чего использовалась Nav2 и AMCL для локализации, построения локальных траекторий и контроля достижения целей. Для связи дискретного и непрерывного уровней применялось преобразование координат, заданное формулой (9):

$$x = x_0 + r\,i, \quad y = y_0 + r\,j \tag{9}$$

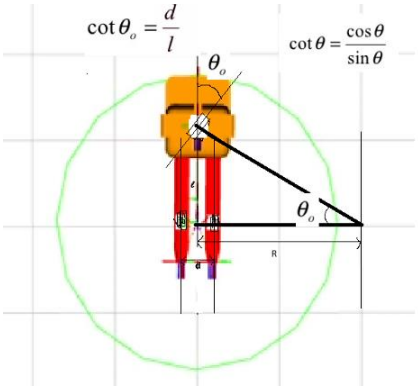


Рисунок 2 – Схематическое изображение кинематики с обозначением переменных

Критерий достижения waypoint задавался ошибкой положения по формуле (10). Цель считалась достигнутой при выполнении условия (11). Перепланирование инициировалось при превышении таймаута, отсутствии прогресса или ошибке Nav2; соответствующие условия приведены в формулах (12)-(14).

$$e_i(t) = \sqrt{((x_i(t) - x_goal)\text{^}2 + (y_i(t) - y_goal)\text{^}2)} \quad (10)$$

$$e_i(t) \leq R_goal \quad (11)$$

$$t_now - t_sent > t_timeout \Rightarrow replan \quad (12)$$

$$\sqrt{((x_i(t) - x_i(t - T_stuck))\text{^}2 + (y_i(t) - y_i(t - T_stuck))\text{^}2)} < d_min \Rightarrow replan \quad (13)$$

$$Nav2_status \in \{aborted, canceled\} \Rightarrow replan \quad (14)$$

Результаты исследований

Экспериментальная оценка проводилась на двух взаимодополняющих уровнях. Дискретный уровень использовался для проверки централизованной координации MAPF/CBS и расчёта makespan, SOC и времени планирования. Непрерывный уровень ROS2/Gazebo/Nav2 применялся для анализа поведения роботов при физически интерпретируемом исполнении, где каждый агент функционировал в отдельном ROS2 namespace, а воспроизводимость конфигураций обеспечивалась контейнеризацией Docker. Параметры дискретных карт и преобразования координат приведены в таблице 1, а также пример симуляции многороботной системы показан на рисунке 3.

Таблица 1 – Параметры дискретных карт и преобразования координат

Карта	Размер сетки	r, м	x0	y0	Тип среды
A	3 x 3	2,0	-2,0	-2,0	свободная / низкоконфликтная среда
B	3 x 3	2,0	-2,0	-2,0	коридорная / конфликтно-нагруженная среда

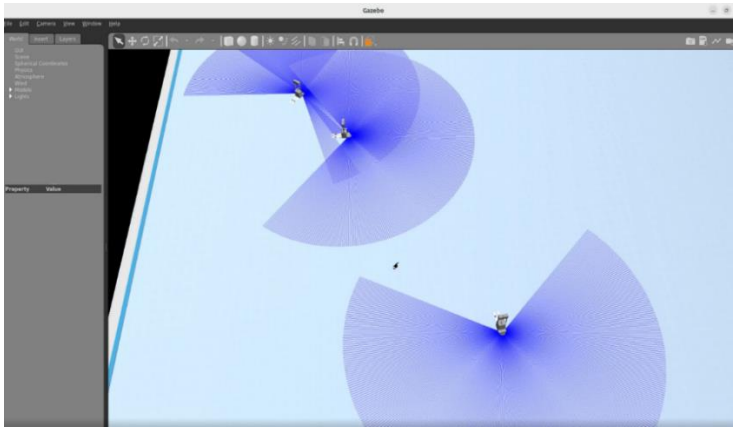


Рисунок 3 –Симуляция многороботной системы в виртуальном складе, где каждый робот функционирует в изолированной среде ROS2

Сравнивались три режима. R1 – централизованная дискретная координация MAPF/CBS, используемая как reference baseline. R2 – децентрализованное исполнение Nav2-only, при котором каждый робот получает только конечную цель и не имеет глобального

механизма согласования с другими агентами. R3 – гибридный режим MAPF/CBS + Fleet Manager + Nav2, где глобальный план преобразуется в waypoint-последовательности и исполняется локальными навигационными средствами. Количественные результаты эталонного режима R1 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Количественные результаты эталонного режима R1 (MAPF/CBS)

Карта	N	Makespan, такты	SOC	Время планирования, с
A	1	2	3	0,095823
A	2	2	5	0,108520
A	8	4	40	15,709505
B	8	1	16	0,055002

В режиме R2 каждый робот получал индивидуальную целевую точку, а построение траектории и обход препятствий выполнялись средствами Nav2 без внешнего координационного уровня. В свободной среде такой подход сохраняет работоспособность при малой плотности агентов, однако в коридорных сценариях становится чувствительным к встречным потокам, очередям и циклическому ожиданию. Поэтому R2 рассматривается как базовый децентрализованный сценарий, относительно которого оценивается вклад глобальной координации.

Гибридная конфигурация R3 объединяет преимущества R1 и R2. Централизованный планировщик устраняет конфликты на уровне дискретной модели до начала движения, Fleet Manager переносит план в последовательность waypoint-целей, а Nav2 обеспечивает локальное исполнение с учётом непрерывной геометрии среды. Такая схема особенно важна в участках ограниченной пропускной способности: глобальный уровень задаёт порядок прохождения конфликтной зоны, а локальный уровень компенсирует ошибки позиционирования, задержки и малые отклонения траектории. Траектории роботов в гибридном режиме MAPF + Nav2 представлены на рисунке 4.

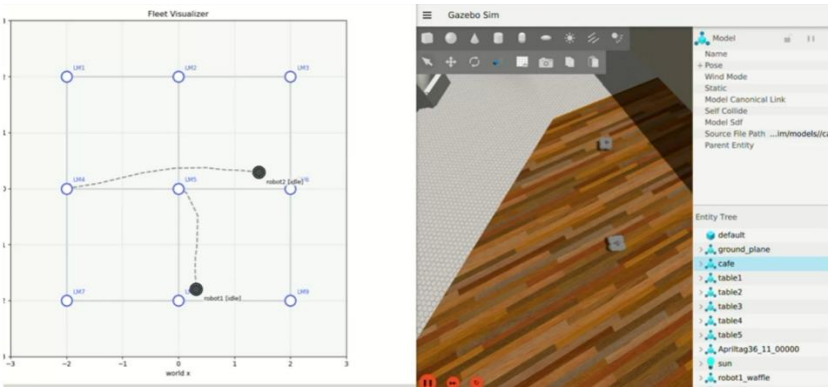


Рисунок 4 – Траектории роботов в гибридном режиме MAPF + Nav2, демонстрирующие согласованное движение

Обсуждение научных результатов

Количественные результаты R1 показывают, что уже на малой дискретной карте увеличение числа агентов с 1 до 8 на карте A приводит к росту времени планирования примерно в 164 раза (с 0,095823 до 15,709505 с), SOC увеличивается с 3 до 40, а makespan - с 2 до 4 тактов. Это подтверждает основное ограничение строгой централизованной координации: она обеспечивает бесконфликтность и глобальную согласованность, но её вычислительная стоимость существенно возрастает при усложнении задачи. Следовательно, практическая ценность гибридной архитектуры заключается не в замене локальной навигации, а в создании координационного слоя, который задаёт порядок движения и передаёт его в устойчивое локальное исполнение.

Заключение

В работе предложена гибридная архитектура управления мобильными роботами, объединяющая централизованное MAPF/CBS-планирование, промежуточный Fleet Manager

и децентрализованное исполнение средствами ROS2/Nav2. В отличие от чисто децентрализованного режима, предложенный подход вводит глобальный механизм предотвращения конфликтов; в отличие от полностью централизованного управления, он сохраняет способность локального уровня адаптироваться к непрерывной среде и текущим отклонениям исполнения.

Формализация задачи через граф G=(V,E), конфликтные ограничения, метрики makespan и SOC, а также кинематическая модель Ackermann-типа устраняют методологическую неопределённость и позволяют воспроизводимо оценивать систему. Экспериментальные результаты эталонного режима R1 показывают рост времени планирования с 0,095823 до 15,709505 с при увеличении числа агентов на карте A с N=1 до N=8; одновременно SOC возрастает с 3 до 40. Эти данные количественно подтверждают, что централизованный уровень полезен для глобальной согласованности, но требует гибридного исполнения при переходе к практическим многороботным сценариям.

Таким образом, разработанная архитектура является обоснованным компромиссом между глобальной оптимизацией и локальной автономностью. Практическое значение работы состоит в воспроизводимом контуре MAPF/CBS – Fleet Manager – Nav2, пригодном для складских и логистических сред с узкими проходами и конфликтными зонами. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение серии Gazebo/Nav2-запусков, статистическую обработку R2/R3 по метрикам success rate, deadlock rate и D_sum, а также на проверку алгоритма при большем числе агентов и динамических препятствиях.

Список литературы

1. Dai Y. Development of a Fleet Management System for Multiple Robots' Task Allocation Using Deep Reinforcement Learning / Y. Dai, D. Kim, K. Lee // Processes. – 2024. – № 12(12). – P. 2921. https://doi.org/10.3390/pr12122921.
2. Efficient multi-robot path planning in real environments: a centralized coordination system / D.M. Matos et al // Int J Intell Robot Appl. – 2025. – № 9. – P. 217-244. https://doi.org/10.1007/s41315-024-00378-3.
3. Decentralized multi-robot formation control in environments with non-convex and dynamic obstacles based on path planning algorithms / L.E. Ruiz-Fernandez et al // Intel Serv Robotics. – 2025. – № 18. – P. 215-232. https://doi.org/10.1007/s11370-024-00582-x.
4. Bayer J. Decentralized multi-robot exploration under low-bandwidth communications / J. Bayer, J. Faigl // Auton Robot. – 2026. – № 50. – P. 7. https://doi.org/10.1007/s10514-025-10234-3.
5. Consistent batch fusion for decentralized multi-robot cooperative localization / N. Hao et al // Control Theory Technol. – 2024. – № 22. – P. 638-651. https://doi.org/10.1007/s11768-024-00229-3.
6. Niu L. Decentralized Density Control of Multi-Robot Systems Using PDE-Constrained Optimization / L. Niu, G. Notomista // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2025. – vol. 10, № 4. – P. 4045-4052. https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3548501. https://ieeexplore.ieee.org/document/10910164.
7. Centralization vs. decentralization in multi-robot sweep coverage with ground robots and UAVs / A. Jamshidpey et al // Artif Life Robotics. – 2025. https://doi.org/10.1007/s10015-025-01049-7.
8. Priority-Based Distributed Coordination for Heterogeneous Multi-Robot Systems With Realistic Assumptions / M. Cecchi et al // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2021. – vol. 6, № 3. – P. 6131-6138. https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3091016.
9. Tahir N. Consensus-based Resource Scheduling for Collaborative Multi-Robot Tasks / N. Tahir, R. Parasuraman // Seventh IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), Laguna Hills, CA, USA. – 2023. – P. 323-330. https://doi.org/10.1109/IRC59093.2023.00059. https://ieeexplore.ieee.org/document/10473544.
10. Comparative Analysis of Centralized and Federated Learning Techniques for Sensor Diagnosis Applied to Cooperative Localization for Multi-Robot Systems / Z. El Mawas et al // Sensors. – 2023. – № 23(17). – P. 7351. https://doi.org/10.3390/s23177351.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант №BR31715767 и № AP22685781).

Е.А. Төлешев[1], Қ.М. Абуталипов[1], М.Ж. Куатова[2], П.М. Рахметова[1]*
[1]Satbayev University, 050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сатпаева 22
[2]Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Шевченко 28
*e-mail: p.rakhmetova@gmail.com

ОРТАЛЫҚТАНДЫРЫЛҒАН ЖОСПАРЛАУ ЖӘНЕ ОРТАЛЫҚТАНДЫРЫЛМАҒАН НАВИГАЦИЯ НЕГІЗІНДЕ МОБИЛЬДІ РОБОТТАР ФЛОТЫН КООРДИНАЦИЯЛАУДЫҢ ГИБРИДТІ АРХИТЕКТУРАСЫН ӘЗІРЛЕУ

Бұл мақалада мобильді роботтар паркін басқаруға арналған гибридті архитектура ұсынылады және формальдандырылады. Орталықтандырылған MAPF/CBS қабаты тұрақты дискретті қозғалыс жоспарын жасайды, ал орталықсыздандырылған ROS2/Nav2 қабаты Gazebo ортасында үздіксіз орындалуды және жергілікті бейімделуді қамтамасыз етеді. Есептеу күрделілігі мен орындау ауытқуларының артуына сезімтал толық орталықтандырылған схемалардан, сондай-ақ роботтар арасындағы қақтығыстардың алдын алудың жаһандық механизмі жоқ тек Nav2 режимінен айырмашылығы, ұсынылған архитектура аралық флот менеджерін енгізеді. Бұл модуль дискретті жоспарды жол нүктесінің командаларының тізбегіне түрлендіреді, прогресті бақылайды, кідірістерді анықтайды және қозғалыс шарттары бұзылған кезде қайта жоспарлауды бастайды. G=(V,E) графигіндегі мәселенің математикалық тұжырымдамасы тұжырымдалған, шыңдар мен жиектердегі қақтығыс шектеулері, макспан және шығындар қосындысының мақсатты критерийлері көрсетілген және үздіксіз орындау үшін Ackermann типті кинематикалық модель ұсынылған. Тәжірибелік тексеру екі деңгейде жүргізілді: дискретті MAPF/CBS моделінде және ROS2/Gazebo/Nav2 модельдеу ортасында. R1 сілтеме режимі үшін A картасындағы агенттер саны N=1-ден N=8-ге дейін артқан сайын жоспарлау уақыты 0,095823-тен 15,709505 с-қа дейін, SOC 3-тен 40-қа дейін, ал макспан 2-ден 4 циклге дейін артатыны көрсетілді. Алынған нәтижелер орталықтандырылған жоспарды жергілікті бейімделгіш іске асыруға гибридті түрде ауыстыру қажеттілігін растайды және көп роботты жүйенің масштабталуын, беріктігін және қақтығыстарға төзімділігін бағалау үшін қайталанатын құрылымды анықтайды.

Түйін сөздер: *гибридті басқару архитектурасы; көп агентті роботты жүйелер; MAPF; Қақтығысқа негізделген іздеу; ROS2; Nav2; Gazebo; автономды навигация.*

E.A. Tuleshov[1], K.M. Abutalipov[1], M.Zh. Kuatova[3], P.M. Rakhmetova[1]*
[1]Satbayev University, 050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev St. 22
[2]U. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering,
050010, Republic of Kazakhstan, Almaty, Shevchenko St. 28
*e-mail: p.rakhmetova@gmail.com

DEVELOPMENT OF A HYBRID COORDINATION ARCHITECTURE FOR A MOBILE ROBOT FLEET BASED ON CENTRALIZED PLANNING AND DECENTRALIZED NAVIGATION

Abstract: *This paper proposes and formalizes a hybrid architecture for controlling a fleet of mobile robots. The centralized MAPF/CBS layer generates a consistent discrete motion plan, while the decentralized ROS2/Nav2 layer ensures continuous execution and local adaptation in a Gazebo environment. Unlike fully centralized schemes, which are sensitive to increasing computational complexity and execution deviations, as well as the Nav2-only mode, which lacks a global mechanism for preventing inter-robot conflicts, the proposed architecture introduces an intermediate Fleet Manager. This module converts the discrete plan into a sequence of waypoint commands, monitors progress, detects delays, and initiates replanning when motion conditions are violated. A mathematical formulation of the problem on a graph G=(V,E) is formulated, conflict constraints on vertices and edges, makespan and sum-of-costs target criteria are specified, and an Ackermann-type kinematic model is presented for continuous execution. Experimental verification was performed at two levels: in a discrete MAPF/CBS model and in the ROS2/Gazebo/Nav2 simulation environment. For the R1 reference mode, it was shown that as the number of agents on map A increases from N=1 to N=8, the planning time increases from 0.095823 to 15.709505 s, the SOC increases from 3 to 40, and the makespan increases from 2 to 4 cycles. The obtained results confirm the need for a hybrid transfer of a centralized plan to a locally adaptive implementation and define a reproducible framework for assessing the scalability, robustness, and conflict tolerance of a multi-robot system.*

Key words: *hybrid control architecture; multi-agent robotic systems; MAPF; Conflict-Based Search; ROS2; Nav2; Gazebo; autonomous navigation.*

Сведения об авторах

Еркебулан Амандыкович Тулешов – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Қайсар Мұхтарұлы Абуталипов – магистрант кафедры Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: kaisar.abutalipovv@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7972-6620.

Молдир Жангелдиевна Куатова – PhD, ведущий научный сотрудник, Институт механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан; директор Департамента по научно-инновационной деятельности Международного инженерно-технологического университета, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: kuatova.moldyr@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7614-6124.

Перизат Маратқызы Рахметова* – PhD, ассоциированный профессор кафедры Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: p.rakhmetova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5645-5157.

Авторлар туралы мәліметтер

Еркебұлан Амандыкович Төлешев – Техника ғылымдарының кандидаты, Роботтытехника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Қайсар Мұхтарұлы Абуталипов – Робототехниканың және техниканың автоматтық құралдары кафедрасының магистранты, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kaisar.abutalipovv@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7972-6620.

Мөлдір Жангелдіқызы Қуатова – PhD, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машина жасау институты, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; Халықаралық инженерлік-технологиялық университетінің ғылыми және инновациялық қызмет департаментінің директоры, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kuatova.moldyr@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7614-6124.

Перизат Маратқызы Рахметова* – PhD, Робототехниканың және техниканың автоматтық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: p.rakhmetova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5645-5157.

Information about the authors

Yerkebulan Tuleshov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Kaisar Abutalipov – masters of Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: kaisar.abutalipovv@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7972-6620.

Moldir Zhangeldievna Kuatova – PhD, Leading Researcher, RSE on the Right of Economic Management «Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U.A. Dzholdasbekov» of the Scientific Research Institute of Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan; Director of the Department of Scientific and Innovative Activities, International University of Engineering and Technology, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: kuatova.moldyr@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7614-6124.

Perizat Rakhmetova* – PhD, Associate Professor of the Department of Robotics and technical means of automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: p.rakhmetova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5645-5157.

Поступила в редакцию 01.05.2026
Принята к публикации 18.06.2026