

Самоорганизация взаимодействия группы цифровых двойников беспилотных транспортных средств при выполнении производственных задач в умном цехе

В.И. Протасов, И.С. Куриленко, Р.О. Мирахмедов

Аннотация — Статья посвящена разработке метода самоорганизации группы цифровых двойников беспилотных транспортных аппаратов (БТА) в виртуальном производственном пространстве умного цеха. Целью работы является обеспечение безаварийного коллективного движения БТА при транспортировке заготовок и комплектующих изделий. Для этого адаптирован метод молекулярной динамики, где каждый аппарат рассматривается как «квазимолекула», взаимодействующая с другими аппаратами и элементами окружения умного цеха через потенциалы притяжения и отталкивания. Для оптимизации временных затрат на обработку партии изделий применяется генетический алгоритм, формирующий квазиоптимальную последовательность выбора заготовок и комплектующих. Моделирование в среде Unity подтвердило эффективность подхода: отклонение от эталонных показателей времени и энергии составило менее 5%, а столкновения в ходе испытаний полностью отсутствовали.

Ключевые слова — умный цех, цифровые двойники, беспилотные транспортные аппараты (БТА), самоорганизация, метод молекулярной динамики, генетический алгоритм, виртуальное производственное пространство, безаварийное движение, Индустрия 4.0, планирование траекторий, квазимолекула.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие информационных технологий кардинально изменяет промышленный сектор, вынуждая предприятия адаптироваться к условиям нестабильности современного рынка через персонализацию продукции под индивидуальные запросы каждого клиента. В настоящее время происходит новая промышленная революция, известная как Индустрия 4.0. Она характеризуется глубокой взаимосвязью между информационными системами и физическими производственными процессами, создающей эффект синергии.

Статья получена 1 октября 2025 г. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, номер темы FSFF-2023-0005.

В.И. Протасов – МАИ (email: protonus@yandex.ru),
И.С. Куриленко – МАИ (email: kuril_iv@yandex.ru),
Р.О. Мирахмедов – МАИ (email: mirakhmedov@gmail.com)

Применение беспилотных аппаратов в контексте Индустрии 4.0 приобретает особую актуальность в связи с их способностью интегрироваться в интеллектуальные системы, которые обеспечивают связь между цифровыми и физическими процессами. При помощи компьютерного зрения, промышленного интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта (ИИ) их использование позволяет реализовать принципы адаптивного производства за счет автономного перемещения между технологическими зонами с возможностью динамической перенастройки маршрутов на основе данных цифрового двойника предприятия. В условиях необходимости перехода к персонализированному производству беспилотные аппараты обеспечивают гибкость решения задач транспортировки, сокращая время переналадки производственных линий за счет мобильности.

Однако, для применения беспилотных аппаратов в рамках производственного предприятия требуется разработка методов организации, осуществляющих движение без столкновений с низкими требованиями к вычислительным ресурсам.

Цель работы. Разработка метода самоорганизации взаимодействия беспилотных транспортных аппаратов (БТА) в виртуальном производственном пространстве на основе принципов молекулярной динамики.

Задачи:

1. Анализ существующих решений организации взаимодействия БТА.
2. Проектирование архитектуры системы виртуального производственного пространства умного цеха.
3. Разработка и программная реализация логистики в виртуальном производственном пространстве.
4. Применение генетического алгоритма (ГА) для создания входной последовательности задач транспортировки с целью сокращения временных и энергетических затрат.
5. Испытания и оценка характеристик цифровых двойников на основе предложенного метода взаимодействия.

II. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

Для организации взаимодействия БТА применяются различные методы нахождения траекторий движения без столкновений. При этом суммарный путь всех аппаратов должен иметь наименьшую возможную протяженность по сравнению с другими возможными вариантами.

Существует много методов решения задач данного класса, однако у каждого из них есть присущие им достоинства и недостатки. Согласно анализу источников [1-7], существует два основных класса методов нахождения параметров движения: на основе алгоритмических подходов и природоподобные методы.

А. Алгоритмические подходы

Алгоритмические подходы нахождения траектории основаны на математических моделях и алгоритмах построения маршрута между двумя точками. Хотя алгоритмические методы обеспечивают оптимальные траектории, поскольку они гарантируют, что в случае, если решение задачи существует, оно будет найдено, и просты в реализации, некоторые из них имеют существенные ограничения, такие как трудности адаптации к динамическим и непредсказуемым условиям [7], а также высокая вычислительная сложность [4]. Тем не менее, эти подходы сохраняют актуальность как основа для современных методов нахождения траекторий движения. Существует три группы алгоритмических методов:

- методы на основе графов,
- методы на основе выборки,
- методы на основе потенциальных полей.

В основе первой группы методов лежит представление всего рабочего пространства, в котором происходит поиск пути, в виде графа, вершины которого представляют собой точки в пространстве, а ребра – возможные пути между данными точками. Каждому ребру присваивается вес стоимости перемещения между вершинами, на основе чего достигается цель подобных методов – нахождения наиболее экономичного пути между начальной и конечной вершинами. Ключевыми представителями данной категории методов являются алгоритмы Дейкстры A^* и D^* [3,8-10]. Хотя эффективность алгоритмов подтверждена исследованиями [9], их вычислительная сложность ограничивает применение в задачах с требованием быстрого поиска пути до конкретной цели. Классическая реализация алгоритма Дейкстры характеризуется экспоненциальным ростом вычислительной нагрузки из-за необходимости полного обхода графа.

Второе большое семейство алгоритмических подходов – методы на основе выборки. Методы, относящиеся к этому семейству построены на выборе случайным образом точек в рабочем пространстве, на основе которых строится граф, соединяющий допустимые точки. Таким образом, в отличие от методов на основе графов, данные методы строят маршрут непосредственно в процессе работы алгоритма. Алгоритм PRM (Probabilistic RoadMap - «Вероятностная дорожная карта») работает в два этапа [1]. На первом этапе строится оффлайн карта маршрутов, когда случайным образом выбираются точки в пространстве,

не являющиеся препятствиями и затем, они соединяются в граф. Количество вершин напрямую влияет на качество результата и время выполнения – чем больше точек, тем точнее путь, но дольше расчет [11]. Второй этап использует полученный граф для онлайн-запросов: находится кратчайший путь между заданными начальной и конечной точками. Также Matthias Hüppi и соавторы представили Temporal-PRM – расширение алгоритма PRM, которое включило концепцию времени для обеспечения движения без столкновений с динамическими препятствиями [12]. Temporal-PRM дополняет исходный алгоритм временной графовой моделью и использует модифицированный алгоритм поиска для эффективного построения маршрутов, сохраняя при этом способность PRM обрабатывать множественные запросы и генерировать плавные траектории. Данный подход обеспечивает отсутствие столкновений в высоко динамичных средах с минимальными вычислительными затратами, но является ресурсно-затратным.

Алгоритм RRT (англ. Rapidly exploring Random Tree - «быстро исследующее случайное дерево») был предложен Стюартом ЛаВаллем в 1998 году [4]. В процессе работы алгоритм берет начальную точку за корневую и последовательно соединяет случайные точки в пространстве до достижения целевой конфигурации. Решение, формируемое RRT, представляет собой древовидную структуру, где каждая точка маршрута является узлом, а ветви напоминают структуру реального дерева. Алгоритм исследует пространство, направляя ветви из узловых точек в исследуемую область. Каждая ветвь выбирается случайным образом и движется к цели в соответствии со своим направлением.

Вероятностная природа алгоритма делает RRT подходящим для сложных динамических сред, что подтверждается успешным применением в таких задачах, как нахождение траекторий для автономных транспортных средств [13] и манипуляционных роботов [14].

Однако, у данного алгоритма есть и недостатки: RRT не всегда способен определить наиболее оптимальный маршрут, поскольку он не гарантирует нахождения наилучшего общего решения [15].

Последняя категория алгоритмических подходов – методы планирования пути на основе искусственного потенциального поля (APF), которые представляют собой подходы, моделирующие окружающую среду как виртуальное потенциальное поле, где препятствия создают силы отталкивания, а целевая точка – силу притяжения, направляя беспилотный аппарат вдоль градиента поля (рис. 1). Эти методы отличаются высокой вычислительной эффективностью, учитывают присутствие динамических препятствий и гарантирует предотвращение столкновений [2]. Однако они имеют ряд ограничений, включая риск застревания в локальных минимумах, сложности при прохождении узких проходов и трудности в сценариях с несколькими целями. Несмотря на эти ограничения, APF остается ценным подходом в робототехнике и был модифицирован в настоящей работе для решения указанных проблем.

Исследователи применяли различные методы в рамках подхода APF для решения специфических задач

и работы в различных средах, повышая его адаптивность и практическую полезность. Модифицированный метод искусственного потенциального поля (MAPF) устраняет указанные ограничения за счет интеграции глобального планировщика маршрутов, который строит безопасную траекторию движения робота на основе APF [16-18].

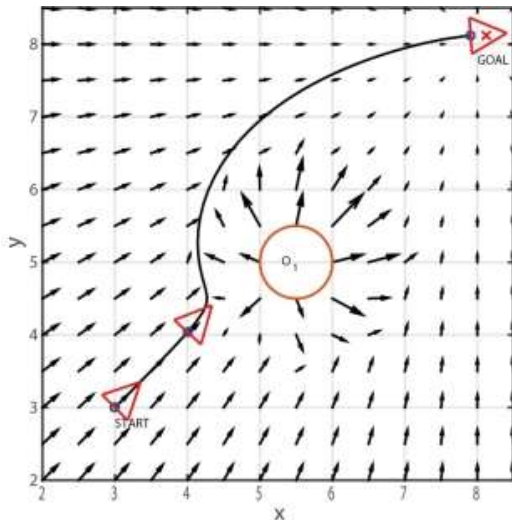


Рис. 1. Алгоритм построения искусственного потенциального поля

В нашей работе для самоуправления групп БТА наряду с методом APF был использован метод молекулярной динамики (ММД). Для тестирования децентрализованной автономной системы управления БТА, основанной на принципах молекулярной динамики с применением разнообразных потенциалов межчастичного взаимодействия, была создана специализированная вычислительная модель, обладающая минимальными требованиями к бортовым вычислителям. В рамках данной модели каждый аппарат, элементы среды и препятствия, как неподвижные, так и подвижные, представляется точечной «квазимолекулой», обладающей соответствующей массой и движение описывается классическими уравнениями Ньютона под воздействием результирующего потенциала сил, создаваемого окружающими «квазимолекулами».

В. Природоподобные методы

При решении сложных оптимизационных задач используются природоподобные методы, которые заимствуют принципы из биологических систем, процессов или моделей поведения, имитируя естественные феномены и используя такие концепции как эволюция и роевой интеллект, что позволяет эффективно решать проблемы оптимизации, поиска и принятия решений. Ключевым представителем данной категории методов являются генетический алгоритм (ГА).

ГА представляет собой эвристический метод поиска, основанный на принципах естественного отбора, который демонстрирует высокую эффективность при решении задач оптимизации с обширным и сложным пространством возможных решений [5]. В контексте нахождения траекторий данный алгоритм позволяет находить оптимальные, или близкие к оптимальным, маршруты путем итеративного генерирования

множества возможных вариантов на протяжении нескольких поколений, где операторы селекции, скрещивания и мутации, использующие целевую функцию, последовательно улучшают пути, минимизируя энергопотребление, уровень риска и длину маршрута.

Ряд исследователей предложили применение этого эволюционного вычислительного метода для определения оптимальных траекторий передвижения БТА. В своей работе Abdul Majeed и соавторы предложили метод на основе ГА для повышения эффективности покрытия территории беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в распределенных зонах [19]. Хотя данный подход успешно учитывает множество целевых показателей и ограничений, он сталкивается с проблемами масштабируемости. Усовершенствованная версия ГА, ориентированная на задачи покрытия больших территорий, была представлена Perihan Pehlivanoglu и коллегами в [20]. Этот модифицированный алгоритм демонстрирует оптимальные результаты, однако требует повышенных вычислительных ресурсов из-за возросшей сложности метода. В исследовании Rutuja Shivgan и коллег ГА был применен для снижения энергопотребления аппаратов [21].

Исходя из приведенного анализа следует сделать вывод, что с задачей самоорганизации группового взаимодействия могут справиться алгоритмы на основе потенциальных полей, поскольку они имеют низкие требования к вычислительным ресурсам, вследствие чего они подходят для решения задачи планирования пути автономных аппаратов, а также они гарантируют отсутствия столкновения внутри группы аппаратов. Однако, для использования предложенного метода молекулярной динамики необходимо внести ряд изменений для адаптации данного метода к использованию в проектируемой системе, поскольку в текущем виде он не предназначен для использования в сложном окружении. Для оптимизации задач логистики аппаратов по времени решения всего цикла производственных задач рациональным является использование генетических алгоритмов для цифровых двойников аппаратов и окружающего их пространства.

III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОСТРАНСТВА

В настоящей работе в качестве среды моделирования виртуального производственного пространства использовалась платформа Unity (<https://unity.com/ru>), которая может быть использована для создания цифровых двойников.

Для выбора архитектуры необходимо определить цели проектирования виртуального производственного пространства:

- 1) должны быть определены задачи, которые будут решаться внутри производственного пространства;
- 2) необходимо составить правила взаимодействия различных объектов между собой внутри данной системы;
- 3) виртуальное производственное пространство должно быть визуальным образом реального цеха, а также наполняющих его элементов;

4) адаптация ММД для организации самоуправления целесообразным коллективным движением БТА без столкновений;

5) для сокращения временных затрат на изготовление партии разнородных изделий должен быть разработан и применен модифицированный ГА.

Для выполнения этих целей нужно рассмотреть задачу транспортировки заготовок, обрабатываемых на производстве разнородных изделий, на протяжении всего жизненного цикла каждой конкретной заготовки внутри виртуального производственного пространства. Для этого необходимо составить технологическую карту, которая в себе содержит описание технологического процесса для каждого изделия, а также процесс выполнения операций над ними.

Заготовки изделий поступают на вход системы со специального склада, перемещаются между различными станками и обрабатываемыми центрами при помощи БТА, доукомплектовываются в соответствии с технологическими картами, и после завершения всех технологических операций и испытаний готовые изделия перемещаются на склад готовой продукции.

Технологическая карта представлена как таблица, где хранятся следующие данные: номер этапа, число этапов, статус выполнения этапа, код операции и длительность операций.

Статус выполнения этапа хранит в себе историю выполненных операций, на основе которой делается вывод о текущем этапе технологической карты. Код операции предписывает какие действия необходимо предпринять на данном этапе. Длительность операции определяет сколько времени потребуется станку обработать заготовку на каждом этапе в соответствии с технологической картой. Также, поскольку задачей БТА является транспортировка заготовок в соответствии с их технологическими картами, ключевым элементом проектируемой системы является обеспечение решения задачи нахождения пути каждого БТА. Поскольку в виртуальном производственном пространстве присутствуют элементы окружения, а также другие БТА, то должно осуществляться движение без столкновений.

Для выполнения поставленных задач должны быть составлены алгоритмы принятия решений, основанные на применении правил взаимодействия между БТА при организации коллективной работы. Таким образом, необходимо составить алгоритмы, распределяющие заготовки между станками и БТА, алгоритм, описывающий сценарии поведения БТА, а также алгоритмы, описывающие сценарии поведения станков и других объектов, с которыми в процессе симуляции взаимодействуют БТА.

А. Блок инициализации симуляции

Блок инициализации симуляции инициализирует создание виртуального производственного пространства из заранее подготовленного шаблона, хранящегося в файловой системе, а также передает блоку распределения заданий либо непосредственно введенную пользователем, либо модифицированную при помощи генератора случайных чисел входную последовательность заготовок. Входная последовательность определяет какое количество заготовок будет обработано за весь цикл симуляции, а

также в какой последовательности они будут перемещаться в соответствии с технологическими картами.

По окончании симуляции в блок инициализации симуляции передается информация о времени, затраченного на обработку данной входной последовательности партии заготовок. Данное время является ключевой мерой для каждой входной последовательности, которая в дальнейшем будет использована для сбора статистических данных о произведенных симуляциях.

В. Блок распределения заданий

Главными функциями этого блока являются хранение информации и принятие решений о перемещениях в соответствии с технологическими картами.

Вначале вызываются списки свободных складов, станков и БТА, на основе которых будут присваиваться задания. Затем, происходит проверка очереди на наличие заданий к выполнению, а также проверка на наличие свободных БТА. Далее происходит поиск подходящих по следующему этапу технологической карты объектов. Если таковые имеются, то из списков свободных объектов подходящего типа выбирается единственный объект по критерию «минимальная дистанция», а также из списка свободных БТА выбирается свободный БТА по такому же критерию, БТА получает данное задание.

Аналогичный алгоритм с некоторыми упрощениями применяется для принятия решений о направлении разряженных БТА на ближайшую зарядную станцию.

С. Блок поведения объектов

Блок поведения объектов отвечает за различные взаимодействия объектов, в зависимости от их типа, с БТА, а также за выполнение предписанных технологической картой заготовки операций. Такими объектами, например, являются передвигающиеся по своей программе балки и кран-балки.

Д. Блок поведения БТА

Блок поведения БТА описывает два основных состояния БТА: когда БТА ожидает поступление новых заданий и когда БТА выполняет поступившее задание. Во время бездействия БТА по возможности сохраняет свое текущее местоположение и при необходимости избегает столкновений с движущимися БТА и окружающими его препятствиями. Для выполнения поступившего задания БТА хранит в памяти текущее задание, позицию конечной цели текущего задания, что используется для построения маршрута, а также все объекты, которые являются препятствиями на его пути для обеспечения движения без столкновений.

Для отладки процесса самоорганизации группового взаимодействия БТА происходит регистрация аварийных столкновений БТА с друг другом или с объектами окружения. Счетчик подобных событий находится в пользовательском интерфейсе на протяжении всего процесса симуляции.

Также, во время передвижения БТА тратит заряд аккумулятора, при падении которого ниже критического уровня происходит добавление БТА в список разряженных БТА блока распределения заданий, где

ему будет подобрана зарядная станция в соответствии с алгоритмом направления разряженных БТА на зарядную станцию. Ведется общий подсчет траты электроэнергии среди всех БТА, что служит одной из метрик оптимизации

Е. Блок взаимодействия пользователя с системой

Блок пользовательского интерфейса визуализирует актуальные метрики процессов, протекающих в виртуальном производственном пространстве, а также позволяет пользователю взаимодействовать с параметрами симуляции.

Ф. Визуализация

Виртуальное производственное пространство (рис.2) представляет из себя цех с элементами наполнения, к которым относятся статичные и динамические объекты, такие как стены, колонны, балки и краны-балки, выполняющие роль препятствий на пути следования для БТА, вынуждающих их изменить траекторию движения, а также сами БТА и объекты, с которыми взаимодействуют БТА. Как описано ранее, к последним относятся склады заготовок, станки различных типов, склады готовой продукции и зарядные станции для БТА.

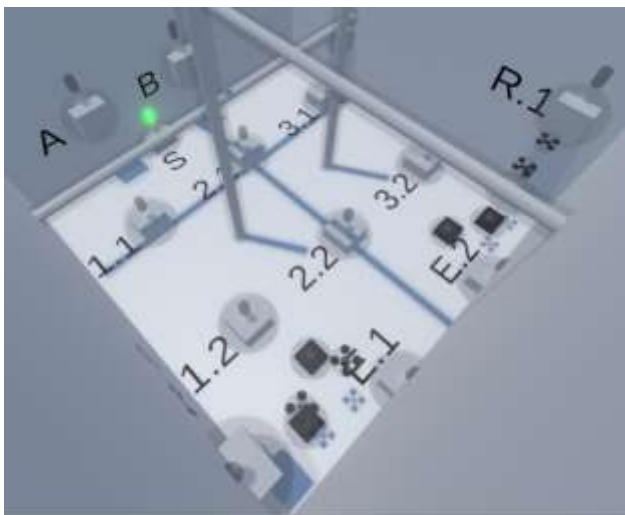


Рис.2. Визуальный образ производственного пространства умного цеха

Все объекты окружены виртуальными зонами безопасности, в которые ни при каких условиях не должны попадать чужие объекты. Колонны и балки располагаются внутри горизонтальных или вертикальных «защитных» цилиндров безопасности, соединяющих противоположно стоящие стены виртуального производственного пространства. 3D объекты небольших размеров окружаются сферами (например, БТА или кран-балки) или полусферами безопасности. Одной из разновидностей балок является кран-балка, который помимо статичного цилиндрического элемента имеет дополнительный перемещающийся кубический элемент, находящийся внутри своей сферы безопасности, который циклически перемещается в разрешенных рамках, симулируя перемещения крюковой подвески. Данное движение

создает динамически возникающее на пути препятствие для БЛА.

В виртуальном производственном пространстве используется два типа БТА – робокары (черные квадраты на рис.2) и БЛА (в виде крестообразных фигур). Робокары перемещаются только в нижней плоскости виртуального производственного пространства и используются для перемещения массивных заготовок, в то время как БЛА свободно перемещаются в 3D-пространстве и используются для перемещения легких комплектующих элементов, необходимых для выполнения операций сборки изделия

Объекты, выполняющие роли складов заготовок, станков различных типов, складов готовой продукции и зарядных станции для БТА, представлены в виде параллелепипедов. Для визуальной индикации типа каждого конкретного объекта рядом с ними на поверхностях наносятся соответствующие маркировки.

Каждому объекту присвоен цветовой индикатор, символизирующий отображаемым в данный момент цветом текущее состояние данного объекта.

IV. МЕТОД МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В настоящей работе представлена автономная система управления, основанная на 3D-зрении и не требующая внешнего управления. В рамках моделирования предполагается, что бортовой компьютер БТА заранее располагает данными о координатах других аппаратов, а также о положении и размерах препятствий.

После построения виртуальной модели окружающей среды с помощью системы технического зрения БТА выполняет следующие действия:

- 1) Обнаружение и классификация объектов – распознаёт препятствия, активные и пассивные помехи.
- 2) Оценка параметров – определяет расстояние до объектов, их скорость и направление движения.
- 3) Прогнозирование и планирование – предсказывает столкновения и корректирует траекторию, обеспечивая как выполнение текущего задания, так и избегание столкновений с другими БТА, статичными препятствиями и динамическими объектами.

Для управления движением БТА были использованы принципы взаимодействия между ними, основанные на методе молекулярной динамики. Каждый БТА рассматривается как «квазимолекула», расположенная в центре массы БТА, и обладающая массой, совпадающей с массой БТА. Данная «квазимолекула» подвержена воздействию силы, которая вычисляется как векторная сумма всех сил как от ближайших соседних «квазимолекул», так и от окружающих её препятствий. Подобные взаимодействия описываются потенциалом парного взаимодействия Леннарда-Джонса [22]. Такой подход обеспечивает безаварийное движение: БТА автоматически избегают столкновений друг с другом и отталкиваются от препятствий.

Для определения координат и скоростей каждого БТА применяются виртуальные потенциалы: притягивающие аппараты в нужную точку и отталкивающие их от окружающих объектов. На основе

векторной суммы этих сил вычисляется результирующее воздействие на каждый аппарат, после чего обновляются его скорость и положение.

Первый вид потенциала моделирует взаимодействие «квазимолекул» с виртуальными центрами параболоидов, обеспечивая навигацию БТА к заданной цели. Каждому БТА принадлежит свой потенциал и на другие БТА не действует. В бортовые компьютеры загружаются параметры траектории (в системе координат XYZ) и проекции векторов скоростей движения. Центр притягивающего потенциала совпадает с текущей точкой маршрута.

Вначале определяется квадрат расстояния от центра БТА до центра виртуального потенциала:

$$r^2 = (X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2$$

где X, Y, Z – координаты БТА, а X_1, Y_1, Z_1 – координаты центра виртуального потенциала.

Виртуальный потенциал притяжения конструируется в квадратичном виде

$$U_p = br^2,$$

где b – настроечный параметр, подбираемый экспериментально).

Данный метод обеспечивает притяжение всех БТА к центрам своих параболоидов. Для предотвращения колебаний «квазимолекул» вблизи центра их параболоида, в систему вводится экспериментально подбираемый коэффициент затухания, на который умножаются проекции скорости на каждом временном шаге. Этот подход подавляет нежелательные колебания и обеспечивает удержание БТА в центрах своих параболических потенциалов.

Второй вид потенциала описывает взаимодействие «квазимолекул» друг с другом, а также с элементами окружения. Поскольку нужно обеспечить отталкивание БТА от всех потенциальных источников столкновений используется отталкивательная ветвь потенциала Ленарда-Джонса [22]. Также, в отличие от существующих имплементаций ММД, для каждого объекта вводится понятие радиуса безопасности r_b , представляющее собой минимальное расстояние сближения, гарантирующее отсутствие столкновений между объектами, а результирующий радиус безопасности определяется как сумма радиусов безопасности каждого из объектов участников взаимодействия. Таким образом, данный вид потенциала имеет вид:

$$U_o = \frac{a}{(r - (r_{b1} + r_{b2}))^{12}},$$

где U_o – виртуальный потенциал отталкивания; r_{b1}, r_{b2} – радиус безопасности взаимодействующих объектов; a – настроечный параметр, подбираемый экспериментально.

Проекция силы на оси координат определяются как частные производные по этим координатам от парных потенциалов взаимодействия, взятые с отрицательным знаком. Для вычисления результирующего воздействия на каждый БТА рассчитываются и суммируются проекции всех сил. С использованием численного метода Эйлера рассчитываются значения проекций векторов скоростей БТА и их координат, при этом силы, действующие на «квазимолекулу», описываются II законом Ньютона

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{V}}{dt}.$$

V. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГА

Поскольку порядок входной последовательности заготовок влияет на исход моделирования, то для сокращения временных затрат целесообразно стремиться к нахождению оптимального порядка выдачи заготовок для равномерного распределения нагрузки между различными типами станков. Для решения этой задачи рационально использовать ГА, поскольку решением задачи является поиск минимума критерия оптимизации, в данном случае времени выполнения всей входной последовательности разнотипных изделий. Посредством скрещивания, мутации и отсеивания возможных рекомбинаций изначального генетического кода, то есть исходной входной последовательности, отбираются только наиболее успешные решения, которые итеративно изменяются для нахождения оптимального решения.

Кодировка хромосом осуществляется посредством установления порядка подачи заготовок во входной последовательности задач. На основе исходной последовательности заготовок составляется начальная популяция из 50 случайных последовательностей наборов заготовок, которые присваиваются каждой копии виртуального производственного пространства.

После определения фитнес-функции каждой особи начальной популяции, в соответствии с процедурой ГА производится выбор случайной пары родителей и осуществляется скрещивание их хромосом. При необходимости производится корректировка последовательностей выбора порядка заготовок. С вероятностью меньше 0.05 [23,24] случайно выбранная хромосома потомка подвергается мутации.

Эволюция популяции решений в соответствии с данной схемой ГА продолжается до тех пор, пока на протяжении нескольких поколений подряд не будут наблюдаться улучшения популяции, после чего определяется лучшая особь, которая считается квазиоптимальным решением.

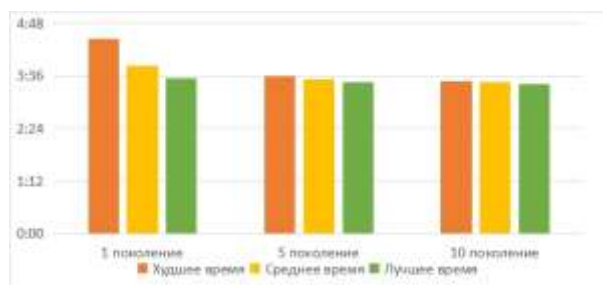
V. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки рассчитываемых при помощи ММД траекторий проводилось сравнение значений, полученных во время симуляции с эталонными [25]. Эталонным считается значение, полученное в условиях свободного пространства, т.е. когда БТА не встречаются на своем пути никаких препятствий и могут свободно передвигаться по виртуальному производственному пространству по кратчайшему расстоянию.

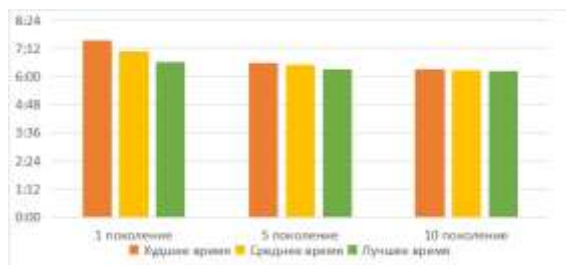
На основе проведенных симуляций были получены практические и эталонные значения итогового времени изготовления партии разнородных изделий и суммарного расхода энергии всеми БТА в процессе обработки данной партии для последовательности из 5 и 10 заготовок. Сравнивая полученные значения, стоит отметить, что их различие составляет менее 5% как для входной последовательности как из 5 заготовок, так и из 10.

На рис.3 представлены полученные результаты применения ГА для нахождения квазиоптимального времени обработки партии разнородных изделий для входных последовательностей из 10 и 20 заготовок. Полученные данные представлены отдельными графиками для начального, пятого и десятого поколений. Для каждого поколения определены показатели фитнес-функции лучших и худших особей в данном поколении, а также рассчитано среднее время обработки входной последовательности для всего поколения.

На основании полученных данных, можно сделать вывод, что при составлении случайного набора входных последовательностей для начальной популяции разница между худшей и лучшей особью составляет около 25%. Поскольку производственных мощностей достаточно для изготовления предложенных партий, и к десятому поколению вся популяция решений из 50 особей существенно превосходит лучший показатель первого поколения, то можно судить об успешности применения разработанного ГА.



a)



b)

Рис.3. Время изготовления последовательности разнородных изделий по поколениям, а) для 10 изделий, б) для 20 изделий.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы был проведен анализ существующих методов организации взаимодействия БТА, выявлены ключевые факторы, ограничивающие их применимость для достижения поставленной цели. На основе проведенного анализа было сделано заключение о целесообразности использования методов нахождения оптимального варианта решения транспортной задачи на основе использования потенциальных полей и ММД для самоорганизации группового взаимодействия БТА.

При испытаниях ММД, адаптированного для организации самоуправления целесообразным коллективным движением БТА без столкновений, был получен результат о приближенности полученных траекторий к эталонным, причем суммарный расход энергии в квазиоптимальном варианте не превышал

расхода энергии в 1.05 раз от варианта с кратчайшими путями, но с возможными столкновениями.

Разработан и испытан ГА, целью которого является поиск квазиоптимальных входных последовательностей заготовок с целью сокращения временных затрат на обработку партии разнородных изделий в умных цехах.

Показано, что для проектирования архитектуры виртуального производственного пространства можно использовать платформу Unity. Поставлены задачи, которые должны решаться внутри этого производственного пространства, описаны основные блоки архитектуры, визуализации производственного пространства, а также составлены необходимые алгоритмы, основанные на применении правил взаимодействия, взятых из ММД при организации коллективной работы, которые гарантируют выполнение поставленных задач.

Для обеспечения движения БТА без столкновений был адаптирован и успешно испытан ММД. Полученные показатели были сравнены с эталонными. Отклонение составило менее 5%, что позволяет судить о достаточной эффективности предложенного и испытанного в экспериментах подхода.

На протяжении большого количества испытаний не наблюдалось ни одного столкновения БТА с препятствиями и между собой, что позволяет судить о перспективности нашего подхода и возможности его применения в реальных умных цехах в рамках концепции Индустрии 4.0.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят доцента МАИ Потапову Зинаиду Евгеньевну за ряд конструктивных замечаний и консультаций, сделанных на этапах выполнения работы и написания статьи.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Kara M. Evaluation of popular planning algorithms // International Journal of Electronics and Telecommunications. — 2024. — P. 13–22.
- [2] AbuJabal N., Baziyad M., Fareh R., Brahmi B., Rabie T., Bettayeb M. A Comprehensive Study of Recent Path-Planning Techniques in Dynamic Environments for Autonomous Robots // Sensors — 2024. — no. 24.
- [3] Tang Z., Ma H. An overview of path planning algorithms // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2024. — № 2
- [4] Wang, H., Pan, W. Research on UAV Path Planning Algorithms. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol 693. — 2021. — P. 012120.
- [5] Debnath, D., Vanegas, F., Sandino, J., Hawary, A. F., & Gonzalez, F. A Review of UAV Path-Planning Algorithms and Obstacle Avoidance Methods for Remote Sensing Applications // Remote Sensing. — 2024. — № 21.
- [6] Лю В. Методы планирования путей в среде с препятствиями // Математика и математическое моделирование. — 2018. — С. 15–58
- [7] Patle B.K., Babu G., Pandey A., Parhi D.R.K., Jagadeesh A. A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot // Defence Technology. — 2019. — P.582-606.
- [8] Дьячук А. К., Белозерцева А.Н. Сравнительный анализ алгоритмов построения оптимального маршрута полета летательного аппарата при наличии зон угроз // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — №5 (131).
- [9] Wayahdi M.R., Ginting S.H.N., Syahputra D. Greedy, A-Star, and Dijkstra's Algorithms in Finding Shortest Path // International Journal of Advances in Data and Information Systems. — 2021. — P. 45–52.
- [10] Bing H., Lai. L. Improvement and Application of Dijkstra Algorithms // Academic Journal of Computing & Information Science. — 2022. — № 5 (5).

- [11] Wang Z., Cai J. Probabilistic roadmap method for path-planning in radioactive environment of nuclear facilities // *Progress in Nuclear Energy*. — 2018. — P. 113–120.
- [12] Huppi M., Bartolomei L., Mascaro R., Chli M. T-PRM: Temporal Probabilistic Roadmap for Path Planning in Dynamic Environments // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. — 2022.
- [13] Jia Z., Lin P., Liu J., Liang L. Online cooperative path planning for multi-quadrotors in an unknown dynamic environment // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. — 2022. — №236 (3).
- [14] Todi V., Sengupta G., Bhattacharya S. Probabilistic Path Planning using Obstacle Trajectory Prediction // *CODS-COMAD: Proceedings of the ACM India Joint International Conference on Data Science and Management of Data*. — 2019. — P. 36–43.
- [15] Chen J., Yu J. An Improved Path Planning Algorithm for UAV Based on RRT // *4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE)*. — 2021. — P. 859–898.
- [16] Hao G., Lv Q., Huang Z., Zhao H., Chen W. UAV Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method // *Aerospace*. — 2023. — P. 562.
- [17] Ma' Arif A., Rahmani W., Vera M. A., Nuryono A. A., Majdoubi R., Çakan A. Artificial potential field algorithm for obstacle avoidance in UAV quadrotor for environment // *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*. — 2021. — P. 184–189.
- [18] Zhang H., Zhu Y., Liu X., Xu X. Analysis of Obstacle Avoidance Strategy for Dual-Arm Robot Based on Speed Field with Improved Artificial Potential Field Algorithm // *Electronics*. — 2021. — №10 (15).
- [19] Majeed, A., Hwang, S.O. A Multi-Objective Coverage Path Planning Algorithm for UAVs to Cover Spatially Distributed Regions in Urban Environments // *Aerospace*. — 2021. — №8 (343).
- [20] Pehlivanoglu V. Y., Pehlivanoglu P. An enhanced genetic algorithm for path planning of autonomous UAV in target coverage problems // *Applied Soft Computing*. — 2021. — №107796.
- [21] Shivgan R., Dong Z. Energy-Efficient Drone Coverage Path Planning using Genetic Algorithm // *IEEE 21st International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*. — 2020. — P. 1–6.
- [22] Jones J.E. On the determination of molecular fields. I. From the variation of the viscosity of a gas with temperature // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. -1924.- Vol. 106. No. 738. — P. 441–462.
- [23] Grefenstette J.J. Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. — 2007. — P. 122–128.
- [24] В.И. Протасов. Системы коллективного интеллекта. — М.: Вузовская книга, 2024. — С.230
- [25] Потапова З. Е., Протасов В. И., Шаронов А. В. Самоуправление в группе беспилотных летательных аппаратов на основе метода молекулярной динамики // *Информационные системы и технологии 2019: сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции «Авиация и космонавтика»*. — 2019. — С. 703–708.

Self-Organization of a Group of Digital Twins of Unmanned Transport Vehicles for Production Tasks in a Smart Workshop

V. Protasov, I. Kurilenko, R. Miramedov

Abstract: The article presents a method for self-organization of a group of digital twins of unmanned transport vehicles (UTVs) in a virtual production space of a smart workshop. The aim is to ensure collision-free collective movement of UTVs during the transportation of workpieces and component parts. This is achieved by adapting the molecular dynamics method, where each vehicle is considered a "quasi-molecule" interacting with other vehicles and environmental elements of the smart workshop through attractive and repulsive potentials. A genetic algorithm is applied to optimize the time required for processing a batch of products, generating quasi-optimal sequences for selecting workpieces and components. Simulations conducted in the Unity environment confirmed the effectiveness of the approach: the deviation from the reference time and energy indicators was less than 5%, and collisions were completely absent during testing.

Keywords: smart workshop, digital twins, unmanned transport vehicles (UTVs), self-organization, molecular dynamics method, genetic algorithm, virtual production space, collision-free motion, Industry 4.0, trajectory planning, quasi-molecule.

REFERENCES

- [1] Kara M. Evaluation of popular planning algorithms // International Journal of Electronics and Telecommunications. — 2024. — P. 13–22.
- [2] AbuJabal N., Baziyad M., Fareh R., Brahmi B., Rabie T., Bettayeb M. A Comprehensive Study of Recent Path-Planning Techniques in Dynamic Environments for Autonomous Robots // Sensors — 2024. — no. 24.
- [3] Tang Z., Ma H. An overview of path planning algorithms // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2024. — № 2
- [4] Wang, H., Pan, W. Research on UAV Path Planning Algorithms. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol 693. — 2021. — P. 012120.
- [5] Debnath, D., Vanegas, F., Sandino, J., Hawary, A. F., & Gonzalez, F. A Review of UAV Path-Planning Algorithms and Obstacle Avoidance Methods for Remote Sensing Applications // Remote Sensing. — 2024. — № 21.
- [6] Liu V. Metody planirovaniia puti v srede s prepiatstviiami // Matematika i matematicheskie modelirovanie. — 2018. — P. 15–58
- [7] Patle B.K., Babu G., Pandey A., Parhi D.R.K., Jagadeesh A. A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot // Defence Technology. — 2019. — P.582-606.
- [8] Diachuk A. K., Belozertseva A.N. Sravnitel'nyi analiz algoritmov postroeniia optimal'nogo marshruta poleta letatel'nogo apparata pri nalichii zon ugroz // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. — 2023. — №5 (131).
- [9] Wayahdi M.R., Ginting S.H.N., Syahputra D. Greedy, A-Star, and Dijkstra's Algorithms in Finding Shortest Path // International Journal of Advances in Data and Information Systems. — 2021. — P. 45–52.
- [10] Bing H., Lai. L. Improvement and Application of Dijkstra Algorithms // Academic Journal of Computing & Information Science. — 2022. — № 5 (5).
- [11] Wang Z., Cai J. Probabilistic roadmap method for path-planning in radioactive environment of nuclear facilities // Progress in Nuclear Energy. — 2018. — P. 113–120.
- [12] Huppi M., Bartolomei L., Mascaro R., Chli M. T-PRM: Temporal Probabilistic Roadmap for Path Planning in Dynamic Environments // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — 2022.
- [13] Jia Z., Lin P., Liu J., Liang L. Online cooperative path planning for multi-quadrotors in an unknown dynamic environment // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. — 2022. — №236 (3).
- [14] Todi V., Sengupta G., Bhattacharya S. Probabilistic Path Planning using Obstacle Trajectory Prediction // CODS-COMAD: Proceedings of the ACM India Joint International Conference on Data Science and Management of Data. — 2019. — P. 36–43.
- [15] Chen J., Yu J. An Improved Path Planning Algorithm for UAV Based on RRT // 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE). — 2021. — P. 859–898.
- [16] Hao G., Lv Q., Huang Z., Zhao H., Chen W. UAV Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method // Aerospace. — 2023. — P. 562.
- [17] Ma' Anif A., Rahmaniar W., Vera M. A., Nuryono A. A., Majdoubi R., Çakan A. Artificial potential field algorithm for obstacle avoidance in UAV quadrotor for environment // IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT). — 2021. — P. 184–189.
- [18] Zhang H., Zhu Y., Liu X., Xu X. Analysis of Obstacle Avoidance Strategy for Dual-Arm Robot Based on Speed Field with Improved Artificial Potential Field Algorithm // Electronics. — 2021. — №10 (15).
- [19] Majeed, A., Hwang, S.O. A Multi-Objective Coverage Path Planning Algorithm for UAVs to Cover Spatially Distributed Regions in Urban Environments // Aerospace. — 2021. — №8 (343).
- [20] Pehlivanoglu V.Y., Pehlivanoglu P. An enhanced genetic algorithm for path planning of autonomous UAV in target coverage problems // Applied Soft Computing. — 2021. — №107796.
- [21] Shivgan R., Dong Z. Energy-Efficient Drone Coverage Path Planning using Genetic Algorithm // IEEE 21st International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR). — 2020. — P. 1–6.
- [22] Jones J.E. On the determination of molecular fields. I. From the variation of the viscosity of a gas with temperature // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. -1924.- Vol. 106. No. 738. — P. 441–462.
- [23] Grefenstette J.J. Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 2007. — P. 122–128.
- [24] V.I. Protasov. Sistemy kolektivnogo intellekta. — M.: Vuzovskaia kniga, 2024. — P.230
- [25] Potapova Z. E., Protasov V. I., Sharonov A. V. Samoupravlenie v gruppe bespilotnykh letatel'nykh apparatov na osnove metoda molekuliarnoi dinamiki // Informatsionnye sistemy i tekhnologii 2019: sbornik materialov XXV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikheskoi konferentsii. — 2019. — P. 703–708