

Karapeev Alexander Nikolaevich – Mirtek LLC; e-mail: a.karapeev@mirtekgroup.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185564919; Deputy Director.

Kosenko Evgeniy Косенко Yurjevich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: ekosenko@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Medvedev Mikhail Yurjevich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: medvmihal@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Pshikhopov Viacheslav Khasanovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: pshichop@rambler.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; dr. of eng. sc.; professor; director.

УДК 007.52

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-175-185

Л.А. Рыбак, Д.И. Малышев, Д.А. Дьяконов, А.А. Мамченкова

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ НАЛИЧИИ СТАЦИОНАРНЫХ И ПОДВИЖНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ

Рассматривается метод планирования траектории движения группы мобильных роботов, обеспечивающий безопасное перемещение и исключающий возможность столкновений как между самими роботами, так и с внешними препятствиями, включая движущиеся объекты. Разработанная математическая модель учитывает три основных сценария возможных столкновений: пересечение траекторий роботов внутри группы, взаимодействие со стационарными препятствиями и вероятность столкновения с подвижными объектами. Каждый из этих сценариев детально анализируется для обеспечения максимальной безопасности движения, а их учет позволяет эффективно адаптировать маршруты роботов к изменяющимся условиям среды. Траектория движения каждого робота представляется в виде ломаной линии с промежуточными точками, которые оптимизируются для обеспечения безопасности движения. Особое внимание уделяется адаптации скорости на различных участках траектории: робот может изменять скорость в зависимости от текущих условий, чтобы минимизировать риск столкновений. Для оценки расстояний между объектами используется евклидова норма, позволяющая рассчитывать минимальные расстояния между центрами сферических представлений роботов и препятствий. Задача решается в два этапа. На первом этапе строится траектория для первого робота с учетом начальных условий и расположения препятствий. На втором этапе формируются траектории для остальных роботов с учетом уже спланированных маршрутов. Для оптимизации координат промежуточных точек и скоростей применяется генетический алгоритм, который минимизирует время перемещения и обеспечивает безопасность движения. Генетический алгоритм использует операторы скрещивания и мутации для создания разнообразных решений, а также выполняет проверку на соответствие условиям безопасности. Численное моделирование проведено на языке Python с использованием библиотеки Matplotlib для визуализации результатов. В ходе экспериментов было выполнено 50 тестов с различным количеством препятствий (от 5 до 10). Анализ результатов показал, что с увеличением числа препятствий возрастает как время расчета, так и качество сформированных траекторий. Это подтверждает эффективность предложенного метода для управления группами мобильных роботов в динамически меняющейся среде.

Группа роботов; мобильный робот; планирование траектории; препятствие; генетический алгоритм; модель.

L.A. Rybak, D.I. Malyshev, D.A. Dyakonov, A.A. Mamchenkova

A GENETIC ALGORITHM FOR PLANNING THE TRAJECTORY OF A GROUP OF MOBILE ROBOTS IN THE PRESENCE OF STATIONARY AND MOBILE OBSTACLES

The article discusses a trajectory planning method for a group of mobile robots that ensures safe movement and eliminates the possibility of collisions both between the robots themselves and with external obstacles, including moving objects. The developed mathematical model considers three main collision scenarios: intersection of robot trajectories within the group, interaction with stationary obstacles, and

the probability of collision with moving objects. Each of these scenarios is analyzed in detail to ensure maximum safety during movement, and their consideration allows for efficient adaptation of robot routes to changing environmental conditions. The trajectory of each robot is represented as a piecewise linear path with intermediate points, which are optimized to ensure safe movement. Special attention is paid to speed adaptation on different segments of the trajectory: a robot can adjust its speed based on current conditions to minimize the risk of collisions. To evaluate distances between objects, the Euclidean norm is used, allowing for the calculation of minimum distances between the centers of spherical representations of robots and obstacles. The problem is solved in two stages. In the first stage, a trajectory is constructed for the first robot, taking into account initial conditions and obstacle placement. In the second stage, trajectories are formed for the remaining robots, considering the already planned routes. For optimizing the coordinates of intermediate points and speeds, a genetic algorithm is applied, which minimizes travel time while ensuring safe movement. The genetic algorithm uses crossover and mutation operators to generate diverse solutions and performs checks to ensure compliance with safety conditions. Numerical simulations were conducted using Python, with the Matplotlib library used for visualization of results. During the experiments, 50 tests were performed with varying numbers of obstacles (from 5 to 10). Analysis of the results showed that as the number of obstacles increased, both the computation time and the quality of the generated trajectories improved. This confirms the effectiveness of the proposed method for controlling groups of mobile robots in dynamically changing environments.

Group of robots; mobile robot; trajectory planning; obstacle; genetic algorithm; model.

Введение. Формирование траектории для групп мобильных роботов позволяет обеспечить безопасность, эффективность и координацию действий. Корректное формирование траектории исключает возможные столкновения с препятствиями (статическими и подвижными), защищает автономных роботов и продлевая срок службы. В работах [1–5] исследуются подходы к оценке риска столкновений или предлагаются алгоритмы их предотвращения. Координация между роботами включает учет их взаимного расположения и разделение зон ответственности, что исключает столкновения между агентами группы и повышает продуктивность совместной работы. Такой подход гарантирует оптимальное использование энергии и времени, а также обеспечивает плавные движения и адаптивность системы. Подобные решения обсуждаются в статьях [6–9], где рассматриваются, в частности, гибридные методы планирования траектории для группы роботов. В исследованиях [10–16] анализируются методы и алгоритмы управления движением мобильных роботов. В то же время, в работах [17–22] предлагаются улучшенные или инновационные подходы к оптимизации данных процессов, основанные на существующих методологиях.

В статье рассмотрен метод формирования траектории, который использует генетический алгоритм для создания промежуточных точек траектории. Генетический алгоритм генерирует множество возможных решений, оценивает их на предмет безопасности и оптимальности, а затем применяет операторы скрещивания и мутации для улучшения результатов. Это позволяет находить безопасные и эффективные маршруты для каждого робота в группе. Метод обладает высокой степенью масштабируемости и применим в различных сферах: доставка и городская логистика, сельское хозяйство, строительство, экология, обеспечивая надежность и производительность работы роботов.

Математическая модель движения группы роботов. Рассмотрим метод формирования траектории, обеспечивающий исключение как взаимных столкновений между роботами внутри группы, так и их столкновений с внешними препятствиями различной природы. В ходе анализа были выявлены три основных сценария возникновения столкновений. Первый сценарий характеризуется пересечением траекторий перемещения роботов, что становится вероятным вследствие их компактного расположения в пространстве на относительно небольших расстояниях друг от друга. Второй сценарий описывает ситуацию столкновения роботов с фиксированными стационарными препятствиями, присутствующими в рабочей области. Третий сценарий учитывает вероятность столкновения с подвижными объектами, движущимися в той же операционной среде. Указанные сценарии представлены визуально на рис. 1.

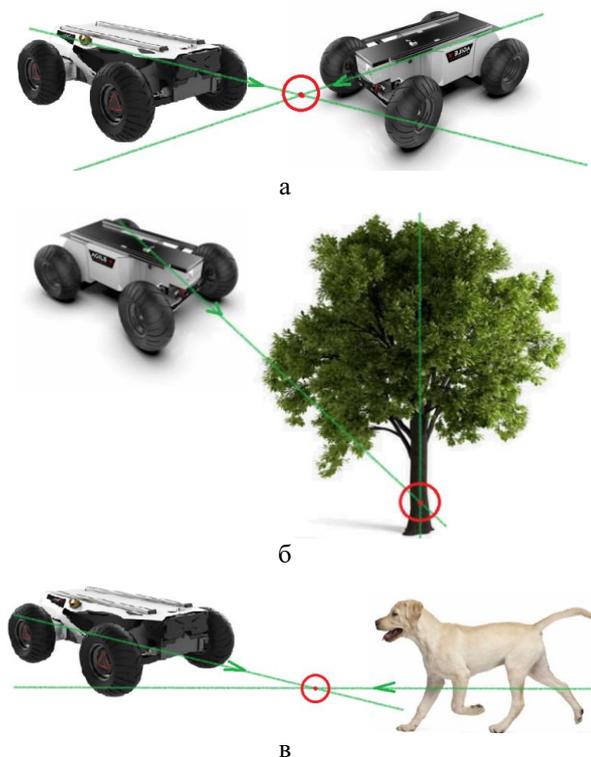


Рис. 1. Визуальные схемы сценариев: а – столкновение роботов в группе, б – столкновение робота со стационарным препятствием, в – столкновение робота с подвижным препятствием

Перемещение группы роботов осуществляется из заданных начальных координат в конечные координаты. При этом траектория движения каждого робота может быть представлена в виде ломаной линии (рис. 2), содержащей определённое количество промежуточных точек. Такая структура траектории используется для обеспечения безопасного перемещения, особенно в условиях наличия движущихся препятствий.

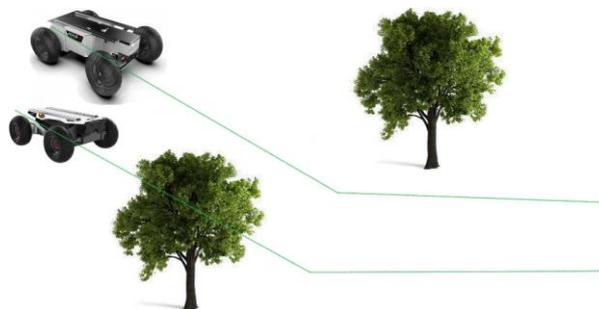


Рис. 2. Пример сформированной траектории

В задаче предполагается, что препятствия движутся с известными скоростями и имеют заранее определённые траектории перемещения. Цель состоит в том, чтобы спроектировать траектории для роботов таким образом, чтобы исключить любые возможные столкновения как с движущимися препятствиями, так и между самими роботами. Для

этого метод учитывает взаимное расположение объектов на протяжении всего процесса перемещения. Для оценки расстояния между роботами и препятствиями используется упрощённая модель, где каждый объект представляется в виде сферы. Центр сферы соответствует текущей позиции объекта, а радиус выбирается таким образом, чтобы гарантировать безопасную дистанцию. Расчёт расстояния выполняется с помощью Евклидовой нормы, которая определяет минимальное расстояние между центрами этих сфер.

При прохождении различных участков своей траектории робот может изменять скорость движения. На некоторых отрезках траектории робот может достигать максимальной скорости, тогда как на других – снижать её для минимизации риска столкновения с препятствиями или другими роботами. Такая адаптация скорости позволяет эффективно использовать доступное время и пространство, одновременно обеспечивая безопасность перемещения.

Расстояние рассматривается как вектор, например, \overline{AB} с начальной $A(x_A, y_A, z_A)$ и конечной $B(x_B, y_B, z_B)$ точками и Евклидова норма будет вычисляться по следующей формуле:

$$d(A, B) = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}. \quad (1)$$

Критерием оценки является время достижения группы роботов конечной точки его траектории, которое вычисляется по следующей формуле:

$$T_{max} = \max_i T^{(i)}, \quad (2)$$

где T_{max} – максимальное значение времени достижения конечной точки траектории роботом (с), i – номер робота в группе, которое $i \in 1, \dots, N_r$, $T^{(i)}$ – время достижения конечной точки каждого робота в группе, которое вычисляется по формуле

$$T^{(i)} = \sum_{j=1}^N t_j^{(i)}, \quad (3)$$

где j – количество временных промежутков, $j \in 1 \dots t_n$, N – количество всех вершин траектории, включая начальную и конечную, $t_j^{(i)}$ – время перемещения робота на каждом отрезке траектории, который вычисляется по следующей формуле:

$$t_j^{(i)} = \frac{d(P_j^{(i)}, P_{j+1}^{(i)})}{v_{r_j}^{(i)}}, \quad (4)$$

где $P_j^{(i)}$ – координаты вершин отрезков траектории, $v_{r_j}^{(i)}$ – скорости робота на каждом отрезке, $d(P_j^{(i)}, P_{j+1}^{(i)})$ – расстояние между вершинами траектории, применяя (1).

Рассчитав все временные промежутки перемещений робота по вершинам траектории, выполняется расчет координат, в которых робот будет находиться в каждый промежуток времени t . Такие координаты вычисляются по формуле (5), но если значение $T^{(i)}$ для i робота является итоговым, но остальные роботы в группе продолжают свое перемещение, то робот будет находиться в конечном положении траектории до достижения времени T_{max} .

$$P^{(i)} = \begin{cases} P_N^{(i)}, & \text{если } T_{max} > T^{(i)} \\ P_j^{(i)} + \frac{(P_{j+1}^{(i)} - P_j^{(i)}) * (t_n - t_j^{(i)})}{(t_{j+1}^{(i)} - t_j^{(i)})}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (5)$$

где $P^{(i)}$ – координаты перемещения робота на отрезках траектории, вычисляемые относительно шага, $P_{j+1}^{(i)}$ – координаты, в которые переместится робот, $P_j^{(i)}$ – координаты, в которых находится робот, $t_{j+1}^{(i)}$, $t_j^{(i)}$ – время, вычисляемое по формуле (3), $P_N^{(i)}$ – конечная вершина траектории АТС, t_n – время перемещения в каждую точку на траектории, относительно шага Δt , которое вычисляется

$$t_n = n * \Delta t \quad (6)$$

где Δt – шаг, с которым робот перемещается по траектории, $n \in 1 \dots t_j^{(i)}$.

Расчет положений препятствий относительно времени перемещения роботов на каждом промежутке времени выполняется по следующей формуле:

$$C^{(s)} = C_1^{(s)} + \vec{v}_s^{(s)} * t_n, \quad (7)$$

где $C^{(s)}$ – новые положения препятствий в промежутки времени перемещений робота, $C_1^{(s)}$ – начальное положение препятствий, $\vec{v}_s^{(s)}$ – скорость препятствий, s – количество препятствий, $s \in 1, \dots, N_s$.

Рассчитав все координаты для перемещения роботов по траекториям с заданным шагом и времени каждого перемещения, а также все положения препятствий, выполняется проверка на наличие столкновения группы роботов между собой или с препятствием.

$$d(P^{(i)}, C^{(i)}) > r_s^{(i)} + r^{(i)}, \quad (8)$$

где $d(P^{(i)}, C^{(i)})$ – расстояние между координатами положений робота $P^{(i)}$ и препятствия $C^{(i)}$, применяя (1), $r_s^{(i)}$ – радиус препятствия, $r^{(i)}$ – радиус робота.

$$d(P^{(i)}, P^{(k)}) > r^{(i)} + r^{(k)}, \quad (9)$$

где $d(P^{(i)}, P^{(k)})$ – расстояние между центрами робота и препятствия, применяя (1), r – радиус робота, k – количество остальных роботов в группе, $k \in 1 \dots N_r$.

Если условия (8) и (9) выполняются, то перемещение робота по траектории выполняется, и такая траектория считается оптимальной, иначе выполняется новое формирование промежуточных точек.

Для второго этапа выполняется вычисление начальных и конечных значений вершин траектории для каждого робота в группе, за исключением первого робота, которые вычисляются

$$P_f^{(m)} = P_f^{(1)} + \begin{cases} C_t - 2, \text{ если } C_t \leq 0 \\ C_t + 2, \text{ иначе} \end{cases}, \quad (10)$$

где C_t – критерий, значение которого случайно выбирается $(-5, 5)$, f – индекс параметра, равный 1 и N , m – количество АТС в группе, за исключением первого.

Диапазон значений промежуточных вершин для траектории и скоростей на отрезках траектории каждого робота в группе вычисляется по следующим формулам:

$$D_p^{(i)} = (P_j^{(i)} - 2 * r + 1, P_j^{(i)} + 2 * r + 1), \quad (11)$$

где $D_p^{(i)}$ – диапазон для формирования промежуточных вершин траекторий АТС на втором этапе.

$$D_v^{(i)} = (v_{r_j}^{(i)} - 1, v_{r_j}^{(i)} + 1), \quad (12)$$

где $D_v^{(i)}$ – диапазон для формирования скоростей АТС на отрезках траекторий второго этапа.

Задача планирования траекторий для группы мобильных роботов решается в два этапа. На первом этапе строится траектория для первого робота. Здесь оптимизируются координаты промежуточных вершин траектории $P_j^{(1)}$ (для $j \in 2, \dots, N - 1$) внутри заданного диапазона D_p , при этом начальная $P_1^{(1)}$ и конечная $P_N^{(1)}$ вершины известны из исходных данных. Также оптимизируются скорости $v_{r_j}^{(1)}$ на каждом из N участков траектории в пределах допустимого диапазона D_v . Целью является минимизация времени достижения конечной точки T_{max} , при этом необходимо учесть ограничения: избежать столкновений с препятствиями, координаты которых $C_1^{(s)}$ генерируются в заданном диапазоне D_C , а их скорости определяются стохастически в диапазоне $D_{\vec{v}}$ (включая возможность нулевой скорости).

На втором этапе последовательно строятся траектории для остальных роботов ($i \in 1, \dots, N_r$). Для каждого робота задача аналогична первой: оптимизируются координаты промежуточных вершин $P_j^{(i)}$ и скорости $v_{r_j}^{(i)}$, минимизируется время T_{max} . Однако

теперь начальные $P_1^{(1)}$ и конечные $P_N^{(1)}$ вершины рассчитываются по уравнениям (10) исходя из траектории первого робота. Ограничения становятся более сложными - нужно не только избегать препятствия, но и учитывать уже спланированные траектории других роботов, чтобы избежать между ними столкновений.

Описание структуры метода. Метод планирования траектории движения группы роботов представлен на рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма, который формирует промежуточные точки для траектории движения робота, представлен на рис. 4. Метод планирования траектории включает два основных этапа:

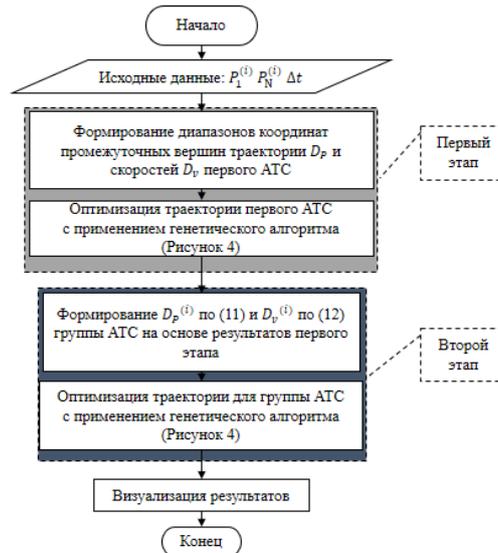


Рис. 3. Блок-схема метода планирования траектории для группы мобильных роботов

На первом этапе выполняется планирование траектории для первого робота в группе. Этот процесс начинается с анализа начальных условий, таких как координаты старта P_1 , цели P_N и расположение препятствий. Для генерации возможных траекторий применяется генетический алгоритм, используя диапазоны промежуточных вершин D_p и скоростей D_v . Сгенерировав промежуточные вершины траектории, выполняется расчет времени перемещения по траектории по формуле (3). Вычислив время перемещения робота по траектории, выполняется расчет точек перемещения робота по траектории с шагом Δt , используя формулу (5). Результатом первого этапа является множество координат перемещения $P^{(i)}$ для первого робота, которые гарантируют его безопасное движение по траектории без столкновений с препятствиями. На втором этапе выполняется планирование траекторий для всех роботов группы. Начальные условия для первого робота остаются прежними, для остальных роботов в группе получаются по формуле (10). Для формирования диапазонов промежуточных вершин используются формулы (11) и (12). Сформировав промежуточные вершины траектории, выполняется расчет максимального времени перемещения по траекториям роботов. Предварительно, вычисляются по (3) время перемещения для каждого робота и оценивается по (2) максимальное время. Вычислив максимальное время перемещения роботов, выполняется расчет точек перемещения каждого робота по траектории с шагом Δt , используя формулу (5). Для первого и второго этапа, используя формулу (7), выполняется вычисление координат перемещения препятствий на основе начальных значений положения препятствия $C_1^{(s)}$, которые формируются в множество. Учитываются взаимные ограничения между роботами, такие как минимальное расстояние между ними и зоны ответственности. Это позволяет минимизировать риск столкновений между роботами и обеспечить эффективную координацию их действий.

Блок-схема генетического алгоритма (рис. 4) демонстрирует процесс формирования траектории и оценку возможных столкновений.

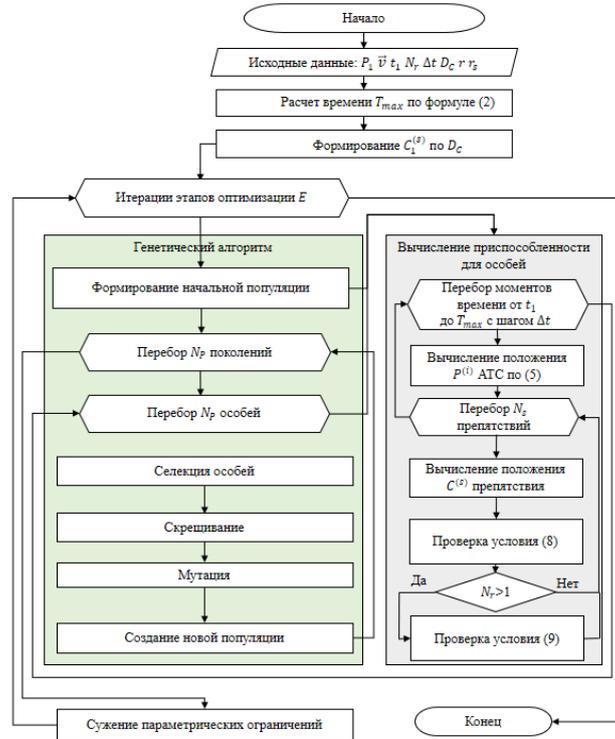


Рис. 4. Блок-схема генетического алгоритма

Генетический алгоритм принимает на вход начальные координаты траектории и диапазоны допустимых скоростей для каждого отрезка пути. Алгоритм начинает работу с создания множества случайных решений (траекторий), каждое из которых представляет собой набор промежуточных точек и скоростей. Каждая траектория оценивается на предмет безопасности, то есть отсутствия столкновений с препятствиями (условие 7), и оптимальности, которая включает минимизацию затрат времени и энергии. Лучшие решения выбираются для дальнейшего использования, после чего применяются операторы скрещивания и мутации: скрещивание комбинирует характеристики двух "родительских" решений, а мутация вносит случайные изменения в параметры траекторий для увеличения разнообразия решений. Шанс мутации особи может случиться с вероятностью M . После прохождения каждой эпохи оптимизации E алгоритм выполняет сужение параметрических ограничений: диапазонов промежуточных вершин D_p и скоростей D_v робота. Процесс повторяется до достижения заданного числа E или выполнения критериев завершения. На основе этих данных алгоритм генерирует множество промежуточных точек, которые проверяются на соответствие условиям безопасности. Выполняется оценка по двум критериям: условие (7) проверяет отсутствие столкновений между роботом и препятствиями, а условие (8) – отсутствие столкновений между роботами при $N_r > 1$. Если условия выполнены, соответствующие координаты сохраняются как лучшие для текущей итерации. В противном случае генетический алгоритм продолжает генерацию новых вариантов траекторий с использованием операторов мутации и скрещивания до тех пор, пока не будут найдены безопасные и оптимальные решения.

После завершения формирования всех траекторий метод переходит к визуализации результатов. Графическое представление включает траектории движения каждого робота, расположение препятствий и динамику изменения скоростей.

Численное моделирование. Метод планирования траектории реализован на языке программирования Python. Для тестирования метода проведены 50 экспериментов и приняты следующие исходные данные: Для первого этапа: координаты начальной точки $P_1 = [0 \text{ м} \ 0 \text{ м} \ 0 \text{ м}]^T$, координаты конечной точки $P_N = [20 \text{ м} \ 20 \text{ м} \ 20 \text{ м}]^T$, количество роботов в группе $N_r = 3$, начальное время $t_1 = 0 \text{ с}$, шаг времени $\Delta t = 1 \text{ с}$, радиус описанной окружности АТС $r = 1 \text{ м}$, диапазон возможных значений координат промежуточных точек (первая часть параметров) $D_p = [0 \text{ м}; 20 \text{ м}]$, диапазон возможных значений скоростей на каждом из отрезков (вторая часть параметров) $D_v = [0 \text{ м/с}; 1 \text{ м/с}]$, вид препятствий – сферы. Параметры препятствий, генерируемые случайно: направление движения, диапазон возможных значений начального положения препятствий по каждой из осей $D_c = [1 \text{ м}; 20 \text{ м}]$, диапазон возможного значения радиуса препятствий $r_s \in [1 \text{ м}; 3 \text{ м}]$, диапазон возможных значений скоростей препятствий $D_{\vec{v}} = [0 \text{ м/с}; 1 \text{ м/с}]$. Для второго этапа: для каждого робота, кроме первого формируются начальные и конечные координаты по формуле (10) относительно координат первого, диапазон возможных значений координат промежуточных точек (первая часть параметров) и диапазон возможных значений скоростей на каждом из отрезков (вторая часть параметров) формируются на основе результатов первого этапа по формулам (11) и (12), случайный параметр $C_t \in [-5 \text{ м}; 5 \text{ м}]$ остальные исходные данные не изменились. Параметры препятствий не меняются. Исходные данные генетического алгоритма были приняты следующие: эпохи оптимизации $E = 10$, количество начальной популяции $N_p = 10$, количество особей $N_c = 30$, процент мутаций $M = 20\%$.

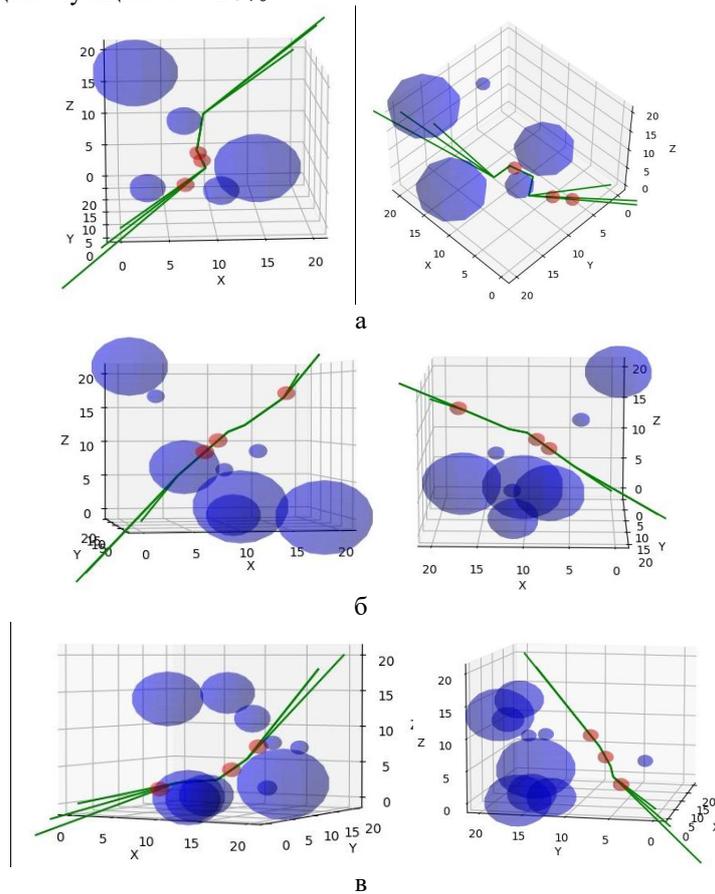


Рис. 5. Результаты визуализации: а – при количестве препятствий 5, б – при количестве препятствий 10, в – при количестве препятствий 15

Визуализация результатов выполнена с использованием библиотеки Matplotlib языка программирования Python. Она позволила создать анимацию перемещения роботов и препятствий, чтобы оценить сформированную траекторию на исключение столкновений.

Исходные данные одинаковые для обоих экспериментов, но результаты различны, так как начальные позиции препятствий, а также роботов в группе, за исключением первого робота, меняются при каждом запуске. Количество препятствий принимались от 5 до 10 с увеличением на 1. В ходе экспериментов оценивались корректность траектории и время вычислений.

Результаты тестирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследования при тестировании метода

Номер эксперимента	Количество препятствий					
	5	6	7	8	9	10
	Время итерации, с					
1	26	29	30	110	60	110
2	25	35	52	55	47	60
3	27	34	48	41	132	67
4	29	30	54	40	42	124
5	35	34	65	86	57	37
Среднее значение	28,4	32,4	49,8	66,4	67,6	79,6

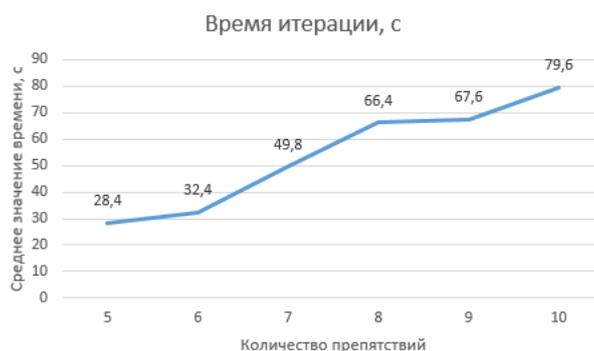


Рис. 6. График среднего значения времени относительно количества препятствий

На рис. 5 представлены несколько результатов экспериментов при указанных количествах препятствий. На рис. 6 показан график возрастания среднего значения времени относительно количества препятствий. Анализируя полученные результаты (рис. 5 и 6), было выявлено, что с увеличением количества препятствий увеличивается значение среднего времени выполнения итерации и, вследствие, качество сформированной траектории.

Заключение. В результате проведенного исследования была разработана и экспериментально подтверждена эффективность метода планирования траекторий движения группы мобильных роботов с использованием генетического алгоритма. Метод обеспечивает безопасное движение роботов, исключая столкновения как между собой, так и с внешними препятствиями, включая движущиеся объекты.

Основные результаты работы: Разработана математическая модель планирования траекторий, учитывающая три основных сценария возможных столкновений: между роботами, со стационарными и подвижными препятствиями. Предложена двухэтапная процедура построения траекторий: Первый этап – построение траектории для первого робота; Второй этап – последовательное построение траекторий для остальных роботов с учетом уже спланированных маршрутов. Реализован генетический алгоритм формирования

промежуточных точек траекторий, обеспечивающий оптимальность и безопасность движения. Проведено численное моделирование на языке программирования Python с использованием библиотеки Matplotlib для визуализации результатов. Экспериментальные исследования показали зависимость времени вычислений от количества препятствий в операционной среде. При увеличении числа препятствий возрастает как время расчета, так и качество сформированных траекторий.

Разработанный метод может быть применен для управления группами мобильных роботов в различных прикладных задачах, где требуется координированное движение нескольких автономных объектов в динамически меняющейся среде.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-02073 <https://rscf.ru/project/24-49-02073/> с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pertzovsky A., Zivan R., Agmon N. Collision Avoiding Max-Sum for Mobile Sensor Teams, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2024, Vol. 79, pp. 1281-1311.
2. Wang S., Hu X., Xiao J., Chen T. Repulsion-Oriented Reciprocal Collision Avoidance for Multiple Mobile Robots, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, Vol. 104 (1).
3. Teng Y., Feng T., Li J., Chen S., Tang X. A Dual-Layer Symmetric Multi-Robot Path Planning System Based on an Improved Neural Network-DWA Algorithm, *Symmetry*, 2025, Vol. 17 (1), pp. 85.
4. Iakovlev D., Tachkov A. Probability of Collision between Autonomous Mobile Robot with an Obstacle, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, Vol. 22 (3), pp. 125-133.
5. Zheng K. Autonomous Obstacle Avoidance and Trajectory Planning for Mobile Robot Based on Dual-Loop Trajectory Tracking Control and Improved Artificial Potential Field Method, *Actuators*, 2024, Vol. 12 (1), pp. 37.
6. AbuJabal N., Rabie T., Baziyad M., Kamel I., Almazrouei K. Path Planning Techniques for Real-Time Multi-Robot Systems: A Systematic Review, *Electronics*, 2024, Vol. 13 (12), pp. 2239.
7. Qiu H., Yu W., Zhang G., Xia X., Yao K. Multi-robot Collaborative 3D Path Planning Based On Game Theory and Particle Swarm Optimization Hybrid Method, *The Journal of Supercomputing*, 2025, Vol. 81 (3).
8. Malyshev D., Cherkasov V., Rybak L., Diveev A. Advances in Optimization and Applications, *OPTIMA 2022. Communications in Computer and Information Science*, 2023, pp. 197.
9. Pisarenko A., Malyshev D., Rybak L., Cherkasov V., Skitova V. Application of evolutionary PSO algorithms to the problem of optimization of 6-6 UPU mobility platform geometric parameters, *Procedia Computer Science*, 2022, Vol. 213 (4), pp. 643-650.
10. Ren Y., Friderikos V. Path Planning Optimization Based Interference Awareness for Mobile Robots in mmWave Multi Cell Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, Vol. PP (99), pp. 1-12.
11. Sahoo S. K., Choudhury B. A review of methodologies for path planning and optimization of mobile robots, *Journal of Process Management and New Technologies*, 2023, Vol. 11 (1-2), pp. 34-52.
12. Nasti S., Najar Z., Chishti M.A. A Comprehensive Review of Path Planning Techniques for Mobile Robot Navigation in Known and Unknown Environments, *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 2024, Vol. 11 (1).
13. Yang L., Li P., Qian S. [et al.]. Path Planning Technique for Mobile Robots: A Review, *Machines*, 2023, Vol. 11 (10), pp. 980.
14. Chen J. Algorithmic Implementation and Optimisation of Path Planning, *Applied and Computational Engineering*, 2024, Vol. 33 (1), pp. 176-184.
15. Khan N., Butt Y., Bhatti A. Constraint-Oriented Formation Control of Multi-Robot System in Leaderless Consensus under Confined Conditions, *Systems Science & Control Engineering*, 2024, Vol. 12 (1).
16. Hamdan N., Medvedev M., Pshikhopov V. Method of motion path planning based on a deep neural network with vector input, *Mechatronics, Automation, Control*, 2024, Vol. 25 (11), pp. 559-567.
17. Diveev A., Sofronova E., Konyrbaev N., Ibadulla S. System Synthesis for Motion along the Trajectory by Evolutionary Machine Learning Control, *Engineered Science*, 2024, Vol. 29, pp. 1130.
18. Diveev A., Sofronova E., Konyrbaev N., Abdullayev O. Advanced Model with a Trajectory Tracking Stabilisation System and Feasible Solution of the Optimal Control Problem, *Mathematics*, 2024, Vol. 25 (11), pp. 3193.
19. Lv Y. Research on Path Planning of Mobile Robots Based on A* and B* Algorithms, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2024, Vol. 120, pp. 392-397.

20. Luo D., Huang X., Huang Y., Miao M., Gao X. Optimal Trajectory Planning for Wheeled Robots (OTPW): A Globally and Dynamically Optimal Trajectory Planning Method for Wheeled Mobile Robots, *Machines*, 2024, Vol. 12 (10), pp. 668.
21. Han J., Ma C., Zou D. [et al.]. Distributed Multi-Robot SLAM Algorithm with Lightweight Communication and Optimization, *Electronics*, 2024, Vol. 13 (20), pp. 4129.
22. Zhang X., Zheng H. Research On Trajectory Planning Methods of Mobile Robots Based on SLAM Technology, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2024, Vol. 111, pp. 116-125.

Рыбак Лариса Александровна – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, e-mail: rlbgtu@gmail.com; г. Белгород, Россия; тел. +74722230530; д.т.н.; профессор, директор НИИ Робототехники и систем управления.

Мальшев Дмитрий Иванович – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; г. Белгород, Россия; тел. +79507134397; м.н.с.

Дьяконов Дмитрий Алексеевич – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: furno.xl@yandex.ru; г. Белгород, Россия; тел. +79606958167; инженер–исследователь.

Мамченкова Анастасия Александровна – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: mamchenkova03@yandex.ru; г. Белгород, Россия; тел. +79192282256; м.н.с.

Rybak Larisa Alexandrovna – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: rlbgtu@gmail.com; Belgorod, Russia; phone: +74722230530; dr. of eng. sc.; professor, director of Research Institute of Robotics and Control Systems.

Malyshev Dmitry Ivanovich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; Belgorod, Russia; phone: +79507134397; junior researcher.

Dyakonov Dmitry Alekseevich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: furno.xl@yandex.ru; Belgorod, Russia; phone: +79606958167; research engineer.

Mamchenkova Anastasia Aleksandrovna – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: mamchenkova03@yandex.ru; Belgorod, Russia; phone: +79192282256; junior researcher.

УДК 519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-185-193

А.Ю. Тамм, Е.А. Барымова, М.И. Кузьмин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПАЙКОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РТК

Одной из ключевых параметров любой современной механической системы является её вибрационные и акустические характеристики, оказывающие прямое воздействие на окружающую среду и человека в процессе работы. В связи с этим, актуальной остается задача диагностики вибрационных характеристик различных сложных по структуре механических объектов, к которым можно отнести промышленные робототехнические комплексы. В силу затрудненности возможности проведения диагностирования и экспериментальной отладки новых разрабатываемых механизмов, интересным является вопрос применения современных подходов к решению задачи диагностики, в частности, с применением нейронных сетей и численных методов. Целью данной работы стало исследование возможности совместного применения спайковой нейронной сети и метода конечных элементов для оценки вибрационных характеристик на примере подшипника волнового редуктора. В работе подробно описан алгоритм проведения диагностики, включающий в себя этапы разработки как конечно-элементной модели исследуемой механической системы, так и разработки архитектуры нейронной сети. При этом генерация обучающего и контрольного наборов данных для нейронной сети проводится на упрощенной конечно-элементной модели, имеющей характеристики, аналогичные детализированной, что обеспечивается совпадением первых десяти собственных форм сборки. Наборы данных сформированы на основе расчетов численными методами с применением явной схемы