

УДК 004.021:519.713

А.Н. Горитов, К.В. Гончаров

Построение плана траектории перемещения манипуляционного робота на основе модифицированного метода муравьиных колоний

Манипуляционные роботы широко применяются в автоматизации многих операций в промышленности. Перед выполнением манипуляционным роботом запланированных операций необходимо построить план траектории перемещения робота из начального состояния в целевое. Задача планирования траектории перемещения осложняется наличием в рабочей зоне робота препятствий, столкновения с которыми требуется избегать. Существует множество методов планирования траектории перемещения как в среде без препятствий, так и в среде с препятствиями. Особый интерес представляет группа методов планирования, основанных на применении эвристических алгоритмов.

Проводится исследование возможности модификации метода планирования перемещения на основе алгоритма муравьиных колоний. Предлагается модификация исходного метода с применением метода вероятностных маршрутных карт (PRM). Анализируются результаты работы модифицированного алгоритма при различных значениях параметров алгоритма. На основании результатов анализа приводятся рекомендации по подбору оптимальных значений параметров.

Ключевые слова: манипуляционный робот, траектория, планирование траектории, препятствия, алгоритм муравьиных колоний, PRM.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-1-98-106

Автоматизация выполнения многих операций в промышленности основана на использовании многозвенных промышленных роботов [1]. Под многозвенным промышленным роботом понимается манипуляционный робот (МР), состоящий из n звеньев [2]. Пространство, в котором может находиться рабочий орган МР во время функционирования, называется рабочей зоной (РЗ) [3].

Рабочая зона МР может быть как свободной от посторонних объектов, ограничивающих перемещения МР, так и содержать объекты, ограничивающие рабочую зону МР. При функционировании МР должен избегать столкновений с такими объектами. Объекты, с которыми необходимо избегать столкновений, будем называть препятствиями.

Для выполнения МР запланированной операции необходимо построить законы управления приводами МР. Основой для построения законов управления МР является план траектории перемещения исполнительного звена МР из начального положения в целевое.

Для построения движения в среде без препятствий достаточно учитывать две группы условий. Первая группа условия вытекает из заданного движения захвата, а вторая группа условий обусловлена критериями оптимального движения. Кинематические узлы должны обеспечить необходимые перемещения звеньев с тем, чтобы исполнительное звено МР перемещалось в соответствии с заданной траекторией. Движение в кинематических узлах при этом должно выполняться в пределах допустимых границ перемещения.

При построении движения в среде с препятствиями группа условия дополняется условиями, связанными с геометрическими характеристиками препятствий внешней среды МР. Эта группа условий

связана с обеспечением построения плана траектории перемещения исполнительного звена МР, не допускающего соударения звеньев робота между собой и столкновения с объектами внешней среды.

Для решения задачи построения плана траектории при наличии препятствий используются различные подходы. Так, ряд методов построен на основе клеточной декомпозиции рабочей зоны МР. Вся рабочая зона разбивается на клетки. Для каждой клетки делают отметку – свободна она или занята. При построении плана траектории анализируются смежные свободные ячейки. Также необходимо контролировать, чтобы все звенья МР находились в свободных ячейках [4, 5].

Большое семейство методов построения плана траектории основано на методе потенциальных полей. В этом методе каждому препятствию приписывается отталкивающая потенциальная функция. Построение плана траектории ведется по точкам с минимальными значениями потенциалов векторного поля [6].

Ряд методов построения плана траектории основываются на применении методов теории графов, а именно, поиск в глубину и поиск в ширину. Как правило, эти алгоритмы предполагают в процессе построения плана траектории выполнить полный обход вершин графа [7].

Для сокращения количества анализируемых вершин используются различные эвристические правила. Так, для построения плана траектории используется алгоритм A^* [8]. В этом случае эвристические правила позволяют сократить число анализируемых вершин в процессе построения плана перемещения исполнительного звена МР [9].

Предлагаются иные подходы к построению плана траектории перемещения исполнительного звена МР в среде с препятствиями [10–12].

Актуальным направлением является построение плана траектории в среде с отсутствием полной информации о положении и габаритах препятствий во внешней среде [13–18].

В работе [19] рассматривалась возможность использования алгоритма муравьиных колоний для построения плана траектории МР. Исследование предложенного метода для построения плана траектории позволило выделить его недостатки. С целью устранения недостатков рассмотренного метода в данной работе предлагается модификация исходного метода построения плана траектории перемещения исполнительного звена МР.

Постановка задачи

Пусть МР функционирует в трехмерном пространстве \mathbf{W} . Структурная схема МР – это последовательность n жестких шарнирно-связных звеньев, соединенных между собой вращательными и поступательными кинематическими парами пятого порядка [20]. С каждой кинематической парой связана обобщенная переменная \mathbf{q}_i ($i = 1, \dots, n$), определяющая относительное положение звеньев кинематической пары. Множество всех возможных значений векторов обобщенных переменных или конфигураций \mathbf{q} называется конфигурационным пространством \mathbf{C} . Основание МР неподвижно. В этом случае решение прямой задачи о положениях позволяет определить декартовы координаты звеньев и исполнительного звена МР [21].

Среда, в которой предстоит выполнить построение плана траектории, содержит множество объектов произвольной формы и габаритов, которые ограничивают возможности перемещения МР. Множество геометрических мест точек этих объектов обозначим $\mathbf{O} \subset \mathbf{W}$. Габариты и положение этих объектов известны заранее.

Множество геометрических мест точек, принадлежащих звеньям робота, определяется как отображение конфигурационного пространства в булеан множества точек трехмерного пространства: $\mathbf{A}: \mathbf{C} \rightarrow P(\mathbf{W})$. Таким образом, множество геометрических мест точек робота в некоторой конфигурации \mathbf{q} обозначается $\mathbf{A}(\mathbf{q})$.

Подмножество конфигурационного пространства, для каждой конфигурации \mathbf{q}' из которого пересечение множества \mathbf{O} и множества $\mathbf{A}(\mathbf{q}')$ непусто, назовем множеством запрещенных конфигураций и обозначим \mathbf{C}_{obs} . Для конфигураций из множества запрещенных конфигураций имеет место столкновение звеньев робота с объектами внешней среды. Множество разрешенных конфигураций \mathbf{C}_{free} определяется как дополнение \mathbf{C}_{obs} до \mathbf{C} .

Таким образом, для стационарно размещенного МР необходимо построить план траектории перемещения исполнительного звена МР из начального положения, определяемого конфигурацией \mathbf{q}_{init} , в целевое, определяемое конфигурацией \mathbf{q}_{goal} , так,

чтобы в процессе перемещения избежать столкновений звеньев МР с объектами внешней среды [21]. Задача построения плана траектории сводится к построению пути $\mathbf{T}: [0,1] \rightarrow \mathbf{C}_{\text{free}}$ такого, что $\mathbf{T}(0) = \mathbf{q}_{\text{init}}$ и $\mathbf{T}(1) = \mathbf{q}_{\text{goal}}$.

Если целевое положение определяется не конфигурацией, а целевым положением исполнительного звена МР, следует сначала определить соответствующую целевую конфигурацию, решив обратную задачу о положениях.

Решение

Предлагаемый метод планирования перемещения основан на применении алгоритма муравьиных колоний [22] и метода вероятностных маршрутных карт [23]. Идея предлагаемого метода заключается в построении графа на множестве векторов обобщенных переменных с помощью метода вероятностных маршрутных карт и последующем решении задачи о поиске кратчайшего пути между парой вершин в построенном графе с помощью алгоритма муравьиных колоний.

Алгоритм муравьиных колоний в общем виде [22, 24] можно представить в виде блок-схемы (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема алгоритма муравьиных колоний

Основными этапами алгоритма муравьиных колоний являются этапы построения решения, обновления уровня феромона и выполнения дополнительных действий. Этапы алгоритма выполняются в цикле, пока не будут выполнены условия выхода из цикла. Каждый из основных этапов будет рассмотрен далее более подробно.

На этапе построения решений каждым муравьём выполняется построение решения задачи поиска кратчайшего пути между парой вершин. В процессе

построения решения муравей перемещается из одной вершины в другую. Процесс построения решения завершается, когда муравей перемещается в конечную вершину. Вероятность перехода k -го муравья из вершины i в смежную с ней вершину j определяется по вероятностно-пропорциональному правилу

$$P_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [d_{ij}]^{-\beta}}{\sum_{l \in \mathbf{J}_{ik}} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [d_{il}]^{-\beta}}, & \text{если } j \in \mathbf{J}_{ik}, \\ 0, & \text{если } j \notin \mathbf{J}_{ik}, \end{cases} \quad (1)$$

где α и β – регулирующие параметры; $\tau_{ij}(t)$ – количество феромона на ребре (i, j) на итерации t ; d_{ij} – вес ребра (i, j) ; \mathbf{J}_{ik} – множество вершин, смежных с i , не посещённых k -м муравьём на итерации t . Параметр α регулирует влияние следа феромона, а параметр β – влияние веса ребра на выбор ребра для перехода. Этап генерации решений завершается, когда каждый муравей построил решение.

Обновление уровня феромона выполняется в два этапа. Сначала происходит испарение феромона, т.е. уменьшение уровня феромона на каждом ребре пропорционально количеству имеющегося на ребре феромона:

$$\tau'_{ij}(t) = (1-\rho)\tau_{ij}(t), \quad (2)$$

где ρ – коэффициент испарения. Затем каждый муравей увеличивает количество феромона на рёбрах, входящих в построенное этим муравьём решение:

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau'_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ijk}(t), \quad (3)$$

где $\Delta\tau_{ijk}(t)$ – количество феромона, размещаемого на ребре (i, j) k -м муравьём на итерации t , определяемое следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta\tau_{ijk}(t) = [L_k(t)]^{-1}, & \text{если } (i, j) \in \mathbf{T}_k(t), \\ \Delta\tau_{ijk}(t) = 0, & \text{если } (i, j) \notin \mathbf{T}_k(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $\mathbf{T}_k(t)$ – путь, построенный k -м муравьём на итерации t , $L_k(t)$ – длина этого пути.

Этап выполнения дополнительных действий включает в себя применение специфичных для задачи действий, которые не могут быть выполнены отдельными муравьями. К таким действиям может относиться, например, применение алгоритмов локального поиска для улучшения результатов построения решений муравьями.

Для повышения эффективности алгоритма была рассмотрена его модификация, известная под названием «алгоритм элитных муравьёв» [25]. Идея алгоритма элитных муравьёв заключается в дополнительном увеличении уровня феромона на рёбрах кратчайшего построенного за время работы алгоритма пути на этапе обновления феромона. Количество

феромона, добавляемое на рёбрах кратчайшего пути, определяется следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta\tau_{ij}^{bs}(t) = e \cdot [L_{bs}(t)]^{-1}, & \text{если } (i, j) \in \mathbf{T}_{bs}(t), \\ \Delta\tau_{ij}^{bs}(t) = 0, & \text{если } (i, j) \notin \mathbf{T}_{bs}(t), \end{cases} \quad (5)$$

где $\Delta\tau_{ij}^{bs}(t)$ – добавляемое количество феромона; e – параметр, регулирующий количество добавляемого феромона; $\mathbf{T}_{bs}(t)$ – кратчайший из всех построенных за t итераций путь; $L_{bs}(t)$ – длина пути $\mathbf{T}_{bs}(t)$. Результаты численных экспериментов в работе [19] показали превосходство модификации над базовой версией алгоритма, поэтому в предлагаемом методе планирования будет использоваться «алгоритм элитных муравьёв».

Для применения алгоритма муравьиных колоний к решению задачи планирования необходимо представить задачу планирования перемещения в виде задачи поиска кратчайшего пути в графе между парой вершин. При решении задачи поиска кратчайшего пути в графе между парой вершин x и y минимизируется следующая целевая функция:

$$D(x, y) = \min_{\mathbf{p} \in \mathbf{P}(x, y)} \{ \sum_{\mathbf{e} \in \mathbf{p}} f(\mathbf{e}) \}, \quad (6)$$

где $\mathbf{P}(x, y)$ – множество всех путей из x в y ; $f: \mathbf{E} \rightarrow \mathbf{R}$ – весовая функция, задающая веса рёбер графа.

Предложенный ранее метод адаптации алгоритма муравьиных колоний к задаче планирования перемещения обладает недостатками, негативно сказывающимися на производительности метода [19]. К таким недостаткам относится необходимость решения обратной кинематической задачи и определения наличия столкновений при расчёте вероятности выбора ребра. С целью избавления от недостатков предлагается использовать метод вероятностных маршрутных карт для построения графа.

Метод вероятностных маршрутных карт выполняет построение графа, вершинами которого являются векторы обобщённых координат. Наличие ребра между парой векторов (\mathbf{i}, \mathbf{j}) в таком графе означает наличие бесконфликтного пути из начального состояния, определяемого вектором \mathbf{i} , в конечное, определяемое вектором \mathbf{j} . Такой граф называется маршрутной картой.

Алгоритм построения маршрутной карты представлен на рис. 2.

Формирование множества вершин маршрутной карты осуществляется путём генерации векторов обобщённых координат случайным образом и проверки сгенерированных векторов на принадлежность множеству разрешённых векторов. Множество разрешённых векторов \mathbf{C}_{free} содержит те векторы, при которых отсутствуют столкновения звеньев робота с объектами внешней среды или другими звеньями. Для проверки вектора на принадлежность \mathbf{C}_{free} применяются алгоритмы проверки наличия

столкновений. Если сгенерированный вектор принадлежит множеству разрешённых векторов, то он добавляется в маршрутную карту. Этап формирования множества вершин завершается, когда множество вершин содержит заданное количество вершин.

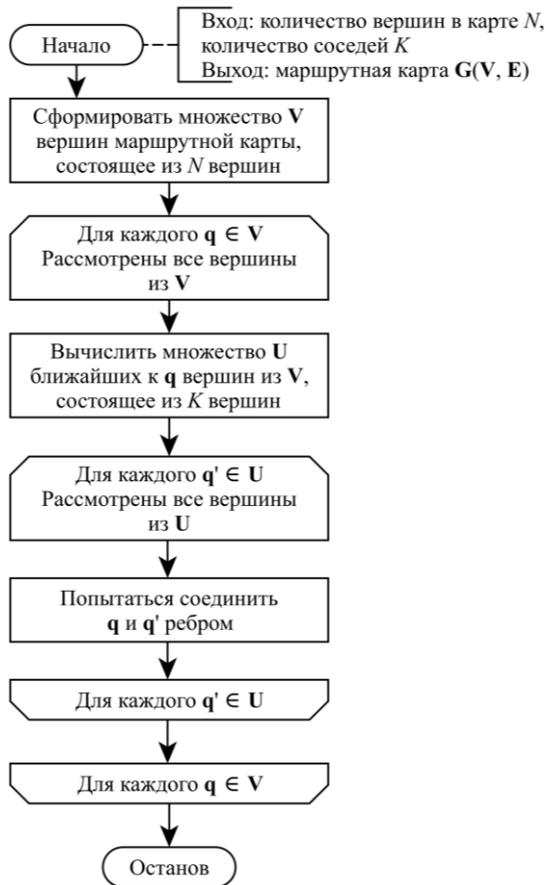


Рис. 2. Блок-схема алгоритма построения маршрутной карты

Вычисление множества ближайших вершин осуществляется на основе заданной метрики, или функции расстояния. Выбираемая функция расстояния $\rho: C_{\text{free}}^2 \rightarrow \mathbf{R}$ должна обладать свойствами рефлексивности ($\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{y}$), симметричности ($\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \rho(\mathbf{y}, \mathbf{x})$) и неравенства треугольника ($\forall \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in C_{\text{free}} \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \rho(\mathbf{y}, \mathbf{z}) \geq \rho(\mathbf{x}, \mathbf{z})$). В качестве примера функции расстояния, обладающей данными свойствами, можно привести хорошо известную евклидову метрику

$$L_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^2}. \quad (7)$$

Соединение вершин рёбрами осуществляется с помощью локального планировщика – процедуры, определяющей наличие бесконфликтного пути между парой векторов обобщённых координат. Наиболее простой способ определения наличия бесконфликтного пути заключается в соединении векторов отрезком, разделении соединяющего отрезка промежуточными векторами и проверке промежуточных векторов на принадлежность к разрешённым. Большое значение имеет выбор шага, с которым происходит

разделение соединяющего отрезка. Если значение шага слишком мало, на проверку промежуточных конфигураций уходит значительное количество времени; если значение шага слишком велико, возможны ситуации, когда вершины соединяются рёбрами, хотя бесконфликтного пути между ними не существует.

Применение метода вероятностных маршрутных карт вместе с алгоритмом муравьиных колоний позволяет реализовать механизм исключения вершин. Данный механизм заключается в исключении из маршрутной карты рёбер, количество феромона на которых меньше некоторого заданного минимального количества феромона, последующим исключением изолированных вершин и добавлением в маршрутную карту новых вершин. В виде алгоритма механизм исключения вершин представляется так, как показано на рис. 3.

Данный механизм может быть реализован как дополнительное действие для алгоритма муравьиных колоний (см. рис. 1). Применение механизма исключения вершин позволяет извлекать редко используемые муравьями вершины и рёбра.

Результаты численных экспериментов

Входными параметрами алгоритма муравьиных колоний являются регулятор влияния феромона на выбор ребра α , регулятор влияния веса ребра на выбор ребра β , начальное количество феромона на рёбрах ϕ , коэффициент скорости испарения феромона ρ , количество муравьёв m , количество итераций i , количество добавляемого элитными муравьями феромона e . Входными параметрами для метода вероятностных маршрутных карт являются количество вершин N и количество вершин во множестве ближайших вершин K . Таким образом, входными параметрами для метода планирования будут входные параметры алгоритма муравьиных колоний в совокупности с входными параметрами для метода вероятностных маршрутных карт, а также параметр, регулирующий нижнюю границу количества феромона для механизма исключения вершин p .

Исследование предложенного метода проводилось при следующих параметрах моделей робота и объектов внешней среды. Параметры объектов внешней среды: нижняя плоскость – нормаль $\mathbf{n}_b = (0; 0; 1)$, точка плоскости $\mathbf{m}_b = (0; 0; 0)$; задняя плоскость – нормаль $\mathbf{n}_r = (1; 0; 0)$, точка плоскости $\mathbf{m}_r = (-3; 0; 0)$; нижний прямоугольный параллелепипед – центральная точка $\mathbf{c}_b = (0, 75; 0; 0, 4)$, размеры $\mathbf{l}_b = (0, 5; 2, 5; 0, 8)$; левый прямоугольный параллелепипед – центральная точка $\mathbf{c}_l = (0; 1, 75; 1)$, размеры $\mathbf{l}_l = (1; 1; 2)$; правый прямоугольный параллелепипед – центральная точка $\mathbf{c}_r = (0; -1, 75; 1)$, размеры $\mathbf{l}_r = (1; 1; 2)$; верхний прямоугольный параллелепипед – центральная точка $\mathbf{c}_u = (0; 0; 2, 1)$, размеры $\mathbf{l}_u = (0, 5; 4, 5; 0, 2)$; исходный прямоугольный параллелепипед – центральная точка $\mathbf{c}_s = (-1, 2; 2; 0, 125)$,

размеры $\mathbf{I}_s = (1; 1; 0,5)$; целевой прямоугольный параллелепипед – центральная точка $\mathbf{c}_d = (1, 2; 2; 0,125)$, размеры $\mathbf{I}_d = (1; 1; 0,5)$. Параметры робота: положение основания относительно начала координат $\mathbf{b} = (-0,15; 0; 0)$; звено основания – цилиндр, высота цилиндра $h = 0,6$, радиус основания цилиндра $r = 0,2$; первое звено – параллелепипед, размеры $\mathbf{I}_1 = (0, 1; 0, 1; 1)$; второе звено – параллелепипед, размеры $\mathbf{I}_2 = (0, 1; 0, 1; 1)$; третье звено – параллелепипед, размеры $\mathbf{I}_3 = (0, 1; 0, 1; 1)$; исполнительное звено – шар, радиус шара $r = 0,071$; сочленение между фиктивным звеном и основанием: тип – вращательное, границы изменения обобщённой координаты

$\theta_0 \in [0; 2\pi]$; сочленение между основанием и первым звеном: тип – вращательное, границы изменения обобщённой координаты $\theta_1 \in [-0,5\pi; 0,5\pi]$; сочленение между первым звеном и вторым звеном: тип – вращательное, границы изменения обобщённой координаты $\theta_2 \in [-0, 1; \pi]$; сочленение между вторым и третьим звеном: тип – вращательное, границы изменения обобщённой координаты $\theta_3 \in [-0, 1; \pi]$; вектор обобщённых координат, соответствующий начальному положению робота, $\mathbf{q}_0 = (3, 62; 0, 85; 0, 618; 1, 086)$; положение целевой точки, в которую должен быть перемещён рабочий орган манипулятора, $\mathbf{g} = (1, 2; 2; 0, 5)$.

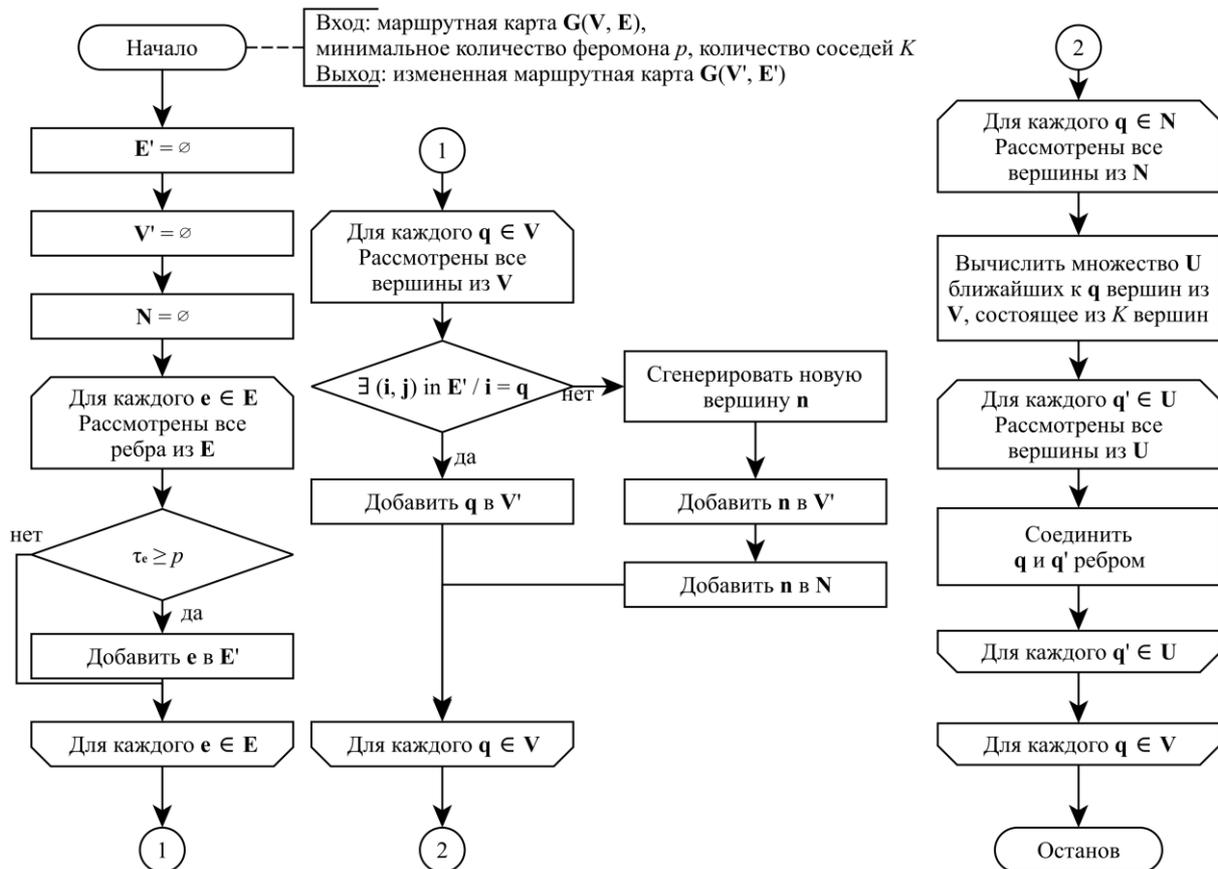


Рис. 3. Блок-схема алгоритма механизма исключения вершин

С целью определения влияния изменения различных параметров метода на результат работы алгоритма испытания проводились при изменении исследуемого параметра при неизменных значениях прочих параметров. Значения неизменяемых параметров равны значениям параметров из базового набора. Значения параметров из базового набора следующие: $\alpha_0 = 1, \beta_0 = 1, \phi_0 = 10^{-6}, \rho_0 = 0,25, m_0 = 64, i_0 = 2500, e_0 = m_0, N_0 = 10^4, K_0 = 15, p_0 = 10^{-9}$.

При исследовании влияния значений параметров на результаты поиска изменению значений подвергались следующие параметры.

1. Количество вершин в маршрутной карте.
2. Значение регулятора влияния веса ребра на выбор муравьём вершины для перехода.
3. Количество муравьёв.
4. Количество соседей вершины в маршрутной карте.
5. Нижняя граница значения феромона на ребре, при котором происходит извлечение ребра из маршрутной карты.

Количество вершин в маршрутной карте

При увеличении параметра количества вершин в маршрутной карте увеличивается вероятность нахождения существующего пути, однако при этом

увеличивается время построения маршрутной карты. Численные эксперименты проводились при значениях параметра $N \in \{10^3; 10^4; 10^5\}$.

Увеличение параметра количества вершин приводит к увеличению минимальной длины пути (рис. 4).

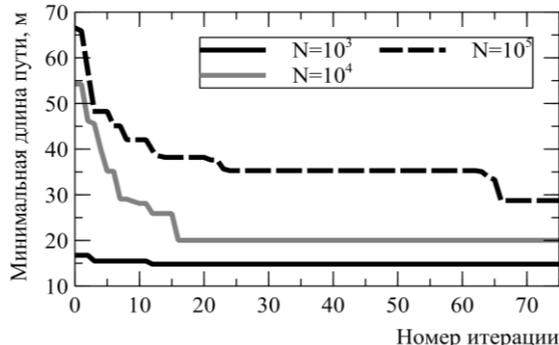


Рис. 4. Зависимость минимальной длины пути от номера итерации при разных значениях количества вершин

Предполагается, что причиной этому является недостаточно полное исследование маршрутной карты вследствие малого количества муравьёв.

Регулятор влияния веса ребра

Изменение значения параметра, регулирующего влияние веса ребра на выбор ребра для перехода, может оказать существенное влияние на результат работы алгоритма, так как ребра теперь имеют различный вес. Численные эксперименты проводились при значении параметра, устанавливающего влияние веса ребра ($\beta = 1$), и при значении параметра, исключающего влияние веса ребра ($\beta = 0$).

Результаты численных экспериментов при заданных значениях параметра регулятора влияния веса ребра на выбор муравьём ребра для перехода в следующую вершину представлены в виде графика на рис. 5.

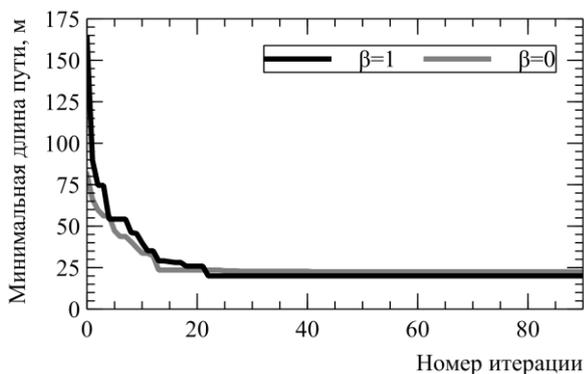


Рис. 5. Зависимость минимальной длины пути от номера итерации при разных значениях параметра β

Следует отметить, что разница в значениях минимальной длины пути достаточно мала, чтобы сделать вывод об отсутствии влияния параметра на минимальную длину пути.

Количество муравьёв

Увеличение количества муравьёв предположительно приводит к более полному исследованию

графа и как следствие к нахождению пути меньшей длины, однако при этом увеличивается время работы алгоритма. Рассматривались результаты численных экспериментов при значениях параметра, регулирующего количество муравьёв, $m \in \{64; 128; 256; 512; 1024\}$.

Результаты численных экспериментов подтверждают обратную зависимость длины пути, найденного в результате работы алгоритма, от количества муравьёв (рис. 6).

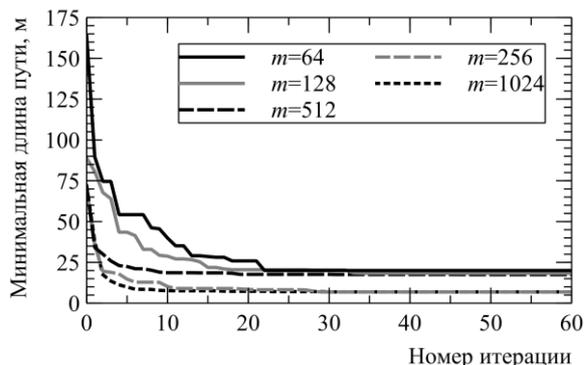


Рис. 6. Зависимость минимальной длины пути от номера итерации при разных значениях количества муравьёв

Полученные результаты подтверждают предположение о влиянии количества муравьёв на минимальную длину получаемых путей.

Количество соседей вершины в маршрутной карте

Увеличение количества рассматриваемых для соединения ребром соседей вершины в маршрутной карте увеличивает количество возможных путей в графе, что приводит к появлению путей меньшей длины. Численные эксперименты проводились при значениях параметра $K \in \{10; 25; 50; 100; 250\}$ и при значении параметра $m = 1024$.

Результаты вычислительных экспериментов при заданных значениях параметра количества соседей вершины в маршрутной карте представлены на рис. 7.

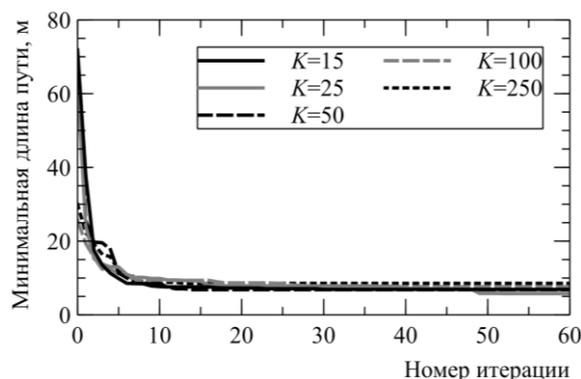


Рис. 7. Зависимость минимальной длины пути от номера итерации при разных значениях количества рассматриваемых соседей вершины в маршрутной карте

Результаты расчётов демонстрируют отсутствие влияния значения данного параметра на минимальную длину пути.

Нижняя граница феромона на ребре

Изменение значения нижней границы количества феромона на рёбрах регулирует частоту, с которой происходит извлечение редко используемых рёбер и вершин. Численные эксперименты проводились при значениях параметра $p \in \{10^{-6}; 10^{-9}; 0\}$ и при значении параметра $m = 256$.

Результаты численных экспериментов указывают на отсутствие зависимости длины пути, полученного в результате работы алгоритма, от значения нижней границы количества феромона (рис. 8).

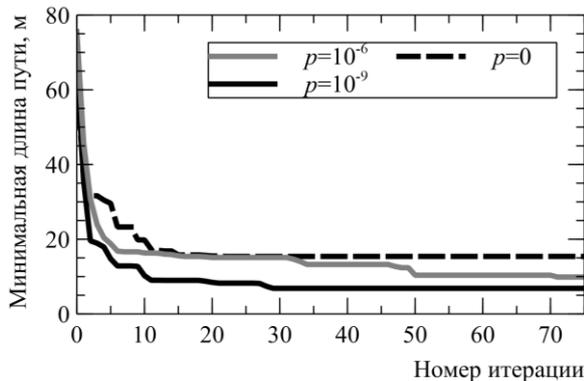


Рис. 8. Зависимость минимальной длины пути от номера итерации при разных значениях начального уровня феромона

Для малых значений данного параметра причина заключается в том, что на итерации, когда механизм исключения вершин начинает исключать рёбра и вершины, обычно наблюдается сходимость алгоритма муравьиных колоний к решению, как следствие, новые генерируемые вершины и рёбра не используются муравьями.

Рекомендации по отбору параметров

По результатам численных экспериментов можно сделать следующие рекомендации.

Увеличение количества муравьёв приводит к нахождению путей меньшей длины в результате работы алгоритма, при этом временные затраты на работу алгоритма муравьиных колоний увеличиваются не столь сильно по сравнению с методом планирования траектории на основе алгоритма муравьиных колоний вследствие уменьшения сложности операции выбора ребра для перехода. Рекомендуется устанавливать значение данного параметра не менее 1024.

Увеличение количества вершин в маршрутной карте приводит к увеличению времени на построение маршрутной карты, а также к нахождению путей большей длины. Рекомендуется вместе с увеличением количества вершин также увеличивать количество муравьёв с целью уменьшить длину пути, найденного в результате работы алгоритма.

Выбор значения параметра, регулирующего влияние веса ребра на выбор ребра, не оказывает существенного влияния на длину находимых муравьями путей. Тем не менее рекомендуется использовать значение параметра $\beta = 1$, так как при этом зна-

чении параметра был получен путь с меньшей длиной.

Исследование изменения количества рассматриваемых соседей показало отсутствие связи между количеством соседей и длиной пути, получаемого в результате работы алгоритма. Таким образом, рекомендуется устанавливать меньшее значение данного параметра с целью уменьшения времени работы алгоритма.

Изменение значения нижней границы феромона также не оказывает значительного влияния на результат работы алгоритма. В связи с этим рекомендуется не использовать механизм исключения вершин, устанавливая значения параметра равными 0, так как генерация новых вершин влечёт за собой дополнительные временные затраты.

Заключение

Анализ применения алгоритма муравьиных колоний позволил выявить недостатки этого метода при решении задачи построения плана траектории, в частности – низкое быстродействие при построении плана траектории с помощью этого метода. Для повышения быстродействия в данной работе предложен метод, совмещающий метод вероятностных маршрутных карт и метод муравьиных колоний. Проведено исследование предложенного метода. На основе проведенного исследования предложенного метода определены диапазоны значений параметров метода, обеспечивающие получение оптимального решения задачи.

Литература

1. Юревич Е.И. Основы робототехники. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
2. Зенкевич С.Л. Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
3. ГОСТ 25686–85. Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения – Введ. 1986–01–01. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Издательство стандартов, 1987. – 8 с.
4. Brooks R.A. A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Find Path with Rotation / R.A. Brooks, T. Lozano-Peres. // IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. – 1985. – Vol. SMC-15, No. 2. – PP. 224–233.
5. Zhu D. Constraint reformulation in a hierarchical path planner. / D. Zhu and J.-C. Latombe // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. – 1990. – PP. 1918–1923.
6. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. // Intern. J. of Robotics Research. – 1986. – Vol. 5, No. 1. – PP. 90–98.
7. Russell S.J. Artificial Intelligence: A Modern Approach. / S.J. Russell, P. Norvig // Neurocomputing. – 1995. – Vol. 9, No. 2. – PP. 215–218.
8. Нильсон Н. Искусственный интеллект. Методы поиска решений. – М.: Мир, 1973. – 272 с.
9. Zeng W. Finding shortest paths on real road networks: the case for A* / W. Zeng, R.L. Church // Int. J. Geogr. Inf. Sci. – 2009. – Vol. 23, No. 4. – PP. 531–543.
10. Генерозов В.Л. Алгоритм планирования траектории манипулятора при наличии препятствий // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1984. – № 1. – С. 137–147.
11. Canny J. The complexity of robot motion planning. – Cambridge; Massachusetts: MIT Press, 1988. – 195 p.

12. LaValle S.M. *Planning Algorithms*. – Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2006. – 1023 p.

13. Ильин В.А. Вопросы теории управления роботами в условиях неполной информации о внешней среде / В.А. Ильин, А.М. Кориков // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1982. – № 4. – С. 202.

14. Петров А.А. Формирование движений манипуляционного робота при обходе препятствий в условиях ограниченной информации о среде / А.А. Петров, И.М. Сирота // Автоматика и телемеханика. – 1983. – № 4. – С. 29–40.

15. Ильин В.А. Интеллектуальные роботы. Теория и алгоритмы. – Красноярск: САА, 1995. – 334 с.

16. Горитов А.Н. Построение плана траектории промышленного робота в произвольных рабочих средах // Автоматизация и современные технологии. – 2001. – № 7. – С. 18–23.

17. Лопатин П.К. Компьютерная имитация управления семизвенным манипуляционным роботом в среде с неизвестными препятствиями // Вестник Сиб. гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2005. – № 3. – С. 69–74.

18. Горитов А.Н. Моделирование адаптивных мехатронных систем / А.Н. Горитов, А.М. Кориков. – Томск: В-Спектр, 2007. – 350 с.

19. Горитов А.Н. Планирование траектории движения манипуляционного робота в неизвестной среде на основе алгоритма муравьиных колоний / А.Н. Горитов К.В., Гончаров // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 55–64.

20. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1979. – 576 с.

21. Корендяев А.И. Теоретические основы робототехники: в 2 кн. – Кн. 1 / А.И. Корендяев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. – М.: Наука, 2006. – 384 с.

22. Dorigo M. *Optimization, Learning and Natural Algorithms* // PhD thesis. – Italie: Politecnico di Milano, 1992. – 140 p.

23. Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces / L. Kavraki et al. // Robotics and Automation, IEEE Transactions on. – 1996. – Vol. 12. – PP. 566–580.

24. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы: теория и практика // Программирование. – 2005. – Т. 31, № 4. – С. 3–18.

25. Курейчик В.М. О некоторых модификациях муравьиного алгоритма / В.М. Курейчик, А.А. Кажаров // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 4 (81). – С. 7–12.

Горитов Александр Николаевич

Д-р техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-5710-5186
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: ang@asu.tusur.ru

Гончаров Кирилл Викторович

Магистрант каф. АСУ ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-112-41-25
Эл. почта: roadto3kmmr@gmail.com

Goritov A.N., Goncharov K.V.

Motion trajectory planning for a manipulator based on modified ant colony optimization

Manipulators are widely used to automate a broad range of operations in industry. It is required to compute a motion plan for a manipulator to move the manipulator from the initial configuration to the goal configuration so that the manipulator can accomplish the planned operations. The motion planning problem is further complicated by the fact that there are obstacles in the work zone of the manipulator, collision with which is to be avoided. There exist many motion planning methods both for obstacle-free environments and for environments with obstacles. The group of motion planning methods based on heuristic algorithms is of a particular interest.

In this paper, a research on the possibility of modification of a motion planning method based on ant colony optimization algorithm for building a motion plan for a manipulator is carried out. A modification of the original method, using probabilistic roadmap (PRM) method, is proposed. An analysis on results of modified algorithm with varied values of parameters of the algorithm is performed. Recommendations on the optimal selection of parameters of the algorithm are provided based on results of the analysis.

Keywords: manipulator, trajectory, motion planning, obstacles, ant colony optimization, PRM.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-1-98-106

References

1. Yurevitch E.I. *Osnovy robototekhniki* [Basics of Robotics]. Saint-Petersburg, BHV-St.Petersburg, 2005, 416 p. (in Russ.).

2. Zenkevitch S.L., Yuschenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulatsionnymi robotami* [Basics of control of robotic manipulators]. Moscow, Publishing House of Moscow State Technical University. N.E. Bauman, 2004. 480 p. (in Russ.).

3. [State Standard 25686-85. Manipulators, autooperators and industrial robots]. Terms and definitions. Moscow, USSR State Committee on Standards, Standard Publishing, 1987, 8 p. (in Russ.).

4. Brooks R.A., Lozano-Peres T. A Subdivision Algorithm in Configuration Space For Find Path with Rotation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, vol. SMC-15, no. 2, pp. 224–233.

5. Zhu D., Latombe J.-C. Constraint reformulation in a hierarchical path planner. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990, pp. 1918–1923.

6. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Intern. Journal of Robotics Research*, 1986, vol. 5, no. 4, pp. 90–98.

7. Russell S.J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. *Neurocomputing*, 1995, vol. 9, no. 2, pp. 215–218.

8. Nilsson N. *Iskusstvennyy intellekt. Metody poiska resheniy* [Problem-solving Methods in Artificial Intelligence]. Moscow, Mir, 1973, 272 p. (in Russ.)

9. Zeng W., Church R.L. Finding shortest paths on real road networks: the case for A*. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, vol. 23, no. 4, pp. 531–543.

10. Generozov V.L. Algoritm planirovaniya trayektorii manipulyatora pri nalichii prepyatstvij [An algorithm for planning a trajectory of a manipulator in the presence of obstacles]. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Technical Cybernetics*, 1984, no. 1, pp. 137–147 (in Russ.).

11. Canny J. *The complexity of robot motion planning*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1988, 195 p.
12. LaValle S.M. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2006, 1023 p.
13. Ilyin V.A., Korikov A.M. *Voprosy teorii upravleniya robotami v usloviyakh nepolnoj informatsii o vneshej srede* [Questions of the theory of robot control in conditions of incomplete information about the external environment]. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Technical Cybernetics*, 1982, no. 4, 202 p. (in Russ.)
14. Petrov A.A., Sirota I.M. *Formirovaniye dvizhenij manipulyatsionnogo robota pri obkhode prepyatstvij v usloviyakh ogranichennoj informatsii o srede* [Building motions of a robotic manipulator when avoiding obstacles given limited information about the scene]. *Automatics and Telemekhanics*, 1983, no 4, pp. 29–40 (in Russ.)
15. Ilyin V.A. *Intellektual'nye roboty. Teoriya i algoritmy* [Intelligent robots. Theory and Algorithms]. Krasnoyarsk, CAA, 1995, 334 p. (in Russ.)
16. Goritov A.N. *Postroeniye plana traektorii promyshlennogo robota v proizvol'nykh rabochikh sredakh* [Construction of a trajectory plan for an industrial robot in arbitrary operating environments]. *Automatization and Modern Technologies*, 2001, no. 7, pp. 18–23 (in Russ.)
17. Lopatin P.K. *Komp'yuternaya imitatsiya upravleniya semizvennym manipulyatsionnym robotom v srede s neizvestnymi prepyatstviyami* [Computer simulation of a seven-link manipulator control in unknown environment]. *Bulletin of the Reshetnev Siberian State Aerospace University*, 2005, no 3, pp. 69–74 (in Russ.)
18. Goritov A.N., Korikov A.M. *Modelirovaniye adaptivnykh mekhatronnykh sistem. Monografiya* [Modelling of adaptive mechatronic systems. A monography]. Tomsk, V-Spekt, 2007, 350 p.
19. Goritov A.N., Goncharov K.V. *Planirovaniye trayektorii dvizheniya manipulyatsionnogo robota v neizvestnoi srede na osnove algoritma murav'yinykh koloniy* [Motion trajectory planning for a multi-link manipulator in an unknown environment based on ant colony optimization]. *Proceedings of TUSUR University*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 55–64 (in Russ.)
20. Levitskiy N.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow, Science, 1979, 576 p. (in Russ.)
21. Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. *Teoreticheskiye osnovy robototekhniki. V 2 knigakh. Kniga 1* [Theoretical foundations of robotics in 2 books. Book 1]. Moscow, Science, 2006, 384 p. (in Russ.)
22. Dorigo M. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. PhD thesis. Italie, Politecnico di Milano, 1992. 140 p.
23. Kavradi L. [et al.] Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, vol. 12, pp. 566–580.
24. Shtovba S.D. *Murav'yinye algoritmy: teoriya i praktika* [Ant Colony Optimization: theory and practice]. *Programming*, 2005, vol. 31, no 4, pp. 3–18 (in Russ.)
25. Kureychik V.M., Kazharov A.A. *O nekotorykh modifikatsiyakh murav'yinogo algoritma* [On several extensions of the Ant System algorithm]. *Bulletin of SFedU. Engineering Sciences*, 2008, no. 4 (81), pp. 7–12 (in Russ.)

Aleksandr N. Goritov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Automated Control Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-5710-5186
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: ang@asu.tusur.ru

Kirill V. Goncharov

Master student,
Department of Automated Control Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-112-41-25
Email: roadto3kmmr@gmail.com