

УДК 004.021:519.713

А.Н. Горитов, К.В. Гончаров

Планирование траектории движения манипуляционного робота в неизвестной среде на основе алгоритма муравьиных колоний

Манипуляционные роботы находят широкое применение в различных сферах деятельности человека. Выполнение многих практически важных задач связано с работой во внешней среде, содержащей объекты, ограничивающие рабочее пространство манипуляционного робота. Задача усложняется тем, что количество, положение и габариты объектов внешней среды не известны. Эти данные могут быть получены только в процессе построения плана траектории. Предлагается алгоритм планирования траектории движения многозвенного манипулятора на основе алгоритма муравьиных колоний – метаэвристического алгоритма для решения задач на графах. Анализируются результаты работы алгоритма при различных наборах параметров. На основе анализа даются рекомендации по подбору параметров для эффективного решения задачи планирования.

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

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-55-64

Манипуляционные роботы (МР) находят широкое применение в различных сферах деятельности человека. С точки зрения управления МР является сложным динамическим объектом, который характеризуется многомерностью, взаимосвязанными переменными и нелинейностью.

Перемещение исполнительного звена МР выполняется путем изменения взаимного положения звеньев МР (рис. 1). Для этого формируются законы управления звеньями МР. Основой для формирования законов управления звеньями манипулятора выступает план траектории перемещения исполнительного звена манипулятора.

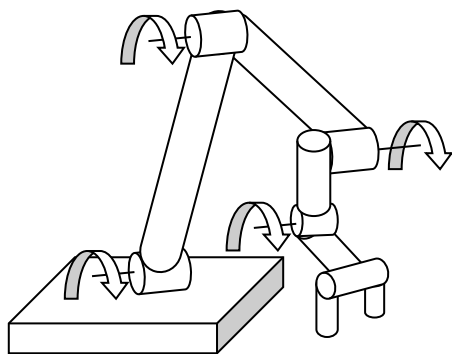


Рис. 1. Манипуляционный робот

Решение задачи планирования траектории во внешней среде с известными препятствиями и аналитически описанными препятствиями рассматривалось в работах [1–4]. Часть методов основана на графовом подходе и алгоритмах эвристического поиска в известной среде [5–7]. Для препятствий, представленных многогранниками, рассматривалось применение методов линейного программирования [8, 9].

Если в промышленности план перемещения исполнительного звена очень часто задают в режиме обучения, то в ряде отраслей, в частности, в строи-

тельстве, использование режима обучения затруднено или просто невозможно [10].

Многие практически важные задачи связаны с необходимостью обеспечить функционирование МР во внешней среде с препятствиями. В этом случае необходимо обеспечить перемещение звеньев МР из начального состояния в целевое так, чтобы не допустить соударения с объектами внешней среды.

Планирование траектории во внешней среде с препятствиями усложняется отсутствием полной информации о положении и габаритах преград [11–17].

Информацию о положении препятствий манипуляционный робот получает с помощью датчиков.

Предложены алгоритмы планирования траектории манипуляторов на основе поступающей локальной сенсорной информации [18, 19]. К недостаткам этих алгоритмов относится отсутствие гарантированной сходимости к цели.

Таким образом, задача построения плана траектории перемещения исполнительного звена манипуляционного робота во внешней среде с неизвестным расположением препятствий в настоящее время является важной для практики задачей.

Цель работы – исследование возможности применения алгоритма муравьиных колоний для построения плана траектории перемещения исполнительного звена МР во внешней среде с неизвестным расположением препятствий.

Постановка задачи

Пусть в трехмерном пространстве находится N -звенный МР. Звенья МР образуют кинематические пары пятого класса [20].

Будем предполагать, что основание МР статично. Пространственное положение звеньев МР определяется значениями вектора обобщенных координат [21]

$$\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_N). \quad (1)$$

Начальное положение исполнительного звена МР обозначим как $M_0(x_0, y_0, z_0)$, а целевое поло-

жение как $M_c(x_c, y_c, z_c)$. Соответственно, начальное положение исполнительного звена МР будет определяться вектором обобщенных координат $\mathbf{q}^{(0)} = (q_1^{(0)}, q_2^{(0)}, \dots, q_N^{(0)})$, а целевое – $\mathbf{q}^{(c)} = (q_1^{(c)}, q_2^{(c)}, \dots, q_N^{(c)})$.

В процессе перемещения звеньев МР значения обобщенных координат должны удовлетворять неравенству

$$q_{i \min} \leq q_i \leq q_{i \max}, \quad (2)$$

где $q_{i \min}$ – минимальное значение i -й обобщенной координаты; $q_{i \max}$ – максимальное значение i -й обобщенной координаты; $i = 1, 2, \dots, N$.

В рабочем пространстве МР находится произвольное множество объектов \mathbf{P} , называемых далее препятствиями. Каждое препятствие характеризуется своими габаритами и положением в рабочем пространстве МР. Положение препятствий во внешней среде МР и их габариты предварительно не известны.

В процессе построения плана траектории выполняется контроль на отсутствие столкновений с объектами внешней среды. Положение, при котором звенья МР входят в контакт с препятствием (объектом внешней среды), называется запрещенным. Информация о возможности перемещения МР из k -го положения в $(k+1)$ -е принимается на основе данных, поступающих от различных источников, об отсутствии соударения звеньев МР с препятствиями.

Задача построения плана траектории состоит в том, чтобы получить последовательность промежуточных положений МР, которые позволяют перевести исполнительное звено МР из начального положения M_0 в целевое положение M_c и в процессе перемещения не допустить контакт звеньев МР с препятствиями, находящимися во внешней среде [22].

Решение задачи

Методы планирования траектории можно разделить на комбинаторные и эвристические.

Комбинаторные методы предполагают перебор всех возможных перемещений манипуляционного робота и выбор среди найденных решений варианта, удовлетворяющего заданным критериям. Эвристические методы позволяют выбрать следующее состояние манипуляционного робота из возможных на основе набора правил, заданных в этом методе. В большинстве случаев это позволяет сократить вычислительную сложность решения задачи планирования траектории.

В работе предлагается использовать для построения плана траектории алгоритм муравьиных колоний [23, 24].

В общем виде алгоритм муравьиных колоний имеет следующий вид:

Алгоритм муравьиных колоний.

1. Инициализация начальных параметров.
2. Пока (не превышено максимальное количество итераций) выполнить.
3. Создаем муравьев.
4. Ищем решения.
5. Обновляем феромон.
6. Дополнительные действия.

Итерация – это одно повторение совокупности операций создания муравьев, поиска решений, обновления уровня феромона и выполнения дополнительных действий. Феромон – специальный секрет, откладываемый как след при перемещении муравья.

Перемещение муравьев выполняется между вершинами из заранее заданного множества вершин. За вероятность перехода k -го муравья из вершины i в вершину j на t -й итерации отвечает вероятностно-пропорциональное правило [24]

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in \mathbf{J}_{ik}} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta}, & \text{если } j \notin \mathbf{J}_{ik}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & \text{если } j \in \mathbf{J}_{ik}, \end{cases} \quad (3)$$

где α и β – два регулирующих параметра, а \mathbf{J}_{ik} – множество посещенных муравьем k вершин, смежных с вершиной i . Параметр α задаёт вес следа феромона, а β – привлекательности вершины при выборе маршрута. При $\alpha = 0$ приоритет будет отдаваться вершинам, расположенным ближе к текущей, однако маршрут будет носить случайный характер. Если $\beta = 0$, тогда работает лишь феромонное усиление, что влечет за собой быстрое вырождение маршрутов к одному субоптимальному решению.

Стоит заметить, что хотя вероятностно-пропорциональное правило не изменяется на протяжении итерации, значения вероятностей для двух муравьев в одной и той же вершине могут отличаться, так как $P_{ij,k}(t)$ – функция от $\mathbf{J}_{i,k}$ – множества посещенных муравьем k вершин.

После завершения маршрута всеми муравьями каждый муравей k откладывает на ребре (i, j) следующее количество феромона [25]:

$$\Delta\tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{1}{L_k(t)}, & \text{если } (i, j) \in \mathbf{T}_k(t), \\ 0, & \text{если } (i, j) \notin \mathbf{T}_k(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $\mathbf{T}_k(t)$ – маршрут, пройденный муравьем k на итерации t ; $L_k(t)$ – длина этого маршрута.

В случае двумерной задачи вычислительная сложность алгоритма оценивается как $O(t_{\max} \cdot m \cdot n^2)$, где t_{\max} – максимальное количество итераций, m – количество муравьев в колонии, n – количество узлов сетки [26].

Адаптация алгоритма муравьиных колоний для задачи построения плана траектории перемещения манипуляционного робота

Для применения алгоритма муравьиных колоний к задаче построения плана траектории перемещения манипуляционного робота необходимо свести задачу к задаче о поиске кратчайшего пути между парой вершин в графе.

Графом, на котором будет производиться поиск кратчайшего пути, является граф-решётка [27]

$G(\mathbf{V}, \mathbf{E})$, где $\mathbf{V} \subset \mathbf{Z}^3$ – множество вершин, соответствующих промежуточному положению исполни-

тельного звена манипуляционного робота, $E = \{((i, j, k), (i', j', k')) \in V^2 : |i - i'| + |j - j'| + |k - k'| = 1\}$ – множество рёбер, задающих переходы между промежуточными положениями.

Соответствие между вершинами графа и промежуточными положениями исполнительного звена определяется следующим образом:

$$g: V \rightarrow M; g(v) = (x_0 + v_x d, y_0 + v_y d, z_0 + v_z d), \quad (5)$$

где M – множество рассматриваемых положений исполнительного звена, $v(v_x, v_y, v_z)$ – отображаемая вершина графа. Нетрудно видеть, что вершина v_0 , соответствующая начальному положению исполнительного звена M_0 , равна $(0, 0, 0)$. Выбранное целевое положение M_c должно принадлежать M .

Обратное соответствие $g^{-1}: M \rightarrow V$ определяется следующим образом:

$$g^{-1}(M_i) = \left(\frac{x_i - x_0}{d}, \frac{y_i - y_0}{d}, \frac{z_i - z_0}{d} \right), \quad (6)$$

где d – расстояние между рассматриваемыми промежуточными положениями; $d > 0$.

Весовая функция $f: E \rightarrow R_+$, ставящая в соответствие каждому ребру его вес, определяется следующим образом:

$$f((v, w)) = \begin{cases} d, & g(v) \in M_J \text{ и } g(w) \in M_J, \\ +\infty & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (7)$$

где (v, w) – ребро графа G , M_J – множество разрешённых промежуточных положений или достижимых положений, при которых не происходит столкновения звеньев МР с препятствиями и другими звеньями.

При решении задачи о кратчайшем пути между парой вершин каждый муравей размещается в начальной вершине. Вершина v_0 является начальной вершиной. На каждом шаге поиска решения муравей выбирает из смежных вершин вершину для перехода согласно вероятностному правилу, определяемому (3), и добавляет выбранную вершину в свой путь. По достижении вершины, соответствующей целевому положению исполнительного звена (конечной вершины), построение решения заканчивается. Конечной вершиной является вершина $v_c = g^{-1}(M_c)$. Использование множества посещённых вершин оправдано, так как кратчайший путь является простым.

На каждом ребре имеется некоторое количество феромона. При построении графа количество феромона на каждом ребре устанавливается равным небольшому положительному числу. После построения решения каждым муравьём на одной итерации алгоритма происходит обновление уровня феромона: происходит уменьшение уровня феромона на каждом ребре, затем происходит увеличение феромона на рёбрах, использованных для построения

решения муравьём, обратно пропорционально длине пути муравья.

Блок-схема адаптированного алгоритма муравьиных колоний приведена на рис. 2.

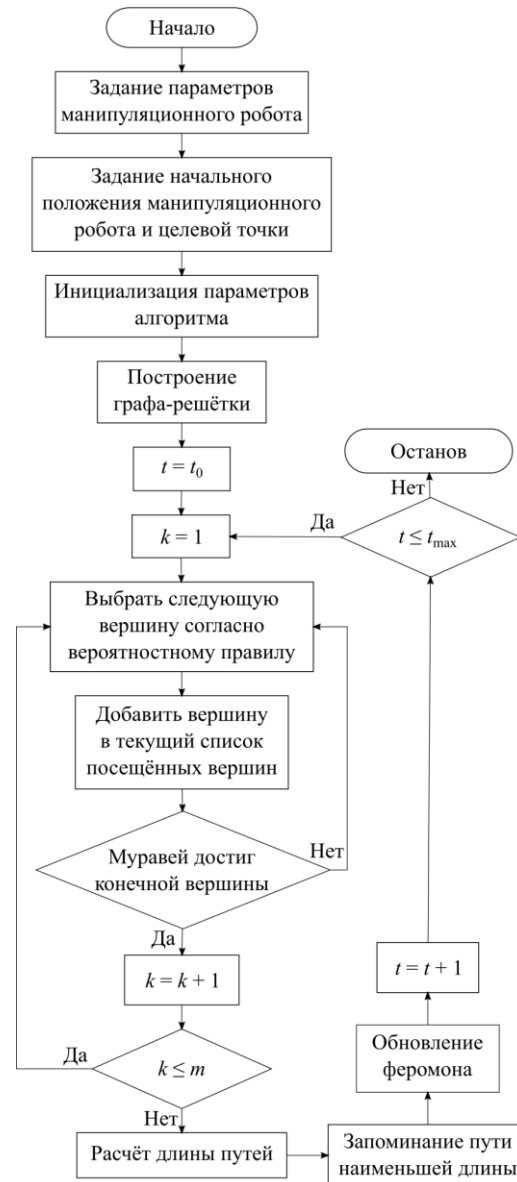


Рис. 2. Блок-схема алгоритма муравьиных колоний применительно к задаче построения плана траектории

Адаптированный алгоритм муравьиных колоний позволяет получить последовательность промежуточных положений МР, последовательное прохождение которых обеспечивает перемещение исполнительного звена МР из начального положения M_0 в целевое положение M_c . Каждое промежуточное положение МР характеризуется набором дискретных значений обобщенных переменных $q_i^{(j)}$, где $i = 1, 2, \dots, N$ и $j = 0, 1, \dots, p$. Здесь N – число звеньев МР, p – число промежуточных состояний МР. Соответственно, $q_i^{(0)}$ – значения обобщенных переменных в начальном положении МР, $q_i^{(p)} = q_i^{(c)}$ –

значения обобщенных переменных в целевом положении МР.

Аппроксимация дискретных значений обобщенных переменных $q_i^{(j)}$ позволяет получить непрерывные функции $q_i(t)$ изменения обобщенных переменных во времени. Аппроксимирующие полиномы должны удовлетворять условиям

$$q_i(t_j) = q_i^{(j)}, j = 0, 1, \dots, p,$$

где t_0, t_1, \dots, t_p – неубывающая последовательность точек разбиения интервала $[0, T]$, где $t_0 = 0, t_p = T$. Здесь T – время, за которое МР должен переместиться из начального положения M_0 в целевое положение M_c . Кроме того, аппроксимирующие функции должны удовлетворять условиям

$$\begin{aligned} |\dot{q}_i(t)| &\leq \dot{q}_{\max}, \\ |\ddot{q}_i(t)| &\leq \ddot{q}_{\max}. \end{aligned}$$

Если МР до выполнения перемещения находится в статичном состоянии и после окончания движения также переходит в статичное состояние, что характерно для многих операций, выполняемых МР, то на производные функции $q_i(t)$ накладываются граничные условия

$$\begin{aligned} |\dot{q}_i(0)| &\leq 0, |\dot{q}_i(c)| \leq 0, \\ |\ddot{q}_i(0)| &\leq 0, |\ddot{q}_i(c)| \leq 0. \end{aligned}$$

В этом случае для получения непрерывных функций $q_i(t)$ изменения обобщенных переменных во времени можно использовать интерполяционные сплайны третьего порядка [28]

$$q_i(t) = a_{ik} + b_{ik}(t - t_k) + c_{ik}(t - t_k)^2 + d_{ik}(t - t_k)^3$$

при $t \in [t_{k-1}, t_k], k = 1, 2, \dots, p$.

Полученные функции изменения обобщенных переменных позволяют построить непрерывное и гладкое перемещение МР из начального положения M_0 в целевое положение M_c .

Результаты численных экспериментов

Входными параметрами алгоритма муравьиных колоний являются: регулятор влияния феромона α , регулятор влияния эвристической информации β , регулятор влияния отклонённости γ , скорость испарения феромона ρ , количество муравьев m и максимальное количество итераций t_{\max} .

Работа алгоритма во многом зависит от заданных значений этих параметров. Рассмотрим, как влияет изменение каждого параметра на результат работы алгоритма. При изменении параметров в наборах испытаний значения неизменяющихся параметров равны значениям параметров из базового набора. Значения параметров из базового набора следующие: $\alpha_0 = 1, \beta_0 = 1, \gamma_0 = 0,25, \rho_0 = 0,25, m_0 = 64, t_{\max 0} = 100$.

Для численных экспериментов использовалась модель многозвенного манипуляционного робота. Во внешней среде МР находились препятствия, но пространственное положение и их габариты МР бы-

ли неизвестны. В процессе перемещения звеньев МР выполняется контроль на соударение с препятствиями. Положение звеньев манипулятора, при котором возникает соударение, считается запрещенным и при построении плана траектории перемещения исполнительного звена МР не используется.

Регулятор влияния феромона

Выбор подходящего значения параметра, регулирующего влияние количества феромона на выбор ребра, имеет большое значение при решении оптимизационной задачи. Слишком низкое значение параметра приводит к замедлению процесса поиска решения; слишком высокое – к сходимости процесса поиска решения к локальному оптимуму.

Были проведены численные эксперименты при базовом значении коэффициента влияния уровня феромона ($\alpha = 1$), при значении, исключающем влияние уровня феромона ($\alpha = 0$), и при значениях, увеличивающих влияние уровня феромона ($\alpha = 2, \alpha = 3, \alpha = 4$). На рис. 3 приведены результаты расчётов при данных значениях регулятора влияния феромона.

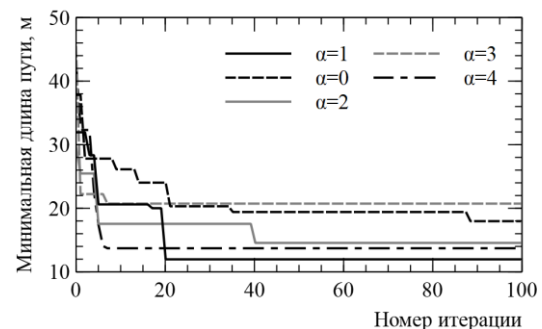


Рис. 3. Графики зависимости минимальных длин пути от номера итерации при различных значениях параметра α

При $\alpha = 1$ был получен путь с наименьшей длиной из всех проведенных испытаний, при этом время работы алгоритма больше, чем время работы алгоритма при $\alpha > 1$, что связано с меньшими затратами на поиск пути при нахождении локального минимума.

На рис. 4 можно видеть, что при $\alpha > 1$ процесс поиска решения сходится к локальному минимуму.

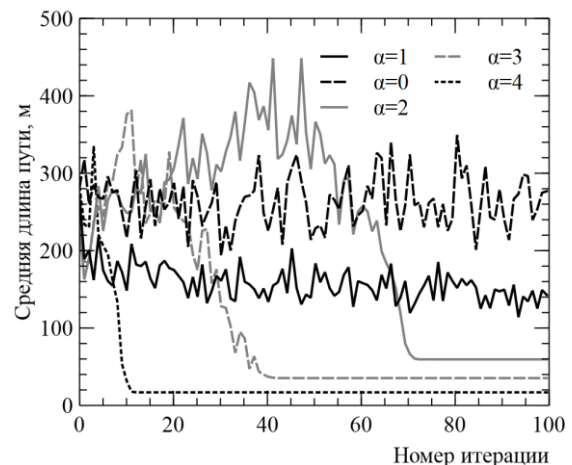


Рис. 4. Графики зависимости средних длин пути от номера итерации при различных значениях параметра α

Среднее значение длины пути становится постоянным на итерации № 77 при значении параметра $\alpha = 2$, на итерации № 44 при значении параметра $\alpha = 3$ и на итерации № 14 при значении параметра $\alpha = 4$. Следует отметить, что значение локального минимума не равно значениям минимальной длины пути, найденного на той же итерации, что и локальный минимум, в каждом из экспериментов, где локальный минимум был найден.

Кроме того, при исключении влияния количества феромона на выбор ребра процесс поиска решения приобретает практически случайный характер, так как результаты поиска на предыдущих итерациях алгоритма не учитываются.

Регулятор влияния эвристической информации

В качестве эвристической информации η_{ij} о ребре (i, j) выбрана величина, обратная весу ребра (i, j) ; таким образом, эвристическая информация о ребре определяется следующим образом:

$$\eta_{ij} = 1 / f((i, j)). \tag{8}$$

Для определения степени влияния параметра на результаты поиска оптимального пути были поставлены численные эксперименты при базовом значении коэффициента влияния эвристической информации ($\beta = 1$) и при значении коэффициента, исключаяющего влияние эвристической информации на выбор ($\beta = 0$).

Изменение коэффициента влияния веса ребра не оказывает существенного влияния на результаты поиска пути минимальной длины (рис. 5).

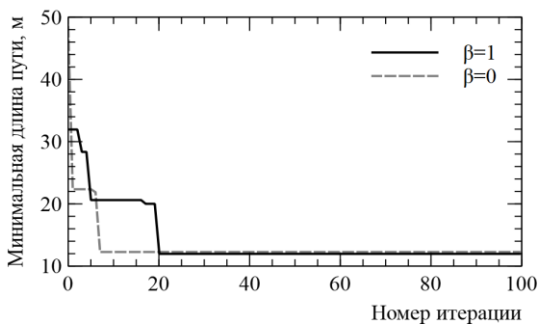


Рис. 5. Графики зависимости минимальных длин пути от номера итерации при различных значениях параметра β

Причина заключается в том, что весовая функция отображает все ребра, соединяющие вершины, соответствующие разрешённым промежуточным положениям, в одно и то же значение. Обозначим это значение η . Тогда формула (3) примет следующий вид:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot \eta^\beta}{\eta^\beta \sum_{l \notin J_{ik}} [\tau_{il}(t)]^\alpha}, & \text{если } j \notin J_{ik}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & \text{если } j \in J_{ik}. \end{cases}$$

Так как $\eta > 0$, то числитель и знаменатель дроби можно разделить на η^β . Получим следующее представление формулы:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha}{\sum_{l \notin J_{ik}} [\tau_{il}(t)]^\alpha}, & \text{если } j \notin J_{ik}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & \text{если } j \in J_{ik}. \end{cases}$$

Легко видеть, что вероятность выбора вершины больше не зависит от параметра, регулирующего влияние эвристической информации.

Регулятор влияния отклонённости

В работе, посвящённой применению алгоритма муравьиных колоний для решения задачи о поиске кратчайшего пути в транспортной сети [29], была предложена модификация алгоритма, использующая информацию о положении вершин графа в пространстве. Применим данную модификацию к рассматриваемой задаче.

Пусть $e(e_x, e_y, e_z)$ – конечная вершина. Пусть $\mathbf{d}_{ij} = (j_x - i_x, j_y - i_y, j_z - i_z)$ – вектор направления движения от вершины i к вершине j . Пусть муравей, находясь в вершине i , рассматривает смежную с ней вершину j , вычисляя её привлекательность. Угол между векторами \mathbf{d}_{ij} и \mathbf{d}_{ie} (назовём его θ_{ij}) показывает, насколько направление движения от i к j отклоняется от направления движения от i к e напрямую; чем меньше данный угол, тем более привлекательной должна быть вершина j для муравья.

С использованием данной модификации формула (3) принимает следующий вид:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta \cdot [u_{ij}]^\gamma}{\sum_{l \notin J_{ik}} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta \cdot [u_{il}]^\gamma}, & \text{если } j \notin J_{ik}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & \text{если } j \in J_{ik}, \end{cases}$$

где $u_{ij} = 1 / (1 + \theta_{ij})$ – величина, обратная отклонённости направления пути от i к j , γ – параметр, регулирующий влияние отклонённости. Угол θ_{ij} можно вычислить следующим образом:

$$\theta_{ij} = \arccos \frac{(\mathbf{d}_{ij}, \mathbf{d}_{ie})}{|\mathbf{d}_{ij}| \cdot |\mathbf{d}_{ie}|}. \tag{9}$$

С целью определения степени влияния регулятора на результаты поиска кратчайшего пути были поставлены численные эксперименты при значениях параметра $\gamma \in \{0,25; 0,5; 1; 2\}$. Результаты эксперимента при значении регулятора, исключаяющего влияние отклонённости на выбор ребра, получить не удалось по причине чрезмерных затрат времени на получение решения.

Из результатов численных экспериментов (рис. 6) видно, что наибольшая эффективность алгоритма достигается при значении параметра $\gamma = 1$.

Дальнейшее увеличение параметра не приводит к существенному выигрышу.

Скорость испарения феромона

Испарение феромона, т.е. уменьшение во времени количества отложенного на предыдущих ите-

рациях феромона, позволяет обеспечить исследование всего пространства решений. Обозначим коэффициент испарения феромона через $\rho \in [0,1]$. Тогда правило обновления феромона примет вид [23]

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \quad (10)$$

где $\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij,k}(t)$, m – количество муравьёв в колонии.

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных при различных значениях коэффициента скорости испарения феромона, приведены на рис. 7.

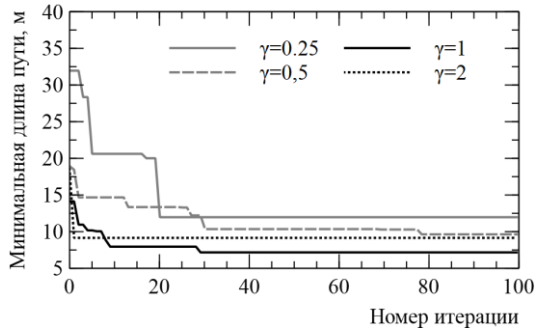


Рис. 6. Графики зависимости минимальной длины путей от номера итерации при различных значениях параметра γ

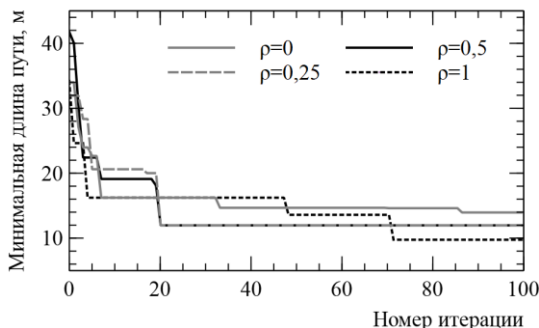


Рис. 7. Графики зависимости минимальных длин пути от номера итерации при различных значениях параметра ρ

Расчеты проводились при базовом значении коэффициента скорости испарения феромона ($\rho = 0,25$) при значении коэффициента, исключающем испарение феромона ($\rho = 0$), при повышенном значении коэффициента скорости испарения ($\rho = 0,5$) и при значении коэффициента, при котором происходит полное испарение феромона после завершения итерации ($\rho = 1$).

Результаты расчётов демонстрируют отсутствие значительного влияния параметра, регулирующего скорость испарения феромона, на минимальную длину найденного пути.

Количество муравьёв

При увеличении количества муравьёв увеличивается число анализируемых путей ($m \times t_{\max}$) в процессе решения задачи, что приводит к более полному исследованию пространства поиска решения и, как следствие, к нахождению пути меньшей длины, однако при этом увеличивается время работы алгоритма.

При исследовании зависимости минимальной длины найденного пути от количества муравьёв были выполнены расчёты со значениями параметра количества муравьёв $m \in \{4, 8, 16, 64\}$ при фиксированном количестве итераций ($t_{\max} = 100$).

В результате расчётов установлено, что увеличение численности муравьиной колонии приводит к нахождению пути меньшей длины за меньшее количество итераций (рис. 8)

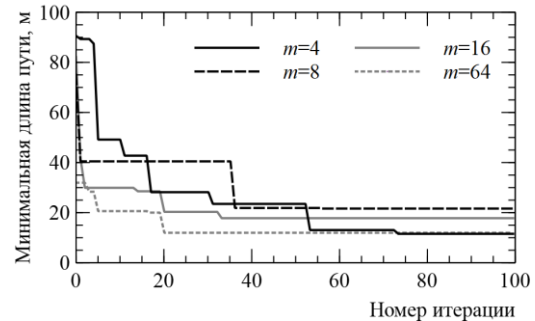


Рис. 8. Графики зависимости минимальных длин пути от номера итерации при различных значениях параметра m

Расчёты, проводимые при численности муравьиной колонии $m > 64$, требуют большого количества времени. При увеличении параметра рекомендуется уменьшать количество итераций алгоритма.

Количество итераций

Назовём попыткой процесс построения решения одним муравьём на одной итерации. Количество попыток, таким образом, равно произведению количества муравьёв на количество итераций. При одном и том же количестве попыток время работы алгоритма будет приблизительно одинаковым при разном количестве итераций.

Были проведены испытания при различных значениях количества итераций и фиксированном количестве попыток. Рассматриваются результаты испытаний при значении параметра $t_{\max} \in \{8, 16, 25, 50, 100, 200\}$ и при количестве попыток, равном 6 400.

Результаты расчётов указывают на предпочтительность уменьшения количества итераций в пользу увеличения количества муравьёв при фиксированном количестве попыток (рис. 9).

Алгоритм «элитных муравьёв»

С увеличением размера задачи производительность алгоритма муравьиных колоний резко падает. С целью улучшить время нахождения оптимального решения были предложены различные модификации алгоритма [25]. Первой такой модификацией стал алгоритм «элитных муравьёв», отличающийся от немодифицированного алгоритма правилом обновления феромона [30].

Идея алгоритма «элитных муравьёв» заключается в усилении следа феромона на пути с наименьшей длиной из всех построенных на t -й итерации. Обозначим этот путь $\mathbf{T}_{bs}(t)$. Усиление происходит за счёт добавления на каждое ребро пути $\mathbf{T}_{bs}(t)$ фе-

ромона в количестве $e / L_{bs}(t)$, где e – регулируемый параметр, $L_{bs}(t)$ – длина пути $\mathbf{T}_{bs}(t)$. Формула обновления феромона (10) принимает следующий вид:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) + e\Delta\tau_{ij}^{bs}(t), \quad (11)$$

где

$$\Delta\tau_{ij}^{bs}(t) = \begin{cases} 1/L_{bs}(t), & (i, j) \in \mathbf{T}_{bs}(t), \\ 0, & (i, j) \notin \mathbf{T}_{bs}(t). \end{cases} \quad (12)$$

Нетрудно видеть, что при $e = 0$ алгоритм «элитных муравьёв» вырождается в немодифицированный алгоритм муравьиных колоний.

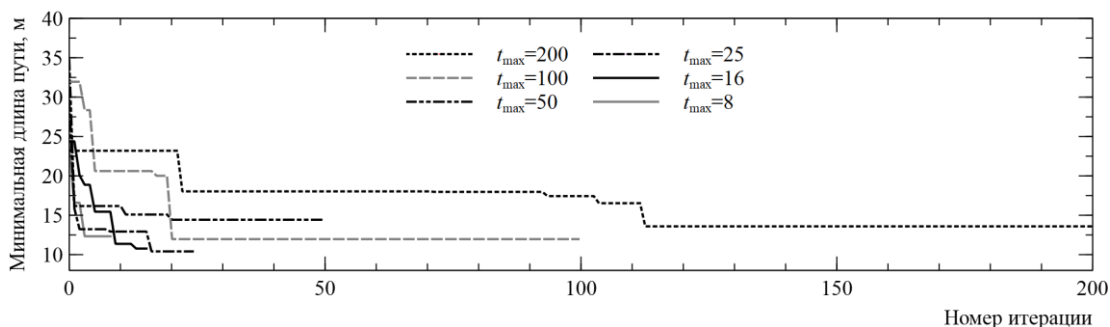


Рис. 9. Графики зависимости минимальных длин путей от номера итераций при различных значениях параметра t_{\max} и при фиксированном значении $m \times t_{\max}$

При сравнении эффективности двух алгоритмов проводились расчёты с использованием немодифицированного алгоритма ($e = 0$) и модифицированного алгоритма со значениями параметра $e = m$ ($e = 64$), $e < m$ ($e = 16$) и $e > m$ ($e = 256$).

Результаты расчётов показывают превосходство алгоритма «элитных муравьёв» над оригинальным алгоритмом муравьиных колоний при значении параметра $e \leq m$ (рис. 10).

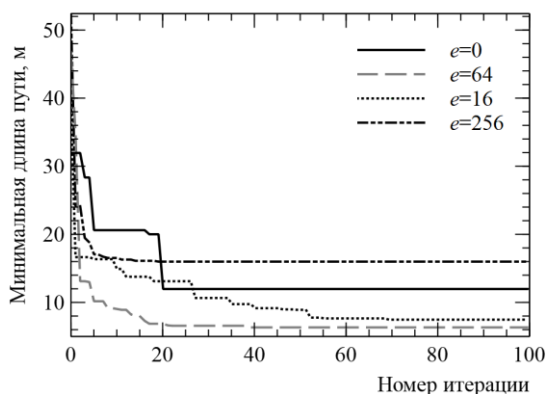


Рис. 10. Графики зависимости минимальных длин пути от номера итерации при различных значениях параметра e

При выборе значения параметра $e > m$ происходит сходжение к локальному минимуму по причине чрезмерного усиления следа феромона на лучшем пути на момент обновления феромона.

Рекомендации по отбору параметров

По результатам численных экспериментов можно сделать следующие рекомендации.

При значении параметра $\alpha > 1$ найденное решение является локальным минимумом, а при значении $\alpha = 0$ поиск решения занимает больше времени, при этом результат поиска не является лучшим из всех результатов экспериментов. Исходя из результатов экспериментов, рекомендуемым значением для регулятора влияния уровня феромона является значение $\alpha = 1$.

С использованием весовой функции (7) значение параметра β не оказывает существенного влияния на результаты поиска пути минимальной длины. В связи с этим невозможно рекомендовать определённое значение данного параметра.

При значении параметра γ , равном нулю, получение решения становится невозможным по причине непопустимо больших затрат времени. При чрезмерном увеличении значения параметра падает эффективность алгоритма вплоть до невозможности получения решения по аналогичной причине. Принимая во внимание результаты численных экспериментов, можно рекомендовать значения $\gamma \in [0, 25; 1]$.

По причине того, что при значениях прочих параметров нет сходимости алгоритма к некоторому локальному минимуму, изменение параметра скорости испарения не оказывает существенного влияния на результаты. На основании полученных результатов рекомендуется установить значение параметра $\rho = 1$.

Рекомендуется устанавливать значение количества муравьёв m не менее 16. Дальнейшее увеличение параметра приводит к улучшению найденного решения за счёт увеличения затрат времени пропорционально увеличению параметра.

При выборе между увеличением количества муравьёв и увеличением количества итераций при фиксированном количестве попыток рекомендуется отдавать предпочтение большему количеству муравьёв при меньшем количестве итераций.

Наконец, рекомендуется использовать алгоритм «элитных муравьёв» вместо обычного алгоритма муравьиных колоний. Результаты экспериментов показывают как существенное улучшение найденного решения, так и существенное уменьшение используемого для поиска решения времени. Не рекомендуется устанавливать значение параметра e , превышающее значение параметра количества муравьёв m , так как это приводит к нахождению локального минимума.

Заключение

Для решения задачи планирования перемещения многозвенного манипулятора был предложен алгоритм, основанный на алгоритме муравьиных колоний. Был реализован программный продукт, позволяющий с помощью предложенного алгоритма совершить построение траектории перемещения манипуляционного робота и проанализировать результаты работы алгоритма. Полученные результаты позволяют определить диапазоны изменения параметров алгоритма, обеспечивающие эффективное решение поставленной задачи.

Литература

- Canny J. The complexity of robot motion planning. – Cambridge: Massachusetts: MIT Press, 1988. – 195 p.
- LaValle S.M. Planning Algorithms. – Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2006. – 1023 p.
- Donald B.R. On motion planning with six degrees of freedom: Solving the intersection problems in configuration space // Proceedings of the IEEE International conference on robotics and automation. – 1985. – Vol. 2. – P. 536–541.
- Shin K. Automatic generation of trajectory planners for industrial robots / K. Shin, N. McKay // Proc. IEEE Int. Conf. Rob. and Autom. – 1986. – Vol. 3. – P. 260–266.
- Пронин А.С. Построение программных траекторий движения манипулятора в среде с препятствиями // Автономные роботы и распознавание образов. – Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1986. – С. 11–20.
- Gouzenes L. Strategies for solving collision-free trajectory problems for mobile and manipulator robots // Int. J. Robot. Res. – 1984. – Vol. 3, No. 4. – P. 51–65.
- Hopcroft J. Reducing multiple object motion planning to graph searching / J. Hopcroft, G. Wilfong // SIAM J. Comput. – 1986. – Vol. 15, No. 3. – P. 768–785.
- Генерозов В.Л. Алгоритм планирования траектории манипулятора при наличии препятствий // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1984. – № 1. – С. 137–147.
- Гречановский Е.И. Метод планирования движений манипулятора при наличии препятствий / Е.И. Гречановский, И.Ш. Пинскер // Модели. Алгоритмы. Принятие решения. – М.: Наука, 1979. – С. 100–142.
- Булгаков А.Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление / А.Г. Булгаков, В.А. Воробьев. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. – 488 с.
- Ильин В.А. Вопросы теории управления роботами в условиях неполной информации о внешней среде / В.А. Ильин, А.М. Корилов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1982. – № 4. – С. 202.
- 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.
- Ильин В.А. Интеллектуальные роботы. Теория и алгоритмы. – Красноярск: САА, 1995. – 334 с.
- Горитов А.Н. Построение плана траектории промышленного робота в произвольных рабочих средах // Автоматизация и современные технологии. – 2001. – № 7. – С. 18–23.
- 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.
- Горитов А.Н. Моделирование манипуляционных робототехнических систем в условиях неполной информации о внешней среде. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы им. Е.В. Зуева СО РАН, 2005. – 275 с.
- Principles of robot motion: theory, algorithms and implementations / H. Choset, K.M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L.E. Kavraki, S. Thrun. – Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2005. – 603 p.
- Аксенов Г.С. Построение программных движений манипулятора при помощи ЭВМ / Г.С. Аксенов, Д.К. Воронцов, В.Н. Фомин // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1978. – № 4. – С. 50–55.
- Лизунов А.Б. Управление движением манипулятора с датчиком ближней локации вдоль контура предмета / А.Б. Лизунов, А.М. Формальский, А.Ю. Шнейдер // Автоматика и телемеханика. – 1987. – № 5. – С. 48–57.
- Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1979. – 576 с.
- Зенкевич С.Л. Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
- 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.
- Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithms // PhD thesis. – Italie: Politecnico di Milano, 1992. – 140 p.
- Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы: теория и практика // Программирование. – 2005. – Т. 31, № 4. – С. 3–18.
- Dorigo M. Ant Colony Optimization / M. Dorigo, T. Stützle. – Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2004. – 305 p.
- Макконелл Дж. Основы современных алгоритмов. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
- Mehlhorn K. Algorithms and Data Structures: The Basic Toolbox / K. Mehlhorn, P. Sanders. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 300 p.
- Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
- Zhang S. A novel ant colony optimization algorithm for the shortest-path problem in traffic networks / S. Zhang, X. Liu, M. Wang // Filomat. – 2018. – Vol. 32, No. 5. – P. 1619–1628.
- 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, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 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

Студент каф. АСУ ТУСУР
Ленина пр-т, д. 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 multi-link manipulator in an unknown environment based on ant colony optimization

Robotic manipulators are widely used in various fields of human activity. Accomplishment of many practically important tasks involves operation in an external environment containing objects that limit the workspace of a manipulator. These tasks are further complicated by the fact that number, position and dimensions of objects in an external environment are unknown. This data can only be acquired while making the trajectory plan.

In this paper, a motion planning algorithm for a multi-link manipulator based on ant colony optimization, that is represented in a metaheuristic framework applied to a wide class of graph problems, is proposed. The results obtained with the proposed algorithm with various sets of parameters are analyzed, and the recommendations on parameter selection for efficient solution of a planning problem are given based on analysis.

Keywords: robotic manipulator, trajectory planning, trajectory, unknown environment, obstacles, ant colony optimization.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-55-64

References

1. Canny J. *The complexity of robot motion planning*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1988. 195 p.
2. LaValle S.M. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2006. 1023 p.
3. Donald B.R. On motion planning with six degrees of freedom: Solving the intersection problems in configuration space. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1985, vol. 2, pp. 536–541.
4. Shin K., McKay N. Automatic generation of trajectory planners for industrial robots. *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. and Autom.*, 1986, vol. 3, pp. 260–266.
5. Pronin A.S. *Postroeniye programmnykh trayektorij dvizheniya manipulyatora v srede s prepyatstviyami* [Construction of programmed motion trajectories for a manipulator in a scene containing obstacles] *Autonomous robots and pattern recognition*, Kyiv, Cybernetics Institute, The Academy of Sciences of the UkrSSR, 1986, pp. 11–20 (in Russ.)
6. Gouzenes L. Strategies for solving collision-free trajectory problems for mobile and manipulator robots. *Int. J. Robot. Res.*, 1984, vol. 3, № 4, pp. 51–65.
7. Hoperoft J., Wilfong G. Reducing multiple object motion planning to graph searching. *SIAM J. Comput.*, 1986, vol. 15, no. 3, pp. 768–785.
8. 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.)
9. Grechanovskiy Ye.I., Pinsker I.Sh. *Metody planirovaniya dvizhenij manipulyatora pri nalichii prepyatstvij* [Methods for planning motions of a manipulator in the presence of obstacles]. *Models. Algorithms. Decision making*, Moscow, Science, 1979, pp. 100–142 (in Russ.)
10. Bulgakov A.G., Vorobiev V. A. *Promyshlennye roboty. Kinematika, dinamika, kontrol' i upravleniye* [Industrial robots. Kinematics, dynamics, monitoring and control]. Moscow, SOLON-PRESS, 2007. 488 p. (in Russ.)
11. Ilyin V.A., Korikov A.M. *Voprosy teorii upravleniya robotami v usloviyakh nepolnoj informatsii o vneshnej 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.)
12. 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 telemechanics*, 1983, no. 4, pp. 29–40 (in Russ.)
13. Ilyin V.A. *Intellektual'nye roboty. Teoriya i algoritmy* [Intelligent robots. Theory and Algorithms]. Krasnoyarsk, CAA, 1995, 334 p. (in Russ.)
14. 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.)
15. 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.)
16. Goritov A.N. *Modelirovaniye manipulyatsionnykh robototekhnicheskikh sistem v usloviyakh nepolnoi informatsii o srede* [Simulation of robotic manipulator systems given limited information about the scene]. Tomsk, V.E. Zuev Institute of Atmosphere Optics SO RAN Publ., 2005. 275 p. (in Russ.)
17. Choset H., Lynch K.M., Hutchinson S., Kantor G., Burgard W., Kavraki L.E., Thrun S. *Principles of robot motion: theory, algorithms and implementations*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2005. 603 p.
18. Aksyonov G.S., Voronetskaya D.K., Fomin V.N. *Postroeniye programmnykh dvizhenij manipulyatora pri pomoschi EVM* [Construction of programmed motions for a manipulator using a computer]. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Technical Cybernetics*, 1978, no. 4, pp. 50–55 (in Russ.)
19. Lizunov A.B., Formal'skiy A.M., Schneider A.Yu. *Upravleniye dvizheniyem manipulyatora s datchikom blizhej lokatsii vdol' kontura predmeta* [Control of motion of a manipulator with proximity sensor along the silhouette of an obstacle]. *Automatics and telemechanics*, 1987, no. 5, pp. 48–57 (in Russ.)
20. Levitskiy N.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow, Science, 1979. 576 p. (in Russ.)
21. Zenkevitch S.L., Yuschenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* [Basics of control of robotic manipulators]. Moscow, Publishing House of Moscow State Technical University. N.E. Bauman, 2004. 480 p. (in Russ.)
22. 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.)
23. Dorigo M. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. PhD thesis. Italie, Politecnico di Milano, 1992. 140 p.
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. Dorigo M., Stützle T. *Ant Colony Optimization*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2004. 305 p.
26. McConnell J. *Osnovy sovremennykh algoritmov* [Analysis of Algorithms: An Active Learning Approach], 2nd ed., Moscow, Technosphere, 2004. 368 p. (in Russ.)

27. Mehlhorn K., Sanders P. *Algorithms and Data Structures: The Basic Toolbox*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008. 300 p.

28. Verzhbitsky V.M. *Osnovy tschislennykh metodov* [Fundamentals of numerical methods]. Moscow, High School, 2002. 840 p. (in Russ.)

29. Zhang S., Liu X., Wang M. A novel ant colony optimization algorithm for the shortest-path problem in traffic networks. *Filomat*, 2018, vol. 32, no. 5, pp. 1619–1628.

30. 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 Engineering Sciences, 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

Student Department of Automated Control Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-112-41-25
Email: roadto3kmmr@gmail.com