

УДК 681.5.015

В.О. Антонов, аспирант, Институт информационных технологий и телекоммуникаций СКФУ (Ставрополь, Россия) (e-mail: ant.vl.02@gmail.com)

АНАЛИЗ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ МЕТОДА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ АНТРОПОМОРФНОГО МАНИПУЛЯТОРА

Энергоэффективность является актуальной проблемой современности, в том числе и в области робототехники. Существующие методы планирования траектории движения манипуляторов с избыточной подвижностью сталкиваются с рядом проблем, одной из которых является невозможность работы в режиме реального времени из-за высокой сложности алгоритма планирования. А существующие алгоритмы, работающие в режиме реального времени, существенно уступают в вычислительной сложности либо энергоэффективности при выполнении целевых операций. Поэтому, ранее, в статьях автора, был разработан итеративный метод кусочно-линейной генерации траектории движения манипулятора.

В данной статье проведен анализ вычислительной сложности метода итеративной кусочно-линейной генерации траектории движения трехзвенного антропоморфного манипулятора с 7-ю степенями подвижности в объемном пространстве с препятствием, аппроксимируемым гиперсферой, в режиме реального времени.

Приведено короткое описание предложенного метода планирования траектории движения. Для передвижения между точками пути используется представление Денавита-Хартенберга с постановкой и решением задачи нелинейной оптимизации с целевой функцией минимизации энергопотребления при перемещении манипулятора в целевую точку.

Описан исходный обобщенный алгоритм метода планирования пути. Рассмотрено количество операций, которые необходимо выполнить в процессе исполнения рекурсивного алгоритма. Распараллеливание ветвящегося рекурсивного алгоритма позволяет свести время его исполнения ко времени выполнения неветвящегося рекурсивного алгоритма с той же вычислительной сложностью и глубиной. Разработана формула, позволяющая подобрать значения переменных параметров алгоритма исходя из доступной вычислительной мощности и допустимым временем расчета, а также определить требования к вычислительной системе манипулятора на стадии разработки. Проведено сравнение с аналогами.

Ключевые слова: антропоморфный манипулятор; планирование траектории движения манипулятора; вычислительная сложность; энергоэффективность.

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-3-13-28

Ссылка для цитирования: Антонов В.О. Анализ вычислительной сложности метода энергоэффективной генерации траектории движения антропоморфного манипулятора // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 3(78). С. 13-28.

Введение

Современные автономные антропоморфные роботы сталкиваются с рядом проблем, одной из которых является невысокая продолжительность их работы. Данный вид роботов предназначен для действия в условиях, опасных для жизни человека — в космосе, под водой или в условиях повышенной радиации, для выполнения нерегулярных операций — спасательные операции, сервис космической техники, оборудования атомных объек-

тов, исследовательские миссии и др. Выполнение основных целевых операций данных роботов производится исполнительными устройствами — антропоморфными манипуляторами (АМ).

Энергопотребление манипуляторов прямо пропорционально зависит от пути его перемещения, поэтому применение методов энергоэффективного планирования пути позволит увеличить длительность работы и времени полезного использования робота (реже приходится тратить время на подзарядку или смену

энергетического элемента), а также срока службы батареи (ограниченного количеством циклов заряда/разряда).

Исходя из специфики применения автономных роботов, обязательным условием применения методов планирования пути является работа в режиме реального времени, что сужает спектр применимых методов до методов поиска пути, заключающихся в следующем – если манипулятор встречает препятствие, он выполняет его обход в ту или иную сторону.

Существует множество эффективных, но имеющих высокую вычислительную сложность методов планирования пути манипулятора. В литературе широко освещены два подхода к планированию траектории [1] – подход на основе теории графов, а также сплайновая интерполяция. Первый подход сопряжен с большой вычислительной сложностью, а второй – со сложностью выбора опорных точек, излишним движением при их малом числе, и сложностью вычислений при большом.

Планирование траектории движения избыточных манипуляторов на основе эволюционных подходов рассмотрено в работах [2-7]. Предлагаемые решения нацелены на получение точного решения как в офлайн режиме, так и в режиме реального времени, но при этом не учитывают энергопотребление двигателей манипулятора при перемещении.

Методы построения траектории движения манипулятора на основе обучения естественным движениям руки человека представлены в работах [8-9]. При этом возникают проблемы с вычислительной сложностью предлагаемых решений, а естественная оптимизация движения руки человека не отвечает требованиям выполнения операции с минимальными энергозатратами.

Численные методы решения задачи планирования траектории представлены в работах [10-13]. Выполнение процедур генерации траектории в данных работах обладает высокой вычислительной сложностью, что требует высокой производительности вычислительной системы.

Исходя из этого является актуальной задача разработки энергоэффективных методов планирования пути для манипуляторов, работающих в режиме реального времени или близкого к нему.

Авторами ранее был разработан метод планирования пути для материальной точки на основе итеративной генерации кусочно-линейной траектории [14], а также выполнена его адаптация для планирования энергоэффективного пути перемещения АМ [15]. Предложенный метод имеет модульную структуру, и различные блоки могут безболезненно изменяться для применения в конкретных условиях.

В данной статье производится анализ вычислительной сложности разработанного алгоритма планирования пути АМ с учетом минимизации энергопотребления [14-15], а также его оптимизация для применения в системах, работающих в режиме реального времени.

2. Постановка задачи

Типовая схема трехзвенного антропоморфного манипулятора с 7-ю степенями подвижности представлена на рисунке 1. В данной схеме введены следующие обозначения: $l_i, i = 1, \dots, 3$ – длины звеньев манипулятора M ; A, B, C – плечевое, локтевое, лучезапястное и кистевое сочленения АМ соответственно; D – рабочее окончание манипулятора; $\alpha_A, \beta_A, \gamma_A, \alpha_B, \alpha_C, \beta_C, \gamma_C$ – углы Эйлера для двигателей в соответствующих сочленениях.

Минимизация энергопотребления при планировании траектории движения манипулятора будет выполняться при условии минимизации суммы произведений углов поворота двигателя на их энергопотребление при перемещении.

$$f(\alpha_A, \beta_A, \gamma_A, \alpha_B, \beta_B, \gamma_B, \alpha_C, \beta_C, \gamma_C) = |\alpha_A - \alpha_{A0}| * k_{\alpha A} + |\beta_A - \beta_{A0}| * k_{\beta A} + |\gamma_A - \gamma_{A0}| * k_{\gamma A} + |\alpha_B - \alpha_{B0}| * k_{\alpha B} + |\beta_B - \beta_{B0}| * k_{\beta B} + |\gamma_B - \gamma_{B0}| * k_{\gamma B} + |\alpha_C - \alpha_{C0}| * k_{\alpha C} + |\beta_C - \beta_{C0}| * k_{\beta C} + |\gamma_C - \gamma_{C0}| * k_{\gamma C} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где k_i – средняя удельная мощность потребляемого электрического тока для изменения соответствующей -й присоединенной координаты;

$\alpha_{A0}, \beta_{A0}, \gamma_{A0}, \alpha_{B0}, \beta_{B0}, \gamma_{B0}, \alpha_{C0}, \beta_{C0}, \gamma_{C0}$ – значение присоединенных координат в начальном состоянии.

Данную задачу решает разработанный авторами метод итеративной кусочно-линейной генерации траектории дви-

жения для трехзвенного антропоморфного манипулятора с 7-ю степенями подвижности [14-15].

При этом для использования метода в режиме реального времени в данной статье проведена оценка его вычислительной сложности.

3. Метод планирования траектории движения АМ

Решение обратной задачи кинематики заключалось в поиске такого значения присоединенных координат $\alpha_A, \beta_A, \gamma_A, \alpha_B, \beta_B, \gamma_B, \alpha_C, \beta_C, \gamma_C$, при котором эффектор манипулятора окажется в целевой точке D .

Математическая модель задачи поиска углов Эйлера для двигателей манипулятора имеет вид: $\overrightarrow{AD} = A_A^0 A_B^A A_C^B * \overrightarrow{CD}$, где матрицы вида A_i^j представляют собой матрицы преобразований, полученный из представления Денавита-Хартенберга:

$$A_A^0 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_A) \cos(\gamma_A) - \sin(\alpha_A) \cos(\beta_A) \sin(\gamma_A) & -\cos(\alpha_A) \sin(\gamma_A) - \sin(\alpha_A) \cos(\beta_A) \cos(\gamma_A) & \sin(\alpha_A) \sin(\beta_A) & 0 \\ \sin(\alpha_A) \cos(\gamma_A) + \cos(\alpha_A) \cos(\beta_A) \sin(\gamma_A) & -\sin(\alpha_A) \sin(\gamma_A) + \cos(\alpha_A) \cos(\beta_A) \cos(\gamma_A) & -\cos(\alpha_A) \sin(\beta_A) & 0 \\ \sin(\beta_A) \sin(\gamma_A) & \sin(\beta_A) \cos(\gamma_A) & \cos(\beta_A) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_B^A = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_B) & -\sin(\gamma_B) & 0 & l_{AB} \\ \sin(\gamma_B) & \cos(\gamma_B) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_C^B = \begin{bmatrix} \cos(\beta_C) \cos(\gamma_C) & -\cos(\beta_C) \sin(\gamma_C) & \sin(\beta_C) & 0 \\ -\sin(\alpha_C) \sin(\beta_C) \cos(\gamma_C) + \cos(\alpha_C) \sin(\gamma_C) & \sin(\alpha_C) \sin(\beta_C) \sin(\gamma_C) + \cos(\alpha_C) \cos(\gamma_C) & -\sin(\alpha_C) \cos(\beta_C) & 0 \\ -\cos(\alpha_C) \sin(\beta_C) \cos(\gamma_C) + \sin(\alpha_C) \sin(\gamma_C) & \cos(\alpha_C) \sin(\beta_C) \sin(\gamma_C) + \sin(\alpha_C) \cos(\gamma_C) & -\cos(\alpha_C) \cos(\beta_C) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Решение обратной задачи кинематики также должно удовлетворять критерию минимума энергозатрат. Целевая функция энергозатрат может быть представлена в виде, заданном в формуле (1).

Для решения данной задачи в режиме реального времени с учетом минимизации энергопотребления в работе был разработан численный метод планирова-

ния траектории движения манипулятора в пространстве с препятствием на основе метода итеративной кусочно-линейной аппроксимации траектории движения точки в многомерном пространстве.

Схема метода итеративной кусочно-линейной аппроксимации траектории движения точки в многомерном пространстве представлена на рисунке 2.

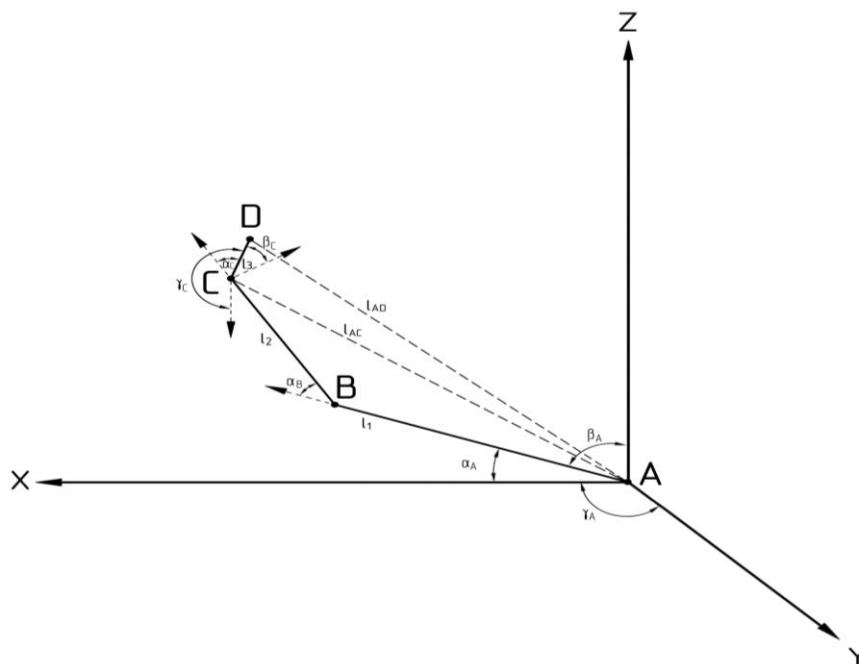


Рис. 1. Схема трехзвеного антропоморфного манипулятора с 7-ю степенями подвижности

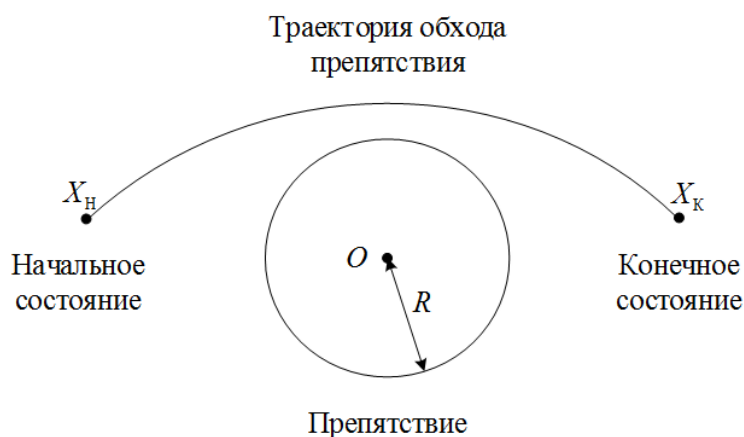


Рис. 2. Исходные данные задачи

Исходными данными являются значения координат точки в начальном и конечном состоянии, а также данные о препятствии:

$X_H = \{x_{1H}, x_{2H}, \dots, x_{nH}\}$, $X_K = \{x_{1K}, x_{2K}, \dots, x_{nK}\}$ – векторы значения координат в начальной и конечной точке; $(O = \{o_{1H}, o_{2H}, \dots, o_{nH}\}, R)$. – препятствие, аппроксимированное гиперсферой, заданное координатами её центра и радиусом.

Пример данной задачи приведен на рисунке 3.

На первой итерации проверяется возможность движения из начального положения в конечное по прямой, при этом предполагается, что все координаты изменяются линейно и достигают своего конечного значения одновременно.

В таком случае, все промежуточные точки данного движения могут быть получены в виде следующей линейной комбинации начального и конечного состояний:

$$X(\lambda) = \lambda \cdot X_H + (1 - \lambda) \cdot X_K, \lambda \in [0, 1]. \quad (5)$$

Обозначим функцию расстояния до препятствия как:

$$f(\lambda) = ||O - X(\lambda)||, \quad (6)$$

тогда критерий возможности движения по прямой может быть определен как:
 $\min_{\lambda \in [0,1]} f(\lambda) > R$.

Пример выполнения данного критерия приведен на рисунках 2, 4. В случае если критерий возможности движения по прямой не выполняется (рис. 5), находится промежуточное состояние с наименьшим расстоянием X_{Π} и вводится дополнительное состояние X_{Δ} , путем смещения точки X_{Π} в направлении вектора $\overrightarrow{OX_{\Pi}}$. Смещение выполняется на расстояние $R + h$ от центра препятствия, где h – параметр метода, влияющий на сложность траектории и зависящий от условий задачи.

После введения дополнительного состояния планирование траектории выполняется аналогичным образом уже для двух отрезков – $X_H X_{\Delta}$ и $X_{\Delta} X_K$. Влияние параметра h на плавность траектории представлено на рисунке 6.

Определение конечного состояния было проведено аналогично методу, приведенному ранее.



Рис. 3. Схема планирования движения точки

Минимальное расстояние от точек звена MN до центра сферы O вычисляется по формуле:

$$d = \begin{cases} |\overrightarrow{MO}|, & \text{если } \overrightarrow{MN} \cdot \overrightarrow{MO} \leq 0, \\ \frac{|\overrightarrow{MN} \times \overrightarrow{MO}|}{|\overrightarrow{MN}|}, & \text{если } \overrightarrow{MN} \cdot \overrightarrow{MO} > 0 \text{ и } \overrightarrow{MN} \cdot \overrightarrow{NO} < 0, \\ |\overrightarrow{NO}|, & \text{если } \overrightarrow{MN} \cdot \overrightarrow{NO} \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

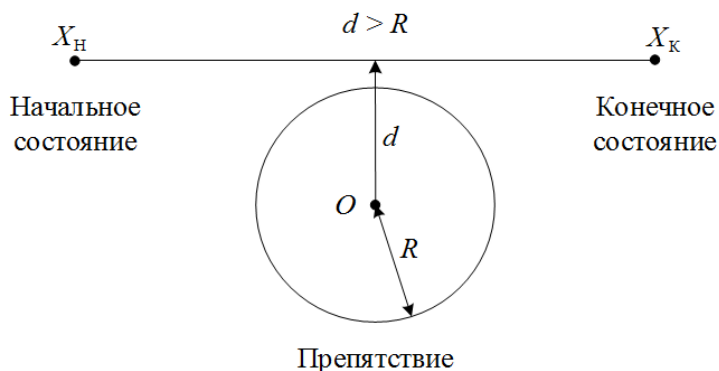


Рис. 4. Движение по прямой возможно

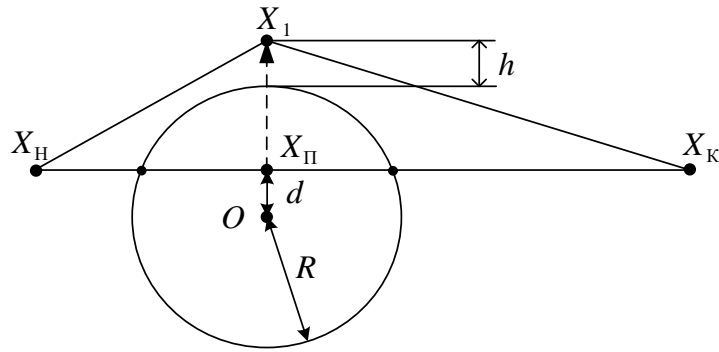
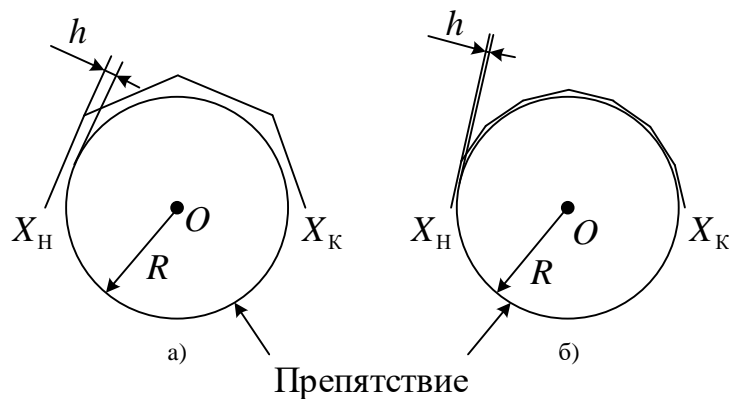


Рис. 5. Введение дополнительного состояния

Рис. 6. Влияние параметра h на плавность траектории: а – большее значение; б – меньшее значение

Приведенное ранее представление Денавита-Хартенберга позволяет получить зависимость декартовых координат сочленений манипулятора от присоединенных координат. На основе данных координат возможно определение минимального расстояния от манипулятора до центра препятствия. Алгоритм отклонения звеньев от препятствия представлен на рисунке 7. Чертеж к методу отклонения произвольного звена от препятствия приведен на рисунке 8.

Пусть изначально положение звена с наименьшим расстоянием до центра препятствия соответствует отрезку MN . Тогда, необходимо повернуть отрезок MN в плоскости OMN так относительно точки M так, чтобы он касался окружности с центром в точке O и радиусом $r + h$ в той же плоскости.

Обозначим точки касания как K_1 и K_2 . Их координаты могут быть найдены из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} (x - x_O)^2 + (y - y_O)^2 + (z - z_O)^2 = (r + h)^2, \\ (x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 + (z - z_M)^2 = R^2, \\ Ax + By + Cz + d = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $R^2 = \min[MN; MO^2 - (r + h)^2]$; $\{A; B; C\} = \overrightarrow{MO} \times \overrightarrow{MN}$ – направляющий вектор плоскости; $D = -A \cdot x_M - B \cdot y_M - C \cdot z_M$.

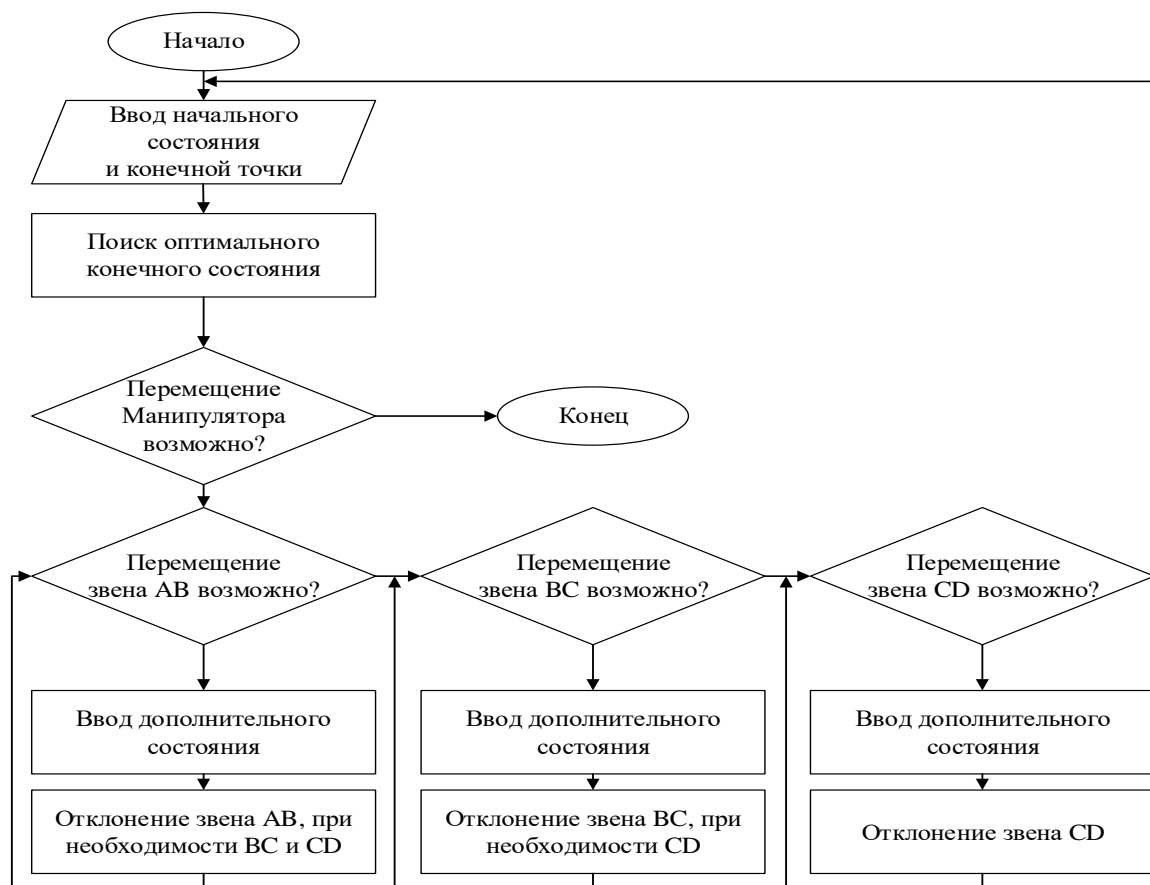


Рис. 7. Метод отклонения звеньев от препятствия

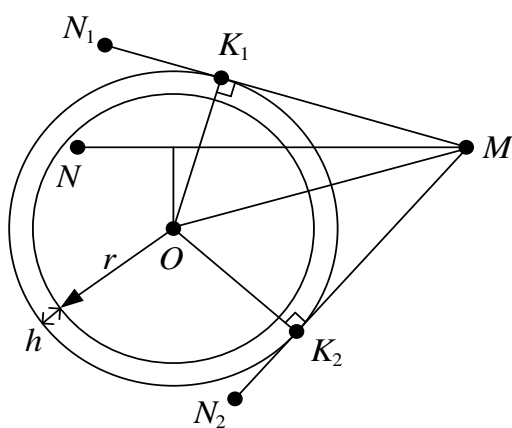


Рис. 8. Отклонение произвольного звена

Для нахождения ближайшей к звену MN касательной можно воспользоваться следующей формулой:

$$K = \begin{cases} K_1, \text{ если } \frac{|\overrightarrow{MK_1} \cdot \overrightarrow{MN}|}{|\overrightarrow{MK_1}|} \geq \frac{|\overrightarrow{MK_2} \cdot \overrightarrow{MN}|}{|\overrightarrow{MK_2}|}, \\ K_2, \text{ если } \frac{|\overrightarrow{MK_1} \cdot \overrightarrow{MN}|}{|\overrightarrow{MK_1}|} < \frac{|\overrightarrow{MK_2} \cdot \overrightarrow{MN}|}{|\overrightarrow{MK_2}|}. \end{cases} \quad (9)$$

А затем отложить вдоль неё отрезок длины MN :

$$\overrightarrow{MN'} = \frac{\overrightarrow{MK} \cdot |\overrightarrow{MN}|}{|\overrightarrow{MK}|}, \quad (10)$$

где $\overrightarrow{MN'}$ – искомый вектор отклоненного положения.

4. Анализ вычислительной сложности предлагаемого метода

Исходный обобщенный алгоритм метода приведен на рисунках 9 и 10.

Оценим время выполнения программы, реализующей данный алгоритм и выполняемой в одном потоке.

Блоки алгоритма, обозначающие ввод и вывод данных, включение глобального начального состояния в траекторию и инициализацию рекурсивного алгоритма, имеют константную сложность. Обозначим суммарное количество операций данных блоков как n_1 .



Рис. 9. Исходный обобщенный алгоритм метода планирования пути

Вычисление глобального конечного состояния является оптимизационной задачей, решаемой методом обобщенного приведенного градиента на 64 подпространствах. Обозначим количество выполненных операций в отдельной оптимизационной задаче как функцию от координат – $f(x)$, а максимальную глубину ветвящейся рекурсии как n_2 . Тогда коли-

чество операций, которые необходимо выполнить в процессе перерасчета глобального состояния составит $64 \cdot n_2 \cdot f(x)$.

Наихудший случай представляет задача планирования пути, когда начальная и конечная точка находятся на сфере препятствия и диаметрально противоположны.

Количество отрезков пути определяется используемым в методе параметром h . Для наихудшего случая, приведенного на рисунке 2, угловые размеры одного отрезка пути составляют:

$$\varphi = 2 \arccos\left(\frac{r}{r+h}\right), \quad (11)$$

где r – радиус сферы препятствия.

Тогда их общее количество может быть найдено по формуле (12), а глубина рекурсии – по формуле (13), а количество итераций по формуле (14):

$$n_3 = \frac{\pi}{\varphi}. \quad (12)$$

$$n_2 = \log_2 n_3 + 1. \quad (13)$$

$$n_4 = 2^{n_2} - 1 = 2^{\frac{\pi}{\varphi}} - 1. \quad (14)$$

Энергоэффективность обратно пропорциональна величине параметра h , однако, как следует из формулы, при его стремлении к нулю, глубина рекурсии может достигать больших значений, что означает невозможность выполнения всего рекурсивного алгоритма за один период планирования траектории. Таким образом выбор значения h должен определяться доступной вычислительной мощностью и допустимым временем расчета.

На отдельной итерации рекурсивного алгоритма выполняется ряд операций с общей константной сложностью, а также трижды выполняется одномерная оптимизация.

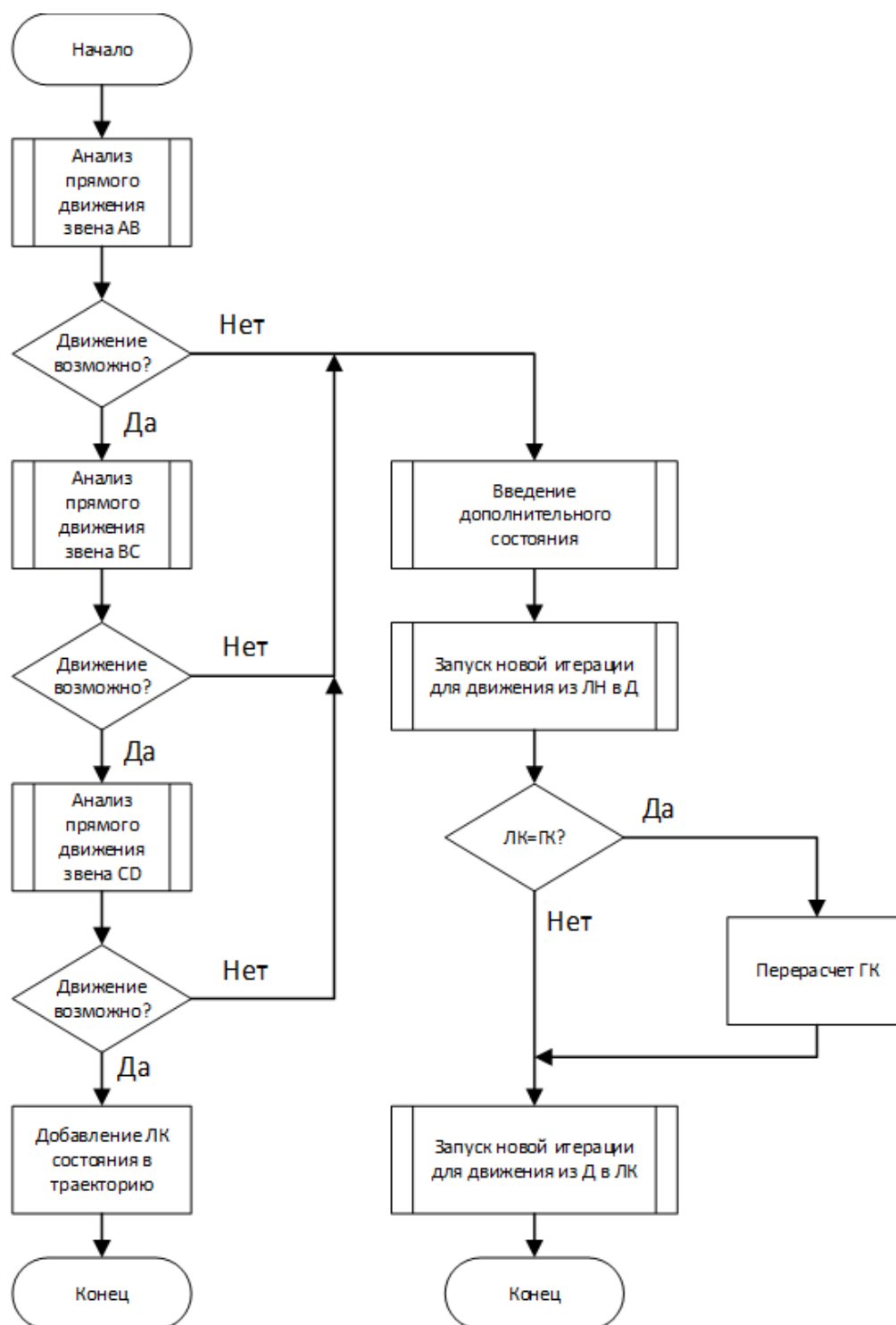


Рис. 10. Рекурсивный алгоритм

Пусть количество единожды выполняемых операций составляет n_5 , а операций в одной итерации одномерного поиска – n_6 . Тогда общее количество операций в одной итерации рекурсивного алгоритма составит:

$$n_7 = n_5 + n_6 \cdot \log_2 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right), \quad (15)$$

где ε – выбранное значение относительной точности нахождения наихудшей точки траектории.

С целью определения сложности вычислений будем рассматривать нетривиальные случаи, когда количество отрезков пути достаточно велико. Тогда общее ко-

личество операций алгоритма, приведенного на рисунке 9, пренебрегая членами с константной сложностью составит:

$$\begin{aligned} N_1 &= n_1 + 64 \cdot n_2 \cdot f(x) + n_3 \left(n_5 + n_6 \cdot \log_2 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \right) = \\ &= n_1 + 64 \cdot \log_2 \left(\frac{\pi}{2 \arccos \left(\frac{r}{r+h} \right)} \right) \cdot f(x) + \\ &+ \left(2 \frac{\pi}{2 \arccos \left(\frac{r}{r+h} \right)} - 1 \right) \left(n_5 + n_6 \cdot \log_2 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \right) \approx \\ &\approx 64 \cdot \log_2 \left(\frac{\pi}{2 \arccos \left(\frac{r}{r+h} \right)} \right) \cdot f(x) + 2 \frac{\pi}{2 \arccos \left(\frac{r}{r+h} \right)} \cdot n_6 \cdot \log_2 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Как следует из формулы, количество операций N_1 является функцией от параметров h и ε , варьирование которых позволяет добиться необходимого компромисса между сложностью вычислений и энергоэффективностью.

Однако в формуле (16) присутствует слабо контролируемая компонента $f(x)$. Так же время исполнения алгоритма можно уменьшить за счет применения параллельных вычислений на графическом процессоре. Поэтому предлагается использовать следующий оптимизированный вариант исполнения алгоритма.

Распараллеливание ветвящегося рекурсивного алгоритма позволит свести время его исполнения ко времени выполнения неветвящегося рекурсивного алгоритма с той же вычислительной сложностью и глубиной. Здесь и далее накладные расходы на работу с параллельными потоками считаются несущественными вследствие их относительной малости при расчете нетривиальных путей.

Применение параллельных потоков при решении оптимизационной задачи поиска конечного состояния позволит в

64 раза уменьшить первое слагаемое в конечном виде формулы (16).

Таким образом время выполнения программы эквивалентно времени выполнения следующего количества операций:

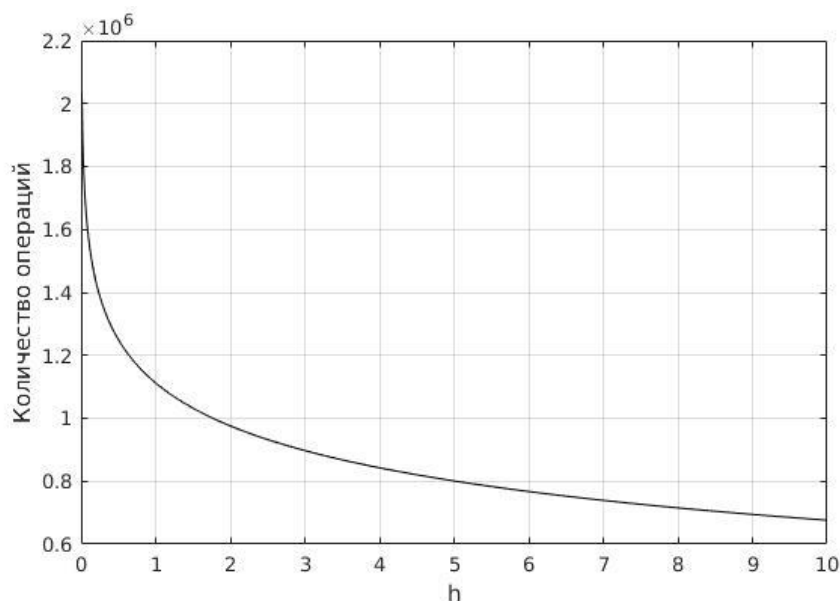
$$N_2 \approx n_6 \log_2 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \left[\log_2 \left(\frac{\pi}{2 \arccos \left(\frac{r}{r+h} \right)} \right) + 1 \right]. \quad (17)$$

В программной реализации, разработанной автором, количество операций n_6 составляет примерно $42 \cdot 10^3$ операций.

5. Численное моделирование и сравнение вычислительной сложности метода с аналогами

Данная формула позволяет подобрать значения параметров ε и h исходя из доступной вычислительной мощности и допустимым временем расчета, а также определить требования к вычислительной системе манипулятора на стадии разработки.

Значение точности ε , достаточное для практического применения, составляет примерно 0,01. Численное моделирование количества операций, в зависимости от параметра h для типового размера препятствия 50 см приведено на рисунке 11.

Рис. 11. Зависимость количества операций от параметра h

Для практического применения приемлемым значением h является значение 1 см, таким образом для планирования пути с помощью разработанного алгоритма необходимо выполнить порядка $1,1 \cdot 10^6$ операций, в то время как стандартный стационарный компьютер способен выполнять порядка $3 \cdot 10^{11}$ операций в секунду, что позволяет использовать разработанный метод для работы в режиме реального времени.

Для сравнения разработанного метода с другими необходимо провести сравнительный анализ вычислительной сложности.

В литературе слабо освещён данный вопрос, авторы методов планирования пути не приводят результаты анализа вычислительной сложности, либо приводят время выполнения программы [16], что является не совсем корректным, так как сильно зависит от вычислительной мощности платформы. Информация, которую удалось собрать, содержит только асимптотическую сложность, однако этих данных достаточно для сравнения.

Нейросетевые и графо-аналитические методы базируются на построении дорожной карты. Для графо-аналитиче-

ских методов усовершенствованным вариантом является применение диаграмм Вороного [17]. Согласно приведённым в [18] данным, класс сложности методов, базирующихся на составлении дорожной карты, составляет $O(n^2)$, а на диаграмме Вороного – $O(n \cdot \lg(n))$, где n – количество узлов рассматриваемой сетки. Сетка в данном случае представляет собой многомерную дискретную сетку обобщённых координат манипулятора. Приблизительно примем, что для каждой обобщённой координаты разрешение одинаково и равно N . В таком случае количество узлов сетки составляет N^k , где k – количество степеней подвижности. Для рассматриваемого манипулятора $k = 7$.

Исходя из приведенных рассуждений можно построить график необходимого количества операций в зависимости от разрешающей способности N , с точностью до множителя (зависящего от конкретной программной реализации и неизвестного, вследствие отсутствия информации в открытых источниках).

Результаты численного моделирования приведены на рисунках 12 и 13.

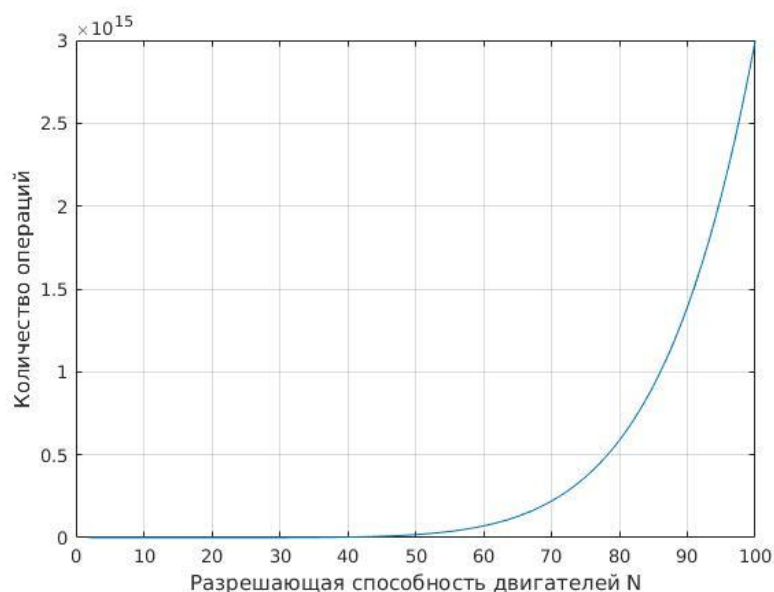


Рис. 12. Количество операций для методов на основе диаграммы Вороного

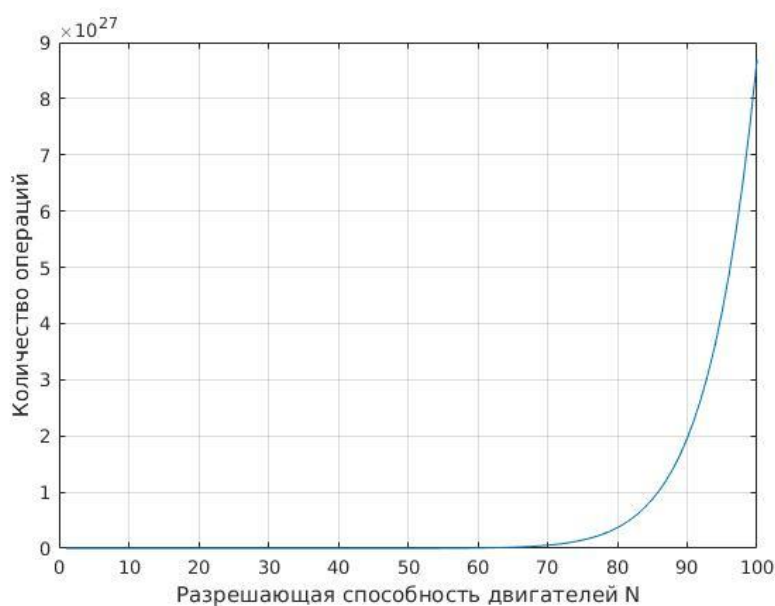


Рис. 13. Количество операций для методов на основе дорожной карты

Как следует из приведенных графиков, несмотря на неизвестность постоянных множителей, количество операций даже для разрешающей способности $N = 100$ (точность позиционирования в двигателях порядка 1°) составляет для методов на основе диаграммы Вороного порядка 3×10^{15} операций, а для методов на основе дорожной карты – порядка

8×10^{27} , что превышает допустимые пределы для работы в режиме реального времени.

6. Обсуждение результатов

Анализ вычислительной сложности предлагаемого метода показал, что для планирования пути АМ необходимо выполнить порядка $1,1 \times 10^6$ операций, в то

время как стандартный стационарный компьютер способен выполнять порядка $3 \cdot 10^{11}$ операций в секунду, что позволяет использовать разработанный метод для работы в режиме реального времени. Сравнение с аналогами показывает, что на примере методов на основе диаграммы Вороного и методов на основе дорожной карты необходимо выполнять порядка $3 \cdot 10^{15}$ и $8 \cdot 10^{27}$ операций соответственно, что составляет порядка 1-3 секунд задержки на современном стационарном компьютере

Выводы

В данной статье проведен анализ вычислительной сложности энергоэффективного метода итеративной кусочно-линейной генерации траектории движения трехзвенного антропоморфного манипулятора с 7-ю степенями подвижности в рабочей зоне с препятствием, аппроксимированным гиперсферой. Данный метод планируется использовать при управлении антропоморфными манипуляторами автономных мобильных роботов. Для этого предлагаемый метод должен выполняться в режиме реального времени.

Проведенный анализ вычислительной сложности показал, что при наихудшем сценарии планирования пути вычислительная сложность метода составляет порядка $1,1 \cdot 10^6$ операций. Современная вычислительная система способна выполнять данные операции, тратя при этом менее половины своей вычислительной мощности. Сравнение метода с аналогами показывает существенное преимущество вычислительной сложности предлагаемого метода.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности применения разработанного метода энергоэффективного планирования траектории движения антропоморфного манипулятора в рабочей зоне с препятствием в режиме реального времени.

Список литературы

1. Погорелов А. Д. Обзор алгоритмов планирования траектории движения манипуляторов // Молодежный научно-технический вестник. 2016. №. 8. С. 2-2.
2. Kamilyanov A. R. Planning of the trajectories of the movement of the multi-link manipulator in a complex three-dimensional working space on the basis of the evolutionary methods. Ph. D. Tesis. Ufa, 2007. 108 p.
3. Lin H. I. A fast and unified method to find a minimum-jerk robot joint trajectory using particle swarm optimization. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2014, vol. 75, no. 3-4, pp. 379-392.
4. Qi R., Zhou W., Wang T. An obstacle avoidance trajectory planning scheme for space manipulators based on genetic algorithm. Jiqiren/Robot, 2014, vol. 36, no. 3, pp. 263-270.
5. Xidias E. K. Time-optimal trajectory planning for hyper-redundant manipulators in 3D workspaces. Robotics and computer-integrated manufacturing, 2018, no. 50, pp. 286-298.
6. Menon M. S., Ravi V. C., Ghosal A. Trajectory Planning and Obstacle Avoidance for Hyper-Redundant Serial Robots. Journal of mechanisms and robotics-transactions of the ASME, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 1-12.
7. Abu-Dakka F. J., Valero F. J., Suner J. L., Mata V. A direct approach to solving

trajectory planning problems using genetic algorithms with dynamics in complex environments. *Robotica*, 2015, vol. 33, no. 3, pp. 669-683.

8. Liu W., Chen D., Zhang L. Trajectory generation and adjustment method for robot manipulators in human-robot collaboration. *Jiqiren Robot*, 2016, vol. 38, no. 4, pp. 504-512.

9. Ren Z. W., Zhu Q. G., Xiong, R. Trajectory planning of 7-DOF humanoid manipulator under rapid and continuous reaction and obstacle avoidance environment. *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, 2015, vol. 41, no. 6, pp. 1131-1144.

10. Howard T., Pivtoraiko M., Knepper R. A., Kelly A. Model-predictive motion planning. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 64-73.

11. Chen Y. J., Ju M. Y., Hwang K. S. A virtual torque-based approach to kinematic control of redundant manipulators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 2, pp. 1728-1736.

12. Pham C. D., Coutinho F., Lizarralde F., Hsu L., From P. J. An analytical approach to operational space control of robotic manipulators with kinematic constraints. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2014, vol. 19, pp. 8509-8515.

13. Simba K. R., Uchiyama N., Aldibaja M., Sano S. Vision-based smooth obstacle avoidance motion trajectory generation for autonomous mobile robots using Bézier curves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, vol. 231, no. 3, pp. 541-554.

14. Метод планирования траектории движения точки в пространстве с препят-

ствием на основе итеративной кусочно-линейной аппроксимации / В.О. Антонов, М.М. Гурчинский, В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 168-182. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/09-Antonov.pdf>

15. Метод планирования оптимальной траектории движения трехзвеного манипулятора в рабочей зоне с препятствием / В.И. Петренко, Ф.Б. Тебуева, В.О. Антонов, М.М. Гурчинский // Вестник Дагестанского государственного технического университета. 2018. №1. Т. 45. С. 68-87.

16. Кожевников М.М., Пашкевич А.П., Чумаков О. А. Планирование траекторий промышленных роботов-манипуляторов на основе нейронных сетей // Доклады БГУИР. 2010. №4 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/planirova-nietrektoriy-promyshlennyh-robotov-manipulyatorov-na-osnove-neyronnyh-setey> (дата обращения: 21.04.2018).

17. Соловьев В. В., Шаповалов И. О., Шадрин В. В. Планирование траектории подвижного объекта с применением диаграммы Вороного // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №2 (163). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-traektorii-podvizh-nogo-obekta-s-primeneniem-diagrammy-voronogo> (дата обращения: 11.04.2018).

18. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пшихова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 304 с.

Поступила в редакцию 14.05.18

UDC 681.5.015

V.O. Antonov, Post-Graduate Student, Training at the Institute of Information Technologies and Telecommunications of NCFU (Stavropol, Russia) (e-mail: ant.vl.02@gmail.com)

ANALYSIS OF THE COMPUTATIONAL COMPLEXITY OF THE METHOD OF ITERATIVE DIMENSIONAL-LINEAR GENERATION OF THE TRAJECTORY OF MOTION OF THE THREE-LINE ANTHROPOMORPHIC MANIPULATOR IN THE VOLUME SPACE WITH OBSTRUCTION

Energy efficiency is an actual problem of the present, including in the field of robotics. Existing methods for planning the trajectory of motion of manipulators with excessive mobility face a number of problems, one of which is the impossibility of working in real time mode due to the high complexity of the scheduling algorithm. Moreover, the existing algorithms that work in real time are significantly inferior to the accuracy of the target operations. Therefore, earlier, in the author's articles, an iterative method of piecewise linear generation of the manipulator's trajectory was developed.

In this paper, we analyze the computational complexity of the numerical method of iterative piecewise linear generation of the trajectory of a three-link anthropomorphic manipulator with 7 degrees of mobility in a volume space with an obstacle, an approximated hypersphere, in real time.

A short description of the proposed method of planning the trajectory of motion is given. To move between the waypoints, the Denavite-Hartenberg representation used, with the formulation and solution of the problem of nonlinear optimization with the objective function of minimizing energy consumption when the manipulator moved to the target point.

The initial generalized algorithm of the path planning method described. The number of operations that must be performed in the process of execution of a recursive algorithm is considered. Parallelizing the branching recursive algorithm allows you to reduce the execution time to the time of executing a non-branching recursive algorithm with the same computational complexity and depth. A formula developed that allows you to select the values of variable parameters of the algorithm based on the available computational power and the allowable calculation time, and to determine the requirements for the manipulator computer system at the development stage.

Key words: anthropomorphic manipulator; planning of the manipulator's trajectory; analysis of computational complexity; energy efficiency.

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-3-13-28

For citation: Antonov V.O. Analysis of the Computational Complexity of the Method of Iterative Dimensional-Linear Generation of the Trajectory of Motion of the Three-Line Anthropomorphic Manipulator in the Volume Space With Obstruction. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 3(78), pp. 13-28 (in Russ.).

Reference

1. Pogorelov A. D. Obzor algoritmov planirovanija traektorii dvizhenija manipulatorov. Molodezhnyj nauchno-tehnicheskij vestnik, 2016, no. 8, pp. 2-2.

2. Kamilyanov A. R. Planning of the trajectories of the movement of the multi-link manipulator in a complex three-dimensional working space on the basis of the evolutionary methods. Ph. D. Tesis. Ufa, 2007, 108 p.

3. Lin H. I. A fast and unified method to find a minimum-jerk robot joint trajectory using particle swarm optimization. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory

and Applications, 2014, vol. 75, no. 3-4, pp. 379-392.

4. Qi R., Zhou W., Wang T. An obstacle avoidance trajectory planning scheme for space manipulators based on genetic algorithm. Jiqiren/Robot, 2014, vol. 36, no. 3, pp. 263-270.

5. Xidias E. K. Time-optimal trajectory planning for hyper-redundant manipulators in 3D workspaces. Robotics and computer-integrated manufacturing, 2018, no. 50, pp. 286-298.

6. Menon M. S., Ravi V. C., Ghosal A. Trajectory Planning and Obstacle Avoidance for Hyper-Redundant Serial Robots. Journal

of mechanisms and robotics-transactions of the ASME, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 1-12.

7. Abu-Dakka F. J., Valero F. J., Suner J. L., Mata V. A direct approach to solving trajectory planning problems using genetic algorithms with dynamics in complex environments. *Robotica*, 2015, vol. 33, no. 3, pp. 669-683.

8. Liu W., Chen D., Zhang L. Trajectory generation and adjustment method for robot manipulators in human-robot collaboration. *Jiqiren Robot*, 2016, vol. 38, no. 4, pp. 504-512.

9. Ren Z. W., Zhu Q. G., Xiong, R. Trajectory planning of 7-DOF humanoid manipulator under rapid and continuous reaction and obstacle avoidance environment. *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, 2015, vol. 41, no. 6, pp. 1131-1144.

10. Howard T., Pivtoraiko M., Knepper R. A., Kelly A. Model-predictive motion planning. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 64-73.

11. Chen Y. J., Ju M. Y., Hwang K. S. A virtual torque-based approach to kinematic control of redundant manipulators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 2, pp. 1728-1736.

12. Pham C. D., Coutinho F., Lizarralde F., Hsu L., From P. J. An analytical approach to operational space control of robotic manipulators with kinematic constraints. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2014, vol. 19, pp. 8509-8515.

13. Simba K. R., Uchiyama N., Aldibaja M., Sano S. Vision-based smooth obstacle avoidance motion trajectory generation for autonomous mobile robots using Bézier curves. *Proceedings of the Institution of Me-*

chanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, vol. 231, no. 3, pp. 541-554.

14. Antonov V.O., Gurchinskij M. M., Petrenko V. I., Tebueva F. B. Metod planirovaniya traektorii dvizheniya tochki v prostranstve s prepjatstviem na osnove iterativnoj kusochno-linejnoj approksimacii. *Sistemy upravleniya, svjazi i bezopasnosti*, 2018, no. 1, pp. 168-182. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/09-Antonov.pdf>

15. Petrenko V.I., Tebueva F.B., Antonov V.O., Gurchinskij M.M. Metod planirovaniya optimal'noj traektorii dvizheniya trehzvennogo manipuljatora v rabochej zone s prepjatstviem. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2018, no.1, vol. 45, pp. 68-87.

16. Kozhevnikov M. M., Pashke A. P. -vich, Chumakov O. A. Planirovanie traektorij promyshlennyh robotov-manipuljatorov na osnove nejronnyh setej. *Doklady BGUIR*, 2010, no.4 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-traektoriy-promyshlennyh-robotov-manipulyatorov-na-osnove-neyronnyh-setey> (data obrashhenija: 21.04.2018).

17. Solov'ev V. V., Shapovalov I. O., Shadrina V. V. Planirovanie traektorii podvizhnogo ob#ekta s primeneniem diagrammy Voronogo. *Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki*, 2015, no.2 (163). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-traektorii-podvizhnogo-obekta-s-pri-meneniem-diagrammy-voronogo> (data obra-shenija: 11.04.2018).

18. Intellektual'noe planirovanie traektorij podvizhnyh ob#ektov v sredah s prepjatstvijami; ed. by Pshihopov V.H.. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2015. 304 p.