На правах рукописи

the

НЕФЕДОВ ДМИТРИЙ ИГОРЕВИЧ

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ РАЗРЕШЕННЫХ КОНФИГУРАЦИЙ МАНИПУЛЯТОРОВ С ЦЕЛЬЮ ПОСТРОЕНИЯ ИХ ДВИЖЕНИЙ В СЛОЖНООРГАНИЗОВАННЫХ СРЕДАХ

05.01.01 – Инженерная геометрия и компьютерная графика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Омск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет».

Научный руководитель Притыкин Федор Николаевич

доктор технических наук, профессор доцент, «Инженерная кафедры геометрия CAIIP» И Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

Афонин Вячеслав Леонидович

доктор технический наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук, лаборатория управления технологическими процессами и системами

Дубанов Александр Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита состоится «25» декабря 2020 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.178.15, созданного на базе ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» по адресу: 644050, г. Омск, Пр. Мира, д. 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» и на сайте <u>www.omgtu.ru</u>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу 644050, г. Омск, пр. Мира 11, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.178.15. Тел: (3812) 65-24-79. Е-mail: <u>dissov omgtu@omgtu.ru</u>

Автореферат разослан "____ 2020 г. Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.178.15, доктор технических наук, доцент

рия Варепо Л. Г.

2

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время роботы широко используются для выполнения самых разных задач. В промышленности и вне производства от роботов-манипуляторов требуется адаптация к меняющимся условиям внешней среды. На этапе предварительной оценки двигательных возможностей механизмов манипуляторов, участвующих в технологических используется компьютерное моделирование движений При процессах, моделировании необходимо решать задачу указанном связанную С сокращением времени расчета изменения обобщенных координат роботов и сокращением объема движения с учетом внешней среды позволяет обеспечить рост производительности процесса компьютерного как моделирования, так и реального робототехнического комплекса.

Выявление закономерностей строения рабочих зон манипуляторов и их областей разрешенных конфигураций, а также описание их с помощью геометрических объектов позволяет оптимизировать работу алгоритма построения движений манипуляторов, используемого при проектировании технологических процессов связанных с контролем, нанесением покрытий и сваркой изделий, и управлении ими.

Степень разработанности темы исследования:

базой Теоретической исследований В области геометрического моделирования и многомерной геометрии послужили работы отечественных и зарубежных ученых: К. И. Валькова, В. Я. Волкова, Г. С. Иванова, И. И. Котова, П. В. Филиппова, А. М. Тевлина, В. И. Якунина и др. В области пространственной геометрического моделирования задач кинематики механизмов и теории управления манипуляционными системами роботов проводили исследования С. Л. Зенкевич, А. А. Кобринский, А. И. Корендясев, В. В. Найханов, В. Е. Турлапов, К. В. Фролов, А. С. Ющенко и др.

Указанные ученые исследовали синтез движения манипуляторов по вектору скоростей, а также двигательную избыточность и способы ее преодоления. В работах проводился анализ разрешенных конфигураций, однако данные конфигурации были исследованы только лишь в локальной зоне в непосредственной близости от механизма манипулятора. Полностью все многообразие точек принадлежащих области разрешенных конфигураций в указанных работах не исследовалось.

Целью данной работы является сокращение времени вычислений и объема движения в приводах при проектировании технологических процессов с использованием робототехнических комплексов путем создания геометрических моделей и вычислительных алгоритмов, осуществляющих перенос выходного звена в целевые положения в сложноорганизованной среде.

Объект исследования: области разрешенных конфигураций (ОРК) в пространстве обобщенных координат для различных механизмов манипуляторов и запретных зон.

Предмет исследования: множества дискретных положений точек в многомерном пространстве обобщенных координат, задающих конфигурации манипулятора, не пересекающие запретные зоны.

Задачи исследования:

1. На основе геометрического компьютерного исследования положений точек, задающих разрешенные конфигурации различных механизмов манипуляторов в пространстве обобщенных координат (ПОК), разработать универсальные способы описания областей данных точек с помощью методов триангуляции и графа гиперкубов.

2. На основе информационных технологий разработать параметрический способ аналитического описания ОРК при различных положениях запретной зоны для случая движения плоского четырехзвенного механизма манипулятора в пространстве, ограниченном по высоте.

3. Разработать способ определения границ достижимости рабочего пространства, а также маневренности манипуляторов в различных точках зоны обслуживания с учетом положения запретных зон. Определить геометрические параметры, характеризующие маневренность механизмов манипуляторов с учетом положения запретных зон.

4. Выполнить модификацию метода синтеза движений роботов (предложенного Кобринским A.A.) c помощью OPK, позволяющих исключать возникновение тупиковых ситуаций при построении перемещений.

5. Сократить время вычислений и объем движения при расчете промежуточных конфигураций в процессе моделирования движения выходного звена к заданному целевому положению.

Методы исследования. В работе использованы методы аналитической и многомерной геометрии, вычислительной математики и компьютерной графики. При выполнении исследования учтены основные положения о структуре, устройстве и кинематических параметрах исследуемых манипуляционных систем роботов. При разработке алгоритмов применены процедурный подход и инструментарий компьютерной графики.

Научная новизна. Новыми научными результатами диссертационного исследования являются:

– способы определения ОРК на основе использования кинематических поверхностей, метода триангуляции и графа гиперкубов для различных структур кинематических цепей механизмов манипуляторов, различных видов запретных зон и их положений;

– аналитические зависимости, устанавливающие влияние параметров положения запретных зон на кинематические поверхности, задающие области разрешенных конфигураций в ПОК применительно к плоскому четырехзвенному механизму манипулятора, функционирующему в сложноорганизованном пространстве, ограниченном по высоте;

– способ оценки множества положений центра выходного звена (ВЗ), определяющих границы достижимости рабочего пространства, а также маневренность манипуляторов в различных точках зоны обслуживания с учетом положения запретных зон;

– алгоритм вычисления в пространстве обобщенных координат точек кривой, которая определяет движение манипулятора в организованной среде, построенный на основе использования ОРК;

– аналитические зависимости, позволяющие сократить время вычислений и объем движения при расчете промежуточных конфигураций в процессе построения движения выходного звена в организованных средах.

Результаты исследований, выносимые на защиту:

– способ определения ОРК на основе геометрического компьютерного исследования их сечений при различных структурах кинематических цепей механизмов манипуляторов, различных видах запретных зон и их положения;

– модели ОРК на основе задания кинематических поверхностей, совокупностей треугольников и графа гиперкубов, определяющих указанную область в многомерном пространстве обобщенных координат;

параметрический способ определения ОРК для плоского четырехзвенного механизма манипулятора, функционирующего В пространстве, ограниченном высоте, основе использования ПО на геометрических компьютерных технологий;

– способ определения границ достижимости рабочего пространства на основе исследования и использования ОРК, а также маневренности манипуляторов в различных точках зоны обслуживания с учетом положения запретных зон;

– алгоритм вычисления в пространстве обобщенных координат точек кривой, задающей движение робота-манипулятора, с использованием ОРК, позволяющий сократить время вычислений и объем движения.

Практическая значимость и внедрение результатов:

_ определения достижимости алгоритм целевых точек механизмами манипуляторов на основе заданных запретных зон, а также ОРК. Реализация данного алгоритма использования на языке программирования AutoLISP позволяет сократить время вычислений при виртуальном моделировании движений;

– алгоритмы построения движений виртуальных моделей механизмов манипуляторов в организованных средах;

– алгоритмы проектирования технологических процессов нанесения покрытий с использованием робототехнических комплексов.

Апробация работы. Основные работы положения данной докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на отечественных конференциях: «Информационные технологии в науке и (Омск, 2015. 2017), «Автоматизация, производстве» мехатроника,

5

информационные технологии» (Омск, 2016), «Инновационные технологии в инженерной графике: проблемы и перспективы» (Брест, 2016), «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2016), «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность» (Омск, 2017), «Региональная научнотехническая конференция "Ученые Омска – региону"» (Омск, 2017), «Проблемы современного машиностроения» (Томск, 2017), «GraphiCon 2018: 28-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению» (Томск, 2018), «Механика и машиностроение. Наука и практика» (Санкт-Петербург, 2018), «Проблемы машиностроения» (Омск, 2019, 2020).

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует научной специальности 05.01.01 по следующим пунктам: п. 4 – Геометрические методы оптимизации в разных отраслях науки и техники; п. 6 – Геометрические основы компьютерного исследования процессов: проектирования, конструирования и технологии производства; п. 8 – Геометрические основы информационных технологий и систем.

Личный вклад автора: решение задач диссертации, разработанные алгоритмы и их программная реализация, экспериментальные и теоретические результаты, представленные в диссертации и выносимые на защиту, принадлежат лично автору.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 23 научные работы, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 4 статьи в изданиях входящих В международную реферативную базу данных И систем цитирования Scopus, 11 публикаций сборниках В материалов международных, всероссийских региональных научно-технических И конференций.

Внедрение результатов работы. Разработанные алгоритмы внедрены на ОМО им. Баранова при проектировании технологических процессов с использованием робототехнических комплексов при обработке поверхностей крупногабаритных изделий.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 133 страницах, содержит 50 рисунков, 12 таблиц и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении на основе анализа литературных источников обоснована актуальность исследования, определены и сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость. Приведены сведения о структуре и объеме работы.

В первой главе были проанализированы проблемы, возникающие при работе систем автоматизированного управления движениями. Рассмотрен процесс развития алгоритмов синтеза движений механизмов манипуляторов в организованных средах с использование средств компьютерной графики.

Представлена известная методика задания моделей незамкнутых кинематических цепей механизмов манипуляторов на основе составления массивов, задающих значения обобщенных координат, длин звеньев механизмов, смещений вдоль осей координат, связанных со звеньями механизмов, и кодов преобразований систем координат.

В качестве объектов исследования взяты плоский четырехзвенный механизм мобильного робота «Варан» ($q_1 = 0$) и шестизвенный пространственный механизм руки андроидного робота (рис. 1).



Рис. 1. Кинематические схемы механизмов: *а* – плоский четырехзвенный механизм; *б* – пространственный шестизвенный механизм руки андроидного робота

Итогом поиска проблем, связанных с возникновением тупиковых ситуаций при синтезе движения роботов стала постановка задач исследования.

Во второй главе проведены исследования, связанные с определением положения и формы областей в ПОК, задающих разрешенные конфигурации манипуляторов. Области разрешенных конфигураций определены для механизмов, представленных на рис. 1.

Область пространства конфигураций L_q (рис. 2, б, в) определена совокупностью точек $B_i(q_2, q_3, ..., q_n)$ (где n – число обобщенных коорднат), задающих разрешенные конфигурации, не пересекающие препятствие P и координаты центра ВЗ которых принадлежат зоне, заданной неравенствами (рис. 1а):

$$x_{o4} > 500 \text{ MM}, z_{o4} > -200 \text{ MM},$$
 (1)

где x_{o4} и z_{o4} – координаты центра ВЗ точки O_4 в системе O_1 .

При фиксированном значении обобщенной координаты $q_1 = 0$, определяющей поворот вокруг оси z_1 , размерность пространства конфигураций L_q будет равна трем. В данном случае пространственный механизм становится плоским.

Исследуемые точки $B_i \in \Lambda$ пространства L_q принято задавать в узлах сетки с шагом Δq_i . Положение конфигураций механизма манипулятора (узловых точек O_i) определяют матрицами $M_{0,1}, ..., M_{0,k}$.

Указанные матрицы вычисляют по соотношениям:

$$M_{0,k} = M_{0,1} \cdot M_{1,2} \cdot \dots M_{k-1,k},\tag{2}$$

где $M_{k-1,k}$ — матрицы, описывающие положение последующей k-ой системы координат O_k относительно предыдущей (k-1)-й системы O_{k-1} , где k — номер системы координат O_k , используемой при задании геометрической модели механизма манипулятора. Значения длин l_{mi} звеньев плоского четырехзвенного механизма при проведении исследований приняты равными соответственно $O_1O_2 = 900$ мм , $O_2O_3 = 700$ мм и $O_3O_4 = 500$ мм, пространственного шестизвенного механизма — $O_1O_2 = 200$ мм , $O_2O_3 = 120$ мм, $O_5O_6 = 100$ мм , $O_7O_8 = 80$ мм , $O_9O_{10} = 150$ мм , $O_{11}O_{12} = 250$ мм .

Функционирование механизмов манипуляторов происходит в пределах ограниченной области Ω пространства обобщенных координат L_q . Область Ω , в общем случае заданная гиперпараллелепипедом, имеет такой вид, что для любого значения вектора q (q_2 , ..., q_4) выполняются неравенства:

$$q_i^{\min} \le q_i \le q_i^{\max},\tag{3}$$

где q_i^{\min} , q_i^{\max} – нижние и верхние предельные значения обобщенных координат. Для плоского механизма (рис. 1 а) при $q_1 = 0$ значения параметра *i* удовлетворяют условиям $2 \ge i \ge 4$. Значения q_i^{\min} и q_i^{\max} соответственно равны q_i^{\min} (0°, -120° , -120°) и q_i^{\max} (120°, 120°, 120°). Для механизма руки андроидного робота (рис. 16) при $q_1 = 0$ значения параметра *i* удовлетворяют условиям $2 \ge i \ge 5$. Значения q_i^{\min} и q_i^{\max} соответственно равны q_i^{\min} (0°, -25° , – 120° , -120°) и q_i^{\max} (120°, 120°, 120°). Точки B_i , не входящие в область Ω , называют запрещенными. Запрещенные точки B_i задают конфигурации, которые пересекаются с препятствиями или не удовлетворяют условиям (1) и (3). В условиях известной среды данные конфигурации могут быть заранее вычислены (рис. 2, *a*).

обобщенной При фиксированных значениях координаты q_2 В пространстве L_q плоского четырехзвенного механизма манипулятора совокупность точек В_i, задающих разрешенные конфигурации, будет различных параллельных некоторые сечения ОРК Λв определять плоскостях, располагающихся на расстоянии Δq_2 . На рис. 2, *б*, *в* представлены изображения одного из сечений и 3D-модель области Л, задающие разрешенные конфигурации (совокупность точек *B_i*) при наличии запретных зон P_1 и P_2 (рис. 2, *a*). Данный случай соответствует перемещению манипулятора в пространстве, ограниченном по высоте.



a b bРис. 2. Положение ОРК Λ для плоского механизма при наличии запретных зон P_1 и P_2 : a – множество разрешенных конфигураций; b – сечение ОРК Λ при $q_2 = 0$ и $z_{op} = 1000$ мм; b – ОРК в пространстве обобщенных координат L_q при $z_{op} = 1000$ мм

Для задания наружного контура сечения ОРК (см. рис. 26) использованы несколько фрагментов граничных линий, в качестве которых выступают шесть прямых $l_1 - l_6$ и два эллипса l_7 и l_8 . Среди различных кривых второго порядка эллипс более точно огибает на определённом месте контура крайние точки сечения области Л. В связи с этим данная кривая выбрана в качестве одного из фрагментов, задающих контур сечения. Анализ положения указанных линий $l_1 - l_8$ в различных параллельных плоскостях сечений области Λ пространства L_a (построенных с некоторым шагом Δq_2) позволил определить принадлежность данных линий шести линейчатым поверхностям и двум эллиптическим кинематическим поверхностям. Данные поверхности в пространстве L_q , ограничивают область Λ (см. рис. 2в). На основе анализа сечений (рис.26, 46) предложено задавать область Λ на основе использования операций пересечения областей Ω₁₋₈. Области Ω₁₋₆ определяют шесть линейчатых кинематических поверхностей заданных образующими прямыми $l_1 - l_6$, а области Ω_{7-8} – двумя эллиптическими кинематическими поверхностями с образующими эллипсами *l*₇ и *l*₈, параметры формы которых изменяются.

С целью аналитического задания области Λ определены неравенства задающие точки, принадлежащие отдельным областям $\Omega_1 - \Omega_8$. Фрагменты областей $\Omega_1 - \Omega_6$ в сечениях задают полуплоскости, определяемые неравенствами:

$$\sum_{i=3}^{4} d_{i1}^{\Omega 1} q_i \ge b_1^{\Omega 1}, \dots, \sum_{i=3}^{4} d_{im}^{\Omega m} q_i \ge b_m^{\Omega m}, \tag{4}$$

где m – число прямых ограничивающих сечения области Λ (для рассматриваемого примера m = 6); $d_{i1}^{\Omega 1}$, $d_{i2}^{\Omega 1}$, ..., $d_{i6}^{\Omega 1}$, $b_1^{\Omega 1}$, $b_2^{\Omega 2}$, ..., $b_m^{\Omega 6}$ – коэффициенты уравнений прямых $l_1 \div l_6$, которые определяются функциями в виде полиномов третьей степени от переменной q_2 :

$$\begin{aligned} d_{31}^{\Omega 1} &= d_{33}^{\Omega 1} q_{2}^{3} + d_{32}^{\Omega 1} q_{2}^{2} + d_{31}^{\Omega 1} q_{2} + d_{30}^{\Omega 1}; \\ d_{41}^{\Omega 1} &= d_{43}^{\Omega 1} q_{2}^{3} + d_{42}^{\Omega 1} q_{2}^{2} + d_{41}^{\Omega 1} q_{2} + d_{40}^{\Omega 1}; \\ d_{32}^{\Omega 2} &= d_{33}^{\Omega 2} q_{2}^{3} + d_{32}^{\Omega 2} q_{2}^{2} + d_{31}^{\Omega 2} q_{2} + d_{30}^{\Omega 2}; \\ \dots \\ b_{1}^{\Omega 1} &= b_{13}^{\Omega 1} q_{2}^{3} + b_{12}^{\Omega 1} q_{2}^{2} + b_{11}^{\Omega 1} q_{2} + b_{10}^{\Omega 1}; \\ \dots \\ b_{6}^{\Omega 6} &= b_{13}^{\Omega 6} q_{2}^{3} + b_{12}^{\Omega 6} q_{2}^{2} + b_{11}^{\Omega 6} q_{2} + b_{10}^{\Omega 6}, \end{aligned}$$
(5)

где $d_{l1}^{\Omega 1}$, $d_{l2}^{\Omega 1}$..., $b^{\Omega 1}$, $b_1^{\Omega 1}$, ..., $b^{\Omega 1}$ определяют коэффициенты полиномов, используемых при задании областей $\Omega_1 - \Omega_6$. Значения данных коэффициентов получены экспериментальным путем на основе получения множества сечений при различных параметрах x_{op} , z_{op} и q_2 .

Для вычисления пересечения областей Ω₁, Ω₂ и т. д. использована операция конъюнкции:

$$Y_2 = X_1 \wedge X_2 = X_1 + X_2 - \sqrt{X_1^2 + X_2^2},\tag{6}$$

где X_1 и X_2 – непрерывные переменные *R*-функции (4).

Объединению двух множеств соответствует дизьюнкция, которая задается выражением:

$$Y_1 = X_1 \vee X_2 = X_1 + X_2 + \sqrt{X_1^2 + X_2^2}.$$
(7)

Неравенства, определяющие точки, располагающиеся снаружи эллипсов l_7 и l_8 кинематических поверхностей, задающих области Ω_7 и Ω_8 при изменении обобщенной координаты q_2 , имеют следующий вид:

$$\frac{(q_{3}\sin\varphi^{\Omega^{7}}+q_{4}\cos\varphi^{\Omega^{7}}+(m_{13}^{\Omega^{7}}q_{2}^{3}+m_{12}^{\Omega^{7}}q_{2}^{2}+m_{11}^{\Omega^{7}}q_{2}+m_{10}^{\Omega^{7}}))^{2}}{(a_{3}^{\Omega^{7}}q_{2}^{3}+a_{2}^{\Omega^{7}}q_{2}^{2}+a_{1}^{\Omega^{7}}q_{2}+a_{0}^{\Omega^{7}})^{2}} + \frac{(q_{3}\cos\varphi^{\Omega^{7}}+q_{4}\sin\varphi^{\Omega^{7}}+(m_{23}^{\Omega^{7}}q_{2}^{3}+m_{22}^{\Omega^{7}}q_{2}^{2}+m_{21}^{\Omega^{7}}q_{2}+m_{20}^{\Omega^{7}}))^{2}}{(b_{3}^{\Omega^{7}}q_{2}^{3}+b_{2}^{\Omega^{7}}q_{2}^{2}+b_{1}^{\Omega^{7}}q_{2}+b_{0}^{\Omega^{7}})^{2}} - 1 \ge 0$$
(8)

$$\frac{(q_{3}\sin\varphi^{\Omega 8} + q_{4}\cos\varphi^{\Omega 8} + (m_{13}^{\Omega 8}q_{2}^{3} + m_{12}^{\Omega 8}q_{2}^{2} + m_{11}^{\Omega 8}q_{2} + m_{10}^{\Omega 8}))^{2}}{(a_{3}^{\Omega 8}q_{2}^{3} + a_{2}^{\Omega 8}q_{2}^{2} + a_{1}^{\Omega 8}q_{2} + a_{0}^{\Omega 8})^{2}} + \frac{(q_{3}\cos\varphi^{\Omega 8} + q_{4}\sin\varphi^{\Omega 8} + (m_{23}^{\Omega 8}q_{2}^{3} + m_{22}^{\Omega 2}q_{2}^{2} + m_{21}^{\Omega 8}q_{2} + m_{20}^{\Omega 8}))^{2}}{(b_{3}^{\Omega 8}q_{2}^{3} + b_{2}^{\Omega 8}q_{2}^{2} + b_{1}^{\Omega 8}q_{2} + b_{0}^{\Omega 8})^{2}} - 1 \ge 0$$
(9)

где $m_{13}^{\Omega7}$, $m_{12}^{\Omega7}$, ..., $a_3^{\Omega7}$, $a_2^{\Omega7}$, ... – коэффициенты полиномов, задающих начало $m_1^{\Omega7}$, $m_2^{\Omega7}$ и угол наклона $\varphi^{\Omega7}$ системы координат, связанной с эллипсом l_7 , и параметры $a^{\Omega7}$, $b^{\Omega7}$, $a^{\Omega8}$ и $b^{\Omega8}$, определяющие форму фрагмента контура сечения эллипсов l_7 и l_8 областей Ω_7 и Ω_8 (см. рис. 2, *a*).

Для определения коэффициентов неравенств (8), (9) для случая, когда запретная зона задана горизонтальной плоскостью Δ (см. рис. 1б) зависимости коэффициентов $m_{13}^{\Omega7} = f_1(z_{op}), m_{12}^{\Omega7} = f_2(z_{op}), ..., m_{10}^{\Omega7} = f_4(z_{op}), a_3^{\Omega7} = f_9(z_{op}), a_2^{\Omega7} = f_{10}(z_{op}), ..., b_3^{\Omega7} = f_{13}(z_{op}), b_2^{\Omega7} = f_{14}(z_{op}), представлены в виде интерполяционных многочленов третьей степени. Для решения этой задачи использованы полиномы, которые склеиваются в узловых точках.$

Коэффициенты неравенств (8), (9) при использовании указанных полиномов определяются шестнадцатью зависимостями:

$$m_{13}^{\Omega7} = S_0^{m13} + S_1^{m13} z_{op} + S_2^{m13} z_{op}^2 + S_3^{m13} z_{op}^3;$$
(10)

$$m_{23}^{\Omega7} = S_0^{m23} + S_1^{m23} z_{op} + S_2^{m23} z_{op}^2 + S_3^{m23} z_{op}^3;$$
(11)

$$a_3^{\Omega 7} = S_0^{a3} + S_1^{a3} z_{op} + S_2^{a3} z_{op}^2 + S_3^{a3} z_{op}^3;$$
(12)

$$b_{3}^{\Omega 7} = S_{0}^{b3} + S_{1}^{b3} z_{op} + S_{2}^{b3} z_{op}^{2} + S_{3}^{b3} z_{op}^{3};$$
(13)

где S_0^{m13} , S_1^{m13} , ..., S_3^{b3} – коэффициенты полиномов.

Для

На рис. З представлены изображения функций $m_1^{\Omega7} = f_{15}(q_2, z_{op}), a^{\Omega7} =$ $f_{16}(q_2, z_{op})$ и $b^{\Omega 7} = f_{17}(q_2, z_{op})$, определяющих положение и форму эллипса l_7 в различных сечениях при движении плоского механизма манипулятора в пространстве, ограниченном по высоте. Аналогичные зависимости определены для нахождения параметров положения и формы эллипса *l*₈. В связи с тем что смещение центра эллипса по направлению оси $m_2^{\Omega 7}$ незначительное, функция $m_2^{\Omega7} = f_{18}(q_2, z_{op})$ имеет изображение на графике (см. рис. Зв) близкое к изображению плоскости, перпендикулярной оси $m_2^{\Omega7}$. Поэтому график указанной функции не приводится.



моделирования гиперповерхностей в трех четырёхмерных пространствах, определяемых параметрами (x_{op} , z_{op} , q_2 , $a^{\Omega7}$), (x_{op} , z_{op} , q_2 , $\dot{b}^{\Omega7}$) и

 $(x_{op}, z_{op}, q_2, m_1^{\Omega 7})$ при задании запретной зоны в виде параллелеипеда вычислены совокупности точек, заданных координатами (x_{op} , z_{op} , q_2 , a^{Ω^7}) и т.д. Для каждого из пространств выбраны узловые точки. Через данные точки проведено по три перпендикулярные 3-плоскости α_i (i = 1, 2, 3). В каждой из 3-плоскосетй *α_i* определены интерполирующие кривые.

получения уравнения моделирующих гиперповерхностей Для использован известный метод, предложенный Вертинской Н.Д. Уравнения гиперповерхностей третьего порядка с применением этого метода примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}^{\Omega 7} &= 0,0009 \cdot x_{op}^{3} + 0,0031 \cdot z_{op}^{3} + 0,0002 \cdot q_{2}^{3} - 0,337 \cdot x_{op}^{2} - 0,937 \cdot z_{op}^{2} - 0,058 \\ &\cdot q_{2}^{2} 38,94 \cdot x_{op} + 0,39 \cdot z_{op} + 0,28 \cdot q_{2} - 4393,01; \\ b^{\Omega 7} &= 0,0017 \cdot x_{op}^{3} + 0,0008 \cdot z_{op}^{3} - 0,0001 \cdot q_{2}^{3} - 0,528 \cdot x_{op}^{2} - 0,275 \cdot z_{op}^{2} + 0,022 \\ &\cdot q_{2}^{2} 51,47 \cdot x_{op} + 27,79 \cdot z_{op} - 1,28 \cdot q_{2} - 2505,91; \\ m_{1}^{\Omega 7} &= 0,0022 \cdot x_{op}^{3} + 0,0015 \cdot z_{op}^{3} + 0,0001 \cdot q_{2}^{3} - 0,663 \cdot x_{op}^{2} - 0,499 \cdot z_{op}^{2} - 0,027 \\ &\cdot q_{2}^{2} 64,82 \cdot x_{op} + 52,28 \cdot z_{op} + 0,62 \cdot q_{2} - 3920,08. \end{aligned}$$

Аналогичные соотношения получены для определения параметров формы и положения эллипса *l*₈.

На рис. 1, δ изображена кинематическая схема механизма руки андроидного робота и положение запретной зоны *P*. Высота базовой точки *A* запретной зоны для рассматриваемого примера в системе координат O_o принята равной $z_{op} = 400$ мм, минимальное безопасное удаление основания манипулятора от препятствия принято равным $x_{op} = 450$ мм (см. рис. 1, δ). На рисунке 4, *a* представлено множество положений разрешенных конфигураций и сечения ОРК для механизма руки андроидного робота, построенных с шагом $\Delta q_i = 20^\circ$ при наличии запретной зон *P*.



Рис. 4. Множество разрешенных конфигураций руки андроидного робота, построенных при наличии запретной зоны *P* и *z*_{op} = 400 мм, *x*_{op} = 450 мм, *z*_{op} = 400 мм: *a* – положения разрешенных конфигурации, изображенных на двух плоскостях проекций; *б* – сечения ОРК при *q*₂ = -20, *q*₃ = -40 и *q*₂ = -0, *q*₃ = -60; *в* – граф гиперкубов

Для задания области Λ в этом случае применен граф, который показан на рисунке 4в. Каждый узел данного графа, задающий гиперкубы P_{p1}^1 на определенных уровнях, позволяет задавать только такие конфигурации руки андроидного робота, которые удовлетворяют заданным условиям не пересечения с запретными зонами. Достоинства представленного метода задания множеств Λ , по сравнению с известными, заключаются в следующем:

 в результате описания ПОК элементарными ячейками обеспечивается возможность работы не только с выпуклыми, но и с невыпуклыми и составными геометрическими объектами, задающими в совокупности ОРК Л;

– метод исследования многомерного ПОК на предмет принадлежности произвольных точек областям Λ позволяет существенно ускорить определение условия не пересечения механизма и запретных зон за счет отсутствия необходимости определения пересечений трехмерных примитивов, задающих их.

Область Л позволяет создать базу данных о множестве положений конфигураций в такой форме, которая понятна системе управления движением роботов при наличии запретных зон на виртуальном уровне.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке систем управления автономно функционирующих роботов.

В третьей главе представлено моделирование движения ВЗ манипулятора мобильного робота в ПОК при отсутствии и наличии запретных зон и различно заданных условиях, определяющих движение ВЗ, исследованно соответствие точек траекторий движения центра ВЗ в реальном декартовом пространстве и точек пространства обобщенных координат, задающих конфигурации.

На рис. 5, *а* изображена поверхность Ψ_1 , которая соответствует совокупностям горизонтальных траекторий центра ВЗ плоского четырехзвенного механизма манипулятора при синтезе движений с произвольной ориентацией ВЗ по критерию минимизации объема движения. $\sum_{i=1}^{n} |\Delta q_i| = min,$ (15)

где Δq_i определяет приращения обобщенных координат за одну итерацию.

На рис. 5, δ изображена та же поверхность Ψ_2 , но при фиксированной ориентации ВЗ.



Рис. 5. Траектории движения точки *B_i* в пространстве *L_q* при перемещении центра ВЗ плоского механизма манипулятора по горизонтальным прямым: *a* – движение без учета ориентации ВЗ; *б* – движение с обеспечением заданной ориентации ВЗ

Таким образом, при задании направления движения, соответствующего горизонтальному перемещению центра ВЗ, и при использовании критерия минимизации объема движения (15) между точками фрагмента плоскости O_0 , и точками пространства L_q устанавливается однозначное соответствие.

На рис. 6 представлены изображения положений расчетных точек O_4 и зоны обслуживания Λ_0 плоского четырехзвенного манипулятора при наличии препятствия P (см. рис. 1, a). На рис. 6 построены только точки O_4 , конфигурации которых не пересекают запретную область P. Точки B_j пространства L_q исследовались с шагом $\Delta q_i = 15^\circ$. Аналогичные исследования проведены для механизма руки андроидного робота (см. рис. 16). Как видно из рис. 6, форма зоны обслуживания зависит от параметра z_{op} , задающего положение препятствия P (см. рис. 1, δ). Маневренность механизма манипулятора с учетом положения запретной зоны P определена площадью $S_{\Lambda 0}$ рабочей зоны Λ_{0} , количеством точек N_{kol} , принадлежащих области Λ_{0} , задающих разрешенные конфигурации (при $\Delta q_{i} = 15^{\circ}$), и количеством конфигураций N_{kol} , приходящихся на единицу площади. Данный параметр вычислен по формуле:

$$\mu = N^{\Phi}_{kol} \,/S^{\Phi}_{A0},\tag{16}$$

где параметры N^{Φ}_{kol} и $S^{\Phi}_{\Lambda 0}$ характеризуют отдельный фрагмент площади 10×10 мм рабочей зоны Λ_0 .



Рис. 6. Анализ положений точек O_4 и значений параметра N_{kol} в различных местах зоны обслуживания плоского механизма манипулятора: a – высота препятствия 500 мм, $N_{kol} = 2153$ точек; δ – высота препятствия 800 мм, $N_{kol} = 6935$ точек

При автоматизации технологических процессов с использованием робототехнических комплексов часто необходимо обеспечить движение центра ВЗ с заданной скоростью. Например, при нанесении покрытий, контроле и сварке изделий движение ВЗ происходит в заданном диапазоне скоростей. Указанное собственное свойство механизмов манипуляторов называется мобильностью. В связи с этим разработан универсальный обеспечить алгоритм, позволяющий оценку возможных скоростей характерной точки центра ВЗ, которая неподвижно связана с инструментом. При этом оценка скоростей проведена по заданным направлениям с учетом максимальных скоростей в приводах и заданной точности позиционирования центра ВЗ при синтезе движения по вектору скоростей. При этом исследован плоский четырехзвенный механизм манипулятора, имеющий двигательную избыточность. Разработанная методика может быть использована для манипуляторов, имеющих другую структуру кинематических цепей и различное число степеней подвижностей.

На тупиковые ситуации при синтезе движений по вектору скоростей и при пересечении траекторией центра B3 с осями неподвижной системы координат в значительной степени влияет заданная точность позиционирования δ . В связи с этим исследованы минимальные значения обобщенных координат механизмов, при которых возникают тупиковые ситуации во время синтеза движений для указанных случаев. В работе предложено при приближении значений x_{o4} и z_{o4} (задающих координаты центра B3 в системе O_1) к нулевым увеличивать модуль вектора скоростей центра B3 V и значение точности позиционирования. **В четвертой главе** приведены численные расчеты траектории ВЗ в случае использования модифицированного алгоритма синтеза движения механизмов манипуляторов при наличии запретных зон с применением ОРК. Проверена и статистически оценена степень погрешности аналитического задания ОРК и проанализировано фактическое удаление конфигураций от запретных зон. В связи с проведенными исследованиями предложено использовать наиболее рациональное минимальное безопасное расстояние до запретных зон при получении математической модели ОРК.

Предложен алгоритм синтеза траектории $l_{s}^{/}$ в пространстве L_{q} , позволяющий исключить ее пересечение с граничными поверхностями области Λ для плоского механизма манипулятора. При этом центр ВЗ перемещается по траекториям, заданным совокупностями отрезков прямых. Кривая в ПОК, соответствующая движению центра ВЗ по критерию минимизации объема движения (15), на рис. 7, *а* обозначена l_{m} . Если траектория l_{m} , соответствующая синтезу движений центра ВЗ, пересекает границу области Λ в точках B_{m} и B_{n} существует необходимость в определении другой траектории $l_{n} \in L_{q}$, располагающейся в области Λ .

Схема алгоритма синтеза траектории движения в конфигурационном пространстве представлена на рис. 7, б, приняты следующие обозначения: 1 – начало; 2 – задание точек A_{μ} и A_{μ} , определяющих начальное и целевое положение ВЗ; 3 – синтез движения от точки A_µ к целевой точке A_µ по критерию (15) и вычисление траектории l_m в пространстве L_q ; 4 – Определение точек пересечения B_m и B_n кривой l_m с областью Λ ; $5 - B_m = nill$, $B_n = nill; 6$ – Вычисление координат точки $F \in l_m, FB_m = FB_n; 7$ – Вычисление коэффициентов уравнений плоскостей $\Delta(r_f, U_A)$ и $\Delta'(r_f', U_A')$ (для случая, когда точки B_m и B_n принадлежат поверхности Ω_7 или поверхности Ω_8), r_b r_f' радиус векторы точек F и F', располагающихся на отрезках B_m и B_n при пересечении кривой l_m с поверхностью Ω_7 или Ω_8 при $B_m F = F B_n$, $B_m F' = F' B_n$. U_{Δ}, U_{Δ}' – единичные нормальные векторы плоскостей Δ и Δ' ($U_{\Delta} \perp B_m B_n, U_{\Delta}' \perp$ $B_m B_n$); 8 – вычисление точек B_f и E_f принадлежащих кривым $l_{\Omega 7} = \Delta \bigcap \Omega_7$ и $l_{\Omega 8}$ $=\Delta \bigcap \Omega_8$ при выполнении условий $d_F = \min$ (для точки B_f), $d_E = \min$ (для точки E_f) (где d_F , d_E – параметры определяющие расстояние точек B_f или $E_f \in l_{\Omega 8}$ до прямой $B_m B_n$ (17)); 9 – определение точки $B_m^{/}$; 10 – определение точки $B_n^{/}$. Точки $B_m^{\prime} \in l_m, B_n^{\prime} \in l_m$ удалены от точек B_m и B_n на расстояние перемещения ВЗ за три итерации; 11 – задание уравнений отрезков $l_m^{/\prime}$ и $l_m^{/\prime}$, проходящих через точки $B_m^{/}, B_f$ и $B_f^{/}, B_m^{'}; 12$ – определение точек M и N, пересечения отрезков l_m' и l_m'' с границами областей Ω_i ; 13 - N = nill, M = nill; 14 - вывод координат точек траектории движения заданной в пространстве L_q; 15 – конец алгоритма.

Минимизация объема движения при расчете траектории *l_n* достигается использованием функции:

$$d = \frac{|a + (r_0 - r_1)|}{|a|} \to min,$$
 (17)

где d – расстояние от точек B_f или E_f до прямой a; $a(a_x, a_y, a_z)$ – направляющий единичный вектор прямой проходящей через точки B_n и B_m ; r_0 – радиус вектор точек $B_f \in l_{\Omega 8}$ или $E_f \in l_{\Omega 8}$; r_1 – радиус вектор точки F.

Использование разработанного алгоритма (см. рис. 7, *б*), позволяет на виртуальном уровне синтезировать траекторию движения ВЗ от начальной точки до целевой точек. Данная траектория обеспечивает заданное удаление звеньев механизма от имеющейся запретной зоны. Предлагаемый расчет траектории движения позволяет избежать возникновения тупиковых ситуаций.



Рис. 7. Синтез траектории перемещения ВЗ в пространстве L_q плоского механизма манипулятора М2-2-2: *а* – траектории l_m и l_n в пространстве конфигураций L_q ; δ – схема алгоритма синтеза траектории движения манипулятора l_n в пространстве L_q

Результаты виртуального моделирования движения плоского четырехзвенного механизма манипулятора при выполнении тестового задания с использованием ОРК и различных значений масштаба отображения вектора приращений обобщенных координат *h* приведены на рисунке 8аб.



Рис. 8. Моделирование движения механизмов манипуляторов: a – синтез движения плоского механизма манипулятора при наличии препятствий с использованием области Λ при h = 1; δ – синтез движений при h = 2; e – синтез движения механизма руки андроидного робота с возникновением тупиковой ситуации, e – моделирование с использованием области Λ

На рис. 8, в представлены результаты моделирования движения руки андроидного робота с возникновением тупиковой ситуации. При этом центр

ВЗ смещается по отрезку прямой, которая соединяет начальную и конечную точки траектории ВЗ. Указанные точки на рис. 8, *в*, *г* обозначены как B_{μ} и B_{μ} . На рис. 8, *г* на основе использования области Λ и значения масштаба вектора приращений обобщенных координат смоделировано движение на всем участке заданной траектории.



Рис.9. Графики-зависимости $t_A = f_2(k)$ и $t = f_1(k)$

На рис. 9 представлены графики $t = f_1(k)$ и $t_A = f_2(k)$ определяющие зависимость времени вычисления разрешенных конфигураций андроидного робота OT количества итераций при использовании **ДВУХ** различных способов расчета. Первый способ $t_A = f_2(k)$ основан на использовании уравнений и неравенств (4) –

(9), описывающих область Л. Второй способ $t = f_1(k)$ основан на определении пересечений трехмерных примитивов задающих звенья механизмов с запретной зоной. Параметр k обозначает число итераций при вычислении разрешенных конфигураций в процессе синтеза движений по вектору скоростей. Данный параметр используется при вычислении вектора приращений обобщенных координат при наличии двигательной избыточности. При проведении исследований использовался компьютер на базе процессора Dual Core Intel Core I3-540, оперативная память DDR3 4 Гб, видеоадаптер дискретный Zotac GeForce GTX 560 с объемом памяти 2Гб. Как функций первый способ расчета разрешенных видно ИЗ графиков конфигураций требует на несколько порядков меньше времени вычислений, чем второй.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработаны универсальные способы описания ОРК на основе геометрического компьютерного исследования положений точек, задающих разрешенные конфигурации различных механизмов манипуляторов в пространстве обобщенных координат с помощью методов триангуляции и графа гиперкубов.

2. На основе геометрических информационных технологий разработан параметрический способ аналитического описания ОРК при различных положениях запретной зоны для случая движения плоского четырехзвенного механизма манипулятора в пространстве, ограниченном по высоте.

3. Разработан способ определения границ достижимости рабочего пространства, а также маневренность манипуляторов в различных точках

зоны обслуживания с учетом положения запретных зон. Определены геометрические параметры, характеризующие маневренность механизмов манипуляторов с учетом положения запретных зон.

4. Выполнена модификация метода синтеза движений роботов с использованием ОРК, позволяющих исключать возникновение тупиковых ситуаций при построении перемещений.

5. Сокращено время вычислений и объем движения при расчете промежуточных конфигураций при моделировании движения выходного звена к заданному целевому положению.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК и приравненных к ним:

1. **Нефедов**, **Д. И.** Геометрический анализ текущих ситуаций, характеризующих положение манипулятора и окружающей среды на основе использования области разрешенных конфигураций / Ф. Н. Притыкин, В. Г. Хомченко, **Д. И. Нефедов**. – Текст: электронный // Программные системы и вычислительные методы. – 2017. – № 2. – С. 55–66. – URL: https://enotabene.ru/ppsvm/article_22685.html (дата обращения 1.09.2020).

2. Нефедов, Д. И. Исследование геометрических параметров, задающих область разрешенных конфигураций при изменении положения запретных зон / Ф. Н. Притыкин, Д. И. Нефедов. – Текст: электронный // Программные системы и вычислительные методы. – 2018. – № 4. – С. 48–59. – URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id = 25176 (дата обращения 1.09.2020).

3. **Нефедов**, **Д. И.** Создание базы знаний о прошлом опыте синтеза движений руки андроидного робота на основе использования области разрешенных конфигураций / Ф. Н. Притыкин, **Д. И. Нефедов**. – Текст: электронный // Программные системы и вычислительные методы. – 2018. – № 4. – С.60–67. – URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id = 26638 (дата обращения 1.09.2020).

Публикации в рецензируемых изданиях, индексируемых Web of Science или Scopus:

4. Nefedov, D. I. Computation of manipulator mechanism path in joint coordinate space with working range forbidden regions / F. N. Pritykin, D. I. Nefedov // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines : conference proceeding, 15-17 Nov., 2016. – Omsk, 2016.

5. Nefedov, D. I. Parametric Method to Define Area of Al-lowable Configurations while Changing Position of Restricted Zones / F. N. Pritykin, D. I. Nefedov, Yu. A. Rogoza, Yu. V. Zinchenko // MEACS 2017 / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering – 2018. – Vol. 327. – Pp. 042088-1 – 042088-8.

6. **Nefedov**, **D. I.** Method of defining region of allowed configurations in multidimensional space of generalized coordinates using hypercube graph / F. N.

Pritykin, **D. I. Nefedov** // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1260: Mechanical Science and Technology Update (MSTU-2015). – P. 072016-1 – 072016-7.

7. **Nefedov**, **D. I.** Geometric method for researching the robot service area under the obstacles for the limitations on links movement / F. N. Pritykin, **D. I. Nefedov** // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1546: Mechanical Science and Technology Update (MSTU-2015). – P. 012040.

Публикации в других научных изданиях:

8. **Нефедов**, **Д. И.** Исследование тупиковых ситуаций при автоматизированном синтезе движений манипуляционных систем / Д. И. **Нефедов**. – Текст: непосредственный // Информационные технологии в науке и производстве : материалы Всерос. молод. науч.-техн. конф., Омск, 9-10 февр. 2015 г. / ОмГТУ. – Омск, 2015. – С. 249–253.

9. Нефедов, Д. И. Исследование поверхностей, задающих границы области разрешенных конфигураций механизма мобильного манипулятора при наличии запретных зон / Ф. Н. Притыкин, Д. И. Нефедов. – Текст: электронный // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – № 6, – т. 17. – С. 404–413. – URL: https://mech.novtex.ru/jour/article/view/320/141 (дата обращения 1.09.2020).

10. Нефедов, Д. И. Синтез траектории движения механизма обобщенных пространстве координат манипулятора В на основе использования областей, задающих разрешенные конфигурации / Ф. Н. Притыкин, Д. И. Нефедов. – Текст: электронный // Инженерный вестник Дона. 2016. N⁰ 2. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary 27174784 86619698.pdf (дата обращения 1.09.2020).

11. Нефедов, Д. И. Преодоление тупиковых ситуаций при синтезе движений манипулятора мобильного робота с обеспечением заданной ориентации выходного звена / Д. И. Нефедов. – Текст: непосредственный // инженерной Инновационные технологии в графике. Проблемы И перспективы: материалы междунар. науч.-практ. конф., Брест, 20 апреля 2016 C. БрГТУ. Брест, 2016. 112–115. URL: Г / ____ ____ https://mech.novtex.ru/jour/article/view/320/141 (дата обращения 1.09.2020).

12. **Нефедов**, **Д. И.** Исследование соответствия, возникающего между точками пространства положений захвата и пространства конфигураций / **Д. И. Нефедов**, Ф. Н. Притыкин. – Текст: непосредственный // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии: Материалы VI Междунар. науч.-тех. интернет-конф. молодых ученых (Россия, Омск, 17 мая 2016 г.) / ОмГТУ. – Омск, 2016. – С. 153–156.

13. **Нефедов**, **Д. И.** Вычисление траектории движения механизма манипулятора в пространстве обобщенных координат при наличии запретных зон в рабочем пространстве / Ф. Н. Притыкин, **Д. И. Нефедов**. –

Текст: непосредственный // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – № 1, т. 4. – С. 178–182.

14. **Нефедов**, Д. И. Исследование влияния запретных зон на форму и положение области разрешенных конфигураций механизма манипулятора / Ф.Н. Притыкин, Д.И. Нефедов. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2017. – Т. 1, № 1. – С. 19–24.

15. **Нефедов**, Д. И. Разработка модуля автоматического обнаружения столкновений механизма манипулятора мобильного робота со средой на основе использования области разрешенных конфигураций / Ф. Н. Притыкин, Д. И. Нефедов. – Текст: непосредственный // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: материалы регион. науч.-техн. конф. – 2017. – № 2. – С. 100–104.

16. **Нефедов**, **Д. И.** Аналитический способ задания области разрешенных конфигураций при задании двух препятствий с использованием фронтально проецирующих плоскостей / **Д. И. Нефедов**. – Текст: непосредственный // Информационные технологии в науке и производстве : материалы IV Всерос. молод. науч.-техн. конф., 8 - 9 февр. 2017 г. / ОмГТУ. – Омск, 2017. – С. 123–127.

17. **Нефедов**, **Д. И.** Исследование соответствий точек пространств, задающих положения центра выходного звена и обобщенных координат / Ф.Н. Притыкин, **Д. И. Нефедов**. – Текст: электронный // Ученые Омска – региону: 2 регион. науч.-техн. конф. – Омск, 2017. – С. 139–144. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29661486_94290902.pdf (дата обращения 1.09.2020).

18. **Нефедов, Д. И.** Аналитическое задание четырехмерной области разрешенных конфигураций руки андроидного робота при наличии запретной зоны в рабочем пространстве / Ф.Н. Притыкин, **Д. И. Нефедов**. – Текст: электронный // GraphiCon 2018: 28-я Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению. – Томск, 24-27 сент., 2018. – С. 376–379. – URL: https://www.graphicon.ru/html/2018/papers/376-379.pdf (дата обращения 1.09.2020).

19. **Нефедов**, **Д. И.** Исследование формы сечений области разрешенных конфигураций механизма руки андроидного робота при наличии запретной зоны в рабочем пространстве / Ф. Н. Притыкин, **Д. И. Нефедов**. – Текст: непосредственный // Механика и машиностроение. Наука и практика. – Санкт-Петербург, 2018. С. 42–45.

Д. И. 20. Нефедов, Метод задания области разрешенных конфигураций в многомерном пространстве обобщенных координат с использованием графа гиперкубов / Ф. Н. Притыкин, Д. И. Нефедов. – Текст: электронный // Проблемы машиноведения: III Международная науч-техн. Омск, 23 - 24апр., 2019. C. 336-341. конф. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_37541848_47862679.pdf (дата обращения 1.09.2020).

21. **Нефедов**, **Д. И.** Геометрический способ исследования зоны обслуживания роботов при заданных препятствиями ограничениях на движения звеньев / Ф. Н. Притыкин, **Д. И. Нефедов**. – Текст: электронный // Проблемы машиноведения: IV Международная науч.-техн. конф. – Омск, 17– 19 мар., 2020. С. 446–451. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_42739052_17702462.pdf (дата обращения 1.09.2020).

Государственная регистрация программ для ЭВМ:

22. Нефедов, Д. И. Программный модуль «Определение параметров, характеризующих манипулятивность плоских механизмов манипуляторов» / Д. И. Нефедов, Ф. Н. Притыкин, А. Ю. Осадчий // М.: ИНИМ ОФЭРНиО, 2015. – №50201550141. Св-во о регистрации электронного ресурса. № 20892; от 05.05.15.

23. **Нефедов**, **Д. И.** Программный модуль «Определение области разрешенных конфигураций и синтез движений руки андроидного робота в организованном пространстве» / **Д. И. Нефедов**, Ф. Н. Притыкин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2019617040.; заявл. 27.05.19; опубл. 03.06.19, RU ОБПБТ №2.