

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



Колпашиков Дмитрий Юрьевич

**Метод и алгоритмы обратной кинематики и планирования
движения для многосекционных непрерывных роботов**

Специальность: 2.5.4 – «Роботы, мехатроника и робототехнические
системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
учёной степени кандидата технических наук

Томск – 2023 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ) в Отделении информационных технологий (ОИТ) в Инженерной школе информационных технологий и робототехники (ИШИТР).

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: Гергет Ольга Михайловна
доктор технических наук, доцент

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: Малолетов Александр Васильевич
доктор физико-математических наук, доцент, автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис», профессор, научный руководитель Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники

Костюков Владимир Александрович
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», доцент кафедры «Электротехники и мехатроники»

Защита диссертации состоится «22» сентября 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.06 при Южном федеральном университете по адресу: по адресу г. Таганрог, ул. Чехова-, 2, корп. «И», комн. 347.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: 344103, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж, а также на библиотечном портале ЮФУ:

<https://hub.sfedu.ru/storage/1/1311448/f3992e7a-51a5-4802-8ce5-7bd5123c3c68/>

Автореферат разослан «__» _____ 2023г.

Ученый секретарь диссертационного совета ЮФУ801.02.06,
кандидат технических наук, доцент
Кухаренко А.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Непрерывные роботы, так же известные как мягкие роботы, двигаются в пространстве за счет упругой деформации собственного тела. Данное свойство позволяет им проникать в труднодоступные места, избегая столкновений с препятствиями, или маневрировать за счет контакта с препятствиями, осуществляя захват объектов без дополнительной оснастки.

Однако, большие деформации в упругой зоне обуславливают сложное и нелинейное поведение непрерывных роботов, что значительно усложняет их кинематику по сравнению с традиционными роботами из жестких звеньев.

В связи со сложностью моделирования, непрерывные роботы управляются напрямую оператором. Для обеспечения автоматического управления и планирования движения в реальном времени с учетом окружающих препятствий необходимы методы и алгоритмы, способные точно и быстро решать прямую и обратную задачи кинематики.

В настоящее время для решения прямой задачи кинематики существует множество подходов, которые можно условно сгруппировать на: геометрические; механические; основанные на обучении. Среди них следует выделить те, что используют допущение о кусочно-постоянной кривизне с допущением об отсутствии деформации кручения. Такие подходы позволяют достичь компромисса между точностью и скоростью, а также могут быть применены к большинству конструкций непрерывных роботов.

Для обратной задачи кинематики также существует широкое многообразие решений. Условно их можно разделить на: аналитические; численные; основанные на обучении. Аналитические решения обратной задачи кинематики представляют собой математические выражения, в которых применяется конечное число математических операций. Аналитические решения наиболее предпочтительны, поскольку позволяют наиболее быстро определить все возможные решения. Однако, получение разрешимого аналитического выражения, особенно для многосекционных непрерывных роботов с переменной кривизной, не всегда возможно. Подходы, основанные на обучении, используют данные реального робота для создания модели, на основе которой можно предсказать решение обратной задачи кинематики. Этот подход не требует предварительных знаний о роботе и позволяет быстро и точно решать обратную задачу кинематики. Однако такая модель не масштабируема и не универсальна. В связи с этим для каждой новой конструкции робота требуется обучать новую модель. Численные методы решают обратную задачу кинематики как задачу оптимизации и достигают приближенного решения с заданной точностью, однако для них заранее неизвестно время сходимости для получения решения.

Несмотря на достигнутые результаты, все вышеперечисленные методы решения обратной задачи кинематики имеют как минимум один из следующих недостатков: низкая надежность; не способность работать в режиме реального времени; высокая вычислительная сложность; отсутствие масштабируемости; работа только с позиционной составляющей, а также введение допущений не позволяют достаточно точно моделировать робота. Перечисленные выше недостатки сдерживают развитие непрерывных роботов и негативно влияют на возможность планировать движение в

пространствах с препятствиями. Основным способом планирования движения с уклонением от препятствий для непрерывных роботов является использование модификаций алгоритмов, применяемых для планирования движения жестких роботов. Заметим, что алгоритмы, позволяющие маневрировать через контакты с препятствиями и осуществлять захват объектов, проработаны слабо.

В связи с этим не вызывает сомнений актуальность разработки новых метода и алгоритмов решения обратной задачи кинематики и планирования движения для непрерывных роботов.

Степень разработанности темы исследования. Развитие методов и алгоритмов решения обратной задачи кинематики для непрерывных роботов во многом обусловлено достижениями зарубежных ученых: G. Robinson, J. B. C. Davies, R. J. Webster, B. A. Jones, I. D. Walker, G. S. Chirikjian, J. W. Burdick, J. Burgner-Kahrs, P. Sears, P. Dupont, I. S. Godage, T. Mahl, T. D. Nguyen, D. C. Rucker, D. B. Camarillo, S. Neppalli, M. A., Z. Li, R. Du, S. Djeflal, A. Amouri, H. Mochiyama, E. Shimemura, H. Kobayashi, C. Mahfoudi и многие другие. Среди отечественных исследователей можно выделить: Романов В. В., Шутин Д. В., Пилипенко А. В., Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е и др.

Среди методов решения обратной задачи кинематики наиболее распространённым является метод, основанный на построении матрицы Якоби. Однако, наиболее перспективным является использование алгоритма FABRIK (Forward And Backward Reaching Inverse Kinematics). Для планирования движения в основном используются модификации алгоритмов планирования движения для жестких роботов.

Объект исследования: непрерывные роботы.

Предмет исследования: метод и алгоритмы решения обратной задачи кинематики и планирования движения для непрерывных роботов.

Целью диссертационной работы является разработка эффективных метода и алгоритмов решения обратной задачи кинематики и планирования движения для непрерывных роботов.

Научная задача, решаемая в диссертации – разработка метода и алгоритмов решения обратной задачи кинематики и планирования движения, обеспечивающих минимальное время при максимальной доле успешных решений.

Для достижения поставленной цели и решения научной задачи необходимо:

1. Провести анализ существующих методов и алгоритмов решения прямой и обратной задач кинематики и планирования движения для непрерывных роботов.
2. Разработать метод решения обратной задачи кинематики для одиночной секции изгиба с переменной кривизной, переменной длиной и возможностью линейного смещения базы.
3. Разработать алгоритм решения обратной задачи кинематики для многосекционного непрерывного робота на основе разработанного метода решения обратной задачи кинематики для одиночной секции изгиба.
4. Разработать алгоритм планирования движения на основе разработанного решения обратной задачи кинематики, реализация которого позволит предотвращать столкновения непрерывного робота со статическими препятствиями.

5. Разработать алгоритм планирования движения на основе разработанного решения обратной задачи кинематики, реализация которого позволит учитывать способность робота маневрировать при столкновении с препятствием.

6. Разработать программное обеспечение и провести вычислительные эксперименты с целью оценки результатов, полученных на основе предлагаемых метода и алгоритмов.

Методы исследования. Проведенные и представленные в работе исследования основаны на использовании метода аналитической геометрии, алгебры, статистического анализа, вычислительной математики, прикладного программирования, математического и имитационного моделирования.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней разработаны:

1. Новый метод решения обратной задачи кинематики для одиночной секции изгиба непрерывного робота с переменной кривизной, переменной длиной и возможностью линейного смещения базы, **отличающийся** от существующих итеративным поиском отношения между углом хорды (угол между хордой и касательной к началу секции) и углом изгиба и итеративным подбором линейного смещения базы.

2. Новый алгоритм решения обратной задачи кинематики для многосекционных непрерывных роботов (FABIKx), в основе которого лежит модифицированный алгоритм FABRIK, **отличающийся** от существующих использованием касательных (для определения предварительной позы робота) и хорд (для определения конфигурации и истинной позы робота через алгоритмы прямой и обратной кинематики одиночной секции).

3. Новый алгоритм планирования движения на основе разработанного алгоритма FABRIKx, который позволяет предотвращать столкновения с препятствиями, **отличающийся** использованием виртуальных звеньев при описании непрерывных роботов.

4. Новый алгоритм планирования движения, который позволяет учитывать способность непрерывных роботов маневрировать при контакте с препятствием, **отличающийся** от существующих использованием способности непрерывных роботов маневрировать при контакте с препятствиями.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод решения обратной задачи кинематики для одиночной секции изгиба позволяет решать обратную задачу кинематики для секций с переменной кривизной, переменной длиной и возможностью линейного смещения базы в режиме реального времени.

2. Предложенный алгоритм FABRIKx обеспечивает минимальное время при максимальной доле успешных решений задач обратной кинематики для многосекционного непрерывного робота.

3. Разработанный алгоритм планирования движения непрерывного робота, на основе алгоритма FABRIKx, обеспечивает: уклонение от столкновений с препятствиями и маневрирование через контакты с препятствиями, в режиме реального времени.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии и совершенствовании методов и алгоритмов управления непрерывными роботами.

Автором доказано, что разработанный метод и алгоритм решения обратной задачи кинематики превосходят аналоги по скорости работы и по доле успешных решений, а разработанные алгоритмы планирования движения имеют высокую эффективность и способны работать в реальном времени.

Практическая значимость. Разработанные алгоритмические и программные средства предназначены для решения обратной задачи кинематики и планирования движения многосекционных непрерывных роботов в режиме реального времени. Использование предложенных метода и алгоритмов позволило осуществить уклонение от препятствий в режиме реального времени и планировать движение, учитывая возможность робота маневрировать, используя контакты с препятствиями. Внедрение разработанных метода и алгоритмов в программное обеспечение, установленное для проведения работ в области неразрушающего контроля в ООО «Инспайр», дало возможность увеличить маневренность робота при оценке дефектов деталей.

Реализация и внедрение результатов. Результаты диссертационного исследования использовались при выполнении: х/д 15.10-421 от 18.10.2021 «Реализация алгоритмов управления роботизированной системой на прототипе программно-аппаратного комплекса», гранта РФФИ 20-38-90143 «Методы планирования и управления движением непрерывного робота при учете контактов робота с препятствиями». Проведена адаптация предложенных алгоритмов и метода на базе: ООО «Инспайр», г. Томск (акт о внедрении от 26.05.2021).

Апробация. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на конференциях: 18th International Conference on Mechatronics «Mechatronika 2018» (Брно, 2018); XV и XVI Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» (Томск, 2017 и 2018); «2019 Twelfth International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD)» (Москва, 2019); XIV международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения 2019» (Курск, 2019); III Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2019) (Санкт-Петербург, 2019).

Достоверность и обоснованность диссертационной работы обеспечивается корректностью постановок задач, строгостью применения математического аппарата, результатами компьютерного моделирования.

Публикации. По материалам работы опубликовано 13 научных работ, из них: 3 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК; 9 публикаций из источников, индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Оформлен 1 патент и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 133 наименований и 2 приложений. Содержание работы составляет 127 страниц текста, 33 рисунков и 13 таблиц.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует п. 5 («Методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства управления роботами, робототехническими и мехатронными системами, включая адаптивное, оптимальное, распределенное, интеллектуальное и супервизорное управление») в части «Методы и алгоритмы управления роботами, робототехническими и мехатронными системами»

паспорта специальности 2.5.4 – «Роботы, мехатроника и робототехнические системы», технические науки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе содержится обзор существующих подходов, методов и алгоритмов, которые применяются для решения прямой и обратной задач кинематики и планирования движения.

Обзор методов решения прямой задачи кинематики показал, что для непрерывных роботов чаще всего применяют два основных допущения. Первое, допущение о постоянстве кривизны – у всех непрерывных роботов в независимости от исполнительного механизма кривизна нейтральной оси постоянна по всей длине. Второе, допущение о том, что конструкция робота исключает возможность деформации кручения. Эти допущения дают возможность представить кривую изгиба нейтральной оси секции как дугу круга, что в свою очередь позволяет описать кинематику непрерывного робота через виртуального робота, состоящего из жестких звеньев переменной длины, соединенных сферическими шарнирами. Более перспективным способом описания непрерывных роботов является использование допущения о кусочно-постоянной кривизне. В этом случае секция изгиба состоит из подсекций, описываемых допущением о постоянстве кривизны.

Обзор методов решения обратной задачи кинематики показал, что итерационные численные методы, в основе которых лежит расчет элементов матрицы Якоби, являются наиболее распространенными. Отметим также перспективность применения алгоритма FABRIK, который показал свое превосходство при решении обратной задачи кинематики как для жестких, так и для непрерывных роботов. Несмотря на достигнутые результаты, все еще остаются нерешенными ряд проблем, в частности, низкая надежность, не способность работать в режиме реального времени, работа только с позиционной составляющей, вычислительная сложность, отсутствие масштабируемости и т.д.

Что касается планирования движения, то здесь в большинстве случаев используются методы планирования движения для жестких роботов, адаптированные к непрерывным роботам, которые часто опираются на алгоритмы обратной кинематики.

Анализ существующих методов и алгоритмов показал, что применение алгоритма FABRIK и допущения о кусочно-постоянной кривизне для решения обратной задачи кинематики дает возможность решить проблемы, связанные с масштабируемостью, ненадежностью и не способностью работать в режиме реального времени.

Во второй главе приведено описание разработанного метода решения обратной задачи кинематики для одиночной секции изгиба, детально рассмотрен предложенный алгоритм FABRIKx для решения обратной задачи кинематики для многосекционного непрерывного робота, а также продемонстрированы алгоритмы планирования движения.

Для описания непрерывного робота используются следующие допущения:

1. Непрерывные роботы состоят из N последовательных секций изгиба. Конструкция секций такова, что изменение конфигурации одной секции не приводит к изменению конфигурации остальных секций. Касательные двух соседних секций лежат на одной прямой в точке сопряжения секций. База первой секции в многосекционном непрерывном роботе может иметь возможность совершать линейные перемещения вдоль оси Z и вращаться вокруг оси Z для контроля вращения вокруг вектора ориентации секции.

2. Каждая секция изгиба может быть поделена на M подсекций. Во время изгиба секций все подсекции изгибаются одновременно. Угол между первой и последней касательными секции – угол изгиба секции. Касательные двух соседних подсекций лежат на одной прямой в точке сопряжения подсекций. Изменение длин подсекций происходит одновременно, когда секция меняет свою длину. Конструкция секции исключает деформацию кручения.

3. Допущение о постоянстве кривизны используется для описания формы нейтральной линии подсекции. Положение и ориентация конечного элемента робота определяется с использованием виртуального жесткого робота.

Исходя из уравнений прямой кинематики, был разработан метод решения обратной задачи кинематики для одиночной секции, который позволяет найти ближайшую к $\theta = 0$ и $h = 0$ конфигурацию секции (длина переменной части секции S'_Δ , угол изгиба θ , угол направления изгиба φ и/или ω , смещение базы h), которая удовлетворяет положению рабочего органа робота P_T . Входные параметры секции для обратной кинематики: база секции T_0 , постоянная длина секции S_C , максимальная длина переменной части секции S_Δ , максимально возможный угол изгиба θ_{max} , максимально возможное линейное смещение h_{max} (минимальное перемещение всегда 0), Δh_{max} – максимальное линейное смещение за итерацию, веса подсекций по длине W , веса подсекций по углу изгиба w , линейный допуск ε_L и угловой допуск ε_A .

Сущность разработанного метода заключается в решении обратной задачи кинематики на основе итеративного поиска отношения k между углом изгиба θ и углом хорды α и подборе линейного перемещения h (смещение базы) через угол хорды α и текущую длину переменной части секции S'_Δ .

Исходя из положения базы секции T_0 и целевого положения P_T определяем угол хорды α , как угол между вектором $\overrightarrow{T_0 P_T}$ и осью Z_0 . Для определения начального отношения k между углом изгиба θ и углом хорды α делается предположение, что секция изгиба имеет постоянную кривизну. Введение данного предположения является обоснованным, поскольку для секций с постоянной кривизной известно отношение угла изгиба θ к углу хорды α . Данное отношение постоянно и одинаково для всех секций постоянной кривизны: $k = 2$. Однако, для секций переменной кривизны соотношение k зависит от весов подсекций и текущего угла изгиба.

Значение k соответствует отношению $k = \theta/\alpha$, на основании которого можно определить угол изгиба секции. Зная значения угла изгиба θ и целевой точки P_T , можно определить длину переменной части секции S'_Δ . S'_Δ может принять значение больше S_Δ или меньше 0 для $h_{max} > 0$, что сигнализирует о необходимости линейного смещения.

Затем через прямую кинематику определяем положение конечного элемента секции P' для угла изгиба θ и длины переменной части секции S'_Δ . Для найденного положения

P' определяем угол хорды α' . В случае, если угол между α' и α больше углового допуска ϵ_Δ , то соотношение k для угла α подобрано неверно и, соответственно, угол изгиба θ рассчитан неверно. Если расстояние между целевой точкой P_T и текущим положением конечного элемента секции P' больше линейного допуска ϵ_L , то соотношение k и/или длина переменной части S'_Δ подобраны неверно.

В таком случае, необходимо переопределить угол изгиба, длину переменной части секции и пересчитать значение k . Исходим из известных утверждений:

1. Поскольку углу изгиба θ соответствует угол хорды α' , то соотношение можно переопределить, как $k = \theta/\alpha'$;

2. Используя новое значение отношения k , можно переопределить угол изгиба $\theta = k \cdot \alpha$;

3. Так как длина хорды линейно зависит от длины секции $S = S'_\Delta + S_C$, то можно переопределить длину переменной части секции, как $S'_\Delta = S'_\Delta \cdot |P|/|P'| - S_C$.

Для $h_{max} > 0$ требуется определить линейное перемещение базы Δh . С этой целью делаем предположение, что перпендикуляр к хорде в точке P'' является касательной прямой к рабочей области секции в точке P'' . Точка P'' соответствует положению конечного элемента секции при значении угла изгиба θ и максимальной длине переменной части секции S_Δ или текущей длине переменной части секции S'_Δ , если она лежит в допустимых границах $S'_\Delta \in [0, \dots, S_\Delta]$. Поскольку длина хорды при $\theta = const$ линейно зависит только от длины секции, то P'' можно определить исходя из целевой позиции P_T , максимальной S_Δ и текущей длины переменной части секции S'_Δ . Линейное смещение Δh определяется исходя из расстояния e между точками P'' и P_T и углом хорды α .

После линейного смещения базы, изменится угол хорды α . Следовательно, необходимо вновь переопределить угол изгиба θ и S'_Δ . Поиск решения осуществляется до тех пор, пока расстояние между P'' и P_T не станет меньше линейного допуска ϵ_L .

Углы поворота φ и ω дублируют функции друг друга и определяются с помощью компонентов P_T^X и P_T^Y целевой точки P_T в системе координат секции T_0 .

Предложенный метод был реализован в виде алгоритма, состоящего из следующих этапов:

1. Определяем целевую точку P_T в системе координат секции T_0 :

$$P = T_0^{-1} \cdot P_T \quad (1)$$

2. Рассчитываем угол поворота:

$$\omega = \varphi = \text{atan2}(P_Y, P_X) \quad (2)$$

3. Определяем целевой угол хорды α для точки P как:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\vec{z}_0 \cdot P}{|P|}\right) \quad (3)$$

где $\vec{z}_0$ – ось Z базы секции T_0 .

4. Предполагаем, что всю секцию изгиба можно описать допущением о постоянной кривизне, тогда угол изгиба θ равен:

$$\theta = 2\alpha \quad (4)$$

5. Текущую длину переменной части секции S'_Δ рассчитываем по формуле:

$$S'_\Delta = \frac{|P| \cdot \theta}{2 \cdot \sin(\theta/2)} - S_C \quad (5)$$

6. Через прямую кинематику определяем положение конечного элемента P' для длины переменной части секции S'_Δ , угла изгиба θ и угла поворота φ .

7. Определяем текущий угол хорды α' для P' по уравнению (3).

8. Определяем соотношение k , угол изгиба θ и длину переменной части секции S'_Δ по формулам:

$$k = \theta / \alpha' \quad (6)$$

$$\theta = k \cdot \alpha \quad (7)$$

$$S'_\Delta = S'_\Delta \cdot |P| / |P'| - S_C \quad (8)$$

9. Рассчитываем линейную и угловую ошибки:

$$e_L = |P - P'| \quad (9)$$

$$e_a = |\alpha - \alpha'| \quad (10)$$

10. Если $h_{max} = 0$, то переходим к шагу 17.

11. Определяем ошибку e между P и P'' :

$$S'_\Delta = \begin{cases} S'_\Delta, & \text{если } 0 < S'_\Delta < S_\Delta \\ S_\Delta, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (11)$$

$$e = |P| \cdot \left(1 - \frac{S_C + S_\Delta}{S_C + S'_\Delta} \right) \quad (12)$$

12. Если $e < \varepsilon_L$, то переходим к шагу 17.

13. Рассчитываем смещение Δh :

$$\Delta h = e / \cos(\alpha') \quad (13)$$

В зависимости от α' смещение Δh может быть слишком большим, поэтому его стоит ограничивать:

$$\Delta h = \begin{cases} \text{sign}(\Delta h) \cdot \Delta h_{max}, & \text{если } \Delta h_{max} < \Delta h \\ \Delta h, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (14)$$

14. Устанавливаем $e_L = 2 \cdot \varepsilon_L$ и $e_A = 2 \cdot \varepsilon_A$.

15. Переопределяем h и P :

$$h = h + \Delta h \quad (15)$$

$$P = P - [0; 0; \Delta h] \quad (16)$$

16. Переопределяем целевой угол хорды α по уравнению (3), угол изгиба θ по уравнению (7) и длину переменной части секции S'_Δ по уравнению (5).

17. Если $e > \varepsilon_L$, или $e_L > \varepsilon_L$, или $e_A > \varepsilon_A$, то переходим к шагу 7.

18. Корректируем S'_Δ , так чтобы она не выходила за лимиты:

$$S'_\Delta = \begin{cases} S_\Delta, & \text{если } S'_\Delta > S_\Delta \\ 0, & \text{если } S'_\Delta < 0 \\ S'_\Delta, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (17)$$

19. Определяем локальный максимум угла изгиба θ'_{max} для текущей длины переменной части секции S'_Δ , как:

$$\theta'_{max} = \begin{cases} S'_\Delta \cdot \theta_{max} / S_\Delta, & \text{если } S_\Delta \neq 0 \\ \theta_{max}, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (18)$$

20. Корректируем угол изгиба θ в зависимости от θ'_{max} :

$$\theta = \begin{cases} \theta, & \text{если } \theta < \theta'_{max} \\ \theta'_{max}, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (19)$$

21. Корректируем h :

$$h = \begin{cases} h_{max}, & \text{если } h > h_{max} \\ 0, & \text{если } h < 0 \\ h, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (20)$$

Альтернативным способом можно получить угол изгиба из угла хорды через аппроксимацию. Для этого необходимо заранее получить набор углов изгиба и соответствующие им углы хорд. Этот подход быстрее, чем итеративный, однако его точность зависит от качества аппроксимации.

На основе алгоритма FABRIK и обратной кинематики для одиночной секции был разработан алгоритм FABRIKx для решения обратной задачи кинематики для многосекционных непрерывных роботов. Алгоритм обратной кинематики для многосекционного непрерывного робота позволяет найти конфигурацию робота, достигающую целевое положение P_T с линейным допуском ϵ_p и целевую ориентацию $\vec{z}_T$ с угловым допуском ϵ_z . Непрерывный робот чаще всего представляет собой осевой инструмент, поэтому для того, чтобы задать его ориентацию в пространстве достаточно одного вектора.

Для работы с непрерывными роботами в алгоритме FABRIKx предложена стратегия, где каждая секция изгиба представляется виртуальным жестким роботом. Робот представлен тремя звеньями: два отрезка касательных (к началу и концу секции изгиба) и хорда, соединяющая начало и конец секции.

Алгоритм начинает работу с некой начальной позы, у которой известны все $(2N + 1)$ ключевые точки P . Ключевыми точками являются: начало робота; конец каждой секции; точки пересечения касательных. Исходя из ключевых точек определяем длины касательных как:

$$L_{2i-1} = |P_{2i}P_{2i-1}| \quad (21)$$

$$L_{2i} = |P_{2i}P_{2i+1}| \quad (22)$$

Каждая итерация алгоритма состоит из этапов прямого и обратного следования. Пример одной итерации алгоритма FABRIKx для трехсекционного непрерывного робота отражен на рисунке 1.

На этапе прямого следования робот рассматривается с позиции, что он состоит только из звеньев касательных, соединенных сферическими шарнирами, без ограничений на углы поворота. Цель этапа прямого следования – получить предварительную позу робота.

В начале этапа конечная точка робота P_N перемещается в целевую позицию P_T :

$$P_N = P_T \quad (23)$$

Значение вектора касательной $\vec{v}$ в точке P_N определяется целевым вектором ориентации $\vec{z}_T$:

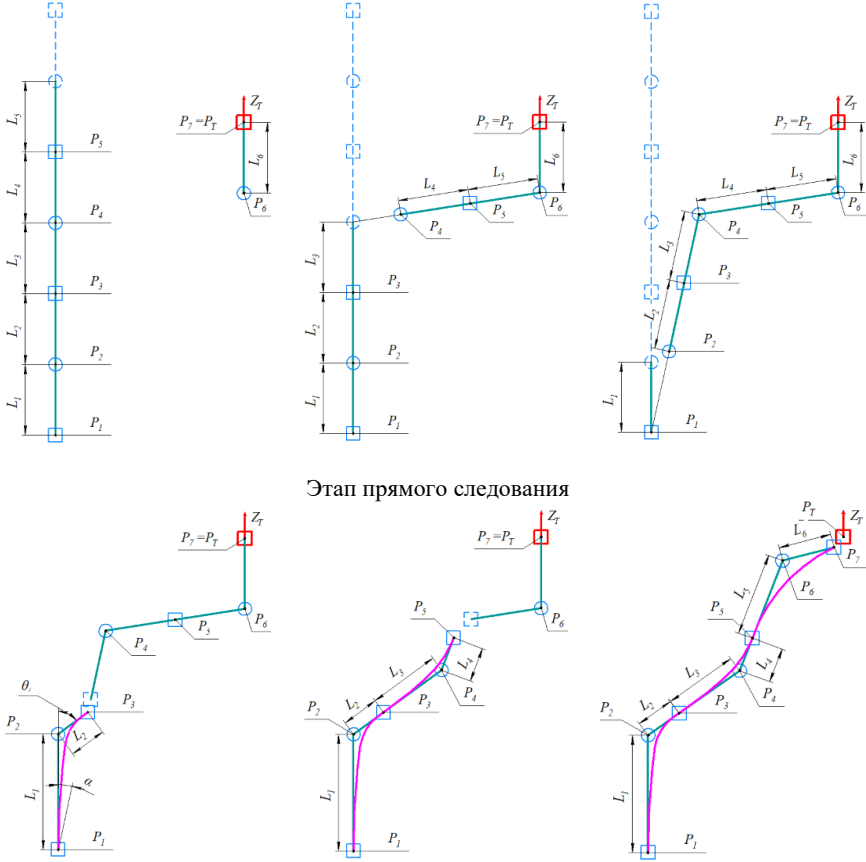
$$\vec{v} = -\vec{z}_T \quad (24)$$

Если $\vec{z}_T$ не задано, то вектор $\vec{v}$ определяется как:

$$\vec{v} = \overrightarrow{P_N P_{N-1}} / |\overrightarrow{P_N P_{N-1}}| \quad (25)$$

Затем переопределяются все оставшиеся ключевые точки, начиная с P_{N-1} до P_1 ($i = 0, \dots, N - 1$). Точки пересечения касательных определяем следующим образом:

$$P_{2(N-i)} = P_{2(N-i)+1} + \vec{v} \cdot L_{2(N-i)} \quad (26)$$



Этап прямого следования

Этап обратного следования

Рисунок 1 – Пример итерации алгоритма FABRIKx для трехсекционного непрерывного робота.

В точке пересечения определяем следующий вектор касательной:

$$\vec{v} = \begin{cases} -\vec{z}_0, & \text{если } i = N - 1 \\ \overrightarrow{P_{2(N-i)}P_{2(N-i-1)}} / |\overrightarrow{P_{2(N-i)}P_{2(N-i-1)}}|, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (27)$$

Конечная точка секции определяется как:

$$P_{2(N-i)-1} = P_{2(N-i)} + \vec{v} \cdot L_{2(N-i)-1} \quad (28)$$

Далее следует этап обратного следования. На этом этапе алгоритм определяет параметры конфигурации $(\theta, \varphi, S'_\Delta, \alpha)$ каждой секции от первой до последней $(i = 1, \dots, N)$ с использованием односекционной обратной кинематики для точки P_{2i+1}

и базы T_{i-1} . Затем через прямую кинематику определяется истинная поза робота. Длины касательных и точки их пересечения также переопределяются.

При завершении этапа обратного следования рассчитываются линейная и угловая ошибки. Если линейная или угловая ошибка больше, чем их допуски, то алгоритм выполняет следующую итерацию, начиная с этапа прямого следования. В противном случае полученные углы изгиба и поворота являются окончательным решением обратной задачи кинематики. Блок-схема алгоритма FABRIKx представлена на рисунке 2.

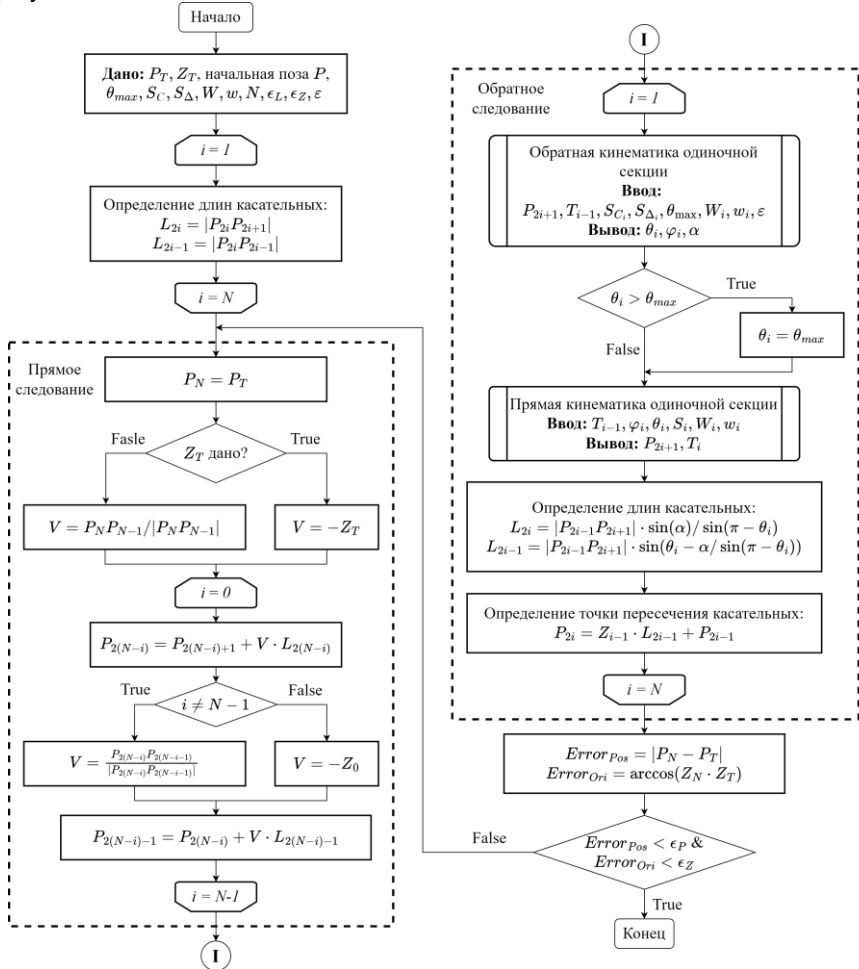


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма FABRIKx.

Также во второй главе приведено описание предложенного алгоритма предотвращения столкновений непрерывного робота с препятствиями для алгоритма FABRIKx.

FABRIKx решает обратную задачу кинематики представляя секции изгиба виртуальными звеньями. Поскольку виртуальные звенья не являются телом робота, то при столкновении препятствия с ними нельзя однозначно сделать вывод о том, что робот также сталкивается с препятствием (см. рисунок 3).

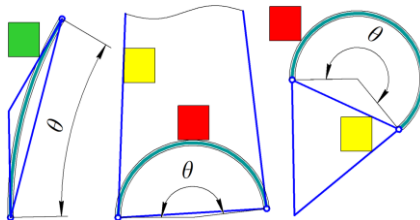


Рисунок 3 – Столкновения непрерывного робота (зеленая кривая) и виртуальных звеньев (синие отрезки) с препятствиями (квадраты). Зеленый квадрат – столкновение виртуального звена и реального робота совпадают. Жёлтые квадраты – столкновение с виртуальным звеном вдалеке от реального тела робота. Красные квадраты – столкновение с реальным телом робота вдалеке от виртуального звена.

С целью предотвращения столкновений робота с препятствием необходимо определить: центр дуги, описывающей секцию, и углы между тремя точками: середина дуги, центр дуги и препятствие. Исходя из этих параметров можно определить наличие/отсутствие столкновения и конфигурацию робота, которая позволяет его избежать. Алгоритм предотвращения столкновений является частью этапа обратного следования.

Следующим разработанным и рассмотренным во второй главе алгоритмом является алгоритм для планирования движения с учетом возможностей непрерывного робота обтекать препятствия. Обтекание является свойством непрерывного робота адаптировать свою форму под действием внешних нагрузок.

Для алгоритма планирования движения было сделано несколько допущений:

- Трение не влияет на форму робота при движении.
- Точка столкновения делит непрерывного робота на две части: до и после столкновения.

Первое допущение позволяет свободно толкать и тянуть корпус робота, не влияя на его форму. Второе допущение позволяет представить непрерывного робота, идущего из одной точки столкновения в другую, как многосекционный непрерывного робота, каждая секция изгиба которого заканчивается в точке столкновения.

Алгоритм позволяет получить искомое решение за несколько итераций. В начале каждой итерации, с помощью алгоритмов прямой и обратной кинематики для одиночной секции, определяются дуги от начальной точки робота до каждой точки столкновения (задаются пользователем) и целевой точки. Из полученного набора дуг удаляются те дуги, для которых по крайней мере одна точка лежит внутри препятствия

(рисунок 4). Оставшиеся дуги используются как базы для следующей итерации (рисунок 4). Алгоритм продолжает повторяться до тех пор, пока не достигнет целевой точки.

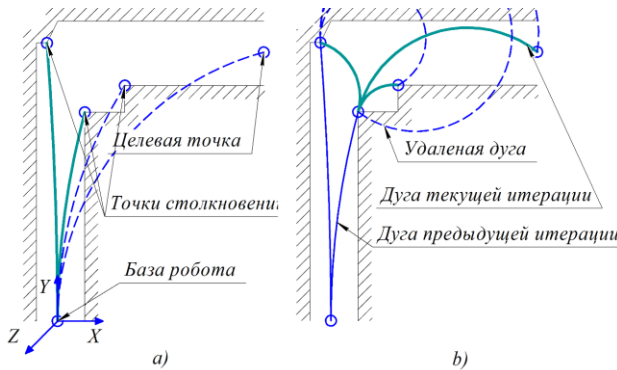


Рисунок 4 – Две итерации алгоритма. а) Дуги построены из базы. Дуги, которые проходят сквозь препятствие, удаляются. б) Новые дуги строятся на концах дуг, оставшихся с предыдущей итерации.

Третья глава посвящена экспериментальной части. Эксперименты проводились в серии симуляций, призванных:

- Оценить работоспособность предложенного метода решения обратной задачи кинематики для одиночной секции и сравнить его с существующим алгоритмом, основанным на вычислении элементов матрицы Якоби;
- Оценить работоспособность предложенного алгоритма решения обратной задачи кинематики для многосекционного робота и сравнить его с существующим алгоритмом, основанным на вычислении элементов матрицы Якоби, и алгоритмом FABRIKs, использующим для решения обратной задачи кинематики только касательные;
- Оценить работоспособность предложенного алгоритма планирования движения для уклонения от столкновений с препятствиями;
- Оценить работоспособность предложенного алгоритма планирования движения, который учитывает способность непрерывного робота обтекать препятствия.

Работоспособность метода решения обратной задачи кинематики для одиночной секции изгиба оценивалась по доле успешно решенных задач. Производительность метода была оценена по времени поиска решения и числу итераций. Генерация целей производилась посредством прямой кинематики, что гарантирует существование решения. Решение считается успешным, если обратная задача кинематики была решена менее чем за 0.5 мс, с точностью $\varepsilon_A = 0.001$ рад и $\varepsilon_L = 1$ мкм. Результаты симуляции для односекционного робота представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты обратной кинематики для одиночной секции

Секция	Число подсекций	Алгоритм	Успешные решения, %	Среднее время успешного решения, мкс	Среднее число итераций успешного решения
Постоянной длины	3	FABRIKx	99.9	63.8	3
		Якоби	92.3	189.6	12
	6	FABRIKx	99.9	70.0	3
		Якоби	91.5	219.4	12
	9	FABRIKx	99.9	73.7	3
		Якоби	90.3	236.6	9
Телескопическая	3	FABRIKx	94.4	56.8	3
		Якоби	62.3	136.8	8
	6	FABRIKx	95.3	61.6	3
		Якоби	60.5	159.2	8
	9	FABRIKx	96.2	67.5	3
		Якоби	60.4	180.5	8
Переменной длины	3	FABRIKx	95.3	103.3	8
		Якоби	83.2	136.4	8
	6	FABRIKx	95.1	124.5	7
		Якоби	81.2	163.9	8
	9	FABRIKx	95.6	147.1	7
		Якоби	81.3	190.3	8

Анализ результатов показывает, что предложенный метод решения обратной задачи кинематики для одиночной секции изгиба является более надежным и быстрым по сравнению с методом, основанным на вычислении элементов матрицы Якоби.

Работоспособность алгоритма решения обратной задачи кинематики для многосекционных роботов оценивалась по доле успешно решенных задач. Производительность алгоритма была оценена по времени поиска решения и числу итераций. Генерация целей производилась посредством прямой кинематики, что гарантирует существование решения.

Для многосекционного робота с секциями постоянной кривизны и длины решение считается успешным, если обратная задача кинематики была решена менее, чем за 300 итераций с точностью $\varepsilon_A = 0.1$ рад и $\varepsilon_L = 0.1$ мм. Результаты симуляции для односекционного робота представлена в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты обратной кинематики при достижении требуемой позиции и ориентации

Число секции в роботе	Успешность, %	Медианное время, мс	Медиана итераций
2	98.1	0.30	8
3	98.0	0.51	10
5	96.0	2.01	27
10	89.9	11.4	83
Среднее	98.3 ± 1.5	0.46^a	5.3^a

^a – на одну секцию.

Анализ результатов показывает, что предложенный в работе алгоритм FABRIKx является надежным способом решения обратной задачи кинематики для многосекционных непрерывных роботов. Успешность алгоритма остается высокой несмотря на увеличение секций изгиба, что говорит о способности к масштабированию.

Для проверки работоспособности алгоритма FABRIKx для решения обратной задачи кинематики для многосекционных непрерывных роботов постоянной длины и переменной кривизны проведено тестирование в симуляционных экспериментах на разных роботах: Трехсекционный робот с тремя подсекциями (Робот 1); Трехсекционный робот с пятью подсекциями (Робот 2); Трехсекционный робот с семью подсекциями (Робот 3); Трехсекционный робот с девятью подсекциями (Робот 4); Пятисекционный робот с тремя подсекциями (Робот 5); Семисекционный робот с тремя подсекциями (Робот 6).

Каждая секция имеет две степени свободы, включая изгиб (ограниченный $\theta_{max} = 100^\circ$) и поворот. Каждая секция имеет уникальную рабочую область. Параметры роботов представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Параметры секций		
Секция	Длины подсекций, мм	Весовые коэффициенты
Робот 1 (3 × 3)	1	[1, 0.001, 3]
	2	[3, 2, 1]
	3	[1, 7, 1]
Робот 2 (3 × 5)	1	[1, 1, 0.001, 3, 4]
	2	[4, 3, 2, 1, 0.001]
	3	[0.001, 1, 7, 1, 3]
Робот 3 (3 × 7)	1	[4, 1, 1, 0.001, 3, 4, 1]
	2	[1, 4, 3, 2, 1, 0.001, 4]
	3	[1, 0.001, 1, 7, 1, 3, 1]
Робот 4 (3 × 9)	1	[2, 4, 1, 1, 0.001, 3, 4, 1, 3]
	2	[4, 1, 4, 3, 2, 1, 0.001, 4, 1]
	3	[4, 1, 0.001, 1, 7, 1, 3, 1, 4]
Робот 5 (5 × 3)	1	[1, 0.001, 3]
	2	[3, 2, 1]
	3	[1, 7, 1]
	4	[0.001, 1, 0.001]
	5	[3, 1, 3]
Робот 6 (7 × 3)	1	[1, 0.001, 3]
	2	[3, 2, 1]
	3	[1, 7, 1]
	4	[0.001, 1, 0.001]
	5	[3, 1, 3]
	6	[3, 0.001, 1]
	7	[3, 0.001, 1]

Разработанный алгоритм FABRIKx использовался в двух вариантах для решения односекционной обратной кинематики: итерационный метод с точностью $\varepsilon_A = 0.006^\circ$ и $\varepsilon_L = 10$ мкм (I) и полиномиальная аппроксимация 10-й степени (P). Полученные результаты сравнивались с результатами алгоритма на основе матриц Якоби и алгоритма FABRIKs.

В ходе эксперимента использовалось 10^5 целевых положений и ориентаций в качестве входных данных для алгоритмов обратной кинематики для каждого робота. Каждое целевое положение и ориентация получены через прямую кинематику, что гарантирует существование хотя бы одного решения обратной задачи кинематики.

Считалось, что алгоритм достиг цели, если линейная ошибка меньше 10 мкм, а угловая ошибка меньше 0.01° . Время работы алгоритма было ограничено 30 мс. Отметим, что время работы алгоритма с матрицами Якоби было увеличено до 0.5 с для роботов 5 и 6. Этот случай отмечен как (S) в таблице 4.

Симуляция проводилась с использованием MATLAB 2021b в Windows 10 с процессором Intel Core i7-4790K 4.00 ГГц и 16 ГБ ОЗУ. Результаты моделирования представлены в таблице 4.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного алгоритма. Оба варианта FABRIKx показывают высокую долю успешно решенных задач обратной кинематики (от 58.9% до 93.8%). Разница в успешности вариантов FABRIKx невелика (менее 2%) и возникает из-за более высокой скорости FABRIKx (P). В целом алгоритм FABRIKx превосходит алгоритм FABRIKs на 1–15%, а алгоритм на основе матриц Якоби на 0–60% с точки зрения успешности.

Различия в показателях успеха для роботов 1–4 показывают, что эффективность FABRIKx снижается с увеличением количества подсекций, но остается на достаточно высоком уровне по сравнению с другими существующими алгоритмами, что говорит о возможности масштабируемости FABRIKx по количеству подсекций.

Различия в показателях успешности между роботами 1, 5 и 6 показывают, что количество секций существенно влияет на уровень успешности всех алгоритмов. Показатели успеха алгоритмов на основе FABRIKx, FABRIKs и Якобиана упали до 60%, 53% и 0% соответственно. Увеличение лимита времени выполнения улучшает результаты алгоритма на основе матриц Якоби, но он все еще значительно низок (5%) и не может работать в режиме реального времени. Это доказывает, что предложенный алгоритм обладает лучшей масштабируемостью по количеству секций.

Разница в уровне успеха (до 15%) между алгоритмами на основе FABRIKx и FABRIKs доказывает, что использование хорд на стадии обратного следования более эффективно, чем использование касательных.

Полученное время решения говорит о том, что FABRIKx может работать в режиме реального времени. FABRIKx (P) превосходит алгоритм на основе матриц Якоби в 1,5–2 раза по времени решения.

Таблица 4.

		Результаты				
	Алгоритм	Успешные решения, %	Время решения, мс		Итерации	
			Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
Робот 1 (3 × 3)	FABRIKx (I)	92.8	4.5	3.2	16	11
	FABRIKx (P)	93.8	3.3	2.1	17	11
	FABRIKc	78.5	4.4	2.3	29	14
	Jacobian	81.3	8.1	5.9	34	25
Робот 2 (3 × 5)	FABRIKx (I)	92.4	5.3	4.0	17	12
	FABRIKx (P)	93.6	3.6	2.4	18	12
	FABRIKc	79.5	4.3	2.2	27	13
	Jacobian	83.7	7.9	6.0	32	24
Робот 3 (3 × 7)	FABRIKx (I)	86.7	6.4	4.7	19	13
	FABRIKx (P)	88.5	4.2	2.8	20	14
	FABRIKc	75.8	4.9	2.6	30	15
	Jacobian	84.4	7.3	5.1	28	19
Робот 4 (3 × 9)	FABRIKx (I)	82.8	6.7	4.9	19	14
	FABRIKx (P)	84.9	4.4	2.9	21	14
	FABRIKc	73.4	5.0	2.7	30	15
	Jacobian	84.9	7.4	5.2	27	19
Робот 5 (5 × 3)	FABRIKx (I)	69.3	5.8	4.5	12	10
	FABRIKx (P)	70.7	4.1	3.1	13	10
	FABRIKc	70.0	4.0	3.0	16	12
	Jacobian	0.3	26.0	26.6	28	28
	Jacobian (S)	13.3	138.7	98.4	128	90
Робот 6 (7 × 3)	FABRIKx (I)	58.9	7.4	6.0	12	10
	FABRIKx (P)	60.4	5.4	4.1	13	10
	FABRIKc	53.1	8.2	6.2	24	18
	Jacobian	0	N/A	N/A	N/A	N/A
	Jacobian (S)	5.2	401.3	411.0	60	61

Достигнутые результаты демонстрируют, что предложенный алгоритм FABRIKx может улучшить: автономность работы; эффективность планирования движения, расчета траектории, уклонение от препятствий для многосекционных непрерывных роботов с переменной кривизной, предоставляя быстрые и точные решения обратной задачи кинематики. Унаследовав природу алгоритма FABRIK, предлагаемый алгоритм FABRIKx обладает целым рядом преимуществ, включая простую реализацию, отсутствие сингулярности, легкость модификации и масштабируемость по числу секций и подсекций.

Результаты экспериментов показывают, что предложенный алгоритм в общем случае позволяет получить лучшую эффективность по времени и успешности по сравнению с алгоритмом, использующим матрицы Якоби. Однако, один алгоритм может быть эффективнее другого в зависимости от конструкции непрерывного робота и ограничений на максимальный угол изгиба.

В третьей главе так же уделено внимание результатам работы *алгоритма уклонения*

от препятствий. В модели трехсекционный непрерывный робот двигался по траектории, проложенной внутри трубы, избегая касания ее стенок. Результаты моделирования представлены на рисунке 5.

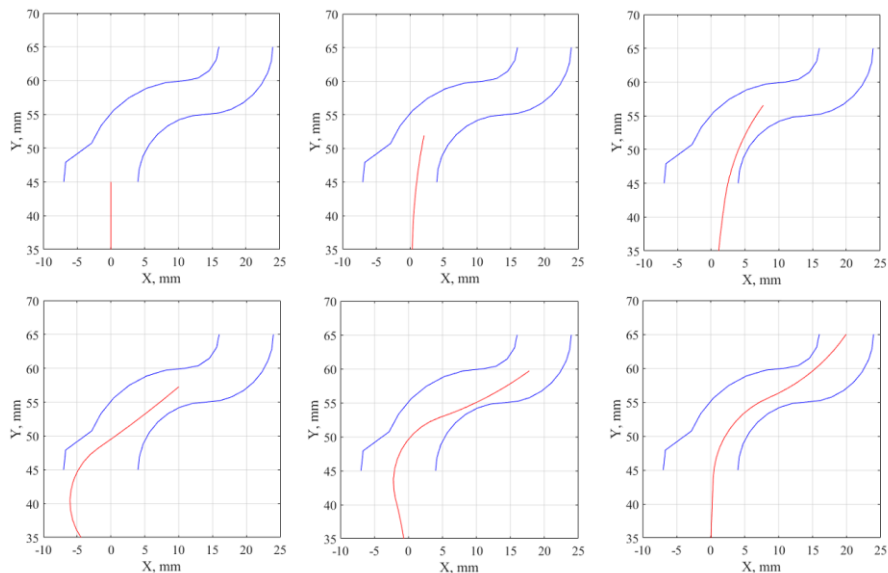


Рисунок 5 – Движение робота в трубке

Анализ результатов показывает, что реализация предложенного алгоритма дает возможность рассчитать движение непрерывного робота с учетом препятствий. Время работы алгоритма для расчета всей траектории из 13 точек составило 0.27 с. Малое время обработки свидетельствует о том, что алгоритм возможно применять в режиме реального времени, что имеет существенное значение при работе в динамически изменяющейся среде.

Для тестирования алгоритма обтекания препятствий выполнено три эксперимента (рисунок 6). Все случаи неразрешимы без столкновений. Общее время выполнения алгоритма ограничено 1 секундой. Результаты симуляции, а именно время работы, количество определенных пользователем точек столкновения и количество найденных решений, приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Результаты работы алгоритма

	Время работы, с	Точки столкновения	Найденные решения
Эксперимент 1	0.07	8	2
Эксперимент 2	0.06	6	2
Эксперимент 3	0.04	5	1

Результаты представленного исследования демонстрируют эффективность предложенного алгоритма. Алгоритм быстр и способен найти одно или несколько решений менее чем за 0.1 с. Время выполнения алгоритма зависит от количества точек столкновения и метода, на основе которого восстанавливаются дуги.

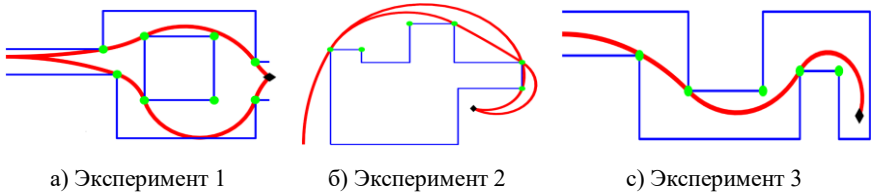


Рисунок 6 – Результаты симуляции. Синие линии – границы препятствий, красные кривые – найденные решения, зелёные точки – точки столкновения, заданные пользователем, чёрная точка – целевая точка.

В заключении сделаны выводы о полученных в процессе работы результатах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основной научный результат диссертации заключается в решении **актуальной научной задачи**, состоящей в *разработке метода и алгоритмов решения обратной задачи кинематики и планирования движения, обеспечивающих минимальное время при максимальной доле успешных решений.*

При проведении исследований и разработок получены следующие теоретические и прикладные результаты, обладающие научной новизной:

1. Разработан новый метод решения обратной задачи кинематики для одиночной секции изгиба, **отличающийся** от существующих итеративным подбором отношения между углом хорды и углом изгиба и обеспечивающий уменьшение времени на решение обратной задачи кинематики для односекционного робота с переменной кривизной на 35% при увеличении доли успешных решений на 20%.

2. Разработана новая модификация итеративного алгоритма FABRIK для решения обратной задачи кинематики для многосекционных непрерывных роботов, **отличающаяся** использованием касательных (для определения предварительной позы робота) и хорд (для определения конфигурации робота через алгоритм обратной кинематики и истинной позы робота через алгоритм прямой кинематики) и позволяющая решать быстро (среднее время решения 4.4мс) и эффективно (доля успешных решений 84.3%) обратную задачу кинематики для многосекционных непрерывных роботов с произвольными секциями изгиба и переменной кривизной.

3. За счет реализации предложенных метода и алгоритма решения обратной задачи кинематики достигнуто существенное увеличение доли успешных решений (до 93.8%), пределов масштабирования (60.4% для семисекционного робота с тремя подсекциями), а также уменьшение времени получения решения (среднее время решения 3.3 мс) по сравнению с существующими методами на основе матрицы Якоби и алгоритма FABRIK.

4. Представлен новый алгоритм планирования движения робота в режиме реального времени для предотвращения столкновения с препятствиями, в основе которого лежит разработанный алгоритм обратной кинематики. Алгоритм обеспечивает безопасное функционирование в режиме реального времени в среде с препятствиями. Реализация предложенного алгоритма дает возможность рассчитать движение непрерывного робота с учетом препятствий. Время работы алгоритма для расчета траектории из 13 точек составило 0.27 с., что соответствует менее, чем 21 мс на точку.

5. Разработан новый алгоритм планирования движения в режиме реального времени, позволяющий планировать движения с учетом способности непрерывных роботов обтекать препятствия. Алгоритм также позволяет планировать движение при захвате объектов. Алгоритм способен найти одно или несколько решений менее чем за 0.1 с.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК России:

1. Данилов, В. В. Автоматическое управление непрерывным роботом с использованием алгоритма FABRIK / В. В. Данилов, **Д. Ю. Колпашиков**, Н. В. Лаптев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7, № 4(27). – С. 1-2. – DOI 10.26102/2310-6018/2019.27.4.004.
2. **Kolpashchikov, D. Yu.** Comparison of Inverse Kinematics Algrithms for Multi-Section Continuum Robots / D. Yu. Kolpashchikov, O. M. Gerget // Mechatronics, Automation, Control. – 2021. – Vol. 22, No. 8. – P. 420-424. – DOI 10.17587/mau.22.420-424.
3. **Колпашиков, Д. Ю.** Сравнение результатов работы алгоритмов обратной кинематики на основе FABRIK для многосекционных непрерывных роботов / Д. Ю. Колпашиков, О. М. Гергет, В. В. Данилов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 12(753). – С. 34-45. – DOI 10.18698/0536-1044-2022-12-34-45.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science:

4. **Kolpashchikov, D.** Robotics in Healthcare / D. Kolpashchikov, O. Gerget, R. Meshcheryakov // Intelligent Systems Reference Library. – 2022. – Vol. 212. – P. 281-306. – DOI 10.1007/978-3-030-83620-7_12.
5. **Kolpashchikov, D.** FABRIKx: Tackling the Inverse Kinematics Problem of Continuum Robots with Variable Curvature / Kolpashchikov D., Gerget O., Danilov V. // Robotics. – 2022. – Т. 11, №. 6. – С. 128. – DOI 10.3390/robotics11060128
6. Use of semi-synthetic data for catheter segmentation improvement / Viacheslav V. Danilov, **Dmitrii Yu. Kolpashchikov**, Olga M. Gerget [et al.] // Computerized Medical Imaging and Graphics. – 2023. – Vol. 106. – С. 102188. – DOI 10.1016/j.compmedimag.2023.102188

7. FABRIK-Based Inverse Kinematics for Multi-Section Continuum Robots / **D. Y. Kolpashchikov**, N. V. Laptev, V. V. Danilov [et al.] // Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2018. – 2019. – P. 8624888.
8. Motion planning algorithm for continuum robots bending over obstacles / **D. Y. Kolpashchikov**, N. V. Laptev, R. A. Manakov [et al.] Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019. – 2019. – C. 269-272. – DOI 10.1109/CTS48763.2019.8973282
9. Gerget, O. M. Collision avoidance for continuum robot using FABRIK algorithm / O. M. Gerget, **D. Y. Kolpashchikov** // Proceedings of 2019 12th International Conference "Management of Large-Scale System Development", MLSD 2019. – 2019. – P. 8911070. – DOI 10.1109/MLSD.2019.8911070.
10. Inverse kinematics for steerable concentric continuum robots / **D. Kolpashchikov**, V. Danilov, N. Laptev [et al.] // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 154. – P. 89-100. – DOI 10.1007/978-981-13-9267-2_8.
11. Visual shape and position sensing algorithm for a continuum robot / R. A. Manakov, **D. Y. Kolpashchikov**, V. V. Danilov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1019, No 1. – P. 012066. – DOI 10.1088/1757-899X/1019/1/012066.

Публикации в других изданиях:

12. **Колпашиков, Д. Ю.** Конструирование роботизированного катетерного устройства для доставки инструмента внутрь работающего сердца / Д. Ю. Колпашиков, Е. Е. Шеломенцев, О. М. Гергет // Молодёжь и современные информационные технологии : сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 04-07 декабря 2017 г. / Министерство образования и науки РФ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", Инженерная школа информационных технологий и робототехники ; [редакционная коллегия: С. С. Михалевич, Д. М. Сонькин, М. А. Иванов и др.]. – Томск : Д-Принт, 2018. – С. 108-109.
13. **Колпашиков, Д. Ю.** Обратная кинематика для непрерывных роботов с использованием алгоритма FABRIK / Д. Ю. Колпашиков, Н. В. Лаптев // Молодёжь и современные информационные технологии : сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 3-7 декабря 2018 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", Инженерная школа информационных технологий и робототехники ; [редакционная коллегия: Д. М. Сонькин, А. Я. Пак, И. А. Ботыгин и др.]. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – С. 338-339.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и патента на изобретение:

14. Патент № 2721769 С1 Российская Федерация, МПК В25J 19/00. Стенд для контроля контурных перемещений гибкого манипулятора : № 2019127060 : заявл. 28.08.2019 : опубл. 22.05.2020 / Н. В. Лаптев, **Д. Ю. Колпашиков**, О. М. Гергет [и др.] ; патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет".

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664820 Российская Федерация. Система автоматического тестирования гибких роботов : № 2019663014 : заявл. 22.10.2019 : опубл. 13.11.2019 / В. В. Данилов, А. А. Кравченко, **Д. Ю. Колпашиков** [и др.] ; патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681279 Российская Федерация. Управление и контроль контурных перемещений гибкого манипулятора в лабораторном стенде : № 2021680612 : заявл. 13.12.2021 : опубл. 20.12.2021 / Н. В. Лаптев, **Д. Ю. Колпашиков**, О. М. Гергет, А. А. Кравченко ; патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611228 Российская Федерация. Расчёт обратной кинематики многосекционных последовательных непрерывных роботов : № 2022610414 : заявл. 13.01.2022 : опубл. 21.01.2022 / **Д. Ю. Колпашиков**, О. М. Гергет ; патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Вклад автора в результаты работ, опубликованных в соавторстве, состоит в разработке метода и алгоритмов обратной кинематики для непрерывных роботов и проведении экспериментов [1-3, 5, 7, 10, 13, 15-17], обзоре и анализе литературы о применении робототехники в медицине [4], описании кинематики роботизированного катетера [6], разработке алгоритмов планирования движения для непрерывных роботов [8-9], разработке алгоритма определения положения и ориентации непрерывного робота на видео [11], разработке конструктивных решений стенда для контроля перемещений гибкого манипулятора и роботизированного катетера [12, 14].