

Планирование движения непрерывных роботов с огибанием препятствий

Д. Ю. Колпащиков¹, Н. В. Лаптев², Р. А. Манаков³,

В. В. Данилов⁴, О. М. Гергет⁵

Томский политехнический университет

¹dyk1@tpu.ru, ²nikitalaptev77@gmail.com,

³ram290495@gmail.com,

⁴viacheslav.v.danilov@gmail.com, ⁵gerget@tpu.ru

Р. В. Мещеряков

Институт проблем управления
имени В. А. Трапезникова РАН

mr.v@ipu.ru

Аннотация. Непрерывные роботы - это манипуляторы, способные изгибаться в любой точке своей структуры. Особенности конструкции позволяют непрерывным роботам избегать нежелательных столкновений в сложных рабочих средах и захватывать объекты, используя своё тело. В связи с этим они используются в качестве инструментов в промышленности и медицине. Для непрерывных роботов столкновение с препятствием не всегда означает, что дальнейшее движение невозможно. Часть сплошного робота можно согнуть вокруг препятствия и протолкнуть дальше. В этой статье представлен алгоритм планирования движения для непрерывного робота на плоскости, который учитывает способность робота огибать препятствия. Для этого сделано два допущения. Первое допущение предполагает, что трение не влияет на форму робота, когда его проталкивают вперёд. Согласно второму допущению, точка столкновения делит одну секцию непрерывного робота на две секции, которые можно описать с помощью подхода постоянной кривизны. Данные допущения позволяют представить односекционный непрерывный робот, идущий из одной точки столкновения в другую, как многосекционный. Представленный алгоритм ищет конфигурацию, которая проходит через точки столкновения от начала робота к целевой точке при этом, не пересекая границы препятствий. Планирование движения происходит на основе этой конфигурации. Результаты моделирования показывают, что алгоритм относительно хорошо справляется с планированием движения с огибанием препятствий и способен находить несколько решений менее чем за 0,1 секунды.

Ключевые слова: непрерывный робот; планирование движения; кинематика

I. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывные роботы – это манипуляторы с непрерывно изгибающейся структурой. Подобная структура позволяет непрерывным роботам изгибаться в любой точке своего тела, что дает им возможность избегать нежелательных столкновений в ограниченном пространстве или хватать объекты, используя своё тело. В промышленности эти роботы применяются для неразрушающего контроля, ремонта газотурбинных двигателей [1], ядерных реакторов [2], в космических [3] и

подводных [4] технологиях. В медицине они широко используются в качестве эндоскопов и хирургических инструментов для малоинвазивной хирургии [5].

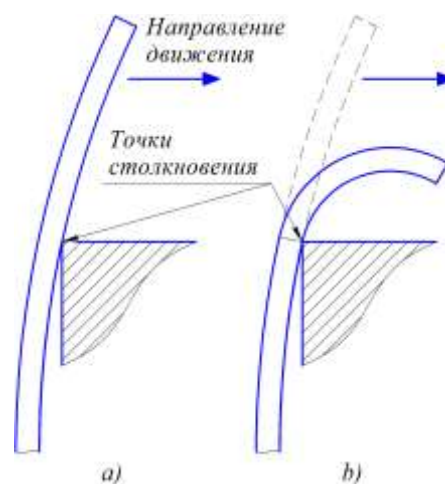


Рис. 1. а) Непрерывный робот сталкивается с препятствием.
б) Непрерывный робот продолжает движение, огибая препятствие

Традиционные жёсткие роботы и непрерывные роботы действуют по-разному, когда происходит столкновение с препятствием. Когда жёсткий робот сталкивается с жёстким препятствием, дальнейшее движение без разрушения робота или препятствия невозможно. Поэтому необходимо избегать столкновений при планировании движения жёстких роботов.

По сравнению с жёсткими роботами, состоящими из конечного числа звеньев, соединённых между собой соединениями, непрерывные роботы не содержат подобных звеньев и имеют бесконечное число вращательных соединений [6]. Управление бесконечным числом степеней свободы, с помощью конечного числа задействованных степеней свободы невозможно. Во время столкновения с препятствием или захвата объекта (рис. 1а) возникает внешняя нагрузка, под воздействием которой непрерывный робот изменяет форму изгиба и деформируется, чтобы приспособить свою форму к препятствию (рис. 1б) [7].

Планирование движения для непрерывного робота имеет решающее значение при работе в ограниченном пространстве с большим количеством препятствий. Поскольку непрерывный робот меняет свою форму после столкновения, существующие алгоритмы стараются избегать препятствий [8–10]. В связи с этим, в данной статье представлен алгоритм планирования движения на плоскости, который учитывает способность обогнуть препятствия для односекционного непрерывного робота.

II. МЕТОДЫ

A. Кинематическая модель

Кинематическая модель для непрерывного робота основана на подходе постоянной кривизны. В данном подходе односекционный непрерывный робот описывается как дуга с постоянной длиной. Матрица преобразования T_{TIP} , описывающая систему координат наконечника секции, определяется следующим образом:

$$T_{TIP} = T_{Base} T_{Bend} \left(\frac{a \cdot \theta}{2} \right) T_{Tr} (H(a)) T_{Bend} \left(\frac{a \cdot \theta}{2} \right) \quad (1)$$

$$H(a) = \frac{H \cdot \sin(a \cdot \theta/2)}{\sin(\theta/2)} \quad (2)$$

где T_{Base} – система координат базы робота, T_{Bend} – вращение вокруг оси Z , θ – угол изгиба, T_{Tr} – перемещение по оси Y , H – длина хорды соединяющей начало и конец дуги, коэффициент $a \in (0; 1]$. Когда $a = 1$, уравнение (1) определяет конец секции. Используя другие значения коэффициента a можно восстановить дугу.

Обратная кинематика также описывается подходом на основе постоянной кривой. Угол изгиба θ определяется следующим образом:

$$\theta = 2 \arccos \left(\frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \quad (3)$$

где X и Y координаты конца секции в системе координат базы секции изгиба.

B. Определение конечной позы

Для алгоритма входными данными являются целевая позиция, система координат базы робота, геометрические параметры препятствий и точки столкновения. Точки столкновения – это точки заданные пользователем на препятствиях, с которыми робот может столкнуться, обогнуть их и продолжить движение. Выходными данными являются углы изгиба и точки столкновения, определяющие окончательную позу.

Для алгоритма планирования движения было сделано несколько допущений:

- Трение не влияет на форму робота, когда он проталкивается вперёд.
- Точка столкновения делит робота на две части, которые имеют форму постоянной кривизны.

Первое предположение позволяет свободно толкать и тянуть корпус робота, не влияя на его форму. Второе предположение позволяет представить односекционный

непрерывный робот, идущий из одной точки столкновения в другую, как многосекционный непрерывный робот, каждая секция изгиба которого заканчивается в точке столкновения. Векторы, которые соединяют точки столкновения, базовую точку и целевую точку, являются хордами дуг. Набор хорд, последовательно идущих от базы робота к целевой точке через точки столкновения, представляет собой позу, которую робот должен принять, чтобы достичь целевой точки.

Представленный алгоритм находит решение в несколько итераций. В каждой итерации хорды строятся от базовых точек до точек столкновения и целевой точки. С помощью уравнения (3) определяется угол изгиба для каждой хорды. Затем с помощью уравнения (1) все дуги полностью восстанавливаются. Из этого набора дуг удаляются те, для которых, по крайней мере, одна точка лежит внутри препятствия (рис. 2a). Конечные матрицы преобразования оставшихся дуг становятся базами для следующей итерации (рис. 2b). Алгоритм продолжает повторяться, пока не достигнет целевой точки.

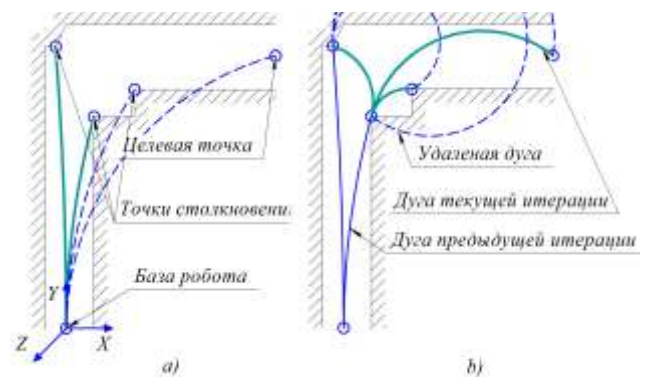


Рис. 2. Две итерации алгоритма. а) Дуги строятся из базы. Дуги, проходящие сквозь препятствия, удаляются. б) Новые дуги строятся из концов дуг, оставшихся с предыдущей итерации

C. Планирование движения

Движения идут от базы робота к целевой точке через все точки столкновения конечной позы. Сначала робот достигает первой точки столкновения, сгибаясь под углом θ_1 . Затем идет начальное проталкивание, представляющее собой небольшое проталкивание робота вперёд с учётом сохранения радиуса изгиба. Начальное проталкивание, необходимо для того, чтобы робот мог использовать точку столкновения в качестве опоры. Поза после толчка может быть определена уравнением (1), когда $a > 1$. Коэффициент a после толкания робота на длину l определяется следующим образом:

$$a = 1 + \frac{2 \cdot l \cdot \sin(\theta/2)}{\theta \cdot H(1)} \quad (4)$$

Точка столкновения разделяет секцию на две части. При этом возможны только два типа столкновения, а именно с ограничением на движение вперёд (рис. 3a) и с ограничением на движение назад (рис. 3b). При ограничении на движение вперёд дальнейшему изгибу мешает препятствие. Часть до точки столкновения

сохраняет свою форму во время движения вперед, в то время как часть после точки столкновения продолжает изгибаться. Во время движения назад обе части разгибаются как одна секция.

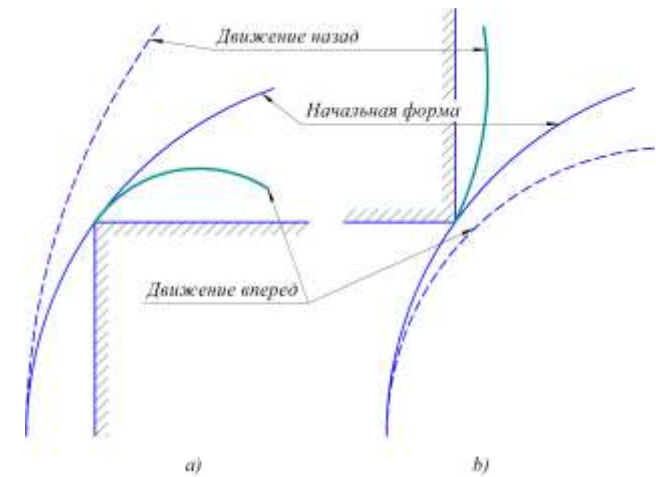


Рис. 3. Типы столкновений: а) с ограничением на движение вперед и б) с ограничением на движение назад

При ограничении на движение назад препятствие предотвращает разгибание. Часть до точки столкновения сохраняет свою форму во время движения назад, в то время как другая часть изгибается. Во время движения назад обе части сгибаются как одна секция. Важно отметить, что во время определения конечной позы не учитывается тип столкновения. Поэтому на этапе планирования движения, решения, которые ведут себя не так, как описано выше, должны быть удалены.

После начального проталкивания робот перемещается к следующей точке столкновения, сгибаясь под углом θ_2 . Чтобы не сталкиваться с препятствиями во время движения, движение робота повторяет желаемую форму робота. Для этого происходит сгиб под углом $a \cdot \theta_2$, где $a \in (0; 1]$. Остальные точки достигаются аналогичным образом.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для тестирования алгоритма было выполнено три эксперимента (рис. 4). Все случаи неразрешимы без столкновений для односекционного непрерывного робота. Симуляция выполнялась с использованием MATLAB 2019a на компьютере с процессором Intel Core i7-4790K 4.00 ГГц и 16 Гб оперативной памяти. Общее время выполнения алгоритма было ограничено 1 секундой. Результаты симуляции, а именно время работы, количество определенных пользователем точек столкновения и количество найденных решений приведены в таблице.

ТАБЛИЦА I РЕЗУЛЬТАТЫ СИМУЛЯЦИИ

	Время работы, с	Точки столкновения	Найденные решения
Случай 1	0,07	8	2
Случай 2	0,06	6	2
Случай 3	0,04	5	1

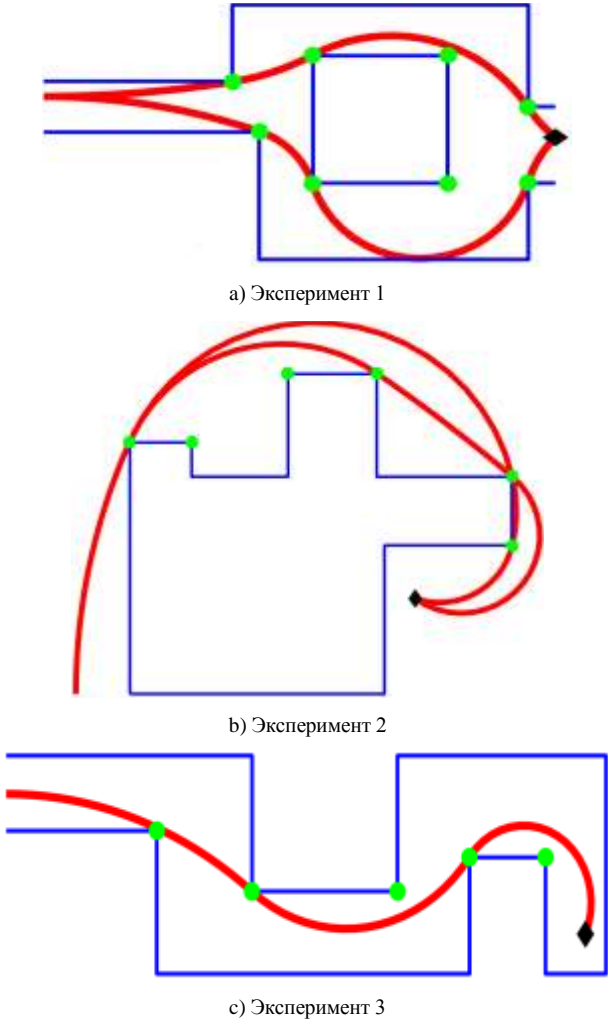


Рис. 4. Результаты симуляции. Синие линии – границы препятствий, красные кривые – найденные решения, зелёные точки – точки столкновения заданные пользователем, чёрная точка – целевая точка

IV. ВЫВОДЫ

Результаты представленного исследования демонстрируют эффективность предложенного алгоритма. Алгоритм относительно быстр и способен найти одно или несколько решений менее чем за 0,1 секунды. Время выполнения алгоритма зависит от количества точек столкновения и метода, которым восстанавливаются дуги. На каждой итерации алгоритм проверяет, возможен ли переход из одной точки столкновения в другую. Для этого дуги восстанавливаются, и проверяется, пересекают ли они границы препятствий. Чем больше точек столкновения, тем больше проверок необходимо выполнить во время итерации. Поэтому при большом количестве точек скорость алгоритма может значительно упасть. С другой стороны, чем больше точек, тем больше разных решений возможно найти.

Поскольку предложенный алгоритм представляет односекционный непрерывный робот многосекционным, каждый изгибающийся участок заканчивается в точке

столкновения. Предположительно возможно использовать предложенный алгоритм для разработки конструкции многосекционных непрерывных роботов, которые будут проходить через те же области с похожими движениями без столкновений.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен метод планирования движения с огибанием препятствий на плоскости односекционного непрерывного робота. Метод способен определить одну или несколько поз и последовательностей действий, которые необходимо выполнить непрерывному роботу, чтобы достичь целевой точки. Представленный алгоритм обладает относительно высокой скоростью работы и способен найти одно или несколько решений менее чем за 0,1 секунды. Стоит отметить, что скорость работы алгоритма зависит от количества точек столкновения, заданных пользователем.

При разработке алгоритма было сделано два допущения. Согласно первому допущению, трение не влияет на форму робота, когда он проталкивается вперёд. Второе допущение предполагает, что точка столкновения делит одну секцию изгиба непрерывного робота на две, которые впоследствии можно описать с помощью подхода постоянной кривизны. Первое допущение позволяет свободно толкать и тянуть робота, не влияя на его форму. Второе предположение позволяет представить односекционный сплошной робот, идущего из одной точки столкновения в другую, в виде многосекционного, каждая секция изгиба которого заканчивается в точке столкновения.

Предложенный алгоритм находит решение в несколько итераций. В каждой итерации хорды строятся от базовых точек до точек столкновения и целевой точки. Дуги

восстанавливаются из этих хорд. Из данного набора дуг удаляются те, для которых хотя бы одна точка лежит внутри препятствий и те, которые ведут себя не соответственно своему типу столкновения. Системы координат концов оставшихся дуг становятся базами для следующей итерации. Алгоритм продолжает выполняться, пока не достигнет целевой точки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Dong X. et al. Development of a slender continuum robotic system for on-wing inspection/repair of gas turbine engines // *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2017. Vol. 44. P. 218–229.
- [2] Buckingham R., Graham A. Nuclear snake-arm robots // *Ind. Robot An Int. J.* 2012. Vol. 39, № 1. P. 6–11.
- [3] Mehling J.S. et al. A minimally invasive tendril robot for in-space inspection // *Proc. First IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics*, 2006, BioRob 2006. IEEE, 2006. Vol. 2006. P. 690–695.
- [4] Guglielmino E., Tsagarakis N., Caldwell D.G. An octopus anatomy-inspired robotic arm // *IEEE/RSJ 2010 Int. Conf. Intell. Robot. Syst. IROS 2010 - Conf. Proc. IEEE*, 2010. P. 3091–3096.
- [5] Burgner-Kahrs J., Rucker D.C., Choset H. Continuum Robots for Medical Applications: A Survey // *IEEE Trans. Robot.* 2015. Vol. 31, № 6. P. 1261–1280.
- [6] Walker I.D., Choset H., Chirikjian G.S. Snake-Like and Continuum Robots // *Springer Handbook of Robotics*. Cham: Springer International Publishing, 2016. P. 481–498.
- [7] Giri N., Walker I. Continuum robots and underactuated grasping // *Mech. Sci.* 2011. Vol. 2, № 1. P. 51–58.
- [8] Xiao J., Vatcha R. Real-time Adaptive Motion Planning for a Continuum Manipulator // *2010 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.* 2010. P. 5919–5926.
- [9] Ataka A. et al. Real-time planner for multi-segment continuum manipulator in dynamic environments // *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. IEEE*, 2016. Vol. 2016-June. P. 4080–4085.
- [10] Godage I.S. et al. Path planning for multisection continuum arms // *2012 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. ICMA 2012. IEEE*, 2012. P. 1208–1213.