

# ОБРАТНАЯ КИНЕМАТИКА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНЫХ РОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА FABRIK

Д.Ю. Колпашиков, Н.В. Лаптев  
 Научный руководитель: Гергет О.М.  
 Томский политехнический университет  
 dyk1@tpu.ru

## Введение

Непрерывные роботы – гибкие, постоянно изгибающиеся манипуляторы. У данного вида роботов число шарниров стремится к бесконечности, а длины жестких звеньев стремятся к нулю [1]. Такая конструкция позволяет использовать непрерывных роботов в местах со сложной геометрией. Они используются для неразрушающего контроля, ремонта трубопроводов, газотурбинных двигателей, ядерных реакторов, в качестве манипуляторов в космосе, для лазерной резки и в медицине [2].

Системы управления непрерывными роботами основаны на принципах прямой и обратной кинематики. На данный момент существует несколько подходов к решению обратной кинематики для непрерывных роботов, состоящих из нескольких управляемых секций. Наиболее часто используются обратные матрицы Якоби [3], которые пригодны для решения в большинстве случаев. Однако они имеют проблемы с сингулярностью и высокой вычислительной сложностью. В работе [4] с целью решения задач обратной кинематики используют геометрический подход. Данный подход прост для расчетов, но решение ищется для конкретной конфигурации и зачастую требуется перебор для поиска решения.

В данной работе используется алгоритм Обратной Кинематики Прямого и Обратного Следования (FABRIK) [5]. FABRIK это итеративный алгоритм, который является более эффективным для решения поставленных задач, в сравнении с обратными Якобианами и геометрическим подходом.

## Описание алгоритма

FABRIK изначально создавался для работы с традиционными дискретными роботами, состоящими из конечного числа жестких звеньев и шарниров. В свою очередь непрерывные роботы имеют бесконечное число шарниров и длины звеньев, стремящиеся к нулю. Это делает невозможным решение задачи обратной кинематики для непрерывных роботов. Поэтому секции изгиба представлены в виде звеньев с переменной длиной (хорд), которые соединяют начало и конец секции. Длины хорд зависят от угла изгиба и могут быть рассчитаны с помощью прямой кинематики [6]. В непрерывных роботах одна дуга изгиба плавно переходит в другую, что усложняет расчеты. Однако поскольку хорды только соединяют начало и конец секций, то угол между ними может быть любым. Это делает возможным представление непрерывного робота

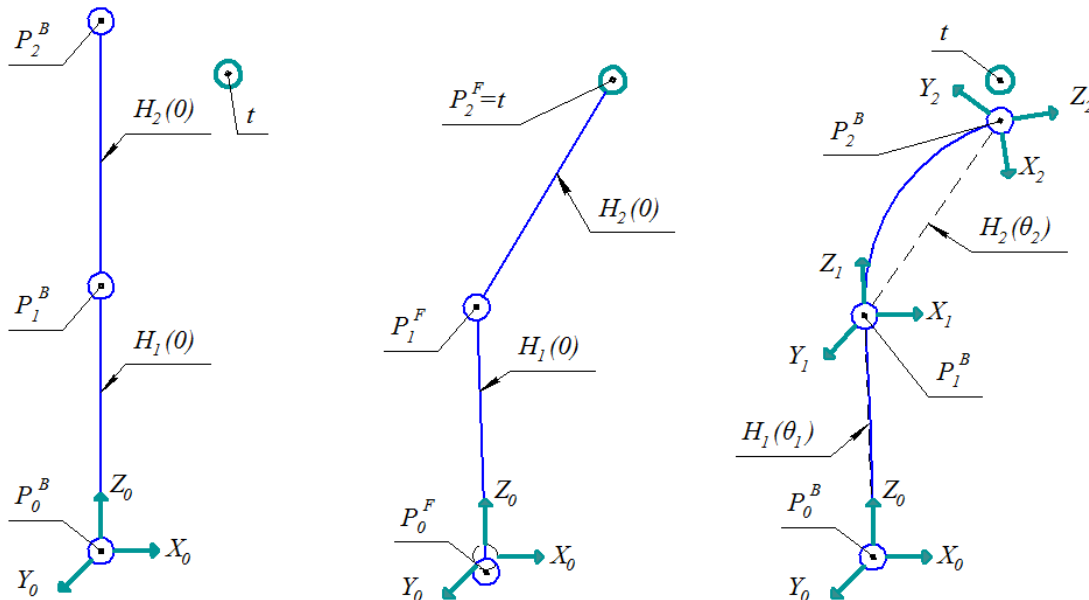


Рис. 1. Пример полной итерации алгоритма. Слева – начальная позиция робота. Центр – результат прямого следования. Справа – результат обратного следования и восстановления дуг из хорд. Вектора  $X_i, Y_i$  и  $Z_i$  – определяют ориентацию кончика дуги и получаются при восстановлении дуги.  $P_i^B$  – положение точки в результате обратного следования.  $P_i^F$  – положение точки в результате прямого следования.

как цепи из звеньев переменной длины соединенных шарнирами. Решение данной цепи является простой задачей для алгоритма.

Реализация алгоритма позволяет найти такую совокупность углов изгиба  $\theta$  и поворота  $\varphi$ , что кончик робота  $P_Q$  находится в окрестностях целевой точки  $t$  с допуском  $TL$ . Для работы алгоритма требуются длины дуг секций изгиба  $S$  и ограничения на угол изгиба  $\theta_{max}$ .

Алгоритм ищет решение за несколько итераций. Каждая итерация включает в себя этапы прямого и обратного следования. Пример работы алгоритма представлен на рисунке. В прямом следовании решение производится для хорд  $H_i(\theta_i)$  постоянной длины без наложения каких-либо ограничений. Конечная точка переносится в целевую и цепь перестраивается. При этом первая точка цепи смещается относительно первоначального положения, чего не может быть. Поэтому, чтобы вернуть её на место производится обратное следование.

В обратном следовании первая точка цепи возвращается на место. При этом цепь снова перестраивается. На данном этапе с помощью прямой кинематики происходит восстановление дуг секций изгиба из хорд и определение новых точек концов секций и обновление длин дуг. В конце обратного следования происходит проверка того, находится ли кончик робота в окрестностях целевой точки. Если данное условие не выполняется, то алгоритм производит еще одну итерацию. Итерации повторяются до тех пор, пока кончик робота не достигнет области допуска или пока алгоритм не превысит число допустимых итераций.

#### Тестирование алгоритма обратной кинематики

Алгоритм был протестирован в симуляции на двухсекционном непрерывном роботе. Каждая секция изгиба длиной 50 мм имела возможность совершать два вида движения – изгиб и поворот. Сочетание этих движений позволяет секции гнуться в любом направлении.

На алгоритм были наложено ограничение в 100 итераций для ускорения расчётов. Линейный допуск установлен в 1 нм. Для тестирования алгоритма было определено  $10^6$  случайных точек с помощью прямой кинематики. Использование прямой кинематики гарантирует, то что все точки лежат внутри рабочей области робота и для них существует как минимум одно решение. Эффективность алгоритма оценивалась по времени, затраченному на расчёт одной точки и по количеству достигнутых точек.

Алгоритм позволяет найти решение для 99.6% точек. Скорость расчета составила  $0.52 \pm 0.48$  мс. На каждую точку в среднем уходило  $9.8 \pm 9$  итераций.

#### Заключение

В результате проведенного тестирования можно сделать вывод о том, что алгоритм обратной кинематики для непрерывных роботов с несколькими секциями изгиба работоспособен. Реализация алгоритма позволяет найти 99.6% точек данных ему в качестве целевых с точностью в 1 нм. Скорость работы расчета каждой точки составила  $0.87 \pm 0.49$  мс. Быстродействие алгоритма говорит о возможности его применения для работы в реальном времени (30 кадров в секунду).

Полученный алгоритм планируется использовать для автоматизации управления непрерывными роботами.

Работа выполнена в рамках государственного задания Наука (тема «Моделирование и алгоритмизация процессов обработки, анализа и репрезентации графических данных в режиме реального времени для проведения эндоваскулярных операций на сердце», № 17.8205.2017/БЧ)

#### Список использованных источников

1. 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.
2. 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.
3. Jones B.A., Walker I.D. Kinematics for multisection continuum robots // IEEE Trans. Robot. 2006. Vol. 22, № 1. P. 43–55.
4. Neppalli S. et al. Closed-form inverse kinematics for continuum manipulators // Adv. Robot. 2009. Vol. 23, № 15. P. 2077–2091.
5. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem // Graph. Models. Elsevier Inc., 2011. Vol. 73, № 5. P. 243–260.
6. Колпащиков Д. Ю., Шеломенцев Е. Е. Конструирование роботизированного катетерного устройства для доставки инструмента внутрь работающего сердца // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 04-07 декабря 2017 г., г. Томск.—Томск, 2017. – С. 108-109.