



УДК 004.896:621.865

DOI 10.25559/SITITO.17.202101.734

Применение метода FABRIK для моделирования захвата цели манипулятором

А. С. Харюнин^{1*}, Е. А. Самылина², Н. А. Борисов¹

¹ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

* sharyunin@mail.ru

² Национальный исследовательский институт Высшая школа экономики, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация

В работе рассматривается метод инверсной кинематики FABRIK (Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics). Алгоритм рассматривается применительно к задаче перемещения манипулятора с последующим захватом цели. Приведено несколько подходов к решению поставленной задачи, а именно: захват при помощи манипулятора с мощным магнитом, устройство захвата типа «клешня», различные вариации манипуляторов, использующих две подвижные плоскости для захвата цели, манипулятор с устройством захвата типа «гарпун». Данные методы рассматриваются с точки зрения применения ограничений, наложенных на углы поворотов звеньев манипулятора.

Далее в статье описаны подробнее наиболее перспективные методы из перечисленных с точки зрения авторов. Для прогнозирования положения в пространстве цели захвата предложено использовать фильтр Калмана, что делает возможным адекватно спланировать движение манипулятора для захвата движущейся цели.

В перспективе развития данного подхода планируется использование дополнительного захвата пальчикового типа в условиях большего множества ограничений (ограничения на углы манипулятора, на его габариты и задания области возможных перемещений в пространстве), а также использование методов прогнозирования движения объектов на основе фильтрации параметров движения с использованием аппарата стохастических дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: инверсная кинематика, FABRIK, фильтр Калмана, манипулятор, захват цели, система наблюдателя.

© Харюнин А. С., Самылина Е. А.,² Борисов Н. А., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Using the FABRIK method to simulate target capture by a manipulator

A. S. Kharyunin^{*1}, E. A. Samylina², N. A. Borisov¹

¹Lobachevsky University of Nizhny Novgorod, Russia

* sharyunin@mail.ru

²High School of Economics of Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

The paper considers the FABRIK (Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics) method. The algorithm is considered in relation to the problem of moving the manipulator with the subsequent target capture. Several approaches to solving the problem are presented, namely: gripping with a manipulator with a powerful magnet, a "pincer" gripper, various variations of manipulators using two movable planes to grip a target, a manipulator with a harpoon gripper. These methods are considered from the point of view of applying the restrictions imposed on the angles of rotation of the manipulator links. The article also describes in more detail the most promising methods from those listed from the point of view of the authors. To predict the position in space of the capture target, it is proposed to use the Kalman filter, which makes it possible to adequately plan the movement of the manipulator to capture a moving target. In the future development of this approach, it is planned to use an additional finger-type gripper under conditions of numerous restrictions (restrictions on the angles of the manipulator, on its dimensions and setting the area of possible displacements in space), as well as the use of methods for predicting the movement of objects based on filtering motion parameters using the apparatus of stochastic differential equations.

Keywords: Inverse kinematics, FABRIK, Kalman filter, manipulator, target acquisition, observer system.

Введение

Инверсная кинематика (ИК) – процесс определения параметров связанных гибких объектов (например, кинематическая пара или кинематическая цепь) для достижения необходимой позиции, ориентации и расположения этих объектов [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Инверсная кинематика является методом планирования движения и активно используется в робототехнике [7, 8, 9, 10], трёхмерной компьютерной анимации и в разработке компьютерных игр. Она особенно эффективна в тех ситуациях, когда необходимо точное позиционирование подвижных сочленений одного объекта относительно других объектов окружающей среды [1, 11, 12, 13, 14].

Инверсная кинематика определена как задача определения подходящей конфигурации звеньев манипулятора, при которых его последнее звено движется к желаемой позиции так плавно, быстро и точно, насколько это возможно. Однако, множество известных и доступных методов имеют существенные недостатки, а именно:

- большая вычислительная сложность;
- после выполнения алгоритма звенья манипулятора занимают неестественное положение.

Основным отличием прямой кинематики от инверсной кинематики является то, что при прямой, любое воздействие передается по иерархической цепочке сверху вниз. Инверсная кинематика использует принцип, диаметрально противоположный принципу прямой – перемещение компонентов-потомков приводит к изменению положения компонентов-предков, то есть алгоритм рассчитывает положение и ориентацию компонентов-предков, исходя из положения и ориентации компонентов-потомков.



Ключом к успешной реализации инверсной кинематики является анимация в пределах ограничений: конечности (манипуляторы) должны вести себя в разумных «антропоморфических» пределах. Точно такая же ситуация и с робототехническими устройствами, которые имеют физические ограничения, определяемые средой, в которой они работают, ограничения подвижности их суставов и ограниченные физические нагрузки и скорости, с которыми они в состоянии двигаться.

В нашем случае мы будем рассматривать эвристический метод, называемый «Метод прямого и обратного следования» (Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics), сокращённо FABRIK [1, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. FABRIK по сравнению с другими известными методами отличается надёжностью, меньшей вычислительной сложностью и простым критерием сходимости [21]. Этот метод решает задачу о поиске положения каждого узла путём вычисления позиции точки на линии [22]. Таким образом, данный метод сходится за относительно небольшое количество итераций, соответственно имеет низкую вычислительную сложность, а манипулятор и после выполнения задачи занимает естественное положение. Можно легко включить в FABRIK ограничения на область перемещения [23], кроме этого, метод легко справляется с поставленной задачей и при наличии нескольких конечных точек [24].

Цель исследования

Рассматривается некоторый объект в пространстве, который будем называть целью захвата. Цель динамически движется в пространстве по нетривиальной траектории. Нашей задачей будет после некоторого наблюдения за объектом либо попытаться с помощью многократного решения задачи перемещения манипулятора посредством алгоритма FABRIK попытаться захватить цель [2, 4], либо, рассмотреть усложнённый вариант, а именно, спрогнозировать направление движения цели используя систему наблюдателя, а затем уже попытаться захватить цель, используя текущий прогноз.

Будем рассматривать ситуацию, когда известны положение и скорость x, y, z и v_x, v_y, v_z цели и будем детерминировано вычислять в какой точке мы будем в следующий момент. Координаты цели могут определяться, например, с помощью захвата ее камерой, кроме этого подразумеваем, что объект цели является точечным и сферическим.

Кроме всего вышеперечисленного, также можно добавить в задачу следующее ограничение: пусть манипулятор движется в прогнозируемое значение не через фиксированный интервал времени dt , а через некоторый динамический интервал, чтобы приближаться к цели максимально быстро. Кроме того, можно предположить, что цель движется не по прямой, а рисует в пространстве некоторый конус возможных направлений движения, а манипулятор, в свою очередь, движется в ту точку конуса, которая находится ближе всего к нему.

Основная часть

Методика эксперимента

Главным отличием от ранее рассмотренных разными специалистами задач, связанных с алгоритмом FABRIK, является дополнение в виде захвата цели, а не просто следование к ней.

Рассмотрим варианты решения задачи перемещения и захвата цели манипулятором при использовании алгоритма FABRIK или связки «FABRIK и система наблюдателя»:

Для реализации первого предложенного решения необходимо сначала ввести некоторое ограничение, а именно, будем предполагать, что цель захвата обладает магнитными свойствами, и манипулятор, соответственно, тоже. Тогда для захвата цели манипулятору нужно оказаться как можно ближе к цели, неважно с какой стороны, и при достаточном приближении цель примагнитится к манипулятору. Данный метод не требует особых усложнений для алгоритма FABRIK, однако, имеем ограничение для манипулятора и цели.



Рисунок 1. Манипулятор с устройством захвата, основанном на использовании магнетизма.

Второе предложенное решение не подразумевает ограничений на тип материала, из которого будут изготовлены манипулятор и цель захвата. В качестве другого решения предлагается «сыграть на опережение», в частности, манипулятору необходимо иметь скорость перемещения быстрее, чем у цели захвата, тогда мы сможем догнать цель и захватить её, а именно, захват будет произведён при помощи специального механизма манипулятора, под которым подразумевается захлопывающаяся ловушка, открытая до тех пор, пока мы не захватили объект, и закрывающаяся после захвата, тем самым оставляя цель захвата внутри ловушки.

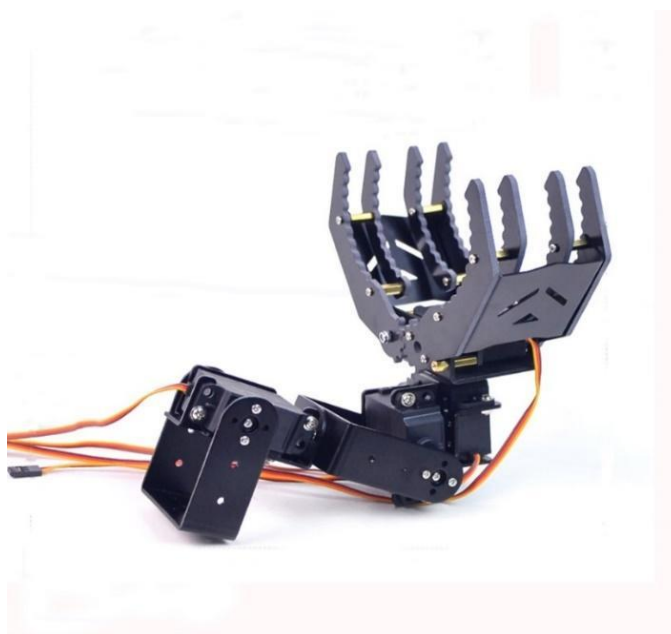


Рисунок 2. Устройство захвата для манипулятора - ловушка.

Следующее решение похоже на предыдущее, лишь с учётом того, что имеется изменение механизма захвата. Пусть в качестве последнего узла манипулятора мы используем две подвижные плоскости, которые могут сдвигаться и раздвигаться, с помощью них, мы и захватим цель после приближения к ней таким же



образом, как и было описано в предыдущем методе. Ещё одной модификацией механизма захвата можно выбрать манипулятор с некоторым подобием гарпуна на конце, который также, при достаточном приближении к цели, будет выстреливать и протыкать цель, однако, в данном случае мы имеем несколько недостатков, например, если выстрел пройдёт мимо, то необходимо как-то вернуть гарпун в исходное для стрельбы положение, или, допустим, если цель нельзя или невозможно проткнуть, то данный метод вообще не работает



Рисунок 3. Манипулятор с устройством захвата, основанном на двух подвижных плоскостях.

Рисунок 4. Манипулятор с другим устройством захвата, основанном на двух подвижных плоскостях.

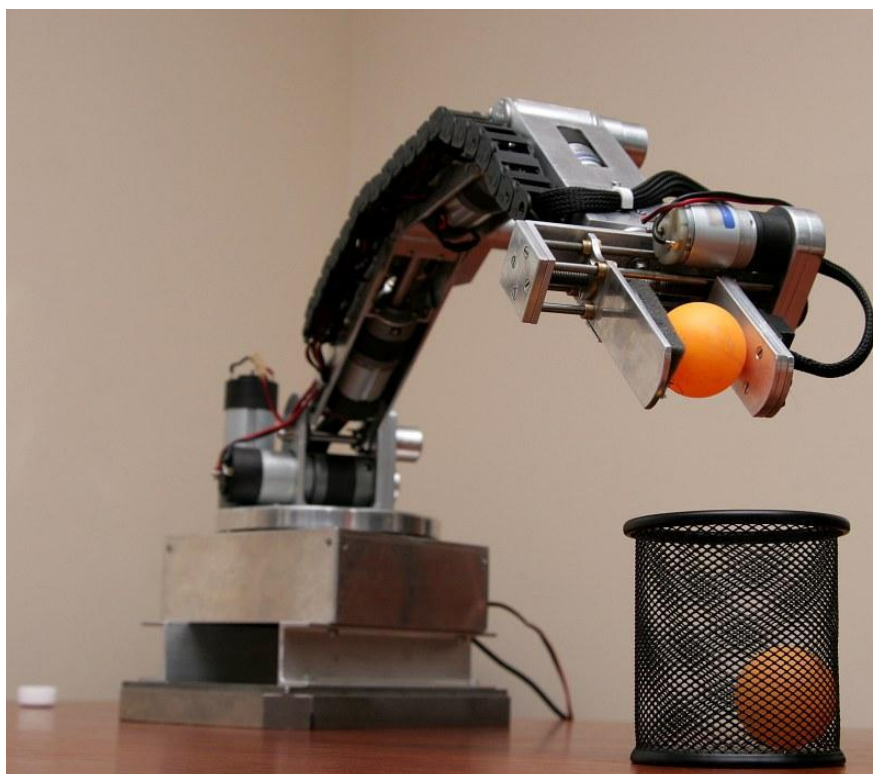




Рисунок 5. Пример ружья с устройством захвата - гарпуном.

Использование системы наблюдателя для прогнозирования положения в пространстве цели захвата

Для прогнозирования положения в пространстве цели захвата будем использовать фильтр Калмана [25].

Фильтр Калмана — один из самых популярных инструментов фильтрации данных, используемый во многих отраслях науки. Он используется для эффективной оценки состояния системы на основе серии зашумленных измерений или измерений с нескольких датчиков.

Каждое состояние системы можно описать вектором ее параметров. Путем некоторого воздействия система переходит из одного состояния в другое. Множество всех состояний системы и переходов образуют некоторую модель.

Существует понятие вектор данных наблюдения. Это набор параметров системы, которые мы можем извлечь из наблюдения за поведением системы. В большинстве случаев размерность вектора состояний системы превосходит размерность вектора данных наблюдения. При этом фильтр Калмана способен оценить с некоторой вероятностью полное внутреннее состояние системы.

Фильтр Калмана работает с дискретизированными по времени линейными динамическими системами. Такие системы моделируются цепями Маркова при помощи линейных операторов и слагаемых с нормальным распределением. В каждый дискретный момент времени линейный оператор действует на состояние и переводит его в другое состояние, добавляя некоторую случайную величину в виде нормального шума и в общем случае вектор управления, моделирующий воздействие управляющего сигнала.

Математическую модель данного процесса обычно представляют в матричной форме и записывают в виде:

$$\begin{aligned}x_k &= F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k, \\z_k &= H_k x_k + u_k\end{aligned}$$

где F_k - матрица ($n \times n$), описывающая, как изменяется состояние системы при переходе из $k - 1$ в k без управляющего воздействия; B_k - матрица ($n \times l$), описывающая, как управляющее воздействие u_k изменяет состояние из $k - 1$ в k , l - размерность управляющего воздействия; H_k - матрица ($c \times n$), описывающая, как состояние x_k преобразуется в наблюдение z_k , c - размерность вектора наблюдения; w_k, u_k - произвольные



значения, представляющие нормально распределенный шум при измерении состояния с соответствующими матрицами ковариации:

$$Q_k, R_k, w_k \sim N(0, Q_k), u_k \sim N(0, R_k).$$

Использование фильтрации данных позволяет оценить положение цели с заданной точностью, что делает возможным корректно спланировать движения захвата и манипулятора в целом с использованием алгоритма FABRIK.

Заключение

В статье описано применение алгоритма FABRIK, а также фильтра Калмана к задаче преследования и захвата цели с помощью манипулятора. Представлено несколько различных способов решения исследуемой проблемы. С точки зрения авторов наиболее целесообразным решением является применение алгоритма FABRIK для перемещения манипулятора и захвата цели, и фильтра Калмана для определения траектории движения цели.

В перспективе исследований планируется реализовать выбранный метод решения технически и провести вычислительные эксперименты с последующим анализом полученных данных. В дальнейшем развитии данного подхода планируется использование дополнительного захвата пальчикового типа в условиях большего множества ограничений (ограничения на углы манипулятора, на его габариты и задания области возможных перемещений в пространстве), а также использование методов прогнозирования движения объектов на основе фильтрации параметров движения с использованием аппарата стохастических дифференциальных уравнений.

Список литературы

1. Харюнин А. С. Решение задачи инверсной кинематики методом FABRIK / А. С. Харюнин, М. Г. Кильдишев, Н. А. Борисов // Материалы сборника научных трудов III Международной научной конференции «Конвергентные когнитивно-информационные технологии» и XIII Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование», Москва, Россия, 29 ноября-02 декабря 2019. – С. 212-219.
2. Страшнов Е. В. Планирование захвата объектов виртуальным антропоморфным роботом с применением инверсной кинематики / Е. В. Страшнов, А. В. Мальцев // Труды научно исследовательского института системных исследований Российской Академии Наук. – 2019. – выпуск №3. – С. 66-72.
3. Анкундинов В. Х. Инверсная кинематика шагающего робота-гексапода / В. Х. Анкундинов, А. В. Максимов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2019. – выпуск №7. – С. 16-23.
4. Архипов А. Е. Применение системы захвата движения в инверсной кинематике в тренажерных комплексах / А. Е. Архипов, Д. Л. Дедов, А. О. Сидорчук, А. Н. Бочарова // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн» / Тамбовский государственный технический университет (Тамбов). – 2020. – С. 73-76.
5. Марышев П. А. Моделирование инверсной кинематики манипулятора средствами MATHCAD / П. А. Марышев, С. Г. Кузовков // Материалы IX международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых»: в 3 частях / Поволжский государственный технологический университет (Йошкар-Ола). – 2014. – С. 105-107.
6. Thomas Joseph Collins, Wei-Min Shen, High-Dimensional Inverse Kinematics and Self-Reconfiguration Kinematic Control, 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR).
7. Richard M. Murray, S. Shankar Sastry, Li Zexiang, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 1994.



8. Mathias Parger, Joerg H. Mueller, Dieter Schmalstieg, Markus Steinberger, Human Upper-Body Inverse Kinematics for Increased Embodiment in Consumer-Grade Virtual Reality, Proc. ACM Virtual Reality Software and Technology (VRST).
9. Olatunji Mumini Omisore, Shipeng Han, Lingxue Ren, Nannan Zhang, Kamen Ivanov, Ahmed Elazab, Lei Wang, Non-iterative geometric approach for inverse kinematics of redundant lead-module in a radiosurgical snake-like robot, Omisore et al. BioMed Eng OnLine (2017) 16(93).
10. Li-Chun Tommy Wang, Chih Cheng Chen, A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators, IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (4)(1991) 489–499.
11. Jonathan Blow, Inverse Kinematics with Quaternion Joint Limits, Game Developer, April 2002.
12. Deepak Tolani, Ambarish Goswami, Norman I. Badler, Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs, Graphical Models 62 (5) (2000) 353–388.
13. Sanghyun Kim, Junhyung Kim, Ji-Hun Bae, Jaeheung Park, Real-time Inverse Kinematics Technique for Controlling Redundant Avatar Arm, Ubiquitous Robots 2018.
14. Ahlem Bentrah, Abdelhamid Djeflal, Med Chaouki Babahenini, Christophe Gillet, Full Body Adjustment Using Iterative Inverse Kinematic and Body Parts Correlation, Journal of Mobile Multimedia, Vol. 10, No. 3&4 (2014) 309–326.
15. Харюнин А. С. Демонстрация освоения компетенций ФГОС на примере реализации алгоритма инверсной кинематики в трехмерном пространстве с учетом ограничений / А. С. Харюнин, М. Г. Кильдишев, Н. А. Борисов // Образовательных технологии и общество. – 2019. – выпуск №4. – С. 115-122.
16. 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. – том № 7, выпуск №4 (27). – С. 1-2.
17. Гергет О. М. Предотвращение столкновений для непрерывного робота с использованием алгоритма FABRIK / О. М. Гергет, Д. Ю. Колпашиков // Тезисы доклада на конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019», Москва, Россия, 01-03 октября, 2019. – С. 742-744..
18. Mahmoud A. Y. Abdallah, Mohammed Saeed Baziyed, Raouf Fareh, Tamer Rabie, Tracking control for robotic manipulator based on FABRIK algorithm, 2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET).
19. Songqiao Tao, Yumeng Yang, Collision-free motion planning of a virtual arm based on the FABRIK algorithm, Robotica 35 (6) (2017) 1431-1450.
20. Weihao Zhang, Zhixiong Yang, Tianlai Dong and Kai Xu, FABRIK: an Efficient Iterative Inverse Kinematics Solver for Continuum Robots, Proceedings of the 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Auckland, New Zealand, July 9-12, 2018.
21. Aristidou Andreas, Lasenby Joan, FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem, Graphical Models 73 (5) (2011) 243-260.
22. Lansley, A., Vamplew, P., Smith, P. and Foale, C., 2016. Caliko: An Inverse Kinematics Software Library Implementation of the FABRIK Algorithm. Journal of Open Research Software, 4(1), p.e36. DOI: <http://doi.org/10.5334/jors.116>.
23. Andreas Aristidou, Yiorgos Chrysanthou, Joan Lasenby, Extending FABRIK with model constraints, Computer Animation and Virtual Worlds 27 (1) 35-37.
24. Dmitrii Yu Kolpashchikov, Nikita V. Laptev, Viacheslav V. Danilov, Igor P. Skirnevskiy, Roman A. Manakov, Olga M. Gerget, FABRIK-Based Inverse Kinematics for Multi-selection Continuum Robots, 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2018.
25. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана – Бьюси: детерминированные наблюдения и стохастическая фильтрация. – М.: Наука, 1982.



Харюнин Александр Сергеевич, аспирант института информационных технологий, математики и механики, ассистент кафедры прикладной инженерии института информационных технологий, математики и механики, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, sharyunin@mail.ru, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 2, каб. 320. Область научных интересов: робототехника, интеллектуальные системы, системы электронного обучения.

Борисов Николай Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной инженерии института информационных технологий, математики и механики, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, nborisov.itmm@yandex.ru, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 2, каб. 320. Область научных интересов: робототехника, интеллектуальные системы, системы электронного обучения.

Самылина Евгения Александровна, аспирант кафедры фундаментальной математики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12, samyлина_evgeniya@mail.ru, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12. Область научных интересов: робототехника, системы электронного обучения, хаотическая динамика, бифуркации, странные аттракторы.