

Применение метода FABRIK для моделирования захвата цели манипулятором

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

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород, Российская Федерация
603022, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23
* sharyunin@mail.ru

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Нижний Новгород, Российская Федерация
603155, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12

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 большого 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.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Харюнин, А. С. Применение метода FABRIK для моделирования захвата цели манипулятором / А. С. Харюнин, Е. А. Самылина, Н. А. Борисов. – DOI 10.25559/SITITO.17.202101.734 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 1. – С. 116-123.

© Харюнин А. С., Самылина Е. А., 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^{a*}, E. A. Samylina^b, N. A. Borisov^a

^a National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603022, Russian Federation

* sharyunin@mail.ru

^b National Research University Higher School of Economics, Nizhny Novgorod, Russian Federation

25/12 Bolshaya Pecherskaya St., Nizhny Novgorod 603155, Russian Federation

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.

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Kharyunin A.S., Samylina E.A., Borisov N.A. Using the FABRIK Method to Simulate Target Capture by a Manipulator. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2021; 17(1):116-123. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202101.734>



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 среды¹ [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 пытаться захватить цель, используя текущий прогноз.

Будем рассматривать ситуацию, когда известны положение и скорость и 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, 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, независимо 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.

Второе предложенное решение не подразумевает ограничение 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

¹ Blow J. Inverse Kinematics with Quaternion Joint Limits [Электронный ресурс] // Game Developer. April 2002. Pp. 16-18. URL: https://ubm-twvideo01.s3.amazonaws.com/o1/vault/GD_Mag_Archives/GDM_April_2002.pdf (дата обращения: 17.12.2020).

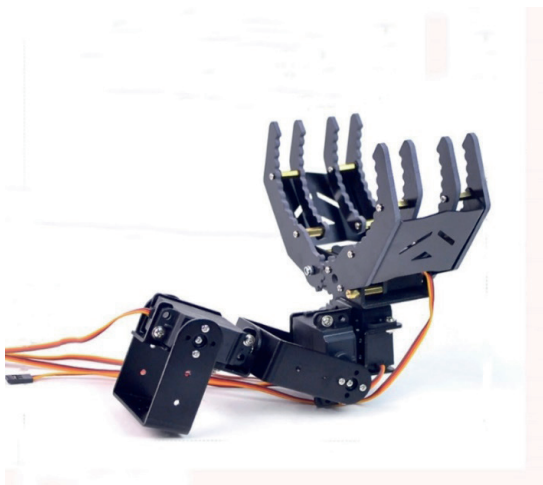


объект, и закрывающаяся после захвата, тем самым оставляя цель захвата внутри ловушки.



Р и с. 1. Манипулятор с устройством захвата, основанном на использовании магнетизма

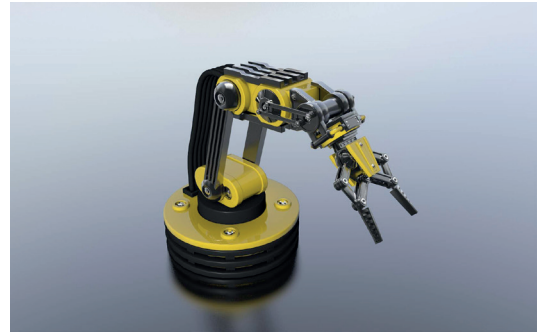
F i g. 1. Manipulator with gripping device based on magnetism



Р и с. 2. Устройство захвата для манипулятора - ловушка

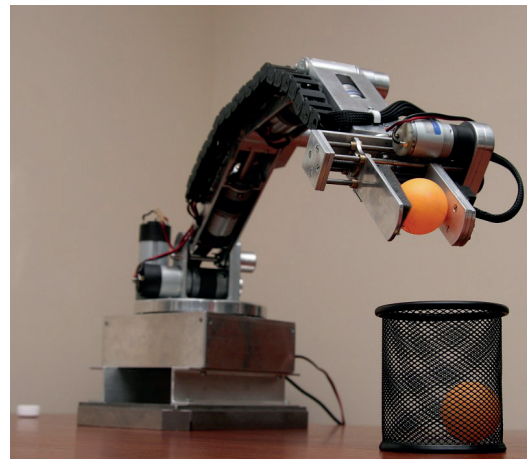
F i g. 2. Gripping device for manipulator - trap

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 сработает.



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

F i g. 3. Manipulator with a gripping device based on two movable planes



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

F i g. 4. Manipulator with another gripping device based on two movable planes



Р и с. 5. Пример ружья с устройством захвата - гарпуном

F i g. 5. Example of a shotgun with a harpoon gripper

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:

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k,$$

$$z_k = H_k x_k + u_k$$

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 вычислитель-

ные 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 использованных источников

- [1] Харюнин, А. С. Решение задачи инверсной кинематики методом FABRIK / А. С. Харюнин, М. Г. Кильдишев, Н. А. Борисов // Современные информационные технологии и ИТ-образование: Сборник научных трудов / Под ред. В. А. Сухомлина. - М.: ВМК МГУ, 2019. - С. 212-219. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38581996> (дата обращения: 17.12.2020).
- [2] Страшнов, Е. В. Планирование захвата объектов виртуальным антропоморфным роботом с применением инверсной кинематики / Е. В. Страшнов, А. В. Мальцев. - DOI 10.25682/NIISI.2019.3.0009 // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. - 2019. - Т. 9, № 3. - С. 66-72. - Рез. англ.
- [3] Анкундинов, В. Х. Инверсная кинематика шагающего робота-гексапода / В. Х. Анкундинов, А. В. Максимов. - DOI 10.18127/j15604128-201907-03 // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2019. - Т. 24, №7. - С. 16-23. - Рез. англ.
- [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». - Тамбов: ТГТУ, 2020. - С. 73-76. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42357459> (дата обращения: 17.12.2020). - Рез. англ.
- [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. - Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. - С. 105-107. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25119720> (дата обращения: 17.12.2020).
- [6] Collins, T. J. Particle Swarm Optimization for high-DOF inverse kinematics / T. J. Collins, W. Shen. - DOI 10.1109/ICCART.2017.7942651 // 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCART). - Nagoya, Japan, 2017. - Pp. 1-6.
- [7] Murray, R. M. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation / R. M. Murray, Z. Li, S. S. Sastry. - 1st ed. - CRC Press, 1994.
- [8] Parger, M. Human Upper-Body Inverse Kinematics for Increased Embodiment in Consumer-Grade Virtual Reality



- / M. Parger, J. H. Mueller, D. Schmalstieg, M. Steinberger. – DOI 10.1145/3281505.3281529 // Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '18). – Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018. – Article 23.
- [9] Omisore, O. M. Non-iterative geometric approach for inverse kinematics of redundant lead-module in a radiosurgical snake-like robot / O. M. Omisore, S. Han, L. Ren, N. Zhang, K. Ivanov, A. Elazab, L. Wang. – DOI 10.1186/s12938-017-0383-2 // BioMedical Engineering OnLine. – 2017. – Vol. 16, issue 1. – Article 93.
- [10] Wang, L.-T. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators / L.-T. Wang, C. C. Chen. – DOI 10.1109/70.86079 // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1991. – Vol. 7, issue 4. – Pp. 489-499.
- [11] Gupta, K. Improved numerical solutions of inverse kinematics of robots / K. Gupta, K. Kazerounian. – DOI 10.1109/ROBOT.1985.1087237 // Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – St. Louis, MO, USA, 1985. – Pp. 743-748.
- [12] Tolani, D. Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs / D. Tolani, A. Goswami, N. I. Badler. – DOI 10.1006/gmod.2000.0528 // Graphical Models. – 2000. – Vol. 62, issue 5. – Pp. 353-388.
- [13] Ahn, J. Formation-Based Tracking Method for Human Following Robot / J. Ahn, M. Kim, S. Kim, S. Lee, J. Park. – DOI 10.1109/URAI.2018.8441820 // 2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR). – Honolulu, HI, USA, 2018. – Pp. 24-28.
- [14] Bentrach, A. Full Body Adjustment Using Iterative Inverse Kinematic and Body Parts Correlation / A. Bentrach [и др.] // Journal of Mobile Multimedia. – 2014. – Vol. 10, issue 3-4. – Pp. 309-326. – URL: <https://journals.riverpublishers.com/index.php/JMM/article/view/4581> (дата обращения: 17.12.2020).
- [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 // Образовательные технологии и общество. – 2019. – Т. 22, №4. – С. 115-122. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41233707> (дата обращения: 17.12.2020). – Рез. англ.
- [16] Данилов, В. В. Автоматическое управление непрерывным роботом с использованием алгоритма FABRIK / В. В. Данилов, Д. Ю. Колпащиков, Н. В. Лаптев. – DOI 10.26102/2310-6018/2019.27.4.004 // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7, № 4. – С. 1-2. – Рез. англ.
- [17] Гергет, О. М. Предотвращение столкновений для непрерывного робота с использованием алгоритма FABRIK / О. М. Гергет, Д. Ю. Колпащиков. – DOI 10.25728/mlsd.2019.1.0742 // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019. – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 742-744.
- [18] Abdallah, M. A. Y. Tracking control for robotic manipulator based on FABRIK algorithm / M. A. Y. Abdallah, M. S. Baziyed, R. Fareh and T. Rabie. – DOI 10.1109/ICASET.2018.8376844 // 2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). – Dubai, Sharjah, Abu Dhabi, United Arab Emirates; 2018. – Pp. 1-5.
- [19] Tao, S. Collision-free motion planning of a virtual arm based on the FABRIK algorithm / S. Tao, Y. Yang. – DOI 10.1017/S0263574716000205 // Robotica. – 2017. – Vol. 35, issue 6. – Pp. 1431-1450.
- [20] Zhang, W. FABRIKc: an Efficient Iterative Inverse Kinematics Solver for Continuum Robots / W. Zhang, Z. Yang, T. Dong, K. Xu. – DOI 10.1109/AIM.2018.8452693 // 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). – Auckland, New Zealand, 2018. – Pp. 346-352.
- [21] Aristidou, A. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem / A. Aristidou, J. Lasenby. – DOI 10.1016/j.gmod.2011.05.003 // Graphical Models. – 2011. – Vol. 73, issue 5. – Pp. 243-260.
- [22] Lansley, A. Caliko: An Inverse Kinematics Software Library Implementation of the FABRIK Algorithm / A. Lansley, P. Vamplew, P. Smith, C. Foale. – DOI 10.5334/jors.116 // Journal of Open Research Software. – 2016. – Vol. 4, issue 1. – Article e36.
- [23] Aristidou, A. Extending FABRIK with model constraints / A. Aristidou, Y. Chrysanthou, J. Lasenby. – DOI 10.1002/cav.1630 // Computer Animation and Virtual Worlds. – 2015. – Vol. 27, issue 1. – Pp. 35-37.
- [24] Kolpashchikov, D. Y. FABRIK-Based Inverse Kinematics For Multi-Section Continuum Robots / D. Y. Kolpashchikov, N. V. Laptev, V. V. Danilov, I. P. Skirnevskiy, R. A. Manakov, O. M. Gerget // 2018 18th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME). – Brno, Czech Republic, 2018. – Pp. 1-8.
- [25] Браммер, К. Фильтр Калмана – Бьюси: детерминированные наблюдения и стохастическая фильтрация / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – М.: Наука, 1982.

Поступила 17.12.2020; одобрена после рецензирования 24.02.2021; принята к публикации 20.03.2021.

Об авторах:

Харюнин Александр Сергеевич, аспирант, ассистент кафедры прикладной инженерии, Институт информационных технологий, математики и механики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (603022, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1029-3938>, sharyunin@mail.ru

Самылина Евгения Александровна, аспирант кафедры фундаментальной математики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (603155, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-8537-8851>, samylnina_evgeniya@mail.ru

Борисов Николай Анатольевич, доцент кафедры прикладной инженерии, Институт информационных технологий, математики и механики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им.



Н.И. Лобачевского» (603022, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23), кандидат технических наук, доцент, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-3924-8591>, nborisov.itmm@yandex.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Kharyunin A.S., Kildishev M.G., Borisov N.A. *Reshenie zadachi inversnoj kinematiki metodom FABRIK* [Solution of the inverse kinematics problem using the FABRIK method]. In: V.A. Sukhomlin (Ed.) *Proceedings of the International Conference on Modern Information Technologies and IT-Education*. CMC MSU Publ., Moscow; 2019. p. 212-219. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38581996> (accessed 17.12.2020). (In Russ.)
- [2] Strashnov E.V., Maltsev A.V. Grasp planning for virtual anthropomorphic robot using inverse kinematics. *Proceedings of SRISA RAS*. 2019; 9(3):66-72. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25682/NIISI.2019.3.0009>
- [3] Ankuudinov V.Kh., Maksimov A.V. Inverse Kinematics of Walking Robot-Hexapod. *Elektromagnitnye volny I elektronnye sistemy* = Electromagnetic Waves and Electronic Systems. 2019; 24(7):16-23. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18127//j15604128-201907-03>
- [4] Arkhipov A.E., Dedov D.L., Sidorchuk A.O., Bocharova A.N. Application of motion capture system and inverse kinematics in training complexes. *Proceedings of the International Conference on Virtual modeling, prototyping and industrial design*. TSTU Publ., Tambov; 2020. p. 73-76. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42357459> (accessed 17.12.2020). (In Russ.)
- [5] Maryshev P.A., Kuzovkov S.G. *Modelirovanie inversnoj kinematiki manipulatora sredstvami MATHCAD* [Modeling of inverse kinematics of the manipulator by means of MATHCAD]. *Proceedings of the International Conference on Scientific progress - creativity of young*. Volga Tech Publ., Yoshkar-Ola; 2014. p. 105-107. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25119720> (accessed 17.12.2020). (In Russ.)
- [6] Collins T.J., Shen W. Particle Swarm Optimization for high-DOF inverse kinematics. *2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*. Nagoya, Japan; 2017. p. 1-6. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2017.7942651>
- [7] Murray R.M., Li Z., Sastry S.S. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. 1st ed. CRC Press; 1994. (In Eng.)
- [8] Parger M., Mueller J.H., Schmalstieg D., Steinberger M. Human Upper-Body Inverse Kinematics for Increased Embodiment in Consumer-Grade Virtual Reality. *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA; 2018. Article 23. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1145/3281505.3281529>
- [9] Omisore O.M., Han S., Ren L., Zhang N., Ivanov K., Elazab A., Wang L. Non-iterative geometric approach for inverse kinematics of redundant lead-module in a radiosurgical snake-like robot. *BioMedical Engineering OnLine*. 2017; 16(1):93. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1186/s12938-017-0383-2>
- [10] Wang L.-T., Chen C.C. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1991; 7(4):489-499. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/70.86079>
- [11] Gupta K., Kazerounian K. Improved numerical solutions of inverse kinematics of robots. *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. St. Louis, MO, USA, 1985. p. 743-748. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1985.1087237>
- [12] Tolani D., Goswami A., Badler N.I. Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs. *Graphical Models*. 2000; 62(5):353-388. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1006/gmod.2000.0528>
- [13] Ahn J., Kim M., Kim S., Lee S., Park J. Formation-Based Tracking Method for Human Following Robot. *2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*. Honolulu, HI, USA; 2018. p. 24-28. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/URAI.2018.8441820>
- [14] Bentrach A. et al. Full Body Adjustment Using Iterative Inverse Kinematic and Body Parts Correlation. *Journal of Mobile Multimedia*. 2014; 10(3-4):309-326. Available at: <https://journals.riverpublishers.com/index.php/JMM/article/view/4581> (accessed 17.12.2020). (In Eng.)
- [15] Kharyunin A.S., Kildishev M.G., Borisov N.A. *Demonstracija osvoenija kompetencij FGOS na primere realizaciji algoritma inversnoj kinematiki v trehmernom prostranstve s uchedom ogranichenij* [Demonstration of mastering the competencies of the Federal State Educational Standard on the example of the implementation of the inverse kinematics algorithm in three-dimensional space, taking into account the limitations]. *Educational Technology & Society*. 2019; 22(4):115-122. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41233707> (accessed 17.12.2020). (In Russ.)
- [16] Danilov V.V., Kolpashchikov D.Y., Laptev N.V. Automatic control of a continuous robot using the FABRIK algorithm. *Modeling, optimization and information technology*. 2019; 7(4):1-2. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.004>
- [17] Gerget O.M., Kolpashchikov D.Yu. *Predotvrashhenie stolkovenij dlja nepreryvnogo robota s ispol'zovaniem algoritma FABRIK* [Collision avoidance for continuous robot using FABRIK algorithm]. *Proceedings of the International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD'2019)*. ICS RAS, Moscow; 2019. p. 742-744. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25728/mlsd.2019.1.0742>
- [18] Abdallah M.A.Y., Baziyed M.S., Fareh R., Rabie T. Tracking control for robotic manipulator based on FABRIK algorithm. *2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*. Dubai, Sharjah, Abu Dhabi, United Arab Emirates; 2018. p. 1-5. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ICASET.2018.8376844>
- [19] Tao S., Yang Y. Collision-free motion planning of a virtual arm based on the FABRIK algorithm. *Robotica*. 2017; 35(6):1431-1450. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/>



- S0263574716000205
- [20] Zhang W., Yang Z., Dong T., Xu K. FABRIK: an Efficient Iterative Inverse Kinematics Solver for Continuum Robots. *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Auckland, New Zealand; 2018. p. 346-352. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/AIM.2018.8452693>
- [21] Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem. *Graphical Models*. 2011; 73(5):243-260. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2011.05.003>
- [22] Lansley A., Vamplew P., Smith P., Foale C. Caliko: An Inverse Kinematics Software Library Implementation of the FABRIK Algorithm. *Journal of Open Research Software*. 2016; 4(1):e36. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.116>
- [23] Aristidou A., Chrysanthou Y., Lasenby J. Extending FABRIK with model constraints. *Computer Animation and Virtual Worlds*. 2015; 27(1):35-37. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/cav.1630>
- [24] Kolpashchikov D.Y., Laptev N.V., Danilov V.V., Skirnevskiy I.P., Manakov R.A., Gerget O.M. FABRIK-Based Inverse Kinematics For Multi-Section Continuum Robots. *2018 18th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME)*. Brno, Czech Republic; 2018. p. 1-8. (In Eng.)
- [25] Brammer K., Siffing G. *Stochastic Fundamentals of the Kalman-Bucy Filter-Probability Theory and Stochastic Processes*. Munich: Oldenbourg-Verlag; 1975. (In Eng.)

*Submitted 17.12.2020; approved after reviewing 24.02.2021;
accepted for publication 20.03.2021.*

About the authors:

Alexander S. Kharyunin, Postgraduate Student, Assistant at the Department of Applied Engineering, Institute of Information Technology, Mathematics and Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603022, Russian Federation), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1029-3938>, sharyunin@mail.ru

Evgeniya A. Samylina, Postgraduate Student of the Department of Fundamental Mathematics, National Research University Higher School of Economics (25/12 Bolshaya Pecherskaya St., Nizhny Novgorod 603155, Russian Federation), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-8537-8851>, samylina_evgeniya@mail.ru

Nikolay A. Borisov, Associate Professor of the Department of Applied Engineering, Institute of Information Technology, Mathematics and Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603022, Russian Federation), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-3924-8591>, nborisov.itmm@yandex.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

