ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ РАЗОМКНУТЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Яковлев А.С.
Научный руководитель: Малышенко А.М., д.т.н., профессор
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: alexyakovlev90@gmail.com

Одними из основных задач кинематического анализа и синтеза манипуляционных роботов являются прямая и обратная задачи кинематики. Решение прямой задачи базируется на определении положения в декартовом пространстве выбранной характеристической точки исходя из заданных обобщенных координат механизма. Такое решение, как правило, единственное и его поиск не представляет больших вычислительных или аналитических трудностей, т.к. методы решения подобных весьма хорошо проработаны и успешно используются [1,2]. Гораздо интереснее обстоят дела с решением обратной задачи кинематики, где необходимо вычислить значения всех обобщенных координат при известной позиции характеристической рабочей точки. С практической точки зрения такое решение представляет собой большую ценность нежели решение прямой задачи. Решение подобных задач играет огромную роль в компьютерной анимации, а также моделировании различных механизмов и прочих шарнирных объектов. Просматривая работы по данной теме можно обнаружить множество различных подходов, было предложено и сформулировано большое множество моделей и способов решения обратных задач из самых различных областей исследований.

Не смотря на то, что на сегодняшний день уже придумано и сформулировано огромное количество способов и методов решения обратной задачи кинематики, получение правдоподобных, плавных и реалистичных движений до сих пор ассоциируется со значительными сложностями среди специалистов робототехнического сообщества. Особое внимание посвящено данной проблеме в разделах науки, изучающих анимацию и моделирование механических систем.

Подробно ознакомившись с различными методами решения обратной задачи кинематики, можно сделать вывод, что все способы решения основаны на вычислении положения через оценивание в отдельности каждой индивидуальной степени свободы с целью решения поставленной задачи с заданными ограничениями.

Основная проблема решения обратной задачи связана с решением системы нелинейных уравнений. Для получения численного решения обратных задач кинематики, одним из первых был сформулирован подход, заключающийся в использовании матрицы Якоби для определения линейной аппроксимации решения [3,4]. Решения, полученные за счет использования определителя упомянутой матрицы - Якобиана позволяют смоделировать движения характеристической рабочей точки или рабочего органа манипулятора при непрерывном изменении всей обобщенных координат всей кинематической системы за счет вращательных и поступательных движений. Наибольшую сложность при использовании Якобиана представляет его аппроксимированное вычисление. Для решения данной проблемы в 80-х годах была предложена серия методов "Jacobian Transpose", "Damped Least Squares" (DLS), "Damped Least Squares with Singular Value Decomposition" (SVD-DLS), "Selectively Damped Least Squares" (SDLS). Все перечисленные методы подробно описаны в [3-6].

Позднее в [7] проблема решения обратной задачи стала рассматриваться как проблема решения задачи оптимизации системы нелинейных уравнений и поиска локального минимума определяя при этом ограничения Декартового пространства. Рассматривая проблему в данном ключе, следует отметить, что огромной популярностью также пользовался метод алгоритм пошагового циклического координатного спуска (Cyclic Coordinate Descent (CCD) algorithm), который был впервые представлен общественности в [8]. Дополнения к данному методу в виде добавленных ограничений декартового пространства можно найти в [9]. Метод координатного спуска является итерационным и требует относительно небольшого количества вычислений для достижения приближенного оптимального решения для каждого сочленения. Но главным достоинством данного метода является отсутствие необходимости использования матричного исчисления при решении обратной задачи кинематики, это приводит к весьма быстрому достижению результата. Метод координатного спуска позднее был апробирован при определении структуры белка [10], а в настоящее время активно используется в создании анимации в индустрии компьютерных игр [11]. Все же, не смотря на удобство и большую проработанность данного метода, при моделировании решения обратной задачи кинематики можно столкнуться с проблемой нереалистичных движений с беспорядочными разрывами траектории движения характеристической рабочей точки.

Существует также отдельное семейство методов в основе которых лежит алгоритм Ньютона. Подобные методы также основаны на поиске оптимальной конфигурации кинематической цепи, решая проблему поиска минимума. Такой подход позволяет добиться весьма плавных движений характеристической рабочей точки не допуская разрывов траектории движения. Наиболее известными реализациями алгоритма являются методы Бройдена, Повэлса, а также метод BFGS, названный в честь фамилий четырех ученых Broyden, Fletcher, Goldfarb и Shanno [12].

Альтернативный подход решения обратной задачи был предложен в [13]. С точки зрения вычислений данный подход является более эффективным чем ранее упомянутые методы и не вызывает проблем с сингулярностью.

Еще один метод вычисления обратной задачи получил название последовательного преобразования Монте Карло (Sequential Monte Carlo Method) [14]. Данный метод основан на представлении параметров кинематической цепи механизма в виде вектора вращений. Каждое вращение описано в виде системы гиперкомплексных чисел, образующих векторное четырехмерное пространство, называемых Кватернионами. С каждым сочленением можно связать от одного до трех вращений, в зависимости от степени подвижности. Суть метода заключается в аппроксимации движения частиц при заданных ограничениях. Следует отметить, что решение обратной задачи кинематики с использованием данного метода позволяет получить плавные движения, не испытывая проблем с сингулярностью. Однако помимо сложности в восприятии данный метод, являясь статистическим, требует большого количества вычислений.

Приняв во внимание все недостатки ранее описанных методов, наиболее удобным способом решения обратных задач на сегодняшний день стал новый приближенный итерационный алгоритм, получивший название FABRIK (Forward And Backward Reaching Inverse Kinematics) [15]. Данный метод был основан на так называемой технике "Follow-the-Leader (FTL)", изначально предназначенной для моделирования физики и движения веревки [16]. Не смотря на свое исходного назначения предложенный метод может быть с легкостью применен к последовательности звеньев соединенных между собой шарнирами, а значит и к кинематическим цепям манипуляционных механизмов. Впоследствии данная методика легла в основу алгоритма решения обратных задач кинематики FABRIK, определяя каждую итерацию метода.

Таким образом, наилучшим подходом к решению обратной задачи кинематики разомкнутых кинематических цепей является алгоритм FABRIK. Данный метод использует прямой и обратный итерационный подход, определяя позицию каждого сочленения через положение на линии.

Литература

1. J. Denavit, R.S. Hartenberg, A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Bazed on Matrices, ASME Journal of Applied Mechanisms, 22 (2) (1955) 215–221.

2.Яковлев А.С., Малышенко А.М. Программное обеспечение для автоматического формирования моделей кинематики в символьной и численной формах для механизмов с разомкнутыми кинематическими цепями и сочленениями третьего, четвертого и пятого классов// Свидетельство №2013615109.

3. W.A. Wolovich, H. Elliott, A computational technique for inverse kinematics, in: The 23rd IEEE Conf. on Decision and Control, vol. 23, 1984, pp. 1359–1363.

4. C.W. Wampler, Manipulator inverse kinematics solutions based on vector formulations and damped least-squares methods, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 16 (1) (1986) 93–101.

5. J. Baillieul, Kinematic programming alternatives for redundant manipulators, in: Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation, vol. 2, March 1985, pp. 722–728.

6. Y. Nakamura, H. Hanafusa, Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control, Transactions ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 108 (3) (1986) 163–171.

7. Jianmin Zhao, Norman I. Badler, Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures, ACM Transactions on Graphics (TOG) 13 (4) (1994) 313–336.

8. 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.

9. Chris Welman, Inverse Kinematics and Geometric Constraints for Articulated Figure Manipulation, Master Dissertation, Simon Fraser University, Department of Computer Science, 1993.

10. Adrian A. Canutescu, Roland L. Dunbrack, Cyclic coordinate descent: a robotics algorithm for protein loop closure, Protein Science 12 (5) (2003) 963–972.

11. Jeff Lander, Making kine more flexible, Game Developer 5 (3) (1998) 15–22.

12. Roger Fletcher, Practical Methods of Optimization, second ed., Wiley Interscience, New York, NY, USA, 1987.

13. Alexandre N. Pechev, Inverse kinematics without matrix invertion, in: Proc. of the 2008 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, May 19–23 2008, pp. 2005–2012.

14. Nicolas Courty, Elise Arnaud. Sequential Monte Carlo Inverse Kinematics. Articulated Motion and Deformable Objects. 5th International Conference, AMDO 2008, Port d'Andratx, Mallorca, Spain, July 9-11, 2008, pp 1-10.

15. Andreas Aristidou, Joan Lasenby. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem. Graphical Models 73 (2011) 243–260.