

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «КОНЕЧНОГО ПОВОРОТА И СМЕЩЕНИЯ» ДЛЯ ПОДВОДНЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СО ЗВЕНЬЯМИ ПАНТОГРАФНОГО ТИПА

А.В. Данилов, А.Н. Кропотов

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Рассматривается применение метода «конечного поворота и смещения» в решении обратной задачи кинематики (ОЗК) для подводного манипуляционного робота (МР) последовательной структуры, имеющего звено пантографного типа. Для решения задачи МР приводится к эквивалентной схеме, в которой каждое звено пантографного типа заменяется на два звена – ведущее и ведомое. С учетом кинематических особенностей звеньев определяются значения максимального угла поворота или максимального смещения для каждой степени подвижности. Согласно методу «конечного поворота и смещения» данные значения соответствуют максимальному приближению конечного звена МР к заданным характеристикам положения и ориентации. По каждой степени подвижности определяются обобщенные координаты в виде сумм максимальных значений поворотов, смещений и малых значений приращений обобщенных координат, используемых для обхода сингулярных точек. При достижении заданной точности полученные таким образом обобщенные координаты принимаются в качестве решения ОЗК.

ВВЕДЕНИЕ

Для управления МР в режиме управления конечным звеном возникает необходимость решать прямую и обратную задачи кинематики. Прямая задача кинематики не вызывает трудностей, и её основное назначение состоит в определении положения конечного звена по заданным обобщенным координатам. Решение ОЗК носит фундаментальный характер для получения желаемого вектора обобщенных координат в составе системы управления МР для дальнейшей реализации движения звеньев.

В настоящее время в целях безопасности на глубинах, недоступных для водолазов, подводно-технические работы выполняются в основном с помощью телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) рабочего класса, оснащенных манипуляторами. Преимущественно применяются подводные МР последовательной структуры как более гибкие по сравнению с МР параллельной структуры, но уступающие последним по жесткости конструкции. В целях повышения жесткости первых звеньев от

основания в МР последовательной структуры используются звенья пантографного типа. Применение таких звеньев с их кинематическими особенностями облегчает управление МР по степеням подвижности. При использовании звеньев пантографного типа удается более легким путем получить аналитическое решение ОЗК, если число степеней подвижности МР не превышает число степеней свободы в трехмерном евклидовом пространстве для твердого тела. При наличии избыточности МР для решения ОЗК применяются численные методы. В качестве такого метода далее предлагается использовать метод «конечного поворота и смещения» [1, 2] с частичной доработкой алгоритма, учитывающего особенности звеньев пантографного типа. Далее в работе речь идет о применении решения ОЗК для МР последовательной структуры с произвольным количеством звеньев, связанных кинематическими парами пятого класса [1, 2], для МР, имеющего звено пантографного типа.

¹ 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, с. 1. Тел.: +7 (916) 9038612, +7 (499) 2636114. E-mail: 157304@rambler.ru, alex.kropotov@bmstu.ru

■ Описание МР со звеньями пантографного типа

В МР последовательной структуры звенья пантографного типа располагаются в кинематической цепи, как правило, от основания до некоторого последующего звена и используются в основном для достижения заданного положения. Остальные обычные звенья применяются для достижения требуемой ориентации. Примером такой конструкции является манипулятор мобильного робототехнического комплекса изделия «Водолаз», показанный на рис. 1 [4, 5]. В данной конструкции применяются звенья пантографного типа в виде параллелограмма. Для соединения этих звеньев, как правило, используются специальные конструктивные элементы, которые дополняют геометрию этих звеньев до параллелограмма и являются элементами кинематической цепи МР. Назовем эти элементы цепи ведомыми звеньями, так как эти звенья не имеют самостоятельных степеней подвижности. Особенность звена пантографного типа заключается в том, что при повороте такого звена в своей плоскости ведомое звено и все прикрепленные к нему последующие звенья сохраняют параллельность самим себе.

Для решения задачи алгоритм, представленный в работах [1,2], был доработан с учетом особенностей звеньев пантографного типа. При этом было необходимо:

- ввести признак принадлежности звена (обычное, основное и ведомое);
- построить эквивалентную кинематическую схему манипулятора;
- построить векторную математическую модель манипулятора;
- выполнить на основе полученной модели комплекс вычислительных процедур.



Рис. 1. Фотография подводного манипуляционного робота со звеньями пантографного типа для изделия «Водолаз»

Для вычислений были использованы программные средства для решения ОЗК методом «конечного поворота и смещения» и пакет Matlab/Simulink [1, 2, 3]. Задача вычислений состояла в том, чтобы получить решение ОЗК в виде однородной матрицы положения и ориентации конечного звена МР и получить графики изменения обобщенных координат по степеням подвижности манипулятора.

■ Краткое описание метода «конечного поворота и смещения»

Метод «конечного поворота и смещения» использует геометрические операции преобразования векторов и основан на кинематических свойствах МР последовательной структуры. К данным свойствам относятся: пятый класс кинематической пары, вид соединения в паре (шарнир, призма), ориентация оси и звена в абсолютной системе координат в виде единичного вектора оси и вектора звена соответственно. Для каждого звена по каждой степени подвижности, поочередно за одну итерацию, определяется однозначно максимальная величина конечного поворота или смещения звена, названная в методе «конечным поворотом и смещением», соответствующая максимальному приближению конечного звена МР к заданным параметрам положения и ориентации согласно теоремам, изложенным в [1, 2]. Итерационный процесс использует в качестве шагов найденные максимальные величины поворота или смещения, а также для обхода сингулярных точек – заданные малые значения обобщенных координат по каждой степени подвижности. В результате суммирования указанных шагов при достижении заданной точности получаем однозначное решение ОЗК, так как конечная сумма однозначно полученных слагаемых дает однозначный результат по каждой степени подвижности. Метод обходит сингулярные точки, обладает высокой скоростью решения, универсальностью алгоритма по отношению к количеству звеньев МР, возможностью использовать вычислители малой мощности, линейной зависимостью времени решения ОЗК от количества звеньев МР, возможностью проектировать МР оптимальной конфигурации для произвольного положения, например компактность в сложенном состоянии. Окончательную формулу решения ОЗК для обобщенной координаты i -й степени подвижности можно записать в виде суммы:

$$q_i = q_{i0} + \sum_{j=1}^z \Delta q_{ij} + \sum_{k=1}^m \delta q_{ik}, \quad (1)$$

где q_{i0} – значение i -й обобщенной координаты до решения ОЗК, $q_i = \theta_i$ – угол для шарнира, $q_i = d_i$ – смещение для призмы после решения ОЗК; i – номер степени подвижности МР, $i=1, 2, \dots, n$, n – число степеней подвижности МР, Δq_{ij} – конечный поворот или смещение i -й степени подвижности для j -го шага, $z = z_0 + z_1 + z_2 + \dots + z_m$ – общее число конечных поворотов и смещений, z_0 – число конечных поворотов и смещений до точки сингулярности, z_k – число конечных поворотов и смещений от k -й сингулярности до $(k+1)$ -й, m – число сингулярных точек на пути решения ОЗК, δq_{ik} – заданные малые значения обобщенных координат, используемые для изменения конфигурации МР при обходе k -й сингулярной точки ($\delta q_{ik} > \varepsilon_{\text{зад}}$), $\varepsilon_{\text{зад}}$ – заданная абсолютная точность от параметров положения и ориентации конечного звена МР.

Если решением является точка сингулярности, то задача заканчивается выходом по заданному числу итерационных шагов, при этом характерная точка конечного звена МР будет лежать в окрестности границы сферы радиуса, равного $\varepsilon_{\text{зад}}$, с центром в сингулярной точке и с ориентацией конечного звена МР с заданной точностью. Если заданный параметр положения выходит за пределы рабочей зоны, то выход из решения ОЗК также осуществляется по заданному числу итерационных шагов и конечное звено МР останавливается на границе рабочей зоны с заданной ориентацией и в зоне минимального отклонения по заданному параметру положения.

■ Построение векторной математической модели МР

В качестве объекта для решения ОЗК с помощью метода «конечного поворота и смещения» был выбран пятистепенной МР последовательной структуры, имеющих звенья пантографного типа. Данный МР, показанный на рис. 2, установлен на изделии «Водолаз».

Кинематическая схема МР представлена на рис. 3. МР состоит из трех обычных звеньев и двух звеньев пантографного типа.

Звенья пантографного типа заменяются ведущими и ведомыми. Путем преобразования получаем эквивалентную схему МР (рис. 4).

На основе эквивалентной кинематической схемы МР строится векторная математическая модель МР (рис. 5).

Метод «конечного поворота и смещения» используется в кинематических парах значения конструктивных ограничений взаимного перемещения звеньев

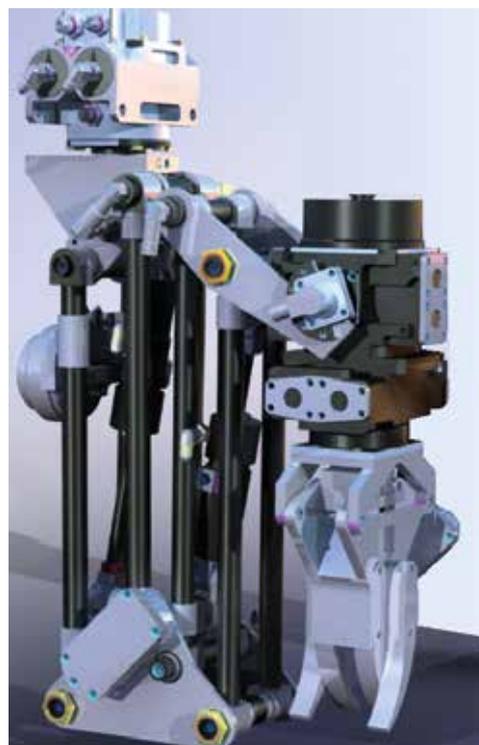


Рис. 2. МР со звеньями пантографного типа для изделия «Водолаз»

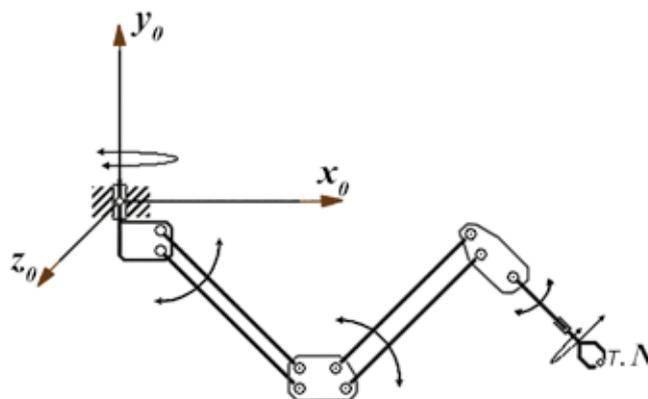


Рис. 3. Кинематическая схема МР изделия «Водолаз», N – характерная точка конечного звена МР

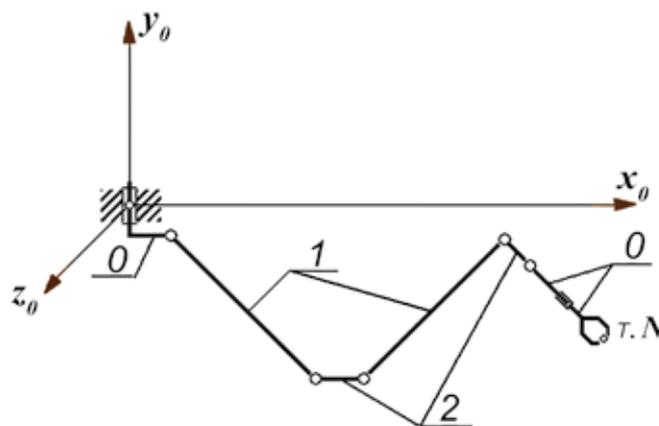


Рис. 4. Эквивалентная кинематическая схема МР, где 0 – обычное звено, 1 – ведущее звено, 2 – ведомое звено

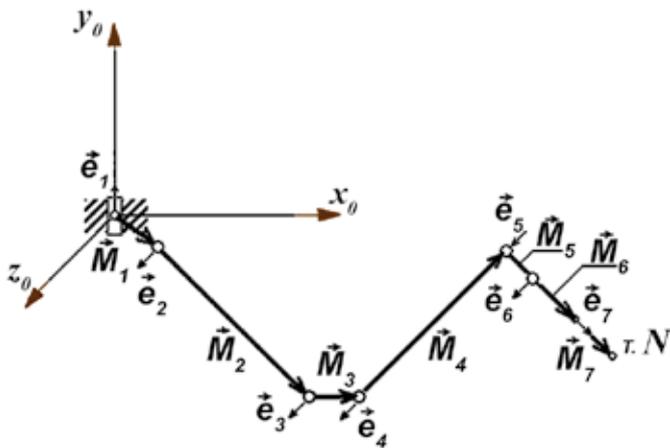


Рис. 5. Векторная математическая модель МР со звеньями пантографного типа

относительно друг друга и признаки вида кинематических пар в виде массивов:

$$L(2, 7) = \begin{pmatrix} q_{1\min} & q_{2\min} & 0 & q_{4\min} & -45^\circ & q_{6\min} & q_{7\min} \\ q_{1\max} & q_{2\max} & 0 & q_{4\max} & -45^\circ & q_{6\max} & q_{7\max} \end{pmatrix}$$

и $p(7) = (0, 1, 2, 1, 2, 0, 0)$ соответственно.

Для учета особенностей звеньев пантографного типа применяются признаки звеньев в виде массива $zv(7) = (0, 1, 2, 1, 2, 0, 0)$, который отображает их тип (1 – ведущее звено, 2 – ведомое звено). Нулевые числа соответствуют обычным звеньям. Исходные данные МР изделия «Водолаз» приведены в табл. 1.

Выбранный объект для демонстрации решения ОЗК методом «конечного поворота и смещения» имеет пять степеней подвижности, что позволяет получить заданное решение по положению и ориентации для данного МР только в плоскости звеньев МР. Заданный поворот конечного звена МР относительно оси y в абсолютной системе координат (см. рис. 5)

Таблица 1. Исходные данные МР изделия «Водолаз»

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| $ \vec{M}_N $ | 56 | 435 | 140 | 420 | 196 | 234 | 234 |
| θ_N | 0 | -45 | 0 | 45 | -45 | -40 | 0 |
| \vec{e}_N | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,766 |
| | y | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,643 |
| | z | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| zv | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| p | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

производится поворотом указанной плоскости вокруг оси \vec{e}_1 и таким образом обеспечивается решение ОЗК во всем рабочем пространстве МР.

■ Результаты решения задачи

Для определения начального и заданного положения конечного звена МР зададим однородные матрицы.

Однородная матрица начального положения конечного звена МР

Начальные углы Эйлера–Крылова: $\varphi = 20^\circ$, $\psi = 30^\circ$, $\theta = 20^\circ$, что соответствует углам курса, дифферента и крена ориентации конечного звена МР в начальном положении. Начальные координаты характерной точки конечного звена МР [1,10614 м, 0,045734 м, 0,402602 м].

$$T_{N0} = \begin{pmatrix} 0,813798 & -0,324533 & 0,482091 & 1,10614 \\ 0,5 & 0,813798 & -0,296198 & 0,045734 \\ -0,296198 & 0,482091 & 0,824533 & -0,402602 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Однородная матрица заданного положения конечного звена МР

Заданные углы Эйлера–Крылова: $\varphi = -30^\circ$, $\psi = 20^\circ$, $\theta = -50^\circ$, что соответствует углам курса, дифферента и крена ориентации конечного звена МР в заданном положении. Заданные координаты характерной точки конечного звена МР [0,939 м, -0,016 м, 0,542 м]. Значения величины заданного вектора положения схвата соответствуют:

$$|\vec{R}| = \sqrt{(x_k - x_n)^2 + (y_k - y_n)^2 + (z_k - z_n)^2} = 0,961 \text{ м.}$$

$$T_{Nk} = \begin{pmatrix} 0,813798 & 0,19263 & -0,548295 & 0,939 \\ 0,34202 & 0,604023 & 0,719846 & -0,016 \\ 0,469846 & -0,773337 & 0,425669 & 0,542 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Однородная матрица положения конечного звена МР после решения ОЗК

Полученные углы Эйлера–Крылова: $\varphi = -30,000^\circ$, $\psi = 20,3609^\circ$, $\theta = -50,000^\circ$. Заданные координаты характерной точки конечного звена МР [0,93888 м, 0,01625 м, 0,54206 м].

$$T_{Nk} = \begin{pmatrix} 0,811916 & 0,189338 & -0,552217 & 0,93888 \\ 0,347933 & 0,602626 & 0,718182 & -0,01625 \\ 0,46876 & -0,775237 & 0,423404 & 0,54206 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot (4)$$

Результаты решения задачи ОЗК приведены в однородной матрице положения (4), в табл. 2 и на рис. 6. Визуализация движения МР показана на рис. 7.

Сравнивая заданную конечную матрицу положения (3) с полученным решением ОЗК (4), можно убедиться в высокой точности полученного результата. Таким образом, для решения ОЗК потребовалось 26 итераций для пятистепенного МР, показанного на рис. 2. Время решения ОЗК равно 149 мкс. Данная оценка времени решения ОЗК проводилась при частоте процессора равной 2,8 ГГц. ОЗК решалась для заданной точности $\epsilon_{зад} = 0,001$ по каждому параметру, что соответствует 1 мм по положению и 3,44 минуты по ориентации.

Таблица 2. Значения обобщенных координат манипулятора

| № сочленения | Обозначение | Значения обобщенных координат, град | | |
|--------------|-------------|-------------------------------------|-------------------|---------------|
| | | Начальное положение | После решения ОЗК | Приращение Δq |
| 1 | Θ_1 | 20 | -30,000 | -50,000 |
| 2 | Θ_2 | -50 | -60,2814 | -10,2814 |
| 3 | Θ_3 | 50 | 59,6303 | 9,6303 |
| 4 | Θ_4 | 30 | 20,3609 | -9,6391 |
| 5 | Θ_5 | 20 | -50,000 | -70,000 |

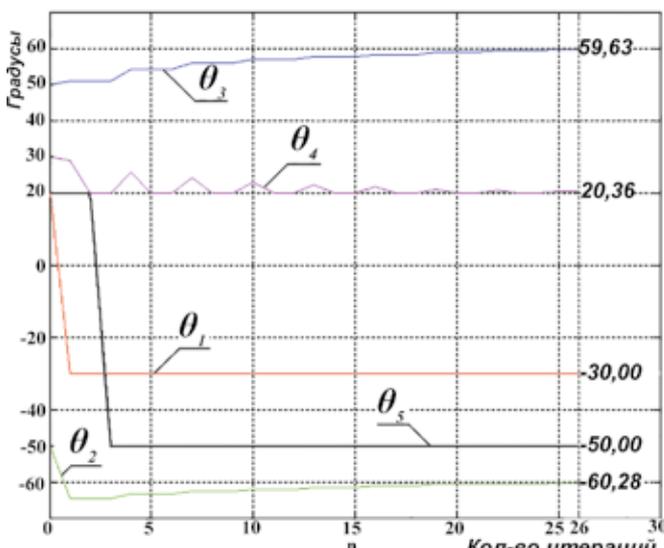


Рис. 6. Графики изменения обобщенных координат

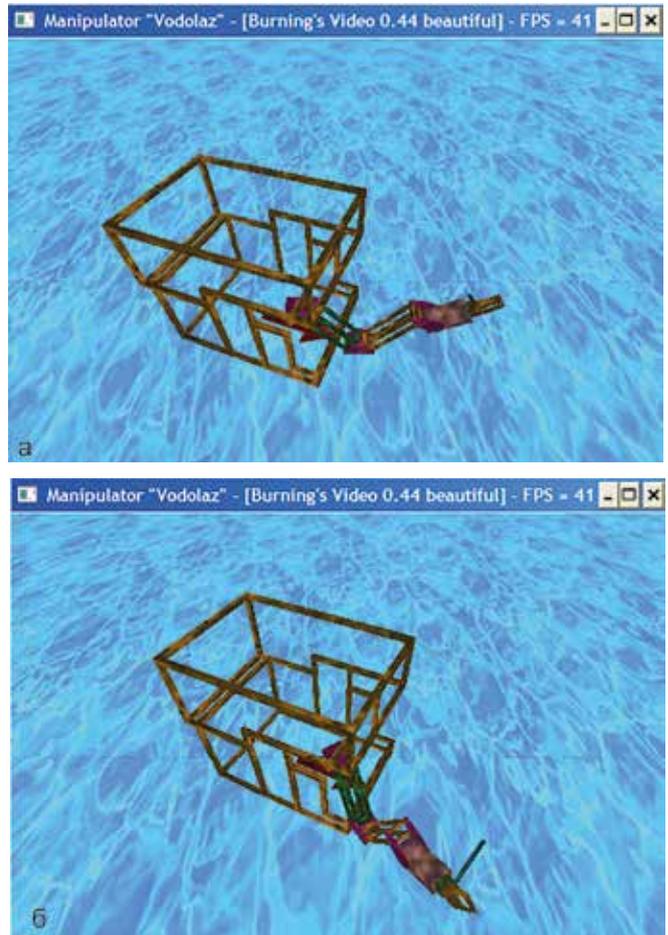


Рис. 7. Визуализация решения ОЗК: а – начальное положение; б – конечное положение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод «конечного поворота и смещения» с доработанным в статье алгоритмом может применяться для МР последовательной структуры с произвольным числом звеньев, включая и звенья пантографного типа. По алгоритму метода разработано программное обеспечение решения ОЗК, структура которого формируется из модулей универсальной части алгоритма в виде динамически подключаемой библиотеки, содержащей все необходимые подпрограммы для организации решения ОЗК и индивидуальной для конкретного МР в виде исходных данных.

Исходные данные метода: векторная модель МР, значения конструктивных ограничений обобщенных координат и признаки, отображающие свойства кинематических пар по виду и по классам.

Применение предложенного в работе метода решения ОЗК для подводных манипуляционных роботов последовательной структуры со звеньями пантографного типа представляется перспективным при разработке объектов подводной робототехники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов А.В., Кропотов А.Н., Трифонов О.В. Общий подход к решению обратной задачи кинематики для манипулятора последовательной структуры с помощью конечного поворота и смещения // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018. № 81. – URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-81> (дата обращения: 25.03.2019).
2. Данилов А.В., Кропотов А.Н., Трифонов О.В. Применение метода конечного поворота и смещения для манипулятора последовательной структуры с кинематическими параметрами пятого класса // Препринты ИПМ им. Келдыша. 2018. № 107. – URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-107> (дата обращения: 25.03.2019).
3. The Mathworks MATLAB and Simulink for Technical Computing. – URL: <http://www.mathworks.com>. (дата обращения: 25.03.2019).
4. Вельтищев В.В., Сарвира Д.В., Малов М.А., Антоненко С.Л., Космачев П.В. Мобильный робототехнический комплекс мониторинга подводных объектов // Материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2013)». М.: АПР, 2013. Т. 1. С. 313–315.
5. Данилов А.В. Система управления электрогидравлическими манипуляторами на подводном аппарате // Материалы XII молодежной науч.-техн. конф. «Взгляд в будущее 2014». СПб: ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2014. С. 171–178.

