

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ПОДВОДНОГО МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

Н.А. Красавин, А.Ю. Коноплин, Е.Е. Калентьева

В статье рассматривается задача повышения точности рекуррентного алгоритма решения обратной задачи динамики для подводных многозвенных манипуляторов, которые являются неотъемлемой частью необитаемых подводных аппаратов, предназначенных для выполнения технологических операций. В отличие от существующих подходов разработанная модификация алгоритма учитывает зависимость сил вязкого трения от реальной скорости набегающего потока жидкости, обусловленной текущей конфигурацией манипулятора, когда взаимное расположение его звеньев приводит к нахождению одних звеньев в спутном следе других. Для этого с помощью предварительной виртуальной продувки отдельного звена многозвенного манипулятора невозмущенным потоком жидкости с различной скоростью в среде SOLIDWORKS Flow Simulation были получены экспериментальные данные, которые в дальнейшем были использованы для вычисления фактических скоростей набегающего потока на сегменты звена, попадающие в спутный след. Было выполнено численное моделирование работы реализованного алгоритма в программной среде Matlab/Simulink для модели многозвенного манипулятора, установленного на необитаемый подводный аппарат. Результаты проведенного моделирования показали эффективность использования разработанной модификации алгоритма для повышения точности вычисления динамических влияний вязкой среды на движущийся в ней ММ, в том числе и в условиях действия подводных течений.

Ключевые слова: подводный многозвенный манипулятор, обратная задача динамики, вязкая среда, спутный след, набегающий поток, манипуляционные операции, необитаемый подводный аппарат.

Введение

Необитаемые подводные аппараты (НПА), оснащаемые многозвенными манипуляторами (ММ), являются одними из основных средств проведения подводных технологических работ [1, 2]. В настоящее время как зарубежные, так и отечественные научные коллективы сосредоточили свои усилия на увеличении степени автономности этих робототехнических комплексов [3, 4]. Однако решение этой задачи осложняется тем, что при выполнении манипуляционных операций необходимо точно рассчитывать и компенсировать вызванные влиянием вязкой среды динамические воздействия на движущийся ММ и его аппарат-носитель. Для расчета указанных воздействий применяются различные алгоритмы решения обратной задачи динамики (ОЗД) подводных ММ, включая методы Лагранжа [5], Ньютона–Эйлера [6, 7] и другие подходы [8, 9], которые позволяют описать динамику системы с учётом сложного взаи-

модействия ММ с окружающей жидкостью. Причем точность этих расчетов зависит от адекватности алгоритма решения ОЗД ММ и точного определения параметров взаимодействия ММ с окружающей жидкостью [10], таких как: коэффициенты вязкого трения, присоединенные массы и моменты инерции жидкости, а также величины подводных течений.

В настоящее время уже известно множество работ, посвященных разработке различных модификаций алгоритмов решения ОЗД для подводных ММ и определению параметров взаимодействия звеньев ММ с окружающей жидкостью. Рекуррентный алгоритм [11] применим лишь при малых числах Рейнольдса – то есть при низких скоростях движения ММ, в работе [12] рассматривалось движение ММ в плоскости, но уже с высокими скоростями движения звеньев. В алгоритме [6] рассматривались пространственные движения ММ и учитывалось, что сегменты его звеньев могут иметь различную скорость как по величине, так и по направлению, в результате чего

сила вязкого трения, действующая на эти сегменты, может иметь как линейную, так и квадратичную зависимость от скорости их движения. Этот алгоритм модифицирован в работе [7] для случая, когда центры масс и центры водоизмещения звеньев ММ не совпадают.

В работах [13, 14] были предложены методы идентификации присоединенных масс и моментов инерции жидкости на основе модели ММ, однако точность идентификации напрямую зависит от точности используемых моделей, и для ее подтверждения требуются экспериментальные исследования. В работах [15–17] были проведены натурные эксперименты по определению коэффициентов вязкого трения и присоединенных масс жидкости. Причем в ходе исследования [15] было выяснено, что величины этих коэффициентов в промежутке от начала движения звеньев ММ до наступления установившегося режима движения зависят от относительного расстояния, пройденного звеном в воде. В работе [18] было экспериментально продемонстрировано, что в установившемся режиме движения вышеуказанные коэффициенты значительно не изменяются и стремятся к постоянному значению. В свою очередь, в работе [19] было также показано, что при поперечном обтекании цилиндрического тела потоком жидкости в заданном диапазоне чисел Рейнольдса коэффициенты вязкого трения можно принять постоянными. В работе [16] экспериментально полученные зависимости коэффициентов вязкого трения и присоединенных масс жидкости, внесенные в алгоритм ОЗД подводного ММ, значительно повысили точность вычислений.

Результаты работ [15, 16] были подтверждены в ходе исследования [20], проведенного с использованием программного обеспечения Fluent. Также, основываясь на результатах, полученных в работах [15, 16], в работе [21] было предложено аппроксимировать полиномами зависимости единойжды полученных коэффициентов вязкого трения и присоединенных масс жидкости от пройденного центром величины конкретного звена расстояния. Эти зависимости были получены с помощью компьютерного моделирования обтекания звеньев невозмущенным потоком жидкости в программных комплексах вычислительной гидродинамики, таких как Ansys Fluent или SOLIDWORKS Flow Simulation. В дальнейшем полученные полиномы могут использоваться на протяжении всего срока эксплуатации ММ, значительно повышая точность используемой динамической модели конкретного подводного ММ.

В связи с вышеописанным можно заключить, что существующие методы позволяют с достаточной

точностью определить параметры взаимодействия звеньев ММ с вязкой средой, а также учесть различный характер взаимодействия звеньев с жидкостью в широком диапазоне скоростей. Однако в известных алгоритмах ОЗД не учитывается, что в процессе движения ММ каждое звено создает спутный след [17], в котором скорость жидкости может существенно отличаться от скорости невозмущенного потока, включая случаи, когда за звеном образуются обратные течения. В результате фактическая скорость набегающего потока жидкости на звено, попавшее в спутный след, может значительно отличаться от рассчитанной известными алгоритмами. Это неизбежно приведет к ошибкам вычисления динамических влияний вязкой среды на движущийся в ней ММ и ошибкам при формировании тяг движителей НПА, компенсирующих силовые и моментные воздействия со стороны работающего ММ [2, 22].

Поэтому для повышения точности управления подводным ММ, в том числе при выполнении контактных манипуляционных операций [2], в данной работе ставится задача модификации алгоритма решения ОЗД подводного ММ [6], в котором будут учитываться фактические скорости набегающего потока жидкости на звенья, попадающие в спутный след соседних звеньев.

1. Рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ММ

Решение поставленной задачи предлагается разбить на два этапа. На первом этапе с помощью средств вычислительной гидродинамики предполагается получить эпюры скоростей жидкости в спутном следе за звеном ММ при обтекании его невозмущенным потоком жидкости с разными скоростями. При этом для упрощения расчетов и простоты анализа результатов численного моделирования в работе будут рассматриваться цилиндрические звенья ММ, имеющие нейтральную плавучесть и совмещенные центры масс и величин. На втором этапе с учетом полученных эпюр скорости в алгоритм решения ОЗД [6] будет добавлен расчет фактических скоростей набегающего потока жидкости на сегменты звеньев, попадающие в спутный след, с учетом которых будут вычисляться уточненные значения результирующих векторов силы вязкого трения, действующей на звено, а также момента, обусловленного этой силой.

Для расчета векторов сил и моментов, действующих на приводы и звенья подводного ММ, в данной работе будет использоваться рекуррентный алгоритм решения ОЗД [6], в котором для построения связан-

ных систем координат звеньев будет использована одна из наиболее эффективных разновидностей подхода Денавита—Хартенберга [23]. На рис. 1 показано расположение осей связанной системы координат (СК) для однородного цилиндрического звена ММ, соответствующее выбранному подходу.

Известно, что при перемещении каждый сегмент звена длиной δh_i^* может иметь различную скорость относительно набегающего потока как по направлению, так и по значению [6], поэтому при высоких скоростях движения рабочего инструмента ММ каждое звено необходимо разбивать на N элементарных сегментов.

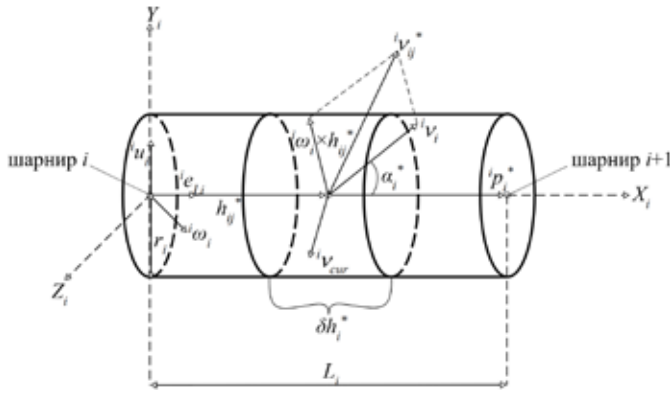


Рис. 1. Схема расположения осей системы координат звена i и векторов скорости сегмента j

Символами на рис. 1 обозначены: $X_i Y_i Z_i$ – связанная со основанием звена i правая СК; ${}^i v_i \in R^3$ – вектор линейной скорости движения шарнира i ; ${}^i v_{cur} \in R^3$ – вектор скорости течения, заданный в СК $X_i Y_i Z_i$; ${}^i \omega_i \in R^3$ – вектор угловой скорости вращения звена i ; ${}^i p_i^* \in R^3$ – вектор, совпадающий с продольной осью звена i , определяющий положение шарнира $i+1$ относительно шарнира i ; ${}^i e_{Li} \in R^3$ – единичный вектор, направленный вдоль продольной оси звена i ; $h_{ij}^* \in R^3$ – вектор, определяющий положение центра масс элементарной части j звена i длиной δh_i^* относительно шарнира i ; $\alpha_i^* = \arccos \frac{{}^i v_i \cdot {}^i p_i^*}{\|{}^i v_i\| \|{}^i p_i^*\|}$ – угол между векторами ${}^i v_i$ и ${}^i p_i^*$; ${}^i u_i = {}^i e_i \times {}^i e_{Li}$ – единичный вектор, направленный вдоль поперечной оси звена i ; ${}^i e_i \in R^3$ – единичный вектор, направленный вдоль оси шарнира i ; L_i и r_i – длина и радиус круглого поперечного сечения звена i .

Правый нижний индекс отражает, в какой СК изначально задан вектор, левый верхний индекс отражает, в какой системе координат представлен указанный вектор.

Векторы линейной и угловой скоростей основания звена i определяются выражениями:

$$\begin{aligned} {}^i v_i &= {}_{i-1}^i A \left({}^{i-1} v_{i-1} + {}^{i-1} \omega_{i-1} \times {}^{i-1} p_{i-1}^* \right), {}^0 v_0 = {}^0 v_{AUV}, \\ {}^i \omega_i &= {}_{i-1}^i A {}^{i-1} \omega_{i-1} + {}^i e_i \dot{q}_i, {}^0 \omega_0 = {}^0 \omega_{AUV}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ${}_{i-1}^i A$ – матрица перехода из $i-1$ -й в i -ю СК; ${}^0 v_0 \in R^3$ – линейная скорость точки крепления ММ к НПА, ${}^0 \omega_{AUV} \in R^3$ – угловая скорость вращения НПА; q_i – обобщенная координата i ММ.

Важно отметить, что звенья ММ, совершающие движение под водой, могут быть подвержены воздействию подводных течений. В результате фактическая скорость набегающего потока жидкости на звенья может значительно отличаться от собственной скорости движения звеньев (1), поэтому при рассмотрении движения звеньев под воздействием подводных течений оправдано перейти к относительной скорости движения звена ${}^i v_{reli} \in R^3$ с учетом известного вектора скорости течения [24]:

$${}^i v_{reli} = {}^i v_i - {}^i v_{cur},$$

где ${}^i v_{cur} \in R^3$ – вектор скорости течения, представленный в СК звена i .

Линейная скорость движения центра масс каждого из N сегментов звена i определяется как:

$${}^i v_{ij}^* = {}^i v_i + {}^i \omega_i \times h_{ij}^*, j = \overline{1, N},$$

где $h_{ij}^* = \frac{1}{2}(2j-1)\delta h_i^* {}^i e_{Li}$.

Аналогичным образом определяется линейная относительная скорость движения центра масс каждого из N сегментов звена i :

$${}^i v_{rel ij}^* = {}^i v_{rel i} + {}^i \omega_i \times h_{ij}^*, j = \overline{1, N}.$$

Продольная ${}^i v_{Li}^* \in R^3$ и поперечная ${}^i v_{pij}^* \in R^3$ составляющие вектора ${}^i v_{rel ij}^* \in R^3$ определяются как:

$${}^i v_{Li}^* = |{}^i v_{rel i}| {}^i e_{Li} \cos \alpha_i^*,$$

$${}^i v_{pij}^* = {}^i v_{rel ij}^* - {}^i v_{Li}^*.$$

Угловые и линейные ускорения основания ${}^i \dot{v}_i \in R^3$ и центра масс ${}^i \dot{v}_{Ai} \in R^3$ звена i рассчитываются следующим образом:

$${}^i \dot{\omega}_i = {}_{i-1}^i A {}^{i-1} \dot{\omega}_{i-1} + \left({}_{i-1}^i A {}^{i-1} \omega_{i-1} \right) \times {}^i e_i \dot{q}_i + {}^i e_i \ddot{q}_i, {}^0 \dot{\omega}_0 = {}^0 \dot{\omega}_{AUV},$$

$${}^i \dot{v}_i = {}_{i-1}^i A \left[{}^{i-1} \dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1} p_{i-1}^* + {}^{i-1} \omega_{i-1} \times \left({}^{i-1} \omega_{i-1} \times {}^{i-1} p_{i-1}^* \right) + {}^{i-1} \dot{v}_{i-1} \right], {}^0 \dot{v}_0 = {}^0 \dot{v}_{AUV},$$

$${}^i \dot{v}_{Ai} = {}^i \dot{\omega}_i \times {}^i r_i^* + {}^i \omega_i \times \left({}^i \omega_i \times {}^i r_i^* \right) + {}^i \dot{v}_i,$$

где ${}^i r_i^* \in R^3$ – вектор, определяющий положение центра масс звена i .

Известно, что характер обтекания звена потоком жидкости определяется числом Рейнольдса, расчет которого имеет вид:

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}, \quad (2)$$

где ρ и η – плотность и вязкость жидкости; v и D – линейная скорость и характерный размер тела.

При значениях числа $Re \leq 10^3$ силовое воздействие со стороны водной среды на движущееся звено ММ линейно зависит от скорости этого движения, а для Re , лежащих в диапазоне $10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5$, рассматриваемая зависимость является квадратичной. На практике при работе ММ всегда выполняется неравенство $Re < 2 \cdot 10^5$.

С учетом выражения (2) для каждого из сегментов звена могут быть определены параметры обтекания их жидкостью при продольном Re_{Li} и поперечном Re_{pij} движении относительно своих продольных осей:

$$Re_{Li} = \frac{\rho^i v_{Li}^* l_i}{\eta},$$

$$Re_{pij} = \frac{2 \rho^i v_{pij}^* r_j}{\eta}.$$

С учетом полученных чисел Рейнольдса можно определить величину продольной составляющей силы вязкого трения, действующей на звено i ММ, согласно следующим условиям:

$$^i F_{RLi} = \begin{cases} k_{Li} \eta^i v_{Li}^*, & \text{если } Re_{Li} \leq 10^3 \\ \frac{1}{2} \rho k_{Li} s_i^i v_{Li}^{*2}, & \text{если } 10^3 < Re_{Li} \leq 2 \cdot 10^5, \end{cases}$$

где k_{Li} – экспериментально определяемый коэффициент; $s_i = \pi r_i^2$ – площадь основания звена i .

Похожим образом определяется поперечная составляющая силы вязкого трения, действующей на сегмент j звена i :

$$^i F_{Rpij} = \begin{cases} k_{pi}^* \eta^i v_{pij}^*, & \text{если } Re_{pij} \leq 10^3 \\ \frac{1}{2} \rho k_{pi}^* r_i \delta h_i^* v_{pij}^{*2}, & \text{если } 10^3 < Re_{pij} \leq 2 \cdot 10^5, \end{cases}$$

$j = \overline{1, N},$

где k_{pi}^* – экспериментально определяемый коэффициент [15, 17, 20, 25].

Суммарная поперечная составляющая силы вязкого трения, действующая на звено, рассчитывается как сумма составляющих, действующих на каждый из N сегментов:

$$^i F_{Rpi} = \sum_{j=1}^N ^i F_{Rpij}, j = \overline{1, N}.$$

Поскольку точка приложения результирующей силы $^i F_{Rpi}$ к звену i неизвестна, то момент $^i M_{Rpi}$ от этой силы в шарнире i рассчитывается как сумма моментов $^i M_{Rpij} = h_{ij}^* \times ^i F_{Rpij}$, создаваемых силами $^i F_{Rpij}$:

$$^i M_{Rpi} = \sum_{j=1}^N ^i M_{Rpij}, j = \overline{1, N}.$$

2. Исследование спутного следа за звеном ММ с помощью SolidWorks Flow Simulation

Как уже было отмечено ранее, качество управления подводным ММ во многом зависит от точности определения параметров его взаимодействия с окружающей жидкостью. В процессе движения многозвенник может находиться в различных кинематических положениях, и его звенья могут попадать в спутный след друг друга, что может привести к значительному снижению скорости набегающего потока на звено, лежащее в спутном следе. Это неизбежно приведет к ошибкам вычисления динамических влияний вязкой среды на движущийся в ней ММ, ошибкам при формировании тяг движителей НПА, компенсирующих силовые и моментные воздействия со стороны работающего ММ [2, 22], а также ошибкам определения величин силового воздействия рабочего инструмента ММ на поверхность объекта работ [2].

Для более точного учета фактической скорости набегающего потока на звенья ММ с помощью средств SOLIDWORKS Flow Simulation была проведена серия виртуальных экспериментов, в ходе которых цилиндрическое звено ММ обтекалось под прямым углом невозмущенным потоком жидкости с различными скоростями. Это обусловлено тем, что на смежные звенья ММ оказывает влияние именно изменение скорости жидкости в спутном следе каждого из сегментов звена, обусловленное поперечной составляющей линейной скорости движения сегментов.

Основные параметры проводимого эксперимента представлены в табл. 1 и соответствуют глубине около 1000 м.

Таблица 1. Параметры обтекания звена

Параметр	Величины
Диаметр звена, м	0,2
Длина звена, м	3
Температура жидкости, К	275
Давление, МПа	10,1
Скорость набегающего потока, м/с	[0,01; 0,03; 0,05; 0,075; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,5]

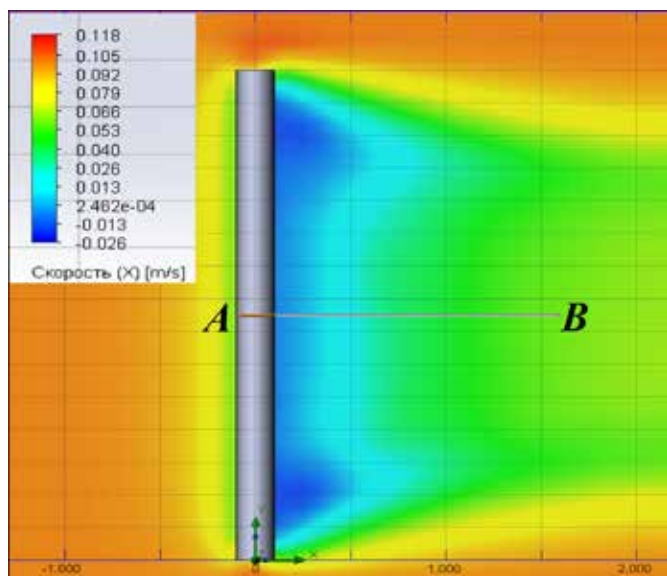


Рис. 2. Сечение спутного следа звена ММ

На рис. 2 представлены результаты обтекания цилиндрического звена невозмущенным потоком жидкости со скоростью 0,1 м/с. Из представленного рисунка видно, что вблизи торцов звена завихрения значительно усиливаются, однако в действительности этим фактором можно пренебречь, так как у большинства сегментов звеньев отсутствуют открытые торцы, поскольку они соединены с соседними сегментами, а сегменты на концах звена соединены шарнирами с соседними звеньями. Поэтому измерение скорости потока в следе за звеном оправдано производить вдоль оси AB (см. рис. 2), равноудаленной от торцов звена.

На рис. 3 приведены эпюры скоростей потока жидкости в спутном следе, из которого четко видно образование обратного течения сразу за звеном, что также соответствует картине на рис. 2. При этом видно, что величина обратных течений тем больше, чем

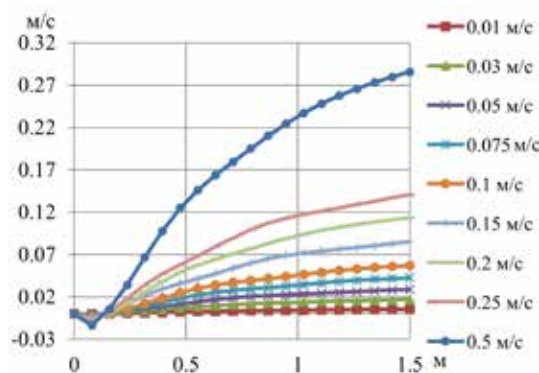


Рис. 3. Кривые профилей скорости потока в следе за звеном, обтекаемым невозмущенным потоком жидкости с различными скоростями

выше скорость набегающего на звено потока: при низких скоростях обтекания тенденция к образованию обратного течения снижается.

В дальнейшем полученные зависимости будут использованы при расчете уточненных значений скоростей набегающего потока на звенья движущегося ММ.

3. Модификация алгоритма решения ОЗД ММ с учетом особенностей взаимного расположения звеньев

Рассмотрим установленный на НПА подводный ММ (рис. 4) с распространенной кинематической схемой типа PUMA. Он имеет 6 степеней подвижности, а связанные с его звеньями системы координат построены с использованием подхода [23]. На этом рисунке введены следующие основные обозначения: $OXYZ$ – абсолютная СК; $CX_C Y_C Z_C$ – СК, связанная с центром величины НПА; $X_0 Y_0 Z_0$ – СК основания ММ; $X_{1-6} Y_{1-6} Z_{1-6}$ – СК, связанные со звеньями ММ; $X_G Y_G Z_G$ – СК рабочего инструмента ММ.

При рассмотрении взаимного расположения звеньев подводного ММ относительно друг друга возможны несколько случаев положения звена i . Определить порядок, в котором звенья попадают в спутный след, можно следующим образом:

- 1) звено i находится в спутном следе звена $i-1$:
 $(q_i < 0 \ \& \ {}^{i-1}\omega_{i-1(3)} > 0) \parallel (q_i > 0 \ \& \ {}^{i-1}\omega_{i-1(3)} < 0)$;
- 2) звено i находится в спутном следе звена $i+1$:
 $(q_{i+1} < 0 \ \& \ {}^i\omega_{i(3)} < 0) \parallel (q_{i+1} > 0 \ \& \ {}^i\omega_{i(3)} > 0)$;
- 3) звено i не находится в спутном следе.

Рассмотрим случай, при котором звено i находится в спутном следе звена $i-1$ (рис. 5).

Для выбранной кинематической схемы (см. рис. 4) для степеней подвижности, совершающих перемещения в одной плоскости, определить положение звена i относительно предыдущего можно с помощью внутреннего угла $\alpha_i = \pi - |q_i|$. Рассчитаем

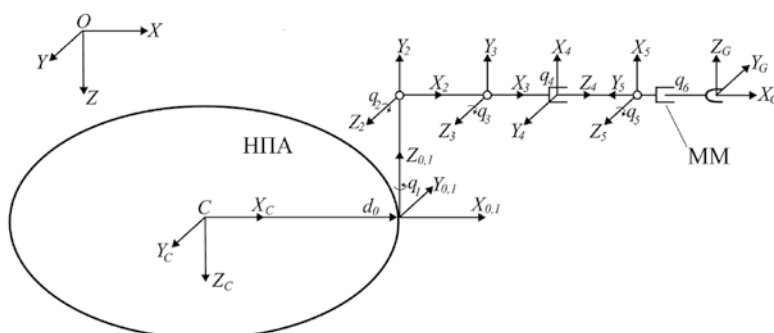
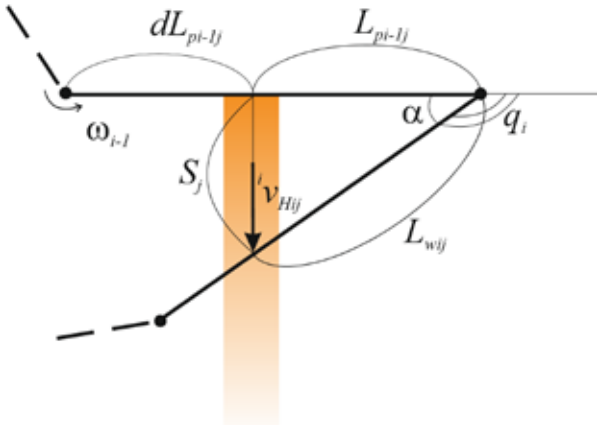


Рис. 4. Кинематическая схема подводного ММ


 Рис. 5. Звено i в спутном следе звена $i-1$

относительные линейные скорости сегментов звена $i-1$, находящихся перед набегающим потоком (см. рис. 5):

$$\begin{aligned} L_{wij} &= \|h_{ij}^*\|, j = \overline{1, N}, \\ L_{pi-1j} &= L_{wij} \cos(\alpha), j = \overline{1, N}, \\ dL_{pi-1j} &= L_{i-1} - L_{pi-1j}, j = \overline{1, N}, \\ {}^{i-1}v_{reli-1j} &= {}^{i-1}v_{reli-1} + {}^{i-1}\omega_{i-1} \times ({}^{i-1}e_{Li-1} dL_{pi-1j}), j = \overline{1, N}, \\ {}^{i-1}v_{reli-1j}^* &= {}^{i-1}u_{i-1} {}^{i-1}u_{i-1}^T {}^{i-1}v_{reli-1j}, j = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

где ${}^{i-1}v_{reli-1j}^*$ – проекция вектора ${}^{i-1}v_{reli-1j}$ на ось вектора ${}^{i-1}u_{i-1}$.

Расстояние S_j , на котором рассматриваемый сегмент j звена i находится в спутном следе звена $i-1$:

$$S_j = \sqrt{L_{wij}^2 - L_{pi-1j}^2}, j = \overline{1, N}.$$

Затем с учетом полученного расстояния рассчитывается фактическая скорость набегающего потока жидкости на сегменты звена i , попадающие в спутный след звена $i-1$:

$$\begin{cases} \text{если } dL_{pi-1j} > 0, \text{ то } {}^i v_{Hij} = {}^i v_{ij} - f(S_j, {}^i v_{reli-1j}^*), \\ \text{иначе, } {}^i v_{Hij} = {}^i v_{relij}^*, \quad j = \overline{1, N}, \end{cases}$$

где $f(S_j, {}^i v_{reli-1j}^*)$ – скорость потока жидкости в спутном следе перед j сегментом звена i , рассчитанная с учетом расстояния S_j и относительной скорости ${}^i v_{reli-1j}^*$ с учетом полученных ранее полиномов (см. рис. 3).

Фактическая продольная составляющая скорости потока жидкости ${}^i v_{HLij}^* \in R^3$, набегающего на сегмент j звена i , лежащий в спутном следе звена $i-1$, а также поперечная составляющая этой скорости ${}^i v_{Hpij}^* \in R^3$ примут вид:

$$\begin{aligned} {}^i v_{HLij}^* &= {}^i e_{Li} {}^i e_{Li}^T {}^i v_{Hij}, j = \overline{1, N}, \\ {}^i v_{Hpij}^* &= {}^i v_{Hij} - {}^i v_{HLij}^*, j = \overline{1, N}. \end{aligned}$$

Расчет фактической скорости набегающего потока на звено i , лежащее в спутном следе звена $i+1$, осуществляется аналогичным образом.

В результате для рассматриваемой типовой кинематической схемы ММ модифицированный рекуррентный алгоритм решения ОЗД примет вид:

$$\begin{aligned} {}^i \omega_i &= {}_{i-1} A {}^{i-1} \omega_{i-1} + {}^i e_i \dot{q}_i, {}^0 \omega_0 = {}^0 \omega_{AUV}, \\ {}^i \dot{\omega}_i &= {}_{i-1} A {}^{i-1} \dot{\omega}_{i-1} + ({}_{i-1} A {}^{i-1} \omega_{i-1}) \times {}^i e_i \dot{q}_i + {}^i e_i \ddot{q}_i, {}^0 \dot{\omega}_0 = {}^0 \dot{\omega}_{AUV}, \\ {}^i v_i &= {}_{i-1} A ({}^{i-1} v_{i-1} + {}^{i-1} \omega_{i-1} \times {}^{i-1} p_{i-1}^*), {}^0 v_0 = {}^0 v_{AUV}, \\ {}^i v_{reli} &= {}^i v_i - {}^i v_{cur}, \\ {}^i v_{Ai} &= {}^i v_i + {}^i \omega_i \times {}^i r_i^*, \psi_i = \arccos \frac{{}^i v_{Ai} {}^i p_i^*}{\|{}^i v_{Ai}\| \|{}^i p_i^*\|}, \\ \alpha_i^* &= \arccos \frac{{}^i v_i {}^i p_i^*}{\|{}^i v_i\| \|{}^i p_i^*\|}, \beta_i^* = \arccos \frac{{}^i \omega_i {}^i p_i^*}{\|{}^i \omega_i\| \|{}^i p_i^*\|}, \\ {}^i r_{pi} &= {}^i r_i^* + K_{Ai} {}^i v_{Ai}, {}^i v_{ij}^* = {}^i v_i + {}^i \omega_i \times h_{ij}^*, j = \overline{1, N}, \\ {}^i v_{relij}^* &= {}^i v_{reli} + {}^i \omega_i \times h_{ij}^*, j = \overline{1, N}, \\ {}^i \omega_{Li} &= \|{}^i \omega_i\| {}^i e_{Li} \cos \beta_i^*, {}^i v_{Li}^* = \|{}^i v_{reli}\| {}^i e_{Li} \cos \alpha_i^*, \\ {}^i v_{pij}^* &= {}^i v_{relij}^* - {}^i v_{Li}^*, j = \overline{1, N}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{если } \left[\begin{aligned} &\alpha < \frac{\pi}{2} \text{ \& } \\ &\left[\begin{aligned} &(q_i < 0 \text{ \& } {}^{i-1} \omega_{i-1(3)} > 0) \parallel \\ &(q_i > 0 \text{ \& } {}^{i-1} \omega_{i-1(3)} < 0) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right] \rightarrow \\ &\begin{cases} L_{wij} = \|h_{ij}^*\|, \\ L_{pi-1j} = L_{wij} \cos(\alpha), \\ dL_{pi-1j} = L_{i-1} - L_{pi-1j}, \\ {}^{i-1} v_{reli-1j} = {}^{i-1} v_{reli-1} + {}^{i-1} \omega_{i-1} \times ({}^{i-1} e_{Li-1} dL_{pi-1j}), \\ {}^{i-1} v_{reli-1j}^* = {}^{i-1} u_{i-1} {}^{i-1} u_{i-1}^T {}^{i-1} v_{reli-1j}, \\ S_j = \sqrt{L_{wij}^2 - L_{pi-1j}^2}, \\ \text{если } dL_{pi-1j} > 0, \text{ то } {}^i v_{Hij} = {}^i v_{ij} - f(S_j, {}^i v_{reli-1j}^*), \\ \text{если } dL_{pi-1j} \leq 0, \text{ то } {}^i v_{Hij} = {}^i v_{relij}^*, \\ {}^i v_{HLij}^* = {}^i e_{Li} {}^i e_{Li}^T {}^i v_{Hij}, \\ {}^i v_{Hpij}^* = {}^i v_{Hij} - {}^i v_{HLij}^*, \\ {}^i v_{pij}^* = {}^i v_{Hpij}^*, \end{cases} \quad j = \overline{1, N} \end{aligned}$$

$$\text{если } \left[\begin{array}{l} \alpha < \frac{\pi}{2} \ \& \\ \left[\left(q_{i+1} < 0 \ \& \ ^i\omega_{i(3)} < 0 \right) \right] \\ \left[\left(q_{i+1} > 0 \ \& \ ^i\omega_{i(3)} > 0 \right) \right] \end{array} \right] \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} L_{wij} = \|h_{ij}^*\|, \\ dL_{pij} = L_i - L_{wij}, \\ L_{pi+1j} = dL_{pij} \cos(\alpha), \\ {}^{i+1}v_{reli+1j} = {}^{i+1}v_{reli+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}e_{Li+1} L_{pi+1j}), \\ {}^{i+1}v_{reli+1j}^* = {}^{i+1}u_{i+1}^T {}^{i+1}u_{i+1} {}^{i+1}v_{reli+1j}, \\ S_j = \sqrt{dL_{pij}^2 - L_{pi+1j}^2}, \quad j = \overline{1, N} \\ \text{если } L_{pi+1j} < L_{i+1}, \text{ то } {}^i v_{Hij} = {}^i v_{ij} - f(S_j, {}^i v_{reli+1j}^*), \\ \text{если } L_{pi+1j} \geq L_{i+1}, \text{ то } {}^i v_{Hij} = {}^i v_{reli+1j}^*, \\ {}^i v_{HLij}^* = {}^i e_{Li}^T {}^i e_{Li} {}^i v_{Hij}, \\ {}^i v_{Hpj}^* = {}^i v_{Hij} - {}^i v_{HLi}^*, \\ {}^i v_{pij}^* = {}^i v_{Hpj}^*, \end{array} \right.$$

$${}^i \dot{v}_i = {}^{i-1}A \left[{}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1}p_{i-1}^* + {}^{i-1}\omega_{i-1} \times ({}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}p_{i-1}^*) + {}^{i-1}\dot{v}_{i-1} \right], {}^0 \dot{v}_0 = {}^0 \dot{v}_{AUV},$$

$${}^i \dot{v}_{Ai} = {}^i \dot{\omega}_i \times {}^i r_i^* + {}^i \omega_i \times ({}^i \omega_i \times {}^i r_i^*) + {}^i \dot{v}_i;$$

$$Re_{Li} = \frac{\rho {}^i v_{Li}^* L_i}{\eta},$$

$$\text{если } Re_{Li} \leq 10^3, \text{ то } F_{RLi} = k_{Li} \eta {}^i v_{Li}^*,$$

$$\text{если } Re_{Li} > 10^3, \text{ то } F_{RLi} = \frac{1}{2} \rho k_{Li} s_i {}^i v_{Li}^{*2},$$

$$Re_{pij} = \frac{2\rho {}^i v_{pij}^* r_i}{\eta}, j = \overline{1, N},$$

$$\text{если } Re_{pij} \leq 10^3, \text{ то } {}^i F_{Rpij} = k_{pi}^* \eta {}^i v_{pij}^* \ddot{u}j = \overline{N},$$

$$\text{если } Re_{pij} > 10^3, \text{ то } {}^i F_{Rpij} = \frac{1}{2} \rho k_{pi}^* r_i {}^i h_{pi}^* {}^i v_{pij}^{*2}, j = \overline{1, N},$$

$${}^i F_{Rpi} = \sum_{j=1}^N {}^i F_{Rpij}, j = \overline{1, N}, {}^i M_{Rpij} = h_{ij}^* \times {}^i F_{Rpij}, j = \overline{1, N},$$

$${}^i M_{Rpi} = \sum_{j=1}^N {}^i M_{Rpij} \ddot{u}j = \overline{N}, {}^i M_{Li} = k_{Li}^* \eta r_i {}^i \omega_{Li};$$

$${}^i F_i = {}^{i+1}A {}^{i+1}F_{i+1} + (m_i + \Pi_{mi}) {}^i \dot{v}_{Ai} + {}^i F_{RLi} + {}^i F_{Rpi}, {}^{n+1}F_{n+1} = F_{ext},$$

$${}^i M_i = {}^{i+1}A {}^{i+1}M_{i+1} + {}^i p_i^* \times ({}^{i+1}A {}^{i+1}F_{i+1}) + {}^i r_i^* \times (m_i {}^i \dot{v}_{Ai}) + {}^i r_{pi} \times (\Pi_{mi} {}^i \dot{v}_{Ai}) +$$

$$+ (\tau_i + T_i) {}^i \dot{\omega}_i + {}^i \omega_i \times ((\tau_i + T_i) {}^i \omega_i) + {}^i M_{Rpi} + {}^i M_{Li}, {}^{n+1}M_{n+1} = M_{ext},$$

где $F_{ext} \in R^3$ – вектор силы реакции опоры, равный по модулю вектору силового воздействия инструмента на объект работ; $M_{ext} \in R^3$ – внешний момент, приложенный к инструменту ММ; m_i, Π_{mi} – соответственно масса звена i и масса присоединенной к нему жидкости; $\tau_i \in R^{3 \times 3}, T_i \in R^{3 \times 3}$ – соответственно тензор инерции звена i и тензор инерции присоединенной к нему жидкости.

4. Исследование качества работы разработанной модификации алгоритма

Для исследования эффективности разработанной модификации алгоритма она была внедрена в хорошо апробированную модель подводного ММ, описанную в работе [2] и реализованную в Matlab/Simulink. В данной модели реализованы блоки формирования траектории, решения прямой и обратной задач кинематики, а также ОЗД для рассмотренного ММ (см. рис. 4). Кроме того, модель содержит блоки электроприводов с использованием двигателей постоянного тока независимого возбуждения и их адаптивных систем управления. В процессе моделирования предполагалось, что НПА зафиксирован на посадочной платформе или прочно удерживается вторым ММ, т.е. основание работающего манипулятора неподвижно. Полный список параметров модели приведен в работе [2], а ее основные характеристики представлены в табл. 2.

Для проверки разработанного алгоритма создавались такие условия, чтобы второе звено в определенный период времени нахо-

Таблица 2. Параметры ММ

Параметры		Величины
Звено 1	Длина, м	0,1
	Масса, кг	0,8
Звено 2	Длина, м	1
	Масса, кг	8
Звено 3	Длина, м	1
	Масса, кг	8
Звено 4	Длина, м	0,3
	Масса, кг	1

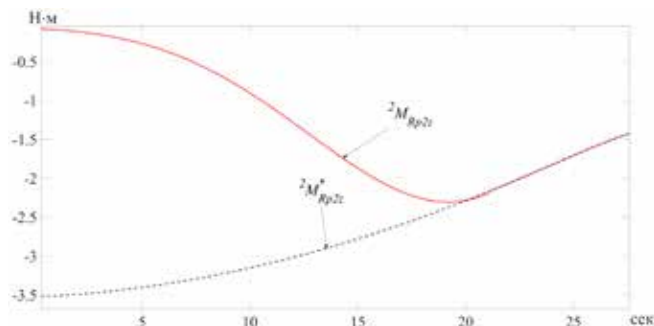
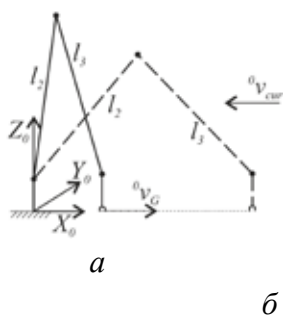


Рис. 7. Движение ММ в условиях действия подводных течений: а — траектория движения; б — составляющие моментов вязкого трения, действующих на второй привод ММ

дилось в спутном следе третьего. Для этого приводы второго и третьего звеньев вращались с одинаковой угловой скоростью $-0,5$ рад/с.

Из рис. 6 видно, что в момент времени 3,3 с угол поворота q_3 становится меньше $-\frac{\pi}{2}$ (см. рис. 6, q_3), то есть второе звено начинает попадать в спутный след третьего звена, в результате чего величина фактического момента силы вязкого трения (см. рис. 6, ${}^2M_{Rp2z}$), действующего на привод второго звена, становится втрое меньше величины момента, рассчитываемого оригинальным алгоритмом [6] (см. рис. 6, ${}^2M_{Rp2z}^*$). Это объясняется тем, что в спутном следе третьего звена фактическая скорость набегающего на второе звено потока значительно снижается по сравнению с собственной линейной скоростью движения второго звена.

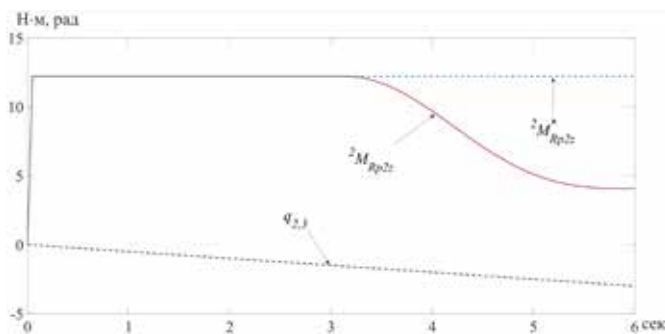


Рис. 6. Результаты тестового движения ММ

Во втором случае ММ двигался по прямолинейной траектории под воздействием подводного течения (рис. 7, а), скорость которого была равна ${}^0v_{cur} = [-0,17; 0; 0]$ м/с, при этом скорость движения рабочего инструмента ММ составляла ${}^0v_G = [0,06; 0; 0]$ м/с.

Из рис. 7, б видно, что несмотря на то, что собственная скорость движения инструмента 0v_G была относительно невысокой, набегающий на звенья поток жидкости ${}^0v_{cur}$ создавал значительное гидро-

динамическое сопротивление. Однако в результате того, что в процессе движения большую часть времени (22 с) звено 2 находилось в спутном следе звена 3, фактический момент силы вязкого трения, обусловленный воздействием течения и рассчитанный модифицированным алгоритмом (см. рис. 7, б, ${}^2M_{Rp2z}$), был значительно меньше момента силы вязкого трения, рассчитанного оригинальным алгоритмом [6] (см. рис. 7, б, ${}^2M_{Rp2z}^*$), не учитывающим эти особенности.

Заключение

В работе представлена модификация рекуррентного алгоритма решения ОЗД для подводного ММ, учитывающая влияние возникающего за звеном спутного следа на скорость потока, набегающего на смежные звенья манипулятора. Для уточнения распределения скоростей в спутном следе использованы результаты виртуальной «продувки» отдельного звена ММ невозмущенным потоком жидкости с различными скоростями в среде SOLIDWORKS Flow Simulation. В дальнейшем полученные зависимости изменения скорости потока в спутном следе за движущимся звеном учитывались при расчете фактической скорости набегающего потока на звенья ММ, попадающие в спутный след. Результаты численного моделирования в Matlab/Simulink подтвердили эффективность разработанной модификации, в том числе в условиях действия подводных течений. Важно отметить, что представленная в работе методика расчета может быть без особых затруднений применена для других алгоритмов решения ОЗД подводных ММ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Antonelli G. Underwater Robots. Third Edition // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2014. Vol. 96.
2. Konoplin A., Krasavin N., Yurmanov A., Piatavin P., Vasilenko R., Panchuk M. Development of a control system for underwater vehicles with multilink manipulators performing contact manipulation operations // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, No. 7. P. 1126.
3. Cieslak P., Ridao P., Giergiel M. Autonomous underwater panel operation by GIRONA500 UVMS: A practical approach to autonomous underwater manipulation // Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015. P. 529–536.
4. Коноплин А.Ю. и др. Разработка комплекса методов для автономного выполнения технологических операций манипуляционными подводными аппаратами // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 1. С. 54–71.
5. Sarkar N., Podder T.K. Coordinated motion planning and control of autonomous underwater vehicle-manipulator systems subject to drag optimization // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2002. Vol. 26, No. 2. P. 228–239.
6. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 53–56.
7. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Тимошенко А.А. Идентификация параметров взаимодействия звеньев подводных манипуляторов с вязкой средой для точного автоматического выполнения манипуляционных операций. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2025. Т. 26, № 2. С. 98–108.
8. Liu X. et al. Dynamic Model of an Underwater Vehicle Manipulator System Using Kane's Method // International Conference on Autonomous Unmanned Systems. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 278–286.
9. Tarn T. J., Shoults G. A., Yang S. P. A dynamic model of an underwater vehicle with a robotic manipulator using Kane's method // Autonomous Robots. 1996. Vol. 3, No. 2. P. 269–283.
10. Coiffet P. Interaction with the Environment. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1983.
11. Koval E.V. Automatic stabilization system of underwater manipulation robot // OCEANS '94. Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation: Proceedings. 1994. Vol. 1. P. 807–812.
12. McLain T.W., Rock S.M., Lee M.J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system // Autonomous Robots. 1996. Vol. 3, No. 2–3. P. 213–232.
13. Lagrange R., Fraitigneau Y. New estimations of the added mass and damping of two cylinders vibrating in a viscous fluid, from theoretical and numerical approaches // Journal of Fluids and Structures. 2020. Vol. 92. P. 102818.
14. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Тимошенко А.А. Идентификация параметров взаимодействия звеньев подводных манипуляторов с вязкой средой для точного автоматического выполнения манипуляционных операций. Ч. 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2025. Т. 26, № 3. С. 128–138.
15. Sarpkaya T., Garrison C.J. Vortex formation and resistance in unsteady flow // Journal of Applied Mechanics. 1963. Vol. 30, No. 1. P. 16–24.
16. McLain T.W., Rock S. M. Experiments in the hydrodynamic modeling of an underwater manipulator // Proceedings of the Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. IEEE, 1996. P. 463–469.
17. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Getman A.V. Experimental Determination of the Viscous Friction Coefficients for Calculation of the Force Impacts on the Moving Links of the Underwater Manipulators // Mechatronics, Automation, Control. 2015. Vol. 16, No. 11. P. 738–743.
18. Lin C.C., Chen R.C., Li T.L. Experimental determination of the hydrodynamic coefficients of an underwater manipulator // Journal of Robotic Systems. 1999. Vol. 16, No. 6. P. 329–338.
19. Корпачев В.П. Теоретические основы водного транспорта леса: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во «Академия естествознания», 2009. 237 с.
20. Fackrell S.A. Study of the added mass of cylinders and spheres. Ph.D. Thesis, University of Windsor (Canada), 2011.
21. Kolodziejczyk W. The method of determination of transient hydrodynamic coefficients for a single DOF underwater manipulator // Ocean Engineering. 2018. Vol. 153. P. 122–131.
22. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Василенко Р.П. Система стабилизации АНПА с дополнительным двигателем для компенсации динамических воздействий со стороны многозвенного манипулятора // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 3 (45). С. 20–29.
23. Medvedev V.S., Leskov A.G., Yushchenko A.S. Control Systems of Manipulative Robots. Moscow: Nauka, 1978. 416 p.
24. Allotta B. et al. Sea currents estimation during AUV navigation using Unscented Kalman Filter // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, No. 1. P. 13668–13673.
25. Leabourne K.N., Rock S.M. Model development of an underwater manipulator for coordinated arm-vehicle control // OCEANS '98 Conference Proceedings. IEEE, 1998. Vol. 2. P. 941–946.

Сведения об авторах

КРАСАВИН Никита Андреевич, н.с.

Место работы: Институт проблем морских технологий имени академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область интересов: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, динамика подводных роботов и манипуляторов, информационно-управляющие системы

Тел. (раб.): 89025063014

E-mail: NAKrasavin@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-1102-5409

КОНОПЛИН Александр Юрьевич, к.т.н., в.н.с.

Место работы: Институт проблем морских технологий имени академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область интересов: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

Тел. (раб.): 89244298396

E-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7554-1002

КАЛЕНТЬЕВА Екатерина Евгеньевна, инженер

Место работы: Институт проблем морских технологий имени академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область интересов: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, динамика подводных роботов и манипуляторов, информационно-управляющие системы

Тел. (раб.): 89020644321

E-mail: kkalenteva@yandex.ru

ORCID: 0009-0008-8793-1735



MODIFICATION OF THE INVERSE DYNAMICS ALGORITHM FOR AN UNDERWATER MULTILINK MANIPULATOR

N.A. Krasavin, A.Yu. Konoplin, E.E. Kalenteva

The paper addresses the problem of improving the accuracy of a recursive algorithm for solving the inverse dynamics of underwater multi-link manipulators—essential components of unmanned underwater vehicles (UUVs) designed for technological operations. In contrast to existing approaches, the proposed modification explicitly accounts for the dependence of viscous drag forces on the actual incoming flow velocity, which is determined by the manipulator's instantaneous configuration: the relative positioning of its links causes certain segments to reside within the wake generated by upstream links. To characterize this effect, virtual flow simulations of an isolated manipulator link in an undisturbed fluid stream at varying velocities were carried out using SOLIDWORKS Flow Simulation. The resulting data were employed to compute the actual local flow velocities acting on link segments located in the wake region. The modified algorithm was implemented and numerically simulated in MATLAB/Simulink using a model of a multi-link manipulator mounted on an unmanned underwater vehicle. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed approach in enhancing the accuracy of dynamic load estimation due to viscous fluid interaction—particularly under ambient underwater currents.

Keywords: underwater multilink manipulator, inverse dynamics problem, viscous fluid, wake, incoming flow, manipulation tasks.

References

1. Antonelli G. Underwater Robots. Third Edition // Springer Tracts in Advanced Robotics. Vol. 96. 2014.
2. Konoplin A., Krasavin N., Yurmanov A., Piatavin P., Vasilenko R., Panchuk M. Development of a control system for underwater vehicles with multilink manipulators performing contact manipulation operations // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, No. 7. P. 1126.
3. Cieslak P., Rida P., Giergiel M. Autonomous underwater panel operation by GIRONA500 UVMS: A practical approach to autonomous underwater manipulation // Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015. P. 529–536.
4. Konoplin A.Yu. et al. Development of a comprehensive methodology for autonomous execution of technological operations by underwater manipulator vehicles // Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2024. No. 1. P. 54–71.
5. Sarkar N., Podder T.K. Coordinated motion planning and control of autonomous underwater vehicle-manipulator systems subject to drag optimization // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2002. Vol. 26, No. 2. P. 228–239.
6. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. System of automatic stabilization of an underwater vehicle in hover mode with an active multi-link manipulator. Part 1 // Mechatronics, Automation, Control. 2014. No. 6. P. 53–56.
7. Filaretov V.F., Zuev A.V., Timoshenko A.A. Identification of parameters of interaction between links of underwater manipulators with a viscous medium for accurate execution of manipulation tasks. Part 1 // Mechatronics, Automation, Control. 2025. Vol. 26, No. 2. P. 98–108.
8. Liu X. et al. Dynamic Model of an Underwater Vehicle Manipulator System Using Kane's Method // International Conference on Autonomous Unmanned Systems. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 278–286.
9. Tarn T.J., Shoults G.A., Yang S.P. A dynamic model of an underwater vehicle with a robotic manipulator using Kane's method // Autonomous Robots. 1996. Vol. 3, No. 2. P. 269–283.
10. Coiffet P. Interaction with the Environment. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1983.
11. Koval E.V. Automatic stabilization system of underwater manipulation robot // OCEANS '94. Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation. Proceedings. 1994. Vol. 1. P. 807–812.
12. McLain T.W., Rock S.M., Lee M.J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system // Autonomous Robots. 1996. Vol. 3, No. 2–3. P. 213–232.
13. Lagrange R., Fraigneau Y. New estimations of the added mass and damping of two cylinders vibrating in a viscous fluid, from theoretical and numerical approaches // Journal of Fluids and Structures. 2020. Vol. 92. P. 102818.
14. Filaretov V.F., Zuev A.V., Timoshenko A.A. Identification of parameters of interaction between links of underwater manipulators with a viscous medium for accurate execution of manipulation tasks. Part 2 // Mechatronics, Automation, Control. 2025. Vol. 26, No. 3. P. 128–138.
15. Sarpkaya T., Garrison C.J. Vortex formation and resistance in unsteady flow // Journal of Applied Mechanics. 1963. Vol. 30, No. 1. P. 16–24.
16. McLain T.W., Rock S.M. Experiments in the hydrodynamic modeling of an underwater manipulator // Proceedings of the Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. IEEE, 1996. P. 463–469.
17. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Getman A.V. Experimental determination of the viscous friction coefficients for calculation of the force impacts on the moving links of the underwater manipulators // Mechatronics, Automation, Control. 2015. Vol. 16, No. 11. P. 738–743.

18. Lin C.C., Chen R.C., Li T.L. Experimental determination of the hydrodynamic coefficients of an underwater manipulator // Journal of Robotic Systems. 1999. Vol. 16, No. 6. P. 329–338.
19. Korpachev V.P. Theoretical Foundations of Water-Based Timber Transport: A Textbook for Universities. Moscow: Publishing House “Academy of Natural Sciences”, 2009. 237 p.
20. Fackrell S.A. Study of the added mass of cylinders and spheres // University of Windsor (Canada), 2011.
21. Kolodziejczyk W. The method of determination of transient hydrodynamic coefficients for a single DOF underwater manipulator // Ocean Engineering. 2018. Vol. 153. P. 122–131.
22. Konoplin A.Yu., Krasavin N.A., Vasilenko R.P. Stabilization system of an AUV with an additional thruster for compensation of dynamic impacts from a multi-link manipulator // Underwater Research and Robotics. 2023. No. 3 (45). P. 20–29.
23. Medvedev V.S., Leskov A.G., Yushchenko A.S. Control Systems of Manipulative Robots; Ser. Scientific Foundations of Robotics. Moscow: Nauka, 1978. 416 p.
24. Allotta B. et al. Sea currents estimation during AUV navigation using Unscented Kalman Filter // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, No. 1. P. 13668–13673.
25. Leabourne K.N., Rock S.M. Model development of an underwater manipulator for coordinated arm-vehicle control // OCEANS '98 Conference Proceedings. IEEE, 1998. Vol. 2. P. 941–946

Recommended citation:

Krasavin N.A., Konoplin A.Yu., Kalenteva E.E. MODIFICATION OF THE INVERSE DYNAMICS ALGORITHM FOR AN UNDERWATER MULTILINK MANIPULATOR. Underwater investigations and robotics. 2025. No. 4 (54). P. 40–50. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_54_04_04. EDN: QMKNKV.

Information about authors

KRASAVIN Nikita Andreevich, scientific researcher

Name of institution: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS

Work address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Sphere of interest: automatic control of underwater robots and manipulators, dynamics of underwater robots and manipulators, information and control systems

Phone: 89025063014

E-mail: NAKrasavin@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-1102-5409

KONOPLIN Aleksandr Jurevich, Ph.D, leading researcher

Name of institution: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS

Work address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Sphere of interest: automatic control of underwater robots and manipulators, adaptive control, information and control systems

Phone: 89244298396

E-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7554-1002

KALENTEVA Ekaterina Evgenevna, engineer

Name of institution: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS

Work address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Sphere of interest: automatic control of underwater robots and manipulators, dynamics of underwater robots and manipulators, information and control systems

Phone: 89020644321

E-mail: kkalentevaa@yandex.ru

ORCID: 0009-0008-8793-1735

