

СИСТЕМА ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ С МНОГОЗВЕННЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТАКТНЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ

А.Ю. Коноплин, Н.А. Красавин, А.П. Юрманов,
П.А. Пятавин, А.А. Кацурин

Предложен новый метод синтеза системы позиционно-силового управления подводными аппаратами (ПА), оснащенными многозвенными манипуляторами, которая обеспечивает автоматическое выполнение контактных манипуляционных операций в режиме зависания аппаратов вблизи или над объектами работ. Для достижения желаемой величины силового воздействия рабочего инструмента на поверхность объекта работ вычисляются величина и направление вектора силы, оказываемой этим инструментом на объект. После чего на приводы всех степеней подвижности манипулятора подаются сигналы управления, обеспечивающие дополнительные перемещения его рабочего инструмента в направлении желаемого вектора силы. Одновременно с помощью создаваемых движителями ПА тяг обеспечивается компенсация вычисляемых в реальном масштабе времени силовых и моментных воздействий на ПА со стороны манипулятора, выполняющего силовую операцию. При этом создается необходимый упор в точке крепления манипулятора к ПА, позволяющий рабочему инструменту этого манипулятора оказывать желаемые силовые воздействия на поверхность объекта работ. Кроме того, для компенсации неизбежных ошибок системы стабилизации ПА, приводящих к отклонениям рабочего инструмента от предписанных ему траекторий, эти траектории автоматически корректируются с учетом реальных смещений аппарата относительно исходного положения. В результате обеспечивается выполнение контактных манипуляционных операций даже в условиях неизбежных (хоть и незначительных) смещений ПА от точки стабилизации в условиях силовых воздействий рабочего инструмента на поверхность объекта. Работоспособность и эффективность системы, синтезированной на основе предложенного метода, подтверждены результатами численного моделирования в Matlab/Simulink с визуализацией в симуляторе CoppeliaSim.

Ключевые слова: подводный аппарат, многозвенный манипулятор, позиционно-силовое управление, контактные операции, система стабилизации.

Введение

В настоящее время автономные и гибридные ПА все чаще оснащаются многозвенными манипуляторами и активно применяются для проведения различных подводных исследований и выполнения технологических операций в автономном режиме [1, 2]. При этом большинство манипуляционных операций требуют контакта рабочего инструмента манипулятора с объектами работ. К таким операциям можно отнести как относительно простые (отбор бактериальных матов и введение пробоотборников в грунт),

так и сравнительно сложные (очистка поверхностей от обрастаний и заиливаний, установка пробоотборников в контрольные отверстия на подводных манифольдах и др.).

Для выполнения исследовательских операций по отбору проб необходимо провести пробоотборником по желаемой траектории с сохранением заданного взаиморасположения этого инструмента и донной поверхности. При этом не требуется оказывать заранее известное силовое воздействие на грунт. В свою очередь, для выполнения операций, связанных с очисткой поверхностей или взаимодействием с объ-

ектами подводной инфраструктуры, важно воздействовать рабочим инструментом манипулятора на поверхность объекта с заданным усилием.

Наиболее удобным и безопасным для выполнения упомянутых операций является режим стабилизированного зависания ПА вблизи или над объектом работ [1, 3, 4]. В этом режиме аппарат занимает наиболее удобное для манипулирования положение и не взмучивает придонный слой воды, как это происходит при посадке на грунт. Однако при контакте манипулятора с поверхностью объекта на его рабочий инструмент начинает действовать сила, приводящая к возникновению нежелательных внешних моментов на выходных валах электроприводов в степенях подвижности манипулятора, а также к силовому и моментному воздействиям на точку крепления манипулятора к ПА. Эти воздействия смещают ПА от точки его зависания, что неизбежно приводит к отклонениям рабочего инструмента от предписанных траекторий и потере контакта с поверхностью объекта работ.

В настоящее время уже существуют решения задачи обеспечения позиционно-силового управления манипуляторами, установленными на ПА. Для этого используют методы параллельного позиционно/силового управления [5] или импедансного управления [6]. В первом случае для управления движением рабочего инструмента синтезируются два контура управления приводами манипулятора – по положению и по создаваемому усилию. В свою очередь, импедансное управление подразумевает формирование зависимостей между желаемым положением рабочего инструмента и создаваемым этим инструментом усилием в точке контакта с объектом работ. Также существуют методы [7], объединяющие в себе оба вышеописанных подхода к силовому управлению подводными манипуляторами. При этом во многих работах предлагается использовать многокомпонентные силовые и моментные датчики для измерения динамических воздействий на ПА и манипулятор, возникающих при контакте последнего с объектом работ. Например, метод [8] позволил перемещать рабочий инструмент подводного манипулятора, оснащенный сило-моментным датчиком, вдоль стены, оказывая при этом заданное силовое воздействие на ее поверхность. Метод [5] основан на использовании дополнительного контура управления ПА, который минимизирует взаимовлияния между аппаратом и манипулятором в процессе выполнения контактных операций. Для работы этого контура применялся сило-моментный датчик, установленный в точке крепления манипулятора к ПА. Это позволило нивелировать возникающие неточности в работе навигационной системы

ПА. Однако в этих работах не учитывались особенности работы навигационной системы в подводных условиях и связанные с этим задержки при формировании векторов отклонений ПА от заданной точки стабилизации.

Также следует отметить, что использование многокомпонентных сило-моментных датчиков значительно затрудняет практическое использование предложенных методов ввиду следующих причин [9]: датчики подвержены зашумлению; ввиду своей конструкции они снижают жесткость кинематической цепи; обладают ограниченной полосой пропускания; обладают высокой стоимостью и подразумевают внесение изменений в конструкцию манипулятора.

Известны подходы к позиционно-силовому управлению промышленным манипуляторами, не требующие использования сило-моментных датчиков. В частности, в работах [10, 11] предложен метод, позволяющий для каждой степени подвижности многозвенных манипуляторов с произвольной кинематической схемой рассчитывать желаемые значения внешних моментов, которые в совокупности обеспечивают заданное силовое воздействие рабочего инструмента на объекты работ. При этом синтезированы и корректирующие устройства, позволяющие одновременно точно управлять положением выходного вала каждого электропривода манипулятора и его внешним моментом за счет одновременной минимизации с помощью квадратичного критерия качества ошибок по этим двум составляющим. В работе [9] для силового управления промышленным манипулятором были использованы наблюдатели, дающие информацию о действующих в приводах моментных воздействиях. Однако указанные подходы эффективны, когда основание манипулятора не смещается относительно объекта работ, чего невозможно добиться при выполнении операций в режиме зависания ПА.

В результате можно сделать вывод, что известные методы и подходы все еще не позволяют обеспечить качественное выполнение распространенных контактных манипуляционных операций в режиме зависания ПА. Поэтому в данной работе ставится задача разработки нового метода синтеза системы позиционно-силового управления ПА, оснащенными многозвенными манипуляторами, лишенной перечисленных выше недостатков.

1. Особенности обеспечения выполнения подводных контактных операций

Перед выполнением подводной контактной операции с помощью системы [3] на основе облаков то-

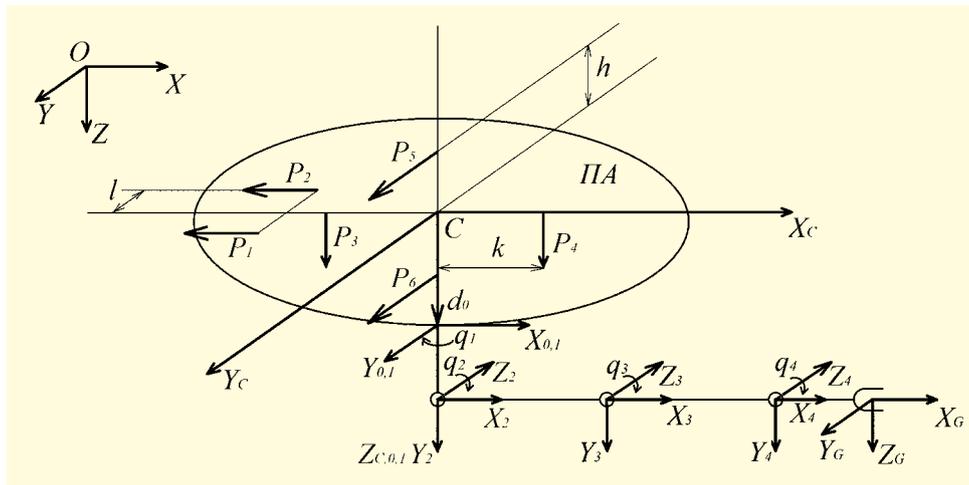


Рис. 1. Кинематическая схема ПА с манипулятором

чек, получаемых от бортовых систем технического зрения (СТЗ) ПА, целевой объект идентифицируется, и на его поверхность переносится желаемая траектория рабочего инструмента манипулятора с учетом возможного заиливания, обрастания и деформации объекта. При этом ориентация указанного инструмента задается на основе сформированной триангуляционной поверхности объекта с учетом требований к выполнению конкретной операции. После чего ПА занимает вблизи объекта такое пространственное положение, при котором траектория рабочего инструмента располагается в рабочей зоне манипулятора таким образом, чтобы этот инструмент подходил к поверхности объекта с заданным углом сервиса, оказывая при контакте с поверхностью минимально возможные динамические воздействия на ПА, а также имел возможность компенсировать нежелательные смещения ПА за счет изменения своей конфигурации. Для выполнения исследовательских манипуляционных операций эта задача решена в работе [12].

Чтобы стабилизироваться в желаемом пространственном положении над или вблизи объекта работ ПА должен иметь схему компоновки движителей, обеспечивающую управление перемещениями аппарата по шести степеням свободы за счет создаваемых этими движителями тяг. Пример такой схемы компоновки движителей ПА, оснащенного многозвенным манипулятором, изображен на рис. 1. Манипулятор закреплен под центром водоизмещения аппарата, что позволяет минимизировать динамические воздействия на ПА в процессе работы этого манипулятора. В качестве примера использована кинематическая схема многозвенника, которая включает три переносные и одну ориентирующую степени подвижности.

На рис. 1 введены следующие обозначения: $OXYZ$ – абсолютная система координат (СК), в которой перемещается ПА; $CX_cY_cZ_c$ – жестко связанная

с корпусом ПА СК, начало которой располагается в центре C величины (водоизмещения) аппарата, ось CX_c совпадает с горизонтальной – продольной осью ПА, ось CZ_c – с его вертикальной осью и направлена вниз, а ось CY_c составляет с ними правую тройку; $X_0Y_0Z_0$ – СК, связанная с основанием манипулятора; $X_{1...4}Y_{1...4}Z_{1...4}$ – СК, построенные с помощью одной из наиболее эффективных разновидностей подхода Денавита–Хартенберга [13, 14] и связанные с началами соответствующих звеньев манипулятора; $X_GY_GZ_G$ – СК, связанная с рабочим инструментом манипулятора; $q_{1...4}$ – обобщенные координаты манипулятора; $P_{1...6}$ – тяги, создаваемые движителями ПА; h, l, k – геометрические параметры компоновки движителей ПА; $d_0 \in R^3$ – вектор, определяющий положение основания манипулятора в СК $CX_cY_cZ_c$.

Стабилизация ПА в режиме зависания обеспечивается с помощью комбинированной системы [3], которая компенсирует тягами движителей аппарата негативные динамические воздействия со стороны неизвестных подводных течений, а также движущегося в вязкой среде манипулятора. Его силовые и моментные воздействия на ПА вычисляются с помощью модификации рекуррентного алгоритма решения обратной задачи динамики (ОЗД) для подводного манипулятора [15], учитывающей особенности влияния вязкой среды на его звенья. Подсистема стабилизации [3], замкнутая по положению ПА относительно объекта работ, определяемому на основе визуальной навигации, реализуется с помощью методов [16, 17].

Для компенсации неизбежных ошибок системы стабилизации ПА, приводящих к отклонениям рабочего инструмента манипулятора от предписанных ему траекторий, необходимо с помощью системы [3] автоматически корректировать программные траектории движения этого инструмента с учетом реальных смещений ПА относительно исходного положе-

ния. Причем угловые смещения ПА определяются бортовыми гироскопами, а линейные – системами визуальной навигации. Использование указанной системы позволит рабочему инструменту манипулятора двигаться по поверхности объекта работ даже в условиях неизбежных (хоть и незначительных) смещений ПА от точки стабилизации под влиянием силы, оказываемой поверхностью объекта на рабочий инструмент.

Поскольку многие исследовательские манипуляционные операции не требуют заданного силового воздействия на поверхность объекта работ и выполняются на основе желаемого взаимного расположения рабочего инструмента и указанной поверхности, то для выполнения таких операций достаточно использования описанных выше систем стабилизации ПА и коррекции программных траекторий манипулятора [3]. Однако сила, действующая на рабочий инструмент при контакте с объектом, приводит к возникновению нежелательных внешних моментов на выходных валах электроприводов в степенях подвижности манипулятора. Эти моменты, приводящие к ошибкам позиционирования рабочего инструмента, должны компенсироваться с помощью дополнительных сигналов управления соответствующими электроприводами манипулятора, сформированных самонастраивающимися корректирующими устройствами [15].

2. Описание метода позиционно-силового управления ПА с манипулятором

Для выполнения в режиме стабилизируемого зависания ПА контактных операций с оказанием манипулятором желаемого силового воздействия на объект предлагается метод позиционно-силового управления, не требующий использования сило-моментных датчиков. Этот метод состоит из трех этапов.

На первом этапе выполняется определение внешних моментов, действующих на выходные валы приводов во всех степенях подвижности манипулятора в результате силового контакта рабочего инструмента этого манипулятора с поверхностью объекта работ. На основе вычисленных величин внешних моментов для конкретной кинематической схемы манипулятора рассчитываются величина и направление вектора силы, оказываемой рабочим инструментом манипулятора на объект работ в процессе выполнения контактной операции.

На втором этапе на приводы всех степеней подвижности манипулятора подаются сигналы управле-

ния, обеспечивающие дополнительные перемещения его рабочего инструмента в направлении желаемого вектора силы для достижения желаемой величины силового воздействия инструмента на поверхность объекта работ.

На третьем этапе на входы соответствующих движителей ПА подаются сигналы управления, компенсирующие динамические воздействия на этот аппарат со стороны манипулятора, перемещающегося в вязкой среде и оказывающего силовое воздействие на объект работ. Причем сигналы управления движителями ПА формируются в реальном масштабе времени на основе аналитических выражений, определяющих силу и момент, с которыми этот манипулятор действует на ПА. Для этого учитываются вычисляемые величина и направление вектора силы, оказываемой рабочим инструментом манипулятора на объект работ, эффекты взаимовлияния между всеми степенями подвижности манипулятора, а также гидростатические и гидродинамические силы сопротивления его движению, включая вязкие трения и присоединенные массы окружающей жидкости. В результате обеспечивается стабилизация ПА в режиме его зависания вблизи или над объектом работ в процессе работы манипулятора, при этом создается необходимый упор в точке крепления манипулятора к ПА, позволяющий рабочему инструменту этого манипулятора оказывать желаемые силовые воздействия на поверхность объекта работ.

Предложенный метод реализуется следующим образом. При движении рабочего инструмента подводного манипулятора по поверхности объекта работ на выходной вал редуктора привода i -й степени подвижности манипулятора ($i = 1, n$, n – количество степеней подвижности манипулятора) действует внешний момент ${}^iM_{dz}$, направленный вдоль оси шарнира i . ${}^iM_{dz} = {}^iM_{wz} + {}^iM_{ez}$. Здесь ${}^iM_{wz}$ – момент, обусловленный эффектами взаимовлияния между всеми степенями подвижности манипулятора, а также гидростатическими и гидродинамическими силами сопротивления его движению, включая вязкие трения и присоединенные массы окружающей жидкости, ${}^iM_{ez}$ – момент, обусловленный влиянием силы реакции опоры поверхности объекта работ ${}^G\vec{F}_e \in R^3$, которая равна по величине и противоположна по направлению силе ${}^G\vec{F}_{imp} \in R^3$ воздействия рабочего инструмента на этот объект. На рис. 2 показаны перечисленные векторы сил и моментов, а также векторы силового $\vec{F} \in R^3$ и моментного $\vec{M} \in R^3$ воздействия на ПА со стороны работающего манипулятора. Индексом G отмечены векторы, заданные в СК $X_G Y_G Z_G$, связанной с рабочим инструментом манипулятора.

Как уже было отмечено выше, с каждым звеном манипулятора жестко связана правая СК с ортами $X_i Y_i Z_i$. Величина ${}^i M_{dz}$ измеряется с помощью датчика или наблюдателя момента нагрузки привода [9, 15]. При этом величины моментов ${}^i M_{wz}$ вычисляются с помощью аналитических выражений решения ОЗД для подводного манипулятора [15]. Величина момента ${}^i M_{ez}$ вычисляется с помощью выражения ${}^i M_{ez} = {}^i M_{dz} - {}^i M_{wz}$.

Далее для конкретной кинематической схемы манипулятора на основе вычисленных величин внешних моментов ${}^i M_{ez}$, действующих на выходные валы приводов во всех степенях подвижности в результате силового контакта рабочего инструмента этого манипулятора с поверхностью объекта работ, определяют элементы действующего на инструмент манипулятора вектора силы ${}^G \vec{F}_e$. Для типовой кинематической схемы подводного многозвенового манипулятора (см. рис. 1), включающей три переносных и одну ориентирующую степени подвижности, вычисление упомянутого вектора осуществляется следующим образом.

Очевидно, что при ${}^G \vec{F}_e \neq 0$ в шарнире четвертой степени подвижности манипулятора возникает дополнительный момент силы, вычисляемый с помощью рекуррентных соотношений [15]:

$$\begin{aligned}
 {}^4 \vec{M}_e &= \vec{p}_4 \times ({}^4 A {}^G \vec{F}_e) = \\
 &= \begin{bmatrix} p_{4x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^G F_{ex} \\ {}^G F_{ey} \\ {}^G F_{ez} \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} p_{4x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^G F_{ex} \\ {}^G F_{ez} \\ -{}^G F_{ey} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ {}^G F_{ey} p_{4x} \\ {}^G F_{ez} p_{4x} \end{bmatrix}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $\vec{p}_i \in R^3$ – вектор, направленный вдоль продольной оси звена i и определяющий положение СК, связанной со звеном $i+1$ в СК i -го звена; ${}^i A \in R^{3 \times 3}$ – матрица поворота векторов из СК, связанной со звеном $i+1$, в СК, связанную с основанием i -го звена; (\times) – векторное произведение векторов.

На выходной вал редуктора привода четвертой степени подвижности манипулятора будет действовать составляющая ${}^4 M_{ez}$ момента ${}^4 \vec{M}_e$, направленная вдоль оси вращения сочленения. Поэтому с учетом выражения (1) составляющую ${}^G F_{ez}$ силы ${}^G \vec{F}_e$, действующую вдоль оси Z_G , можно определить с помощью выражения:

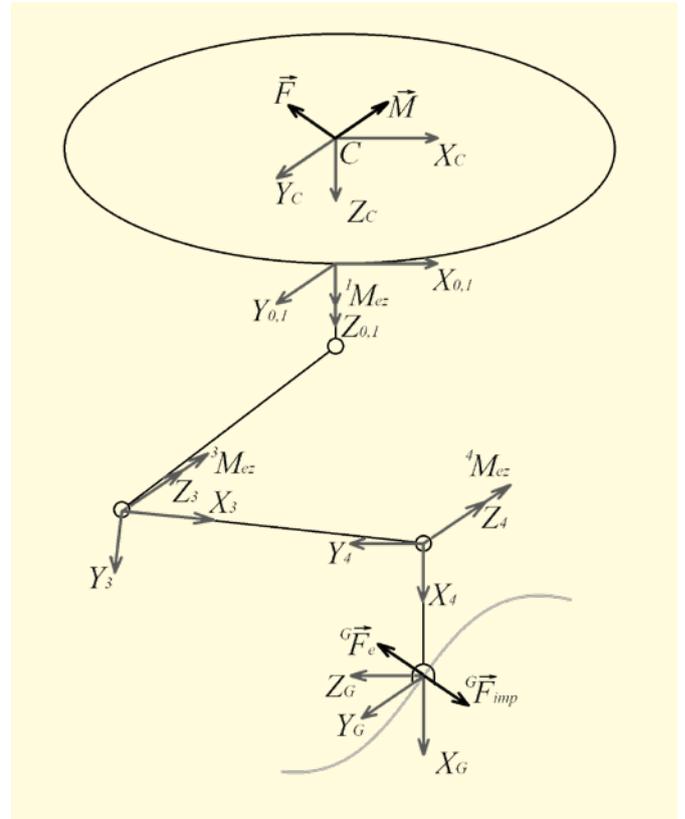


Рис. 2. ПА, выполняющий контактную операцию; направления воздействия векторов сил и моментов при контакте рабочего инструмента с поверхностью объекта работ

$${}^G F_{ez} = \frac{{}^4 M_{ez}}{p_{4x}}. \quad (2)$$

Действующие на рабочий инструмент манипулятора составляющие ${}^G F_{ex}, {}^G F_{ey}$ вектора ${}^G \vec{F}_e$ определяются аналогично на основе измеряемых значений моментов ${}^3 M_{ez}$ и ${}^1 M_{ez}$, возникающих в приводах третьей и первой степеней подвижности соответственно и обусловленных воздействием вектора ${}^G \vec{F}_e$ на упомянутый рабочий инструмент. Для используемой кинематической схемы манипулятора вектор ${}^3 \vec{F}_e$ с учетом направления осей СК, расположенных в степенях подвижности манипулятора, будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 {}^3 \vec{F}_e &= {}^3 A {}^4 \vec{F}_e = {}^3 A ({}^4 A {}^G \vec{F}_e) = \\
 &= \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^G F_{ex} \\ {}^G F_{ey} \\ {}^G F_{ez} \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^G F_{ex} \\ {}^G F_{ez} \\ -{}^G F_{ey} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^G F_{ex} c_4 - {}^G F_{ez} s_4 \\ {}^G F_{ex} s_4 + {}^G F_{ez} c_4 \\ -{}^G F_{ey} \end{bmatrix}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $c_4 = \cos(q_4), s_4 = \sin(q_4)$.

В таком случае с учетом (1) и (3) вектор ${}^3\vec{M}_e$ будет иметь вид:

$$\begin{aligned} {}^3\vec{M}_e &= \vec{p}_3 \times {}^3\vec{F}_e + {}^3A^4\vec{M}_e = \\ &= \begin{bmatrix} p_{3x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^G F_{ex} c_4 - {}^G F_{ez} s_4 \\ {}^G F_{ex} s_4 + {}^G F_{ez} c_4 \\ -{}^G F_{ey} \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ {}^G F_{ey} p_{4x} \\ {}^G F_{ez} p_{4x} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -{}^G F_{ey} p_{4x} s_4 \\ {}^G F_{ey} (p_{3x} + p_{4x} c_4) \\ p_{3x} ({}^G F_{ex} s_4 + {}^G F_{ez} c_4) + {}^G F_{ez} p_{4x} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) нетрудно получить:

$${}^3M_{ez} = p_{3x} ({}^G F_{ex} s_4 + {}^G F_{ez} c_4) + {}^G F_{ez} p_{4x},$$

откуда с учетом выражения (2) можно выразить:

$$\begin{aligned} {}^G F_{ex} &= \frac{{}^3M_{ez} - {}^G F_{ez} (p_{3x} c_4 + p_{4x})}{p_{3x} s_4} = \\ &= \frac{{}^3M_{ez} - \frac{{}^4M_{ez}}{p_{4x}} (p_{3x} c_4 + p_{4x})}{p_{3x} s_4}. \end{aligned} \quad (5)$$

Вектор ${}^2\vec{M}_e$ в СК, связанной с основанием второго звена манипулятора, определяется в виде:

$$\begin{aligned} {}^2\vec{M}_e &= \vec{p}_2 \times ({}^2A^3\vec{F}_e) + {}^2A^3\vec{M}_e = \begin{bmatrix} p_{2x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^G F_{ex} c_{34} - {}^G F_{ez} s_{34} \\ {}^G F_{ex} s_{34} + {}^G F_{ez} c_{34} \\ -{}^G F_{ey} \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -{}^G F_{ey} p_{4x} s_4 \\ {}^G F_{ey} (p_{3x} + p_{4x} c_4) \\ p_{3x} ({}^G F_{ex} s_4 + {}^G F_{ez} c_4) + {}^G F_{ez} p_{4x} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -{}^G F_{ey} (p_{3x} s_3 + p_{4x} s_{34}) \\ {}^G F_{ey} (p_{2x} + p_{4x} c_{34} + p_{3x} c_3) \\ {}^G F_{ex} (p_{3x} s_4 + p_{2x} s_{34}) + {}^G F_{ez} (p_{4x} + p_{3x} c_4 + p_{2x} c_{34}) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $c_{34} = \cos(q_3 + q_4), s_{34} = \sin(q_3 + q_4)$.

С учетом (6) определим вектор ${}^1\vec{M}_e$ в СК, связанной с основанием первого звена манипулятора:

$$\begin{aligned} {}^1\vec{M}_e &= \vec{p}_1 \times {}^1\vec{F}_e + {}^1A^2\vec{M}_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p_{1z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^G F_{ex} c_{234} - {}^G F_{ez} s_{234} \\ {}^G F_{ey} \\ {}^G F_{ex} s_{234} + {}^G F_{ez} c_{234} \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ s_2 & c_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -{}^G F_{ey} (p_{3x} s_3 + p_{4x} s_{34}) \\ {}^G F_{ey} (p_{2x} + p_{4x} c_{34} + p_{3x} c_3) \\ {}^G F_{ex} (p_{3x} s_4 + p_{2x} s_{34}) + \\ + {}^G F_{ez} (p_{4x} + p_{3x} c_4 + p_{2x} c_{34}) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -{}^G F_{ey} (p_{4x} s_{234} + p_{3x} s_{23} + p_{2x} s_2 + p_{1z}) \\ {}^G F_{ex} (p_{1z} c_{234} - p_{3x} s_4 - p_{2x} s_{34}) - \\ -{}^G F_{ez} (p_{4x} + p_{3x} c_4 + p_{2x} c_{34} + p_{1z} s_{234}) \\ {}^G F_{ey} (p_{4x} c_{234} + p_{3x} c_{23} + p_{2x} c_2) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $c_{234} = \cos(q_2 + q_3 + q_4), s_{234} = \sin(q_2 + q_3 + q_4)$.
Из (7) нетрудно получить:

$${}^1M_{ez} = {}^G F_{ey} (p_{4x} c_{234} + p_{3x} c_{23} + p_{2x} c_2),$$

откуда выразим:

$${}^G F_{ey} = \frac{{}^1M_{ez}}{(p_{4x} c_{234} + p_{3x} c_{23} + p_{2x} c_2)}. \quad (8)$$

С учетом (2), (5), (8) получим:

$${}^G \vec{F}_e = \begin{bmatrix} {}^G F_{ex} \\ {}^G F_{ey} \\ {}^G F_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{{}^3M_{ez} - \frac{{}^4M_{ez}}{p_{4x}} (p_{3x} c_4 + p_{4x})}{p_{3x} s_4} \\ \frac{{}^1M_{ez}}{(p_{4x} c_{234} + p_{3x} c_{23} + p_{2x} c_2)} \\ \frac{{}^4M_{ez}}{p_{4x}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Чтобы рабочий инструмент манипулятора воздействовал на поверхность объекта работ с желаемым усилием ${}^G \vec{F}_{imp}^* \in R^3$, необходимо подавать дополнительные управляющие сигналы на приводы его степеней подвижности, которые будут обеспечивать перемещение инструмента в направлении вектора ${}^G \vec{F}_f = {}^G \vec{F}_{imp}^* - {}^G \vec{F}_{imp}$, причем ${}^G \vec{F}_{imp} = -{}^G \vec{F}_e$. При этом величина k указанного дополнительного перемещения рабочего инструмента формируется регулятором пропорционально длине (модулю) вектора ${}^G \vec{F}_f$. В результате если разность ${}^G \vec{F}_{imp}^* - {}^G \vec{F}_{imp} > 0$, то в направлении вектора ${}^G \vec{F}_f$ формируется величина k до-

полнительного смещения рабочего инструмента пропорционально величине полученной разницы. Если ${}^G \vec{F}_{imp}^* - {}^G \vec{F}_{imp} < 0$, тогда величина k дополнительного смещения инструмента будет формироваться в направлении от поверхности объекта. Таким образом обеспечивается непрерывное оказание заданного силового воздействия рабочим инструментом манипулятора на поверхность объекта работ.

Чтобы создать необходимый упор в точке крепления манипулятора к ПА, позволяющий рабочему инструменту этого манипулятора оказывать желаемые силовые воздействия на поверхность объекта работ, на входы соответствующих движителей ПА должны подаваться сигналы, которые будут компенсировать оказываемые на этот ПА со стороны манипулятора силовые и моментные воздействия.

Для создания в реальном масштабе времени дополнительных сигналов управления движителями ПА рассчитываются векторы силы \vec{F} и момента \vec{M} , с которыми манипулятор воздействует на центр величины (водоизмещения) ПА (см. рис. 2). Эти векторы обусловлены величиной и направлением вектора силы ${}^G \vec{F}_e$ (9), оказываемой на рабочий инструмент манипулятора объектом работ, эффектами взаимовлияния между всеми степенями подвижности манипулятора, а также гидростатическими и гидродинамическими силами сопротивления движению звеньев, включая вязкие трения и присоединенные

массы окружающей жидкости. Расчет упомянутых динамических воздействий \vec{F} и \vec{M} с учетом вычисляемой величины ${}^G \vec{F}_e$ (9) осуществляется с помощью аналитических выражений, описывающих решение ОЗД манипулятора [15].

Вычисленные воздействия компенсируются соответствующими тягами движителей ПА с помощью разомкнутого контура системы стабилизации [3]. В результате чего обеспечивается стабилизация ПА в режиме его зависания вблизи или над объектом работ в процессе работы установленного на нем манипулятора, при этом создается необходимый упор в точке крепления манипулятора к ПА, позволяющий рабочему инструменту этого манипулятора оказывать желаемые силовые воздействия на поверхность объекта работ.

Структурная схема синтезированной на основе предложенного метода системы позиционно-силового управления представлена на рис. 3. На этом рисунке введены следующие обозначения:

- БКТ – блок коррекции траектории движения рабочего инструмента манипулятора [3];
- ММ и его СУ – модель многозвенного манипулятора и его системы управления [15];
- СС ПА – система стабилизации, формирующая результирующий вектор тяг

$$\vec{T} = [P_1, \dots, P_6]^T, \text{ создаваемых движителями}$$

ПА для компенсации вектора \vec{G} внешних силовых и моментных воздействий на этот аппарат, обусловленных течениями и воздействиями со стороны работающего манипулятора;

- СН ПА – система навигации ПА, дающая информацию о текущем векторе линейного смещения $\vec{r} \in R^3$ в абсолютной СК OXYZ и углах крена φ , дифферента ψ и рысканья θ ПА;
- БУВ – блок управления силовым воздействием, оказываемым манипулятором на поверхность объекта работ;
- БРВ – блок расчета текущего силового взаимодействия манипулятора с поверхностью объекта;
- ОЗД – блок решения ОЗД подводного манипулятора;

- \vec{F}_{ext} – вектор внешних сил, действующих на звенья и рабочий инструмент манипулятора, вызванных его взаимодействием с окружающей вязкой средой и поверхностью объекта работ;

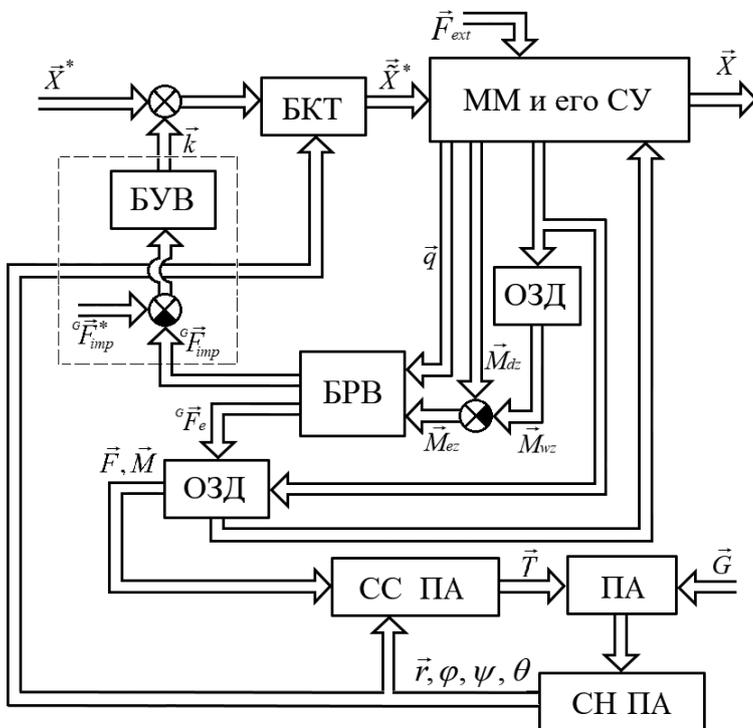


Рис. 3. Структурная схема системы позиционно-силового управления ПА с манипулятором

- $\vec{X}^*, \vec{X} \in R^3$ – векторы желаемого и реального положений рабочего инструмента в СК $CX_C Y_C Z_C$;
- $\vec{X}^* \in R^3$ – вектор желаемого положения рабочего инструмента, сформированный в СК $CX_C Y_C Z_C$ с учетом величины дополнительного смещения инструмента k в направлении вектора ${}^G \vec{F}_f$.

3. Исследование работы системы с помощью численного моделирования

Для моделирования в Matlab/Simulink использовалась хорошо апробированная математическая модель ПА [18] с установленным многозвенным манипулятором, кинематическая схема которого изображена на рис. 1. Основные параметры ПА и манипулятора показаны в табл. Полный список параметров используемой модели ПА приведен в работах [19, 20], модель манипулятора и ее параметры детально описаны в работе [15]. При этом вектор d_o в СК $CX_C Y_C Z_C$ имел координаты $d_o = (0, 0, 0.5)^T$ (см. рис. 1).

Параметры ПА и манипулятора

Параметры		Величины
ПА	Д x Ш x В, м ³	1.2 x 1.5 x 0.9
	Масса, кг	170
Звено 1	Длина, м	0.05
	Масса, кг	0.4
Звено 2	Длина, м	0.5
	Масса, кг	4
Звено 3	Длина, м	0.5
	Масса, кг	4
Звено 4	Длина, м	0.15
	Масса, кг	0.5

В модели реализована комбинированная система стабилизации ПА в режиме зависания [3], а также система [3], позволяющая на основе информации о линейных и угловых смещениях ПА от исходного положения находить в СК $CX_C Y_C Z_C$ координаты вектора, определяющего текущее желаемое положение рабочего инструмента на поверхности объекта. Причем используемая указанными системами информация об угловых смещениях ПА, измеряемых бортовыми гироскопами, в процессе моделирования поступала без временных задержек. Вектор \vec{r} текущих линейных смещений ПА относительно точки стабилизации

формировался с задержкой в 0.6 с, что обусловлено скоростью обработки данных, получаемых от СТЗ.

Для компенсации приводящих к ошибкам позиционирования рабочего инструмента внешних моментов, возникающих на выходных валах редукторов электроприводов манипулятора и обусловленных его движением в вязкой среде с оказанием силового воздействия на объект работ, использовались самонастраивающиеся корректирующие устройства [15].

Для визуализации процесса моделирования в симуляторе CoppeliaSim была воссоздана сцена морского дна, содержащая ПА, оснащенный манипулятором (рис. 4).

Для моделирования процесса выполнения операций пробоотбора, не требующих оказания желаемого силового воздействия манипулятором на поверхность дна, была сформирована траектория движения рабочего инструмента, имитирующая забор поверхностного слоя грунта. Манипулятор вел пробоотборник по дну со скоростью 2 см/с. В момент контакта пробоотборника с грунтом на рабочий инструмент начинал действовать вектор силы, противоположный направлению движения инструмента. Величина этого вектора линейно изменялась от 0 до 50 Н.

На рис. 5 показаны графики изменения евклидовых норм $\|\varepsilon\|, \|r\|$ векторов отклонения рабочего инструмента от заданной траектории и центра величины ПА от точки стабилизации в абсолютной СК для двух случаев моделирования: без учета идентифицированных величин \vec{F}, \vec{M} , а также для случая, когда величины \vec{F}, \vec{M} учитывались при формировании вектора тяг движителей ПА.

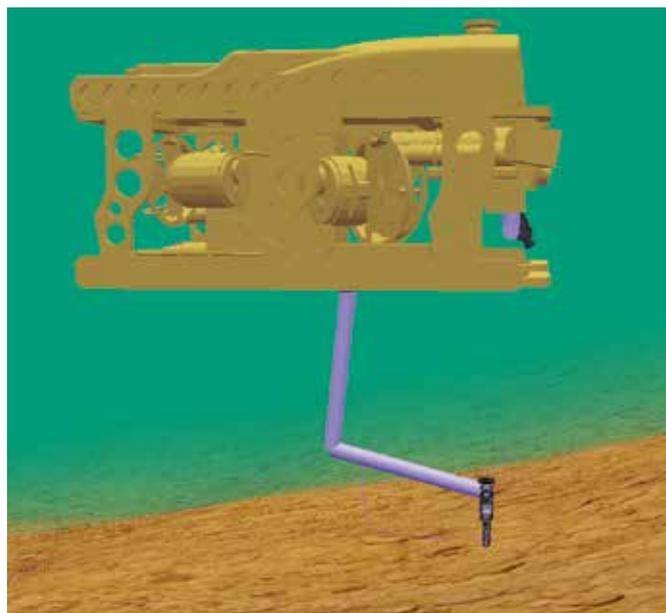


Рис. 4. Сцена в симуляторе CoppeliaSim

Из графиков видно, что в момент времени $t = 14$ с на рабочий инструмент начал воздействовать вектор ${}^G\vec{F}_e$. При этом в случае, когда система стабилизации не компенсировала динамические воздействия на ПА, обусловленные силой ${}^G\vec{F}_e$, отклонение аппарата резко возрастало до 24 см (черная кривая), при этом отклонение инструмента достигло 6 см (оранжевая кривая). В то же время использование в разомкнутом контуре системы стабилизации ПА вычисляемых величин \vec{F}, \vec{M} позволило величине $\|r\|$ отклонения аппарата (зеленая кривая) оставаться в пределах 2.5 см. При этом величина $\|\varepsilon\|$ (красная кривая) не превышала 5 мм на протяжении всей траектории.

Также было проведено моделирование процесса движения рабочего инструмента вдоль плоской поверхности объекта по вышеописанной траектории (см. рис. 4) с желаемым усилием ${}^G\vec{F}_{imp}^* = [0; 0; 30]^T$ Н, направленным перпендикулярно этой поверхности. Скорость движения инструмента составляла 1.5 см/с, коэффициент упругости поверхности \tilde{k} был равен $5 \cdot 10^3$ Н/м. Для управления величиной оказываемого усилия использовался пропорциональный регулятор величины k с коэффициентом $1 \cdot 10^{-7}$.

На рис. 6 представлены графики изменения евклидовых норм вектора \vec{r} линейного отклонения ПА и вектора ${}^G\vec{F}_{imp}$ силового воздействия, оказываемого инструментом манипулятора на поверхность объекта работ. Графики показывают, что после завершения переходных процессов величина $\|{}^G\vec{F}_{imp}\|$ достигала желаемого значения 30 Н, после чего инструмент обрабатывал заданную траекторию с этим желаемым силовым воздействием. При этом система коррекции программных траекторий манипулятора нивелировала возникающее отклонение $\|r\|$ ПА от точки стабилизации, сохраняя таким образом контакт рабочего инструмента с поверхностью объекта работ.

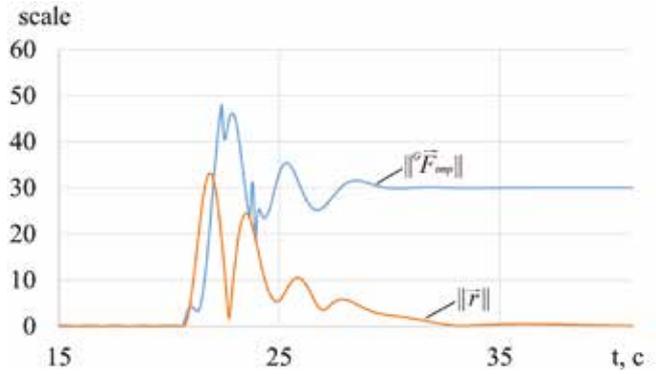


Рис. 6. Результаты моделирования процесса выполнения силовой операции, $\|{}^G\vec{F}_{imp}\| = \text{scale Н}$, $\|\vec{r}\| = \text{scale} \cdot 10^{-3}$ м

Также было выполнено моделирование процесса очистки поверхности подводного объекта, имеющей сложную форму, рабочим инструментом манипулятора с заданным усилием. При этом использовались реальные данные, полученные путем сканирования подводной сцены с целевым объектом с помощью разработанной СТЗ [21]. В результате обработки облаков точек, полученных от СТЗ, выполнена идентификация целевого объекта – бочки диаметром 0.5 м. Затем на поверхность бочки перпендикулярно ее продольной оси была спроецирована желаемая траектория (рис. 7), при движении по которой имитировалась операция очистки от обрастаний. Сформированная траектория отправлялась в Matlab/Simulink для обработки динамической моделью манипулятора, установленного на ПА, в режиме позиционно-силового управления.

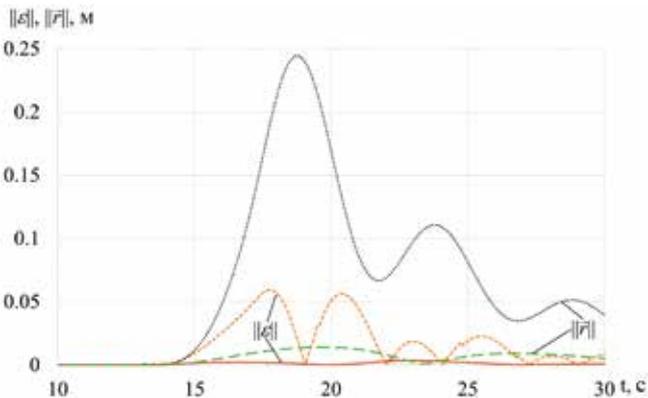


Рис. 5. Результаты моделирования операции пробоотбора

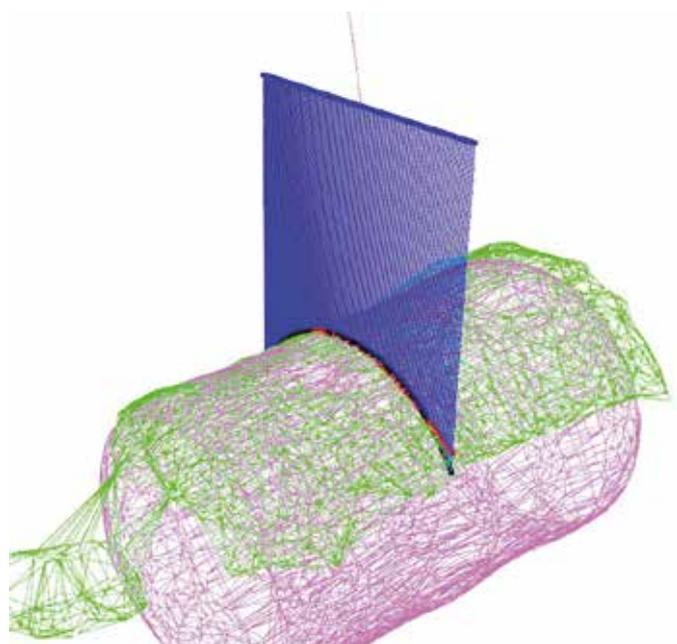


Рис. 7. Объект сканирования и наложенная траектория

Направление желаемого вектора ${}^G \vec{F}_{imp}^*$ силового воздействия рабочего инструмента задавалось перпендикулярно поверхности объекта с помощью метода [3], а его величина составляла 30 Н, $\tilde{k} = 5 \cdot 10^3$. В процессе выполнения операции этот инструмент двигался со скоростью 1 см/с. На рисунке 8 показаны графики изменения евклидовых норм векторов \vec{r} и ${}^G \vec{F}_{imp}$. Из этого рисунка видно, что после завершения переходных процессов разница величин $\|{}^G \vec{F}_{imp}^*\|$ и $\|{}^G \vec{F}_{imp}\|$ не превышала 5 Н.

Результаты проведенного численного моделирования позволяют сделать вывод, что разработанная система позиционно-силового управления ПА, оснащенными многозвенными манипуляторами, может успешно использоваться для выполнения контактных манипуляционных операций. Практическая реализация этой системы не вызывает принципиальных трудностей и не требует использования дорогостоящих сило-моментных датчиков.

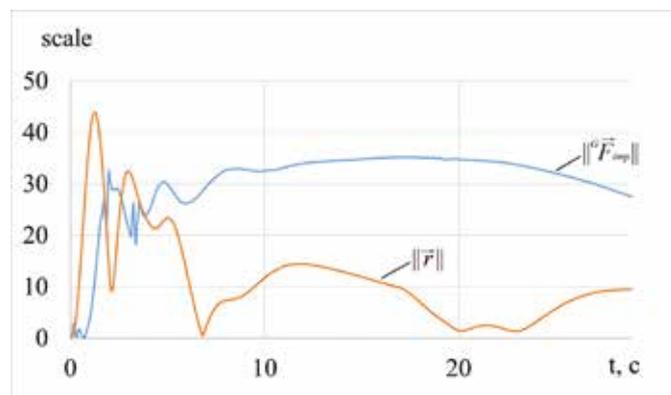


Рис. 8. Результаты моделирования процесса очистки поверхности подводного объекта, имеющей сложную форму, $\|{}^G \vec{F}_{imp}^*\| = \text{scale}$ Н, $\|\vec{r}\| = \text{scale} \cdot 10^{-4}$ м

Заключение

Для выполнения контактных операций в режиме стабилизируемого зависания ПА с оказанием манипулятором желаемого силового воздействия на объект работ в статье предложен новый метод, и на его основе синтезирована система позиционно-силового управления указанными динамическими объектами, не требующая использования сило-моментных датчиков. Эта система рассчитывает величину и направление вектора силы, оказываемой рабочим

инструментом манипулятора на объект в процессе выполнения операции. Для расчета используется информация об измеряемых датчиками или определяемых наблюдателями внешних моментах, действующих на выходные валы редукторов приводов во всех степенях подвижности манипулятора в результате силового контакта рабочего инструмента с поверхностью объекта.

Непрерывное оказание заданного силового воздействия манипулятора на объект осуществляется за счет дополнительного смещения рабочего инструмента в направлении вектора разности векторов желаемого и реального силовых воздействий. Причем результаты численного моделирования показали, что для точного управления усилием достаточно использования пропорционального регулятора величины k дополнительного смещения инструмента.

Одновременно с помощью тяг двигателей ПА, формируемых разомкнутым контуром его системы стабилизации, обеспечивается компенсация вычисляемых в реальном масштабе времени силовых и моментных воздействий на ПА со стороны выполняющей силовую операцию манипулятора. В результате создается необходимый упор в точке крепления манипулятора к ПА, позволяющий рабочему инструменту этого манипулятора оказывать желаемые силовые воздействия на поверхность объекта работ.

Стоит отметить, что для успешного позиционно-силового управления ПА с манипулятором необходимо использование замкнутых по положению и ориентации аппарата контуров стабилизации и коррекции траекторий движения рабочего инструмента манипулятора.

Для проверки работоспособности и особенностей функционирования синтезированной системы выполнено численное моделирование, учитывающее динамические особенности ПА и манипулятора, а также задержки получения информации от системы навигации аппарата, использующей СТЗ. Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность использования предложенной системы для выполнения контактных манипуляционных операций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования РФ 13.1902.21.0012 «Фундаментальные проблемы изучения и сохранения глубоководных экосистем в потенциально рудоносных районах северо-западной части Тихого океана» (Соглашение №075-15-2020-796).

ЛИТЕРАТУРА

1. Antonelli G. Underwater Robots. Third Edition // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2014. Vol. 96.
2. Cieslak P., Ridao P., Giergiel M. Autonomous Underwater Panel Operation by GIRONA500 UVMS: A Practical Approach to Autonomous Underwater Manipulation // Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2015. P. 529–536.
3. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 3. P. 1666. <https://doi.org/10.3390/app12031666>.
4. Vu M. T. et al. Station-keeping control of a hovering over-actuated autonomous underwater vehicle under ocean current effects and model uncertainties in horizontal plane. // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 6855–6867.
5. Lapierre L., Fraise P., Dauchez P. Position/force control of an underwater mobile manipulator // Journal of Robotic Systems. 2003. Vol. 20, No. 12. P. 707–722.
6. Cao H. et al. Dynamic adaptive hybrid impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environments // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 83162–83174.
7. Anderson R. J., Spong M. W. Hybrid impedance control of robotic manipulators // IEEE Journal on Robotics and Automation. 1988. Vol. 4. No. 5. P. 549–556.
8. Cui Y., Yuh J. A unified adaptive force control of underwater vehicle-manipulator systems (UVMS) // Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453). IEEE. 2003. Vol. 1. P. 553–558.
9. Katsura S., Matsumoto Y., Ohnishi K. Modeling of force sensing and validation of disturbance observer for force control // IEEE Transactions on industrial electronics. 2007. Vol. 54, No. 1. C. 530–538.
10. Зуев А.В., Филаретов В.Ф., Особенности создания комбинированных позиционно-силовых систем управления манипуляторами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. №1. С. 154–162.
11. Филаретов В.Ф., Зуев А.В. Позиционно-силовое управление электроприводом манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 9, С. 20–24.
12. Filaretov V.F., Konoplin N.Y., Konoplin A.Y., System for automatic soil sampling by AUV equipped with Multilink manipulator // International Journal of Energy Technology and Policy. 2019. Vol. 15, No. 2/3. P. 208–223.
13. Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С. Системы управления манипуляционных роботов. Серия Научные основы робототехники. 1978. 416 с.
14. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы. 1978. 400 с.
15. Filaretov V. F., Konoplin A. Y., Zuev A. V., Krasavin N. A., A method to synthesize high-precision motion control systems for underwater manipulator // International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM). 2021. Vol. 20, No. 4. P. 625–636.
16. Pérez-Alcocer R., Torres-Méndez L.A., Olguín-Díaz E., Maldonado-Ramírez A.A., Vision-based autonomous underwater vehicle navigation in poor visibility conditions using a model-free robust control // Journal of Sensors. 2016. Vol. 2016. P. 1–16.
17. Костенко В.В., Павин А.М. Автоматическое позиционирование необитаемого подводного аппарата над объектами морского дна с использованием фотоизображений // Подводные исследования и робототехника. 2014. Т. 17, № 1. С. 39–47.
18. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, 2011. DOI:10.1002/9781119994138.
19. Herman P. Numerical Test of Several Controllers for Underactuated Underwater Vehicles // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No. 22. P. 8292.
20. Vervoort J. Modeling and control of an unmanned underwater vehicle // Master Traineeship Rep. 2009. P. 5–15.
21. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Pyatavin P., Panchuk M., Vasilenko R. System for Identifying Target Objects to Perform Manipulative Operations by Unmanned Underwater Vehicles // IEEE International Conference on Ocean Studies. Vladivostok, 2022. P. 55–59.

Об авторах

КОНОПЛИН Александр Юрьевич, к.т.н. зав. лаб.

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

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

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

Тел.: 89244298396

E-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7554-1002

КРАСАВИН Никита Андреевич, младший научный сотрудник

Институт проблем морских технологий ДВО РАН;

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

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

Тел.: 89025063014

E-mail: krasavya061@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1102-5409

Юрманов Александр Павлович, младший научный сотрудник

Институт проблем морских технологий ДВО РАН;

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

Научные интересы: автоматическое управление подводными манипуляторами, информационно-управляющие системы, supervisory управление, интеллектуальные системы

Тел.: 89146786060

E-mail: yurmanov_a@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6849-3700

ПЯТАВИН Павел Алексеевич, младший научный сотрудник

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

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

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, информационно-управляющие системы, системы технического зрения подводных роботов

Тел.: 89098882900

E-mail: mcmaster988@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0812-808X

КАЦУРИН Алексей Анатольевич, к.т.н., старший научный сотрудник

Институт проблем морских технологий ДВО РАН;

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

Научные интересы: методы группового управления мобильными роботами, системы управления исполнительными устройствами роботов, подводная робототехника

Тел.: 84232652424, доб. 1072

E-mail: katsurin@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8905-7465

SYSTEM OF POSITION/FORCE CONTROL OF UNDERWATER VEHICLES WITH MULTI-LINK MANIPULATORS FOR PERFORMING CONTACT MANIPULATION OPERATIONS

A.Yu. Konoplin, N.A Krasavin, A.P. Yurmanov, P.A Piatavin, A.A. Katsurin

The article proposes a new method for the synthesis of a system of position/force control of underwater vehicles (UV) equipped with multi-link manipulators, which provides automatic execution of contact manipulation operations in the hovering mode near or above objects of work. To achieve the desired magnitude of the force effect of the working tool on the object, the magnitude and direction of the force vector provided by this tool on the object are calculated. After that, control signals are applied to the drives of all degrees of mobility of the manipulator, providing additional movements of its working tool in the direction of the desired force vector. At the same time, compensation of the calculated in real time force and torque effects on the UV from the manipulator performing the force operation is provided with the help of the thrust created by the propellers of the UV. Herewith, the necessary thrust force is created at the attachment point of the manipulator to the UV. This thrust allows the manipulator's working tool to carry out the desired force effects on the surface of the object of work. In addition, to compensate for inevitable errors of the UV stabilization system, which lead to deviations of the working tool from desired trajectories, these trajectories are automatically corrected taking into account actual displacements of the UV relative to the initial position. As a result, contact manipulation operations are carried out even under conditions of inevitable (albeit insignificant) displacements of the UV from the stabilization point under force effects of the working tool on the surface of the object. The operability and efficiency of the system synthesized on the basis of the proposed method are confirmed by results of numerical simulation in Matlab/Simulink with visualization in the CoppeliaSim simulator.

Keywords: underwater vehicle, multi-link manipulator, position/force control, contact operations, stabilization system.

References

1. Antonelli G. Underwater Robots. Third Edition. Springer Tracts in Advanced Robotics. 2014. Vol. 96.
2. Cieslak P., Ridao P., Giergiel M. Autonomous Underwater Panel Operation by GIRONA500 UVMS: A Practical Approach to Autonomous Underwater Manipulation. Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2015. P. 529-536.
3. Konoplin, A.; Yurmanov, A.; Krasavin, N.; Piatavin, P. Development of a Control System for Multilink Manipulators on Unmanned Underwater Vehicles Dynamically Positioned over Seafloor Objects. Appl. Sci. 2022, No. 12, 1666. <https://doi.org/10.3390/app12031666>.
4. Vu M. T. et al. Station-keeping control of a hovering over-actuated autonomous underwater vehicle under ocean current effects and model uncertainties in horizontal plane. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 6855-6867.
5. Lapierre L., Fraisse P., Dauchez P. Position/force control of an underwater mobile manipulator. Journal of Robotic Systems. 2003. Vol. 20, No. 12. P. 707-722.
6. Cao H. et al. Dynamic adaptive hybrid impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environments. IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 83162-83174.
7. Anderson R. J., Spong M. W. Hybrid impedance control of robotic manipulators. IEEE Journal on Robotics and Automation. 1988. Vol. 4, No. 5. P. 549-556
8. Cui Y., Yuh J. A unified adaptive force control of underwater vehicle-manipulator systems (UVMS). Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453). IEEE. 2003. Vol. 1. P. 553-558.
9. Katsura S., Matsumoto Y., Ohnishi K. Modeling of force sensing and validation of disturbance observer for force control. IEEE Transactions on industrial electronics. 2007. Vol. 54, No. 1. P. 530-538.
10. Zuev A.V., Filaretov V.F., Osobennosti sozdaniya kombinirovannykh pozicionno-silovykh sistem upravleniya manipulyatorami. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2009. No. 1. P. 154-162.
11. Filaretov V.F., Zuev A.V. Pozicionno-silovoe upravlenie elektropriivodom manipulyatora. Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2006. No. 9. P. 20-24.
12. Filaretov V.F., Konoplin N.Y., Konoplin A.Y., System for automatic soil sampling by AUV equipped with Multilink manipulator. International Journal of Energy Technology and Policy. 2019. Vol. 15, No. 2/3. P. 208-223.

13. Medvedev V.S., Leskov A.G., Yushchenko A.S. Sistemy upravleniya manipulyacionnyh robotov. Ser. Nauchnye osnovy robototekhniki. 1978. 416 p.

14. Popov E.P., Vereshchagin A.F., Zenkevich S.L. Manipulyacionnye roboty. Dinamika i algoritmy, 1978. 400 p.

15. Filaretov V. F., Konoplin A.Y., Zuev A.V., Krasavin N.A., A method to synthesize high-precision motion control systems for underwater manipulator. International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM). 2021. Vol. 20, No. 4.

16. Pérez-Alcocer R., Torres-Méndez L.A., Olguín-Díaz E., Maldonado-Ramírez A.A., Vision-based autonomous underwater vehicle navigation in poor visibility conditions using a model-free robust control. Journal of Sensors. 2016. Vol. 2016. P. 1-16.

17. Kostenko V.V., Pavin A.M. Automatic stabilization of unmanned underwater vehicles over the seabed objects on the base of photo images. Underwater Investigations and Robotics. 2014. Vol. 17. No. 1. P. 39-47.

18. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons. 2011. DOI:10.1002/9781119994138.

19. Herman P. Numerical Test of Several Controllers for Under-actuated Underwater Vehicles. Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No. 22. P. 8292.

20. Vervoort J. Modeling and control of an unmanned underwater vehicle. Master Traineesh. Rep. 2009. P. 5-15.

21. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Pyatavin P., Panchuk M., Vasilenko R. System for Identifying Target Objects to Perform Manipulative Operations by Unmanned Underwater Vehicles. IEEE International Conference on Ocean Studies. Vladivostok, 2022. P. 55-59.

About authors

KONOPLIN Alexander Jurevich, Ph.D, head of laboratory Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Research interests: 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

KRASAVIN Nikita Andreevich, junior researcher Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Research interests: automatic control of underwater robots and manipulators, adaptive control, information and control systems

Phone: 89025063014

E-mail: krasyava061@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1102-5409

YURMANOV Aleksandr Pavlovich, junior researcher Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Research interests: automatic control of underwater manipulators, information and control systems, supervisory control, intelligent systems

Phone: 89146786060

E-mail: yurmanov_a@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6849-3700

PIATAVIN Pavel Alexeyevich, junior researcher Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Research interests: automatic control of underwater robots and manipulators, information and control systems, technical vision systems of underwater robots

Phone: 89098882900

E-mail: mcmaster988@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0812-808X

KATSURIN Alexey Anatoljevich, Ph.D, Senior reseacher Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Research interests: Methods of group control of mobile robots, control systems for robot actuators, underwater robotics.

Phone: 84232652424, ext. 1072

E-mail: katsurin@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8905-7465



Recommended citation:

Konoplin A.Yu., Krasavin N.A., Yurmanov A.P., Piatavin P.A., Katsurin A.A. SYSTEM OF POSITION/FORCE CONTROL OF UNDERWATER VEHICLES WITH MULTI-LINK MANIPULATORS FOR PERFORMING CONTACT MANIPULATION OPERATIONS. Underwater investigations and robotics. 2022. No. 4 (42). P. 40-52. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_04. EDN: FQYACG.