

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСТЕПЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Д.А. Юхимец, А.С. Губанков

В работе предложен метод идентификации кинематических параметров подводных многостепенных манипуляторов с последовательной кинематической схемой. Этот метод с помощью простых и доступных инструментов позволяет значительно повысить точность перемещения рабочих инструментов роботов, выполняющих различные технологические операции. Предлагаемый способ экспериментально проверен и наиболее эффективно может применяться для идентификации параметров вновь создаваемых манипуляторов для морских робототехнических комплексов. Это объясняется тем, что указанные уникальные изделия с различным количеством звеньев, оси сочленений которых расположены под произвольными углами, собираются без использования дорогостоящих систем контроля пространственного положения его частей (контрольно-измерительных машин, лазерных трекеров и т.д.). В результате этот негативный, значительно влияющий на точность движения рабочих инструментов манипуляторов в автоматическом режиме, фактор можно эффективно устранить за счет простых, дешевых и доступных средств.

Ключевые слова: многостепенный манипулятор, идентификация, кинематические параметры, калибровка, подводные технологические операции

Введение

В настоящее время активизировались работы по созданию многостепенных манипуляторов, предназначенных для выполнения подводных технологических операций. Традиционным методом программирования многостепенных манипуляторов (ММ), выполняющих операции в автоматическом режиме, является ручной вывод рабочих инструментов (РИ) в требуемые точки рабочей зоны для задания базовых точек траекторий их движения с учетом реального расположения объектов и дополнительного оборудования. В указанных базовых точках контроллер ММ сохраняет соответствующие векторы обобщенных координат. Затем, в зависимости от решаемой задачи, с помощью различных типов интерполяции формируются требуемые траектории движения РИ, проходящие через указанные точки. Точность движения РИ по этим траекториям в автоматическом режиме определяется точностью отработки заданных обоб-

щенных координат всеми электроприводами ММ с помощью их следящих систем управления. Эта проблема хорошо исследована, предложено множество методов синтеза и аппаратных решений для высокоточных систем управления электроприводами ММ, которые успешно используются в серийной технике.

Однако в современных приложениях, когда ММ выполняет технологические операции в условиях неопределенности подводной среды, формируя траектории движения РИ офлайн или на основе данных от различных систем оцувствления (систем технического зрения, щупов и т.д.), базовые точки траекторий задаются в жестко связанной с основанием ММ прямоугольной системе координат – базовой системе координат (БСК) [1,2]. Реальная точность позиционирования рабочего инструмента любого ММ в БСК определяется в основном точностью кинематической модели ММ, так как его контроллер определяет положение рабочего инструмента с использованием только этой модели и показаний датчиков углов по-

ворота его приводов. Поэтому в случае отличия параметров кинематической модели ММ, используемой контроллером, от их реальных значений расхождения между рассчитанным и реальным положением инструмента могут достигать значений от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров для серийно произведенных и штучных экземпляров ММ соответственно. Это является недопустимым в случае автоматического формирования траекторий движения инструментов ММ, так как не позволит точно выполнять технологические операции [3,4].

Для уточнения параметров кинематических моделей ММ разработано множество методов и предложено несколько классификаций [5,6]. Однако фундаментально их можно разделить на методы идентификации кинематических (геометрических) параметров моделей ММ на основе использования внешних измерительных устройств и методы, в которых они не используются [6]. Традиционно наиболее широко распространены методики, основой которых являются внешние измерительные устройства [5–10]. Ранее это были различные устройства отслеживания линейных перемещений рабочего инструмента манипулятора, ультразвуковые и инфракрасные измерительные системы, теодолиты и стереоскопическая триангуляция. В настоящее время это высокоточные оптические сканеры, лазерные трекары, контрольно-измерительные машины, дополнительный калиброванный робот и прочее прецизионное оборудование [7–10].

Помимо неудобства использования непосредственно в условиях производственного процесса предлагаемых алгоритмов идентификации, основанных на статистическо-вероятностном подходе и требующих знания некоторых сложно определяемых параметров, например матриц ковариации, эти методики обладают существенным недостатком – чрезмерной дороговизной используемого измерительного оборудования. Это оборудование часто недоступно на производстве или организации системному интегратору. В результате возникает задача разработки упрощенной процедуры идентификации параметров кинематической модели ММ, не требующей использования дорогостоящего специализированного оборудования.

В работах [5, 11–13] предложены методы идентификации геометрических параметров звеньев многостепенных манипуляторов с использованием раз-

личных приспособлений – калибровочных пластин, щупов известной геометрии, сфер и т.д. Их общим недостатком являются повышенные требования к точности изготовления указанных устройств и приспособлений, а также большое количество проводимых измерений, поскольку это влияет на точность процесса идентификации.

Таким образом, для устранения отмеченных выше недостатков, а именно необходимости использования точно изготовленных калибровочных устройств (плит, щупов и т.д.), для замены данных от внешних высокоточных сенсоров, измеряющих положение рабочего инструмента ММ в БСК, может быть использована процедура, аналогичная типовому способу определения рабочей точки инструмента ММ. То есть будут использованы данные от их датчиков углов поворота электроприводов отдельных степеней подвижности при выводе вручную рабочего органа ММ в одну и ту же точку пространства с разной ориентацией. На основе этой информации будет разработан метод идентификации параметров кинематической модели ММ.

■ Постановка задачи

В работе рассматриваются шестистепенные ММ с последовательной кинематической схемой как наиболее распространенный вид роботов. Их кинематическая модель описывается с помощью уравнений вида [14]:

$$T_f(\Phi, Q) = \prod_{k=1}^6 T_k(\phi_k, q_k) \tag{1}$$

где $T_f = \begin{bmatrix} R_f & X_f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in R^{4 \times 4}$ – матрица однородного преобразования, описывающая положение и ориентацию последнего звена (фланца) ММ в БСК $O_{хуз}$, связанной с основанием манипулятора; $R_f \in R^{3 \times 3}$ – матрица ориентации фланца ММ в БСК; $X_f \in R^{3 \times 1}$ – вектор координат фланца ММ в БСК; $O \in R^{1 \times 3}$ – нулевой вектор строка; $\Phi = (\phi_1^T, \dots, \phi_6^T)^T$, $\phi_k = (a_k, d_k, \alpha_k, \theta_k)$, $k = \overline{1, 6}$ – матрица параметров Денавита–Хартенберга; k – номер шарнира ММ; $Q = (q_1, \dots, q_6)^T$ – вектор обобщенных координат (углов поворота приводов) ММ;

$$T_k(\phi_k, q_k) = \begin{bmatrix} \cos(q_k + \theta_k) & -\sin(q_k + \theta_k)\cos(\alpha_k) & \sin(q_k + \theta_k)\sin(\alpha_k) & a_k \cos(q_k + \theta_k) \\ \sin(q_k + \theta_k) & \cos(q_k + \theta_k)\cos(\alpha_k) & -\cos(q_k + \theta_k)\sin(\alpha_k) & a_k \sin(q_k + \theta_k) \\ 0 & \sin(\alpha_k) & \cos(\alpha_k) & d_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

– матрица преобразования Денавита–Хартенберга [14]. Смысл представления Денавита–Хартенберга состоит в формировании однородной матрицы преобразования (2), имеющей размерность 4×4 и описывающей положение системы координат k -го звена относительно системы координат $k-1$ -го звена. Для задания матрицы (2) используются параметры, имеющие следующий физический смысл: d_k – расстояние между осями, z_{k-1} и z_k вдоль общей нормали, θ_k – угол поворота вокруг z_{k-1} от x_{k-1} к x_k , a_k – длина общей нормали, α_k – угол вокруг общей нормали от z_{k-1} к z_k .

Модель (1) используется для решения прямой задачи кинематики, то есть для вычисления положения и ориентации фланца ММ в БСК на основе величин Q и Φ . При этом для планирования движений ММ в БСК должна решаться обратная задача кинематики, заключающаяся в расчете желаемого вектора Q^* , который соответствует желаемому положению и ориентации T_f^* фланца ММ:

$$Q^* = F_{IKT}(T_f^*, \Phi), \quad (3)$$

где $F_{IKT}(T_f^*, \Phi)$ – функция решения обратной задачи кинематики. Функция (3) может быть реализована как с помощью аналитических выражений [15], так и с помощью итерационных алгоритмов численной оптимизации.

Выражения (1) и (3) используются контроллерами ММ для вычисления текущего положения и ориентации рабочих инструментов, а также желаемых углов поворота приводов роботов. При этом в качестве кинематических параметров манипуляторов обычно используется матрица Φ , соответствующая их номинальным геометрическим параметрам, приведенным в технической документации.

Однако точные кинематические параметры Φ конкретного подводного ММ могут значительно отличаться от его номинальных параметров $\tilde{\Phi}$ вследствие отсутствия серийности, неточности изготовления и соединения его механических элементов на некоторую малую величину:

$$\Phi = \tilde{\Phi} + \Delta. \quad (4)$$

Использование в (3) параметров $\tilde{\Phi}$ приводит к тому, что вместо вектора, соответствующего желаемому значению T_f^* , будет сформирован вектор \tilde{Q}^* , который будет отличаться от вектора Q^* на некоторую величину $\beta = Q^* - \tilde{Q}^*$. Наличие β приводит к тому, что при выводе всех приводов ММ в положение, соответствующее \tilde{Q}^* , фланец робота будет находиться не в желаемом положении T_f^* , а в положении \tilde{T}_f^* , которое отличается на величину $\varepsilon = T_f^* - \tilde{T}_f^*$. То есть отклонение параметров кинематической моде-

ли, используемой контроллером, от реальных параметров подводного ММ приводит к появлению ошибок позиционирования и ориентации его фланца и, как следствие, прикрепленного к нему РИ. Это особенно важно для случаев, когда траектория движения ММ рассчитывается автоматически, на основе информации, поступающей от систем технического зрения (лазерных или оптических сканеров, фотокамер и т.д.), тем более подводных [1–4].

Уточнение кинематических параметров подводных ММ может производиться с помощью специальных измерительных систем, позволяющих с высокой точностью определять линейные и угловые координаты инструментов роботов. Однако использование таких систем часто является невозможным из-за их высокой стоимости. При этом ММ уже имеют высокоточную систему измерения углов поворотов их приводов, что можно использовать для вычисления указанных выше параметров.

Таким образом, в работе ставится и решается следующая задача. Пусть имеется подводный шестистепенной ММ с последовательной кинематической схемой. Его кинематические параметры описываются матрицей Φ . Контроллер робота использует матрицу номинальных параметров $\tilde{\Phi}$ для решения его прямой и обратной задач кинематики, что приводит к появлению ошибки ε при позиционировании фланца ММ в БСК. Для уменьшения этой ошибки необходимо разработать метод оценки параметров ММ на основе серии измерений его обобщенных координат.

■ Метод идентификации кинематических параметров ММ

Исходными данными для оценки матрицы Φ являются n серий измерений векторов Q . Каждая i -я серия состоит из m_i векторов Q , которые формируются в результате вывода оператором вручную с помощью пульта управления рабочей точки инструмента с разной ориентацией в одну и ту же точку пространства X^i . Положение X^i задается в пространстве с помощью произвольно расположенного в рабочей области ММ остроконечного щупа. Траектория вывода рабочей точки инструмента не имеет значения, так как все измерения выполняются в стационарном положении. Как правило, для удобства визуального контроля оператором для выполнения измерений в качестве инструмента используется закрепленный на фланце остроконечный щуп (рис. 1).

Таким образом, в результате измерений формируется массив данных:

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \vdots \\ \Psi_n \end{bmatrix}, \Psi_i = (Q_1^i, \dots, Q_{m_i}^i)^T, i = (\overline{1, n}). \quad (5)$$

Каждому вектору $Q_j^i, i = (\overline{1, n}), j = (\overline{1, m_i})$ можно поставить в соответствие вектор $\tilde{X}_{tool,j}^i$ координат рабочей точки инструмента $X_{tool,j}^i$ в БСК (см. рис. 1), который будет вычисляться по модели (1) при использовании матрицы $\tilde{\Phi}$ параметров:

$$T_j^i(\tilde{\Phi}, Q_j^i) = \begin{bmatrix} \tilde{R}_{f,j}^i & \tilde{X}_{tool,j}^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \left(\prod_{k=1}^6 T_{k,j}^i \right) T_{TCP}^i, \quad (6)$$

где $\tilde{R}_{f,j}^i \in R^{3 \times 3}$ – матрица ориентации фланца ММ в БСК для j -го измерения в i -й серии; $T_{TCP}^i = \begin{bmatrix} E & X_{TCP}^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, E \in R^{3 \times 3}$ – единичная диагональная матрица; X_{TCP}^i – вектор координат рабочей точки инструмента (TCP – tool center point) в системе координат фланца робота $O_f x_f y_f z_f$.

Расчитанные с помощью (6) координаты точек $\tilde{X}_{tool,j}^i$ будут отличаться от координат реального положения рабочей точки инструмента в силу отличия используемых параметров ММ от их реальных значений. Однако так как рабочий инструмент в каждой серии измерений выводится в одну и ту же точку с неизвестными координатами, то и реальные координаты рабочей точки в одной серии измерений будут совпадать. Этот факт можно использовать для идентификации кинематических параметров манипулятора.

Оценку матрицы $\hat{\Phi}$ параметров манипулятора можно осуществить, подбирая указанные параметры

так, чтобы координаты $\hat{X}_{tool,j}^i$, вычисленные по модели (6) с использованием $\hat{\Phi}$, для отдельной серии измерений сблизилась на минимальное расстояние. То есть оценку качества идентификации параметров манипулятора можно производить по следующему критерию:

$$J(\Xi, \hat{\Phi}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i-1} \sum_{s=j+1}^{m_i} \left(\hat{X}_{tool,j}^i - \hat{X}_{tool,s}^i \right)^2. \quad (7)$$

Выражение (7) не содержит реальных координат точек X^i , поэтому для оценки параметров ММ не требуется использования высокоточных измерительных систем. Таким образом, задача идентификации параметров ММ формулируется следующим образом:

$$J(\Xi, \hat{\Phi}) = \min_{\hat{\Phi}} J(\Xi, \hat{\Phi}). \quad (8)$$

Для оценки параметров манипулятора будет использоваться метод численной оптимизации Ливенберга–Марквардта. Для этого исходные данные измерений необходимо представить в следующем виде:

$$r_p^i = \hat{X}_{tool,j}^i - \hat{X}_{tool,s}^i, \quad i = (\overline{1, n}), \quad j, s = (\overline{1, m_i}), \quad j < s, \\ p = (\overline{1, l_i}),$$

$$R_i = \begin{bmatrix} r_1^i \\ \vdots \\ r_{l_i}^i \end{bmatrix}, \quad l_i = m_i(m_i - 1) / 2, \quad P = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \in R^{3L},$$

$$L = \sum_{i=1}^n l_i. \quad (9)$$

Критерий (7) с учетом (9) можно переписать в виде:

$$J = \frac{1}{2} P^T P. \quad (10)$$

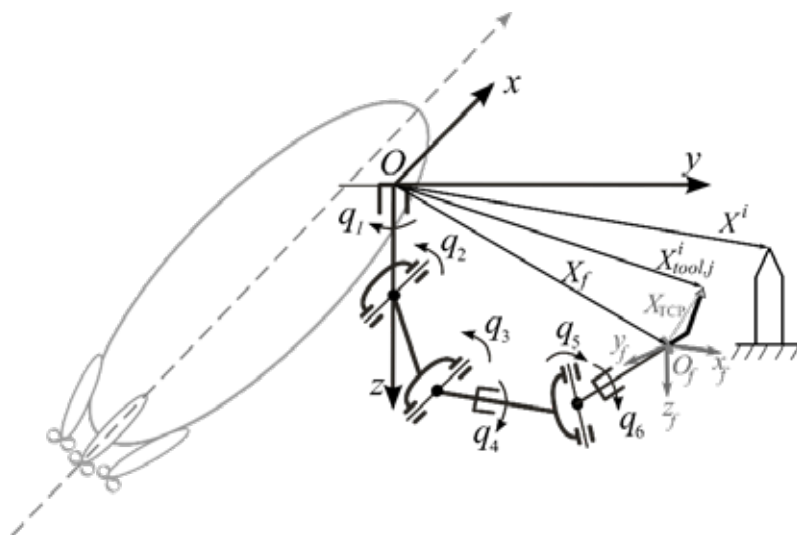


Рис. 1. Подводный ММ с последовательной кинематической схемой

При этом матрицу Φ параметров ММ можно представить в следующем виде:

$$\mathcal{G} = \begin{bmatrix} \phi_1^T \\ \vdots \\ \phi_6^T \\ X_{TCP} \end{bmatrix} \in R^{27}. \quad (11)$$

Из (11) видно, что в процессе идентификации будет оцениваться 27 параметров: 24 параметра описывают кинематику ММ, а 3 параметра описывают положение рабочей точки инструмента в системе координат $O_f x_f y_f z_f$.

Начальную оценку вектора \hat{X}_{TCP} можно получить на основе массива данных Ξ с помощью метода наименьших квадратов. Для этого запишем выражение, связывающее вектор X_{TCP} , вектор X_f положения и матрицу R_f ориентации фланца ММ:

$$X_f + R_f X_{TCP} = X_{prob}, \quad (12)$$

где X_{prob} – вектор координат рабочей точки инструмента в БСК.

Перепишем (12) в виде:

$$X_f + \begin{bmatrix} R_f & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{TCP} \\ -X_{prob} \end{bmatrix} = 0, \quad (13)$$

где $E \in R^{3 \times 3}$ – единичная диагональная матрица.

Выражение (13) описывает модель, которая будет использована для начальной оценки неизвестных векторов \hat{X}_{TCP} и \hat{X}_{prob} . Для этого необходимо в (1) подставить Φ , рассчитать положение и ориентацию фланца ММ для каждого измерения и сформировать следующие массивы:

$$\tilde{X}_{f,i} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{f,j}^i \\ \vdots \\ \tilde{X}_{f,m_i}^i \end{bmatrix}, \Omega_i = \begin{bmatrix} \tilde{R}_{f,j}^i & E \\ \vdots & \vdots \\ \tilde{R}_{f,m_i}^i & E \end{bmatrix}, i = \overline{1, n}, \quad (14)$$

$$j = \overline{1, m_i}.$$

С помощью метода наименьших квадратов и массивов $\tilde{X}_{f,i}$ и Ω_i можно получить оценки векторов \hat{X}_{TCP} и \hat{X}_{prob} для каждой серии измерений:

$$\Lambda_i = (\Omega_i^T \Omega_i)^{-1} \Omega_i^T \tilde{X}_{f,i}, \quad (15)$$

где $\Lambda_i = \begin{bmatrix} \hat{X}_{TCP,i} \\ -\hat{X}_{prob,i} \end{bmatrix}$. При этом $\hat{X}_{prob,i}$ представляет собой оценку координат точки X^i .

Начальная оценка вектора \hat{X}_{TCP} вычисляется по формуле:

$$\hat{X}_{TCP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{X}_{TCP,i}. \quad (16)$$

Полученная оценка \hat{X}_{TCP} и $\tilde{\Phi}$ формируют исходную оценку вектора $\hat{\mathcal{G}}$ параметров ММ (11), которая используется на первой итерации метода Левенберга–Маргвардта. Процесс идентификации $\hat{\mathcal{G}}$ с помощью этого метода осуществляется на основе следующих выражений:

$$\Delta \hat{\mathcal{G}}(\tau) = -[\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \mu(\tau) E]^{-1} \mathbf{G}^T P, \quad (17)$$

$$\hat{\mathcal{G}}(\tau+1) = \begin{cases} \hat{\mathcal{G}}(\tau) + \Delta \hat{\mathcal{G}}(\tau), \mu(\tau+1) = \frac{\mu(\tau)}{\eta}, \\ \text{если } J(\hat{\mathcal{G}}(\tau) + \Delta \hat{\mathcal{G}}(\tau)) < J(\hat{\mathcal{G}}(\tau)) \\ \hat{\mathcal{G}}(\tau), \mu(\tau+1) = \mu(\tau)\eta, \\ \text{если } J(\hat{\mathcal{G}}(\tau) + \Delta \hat{\mathcal{G}}(\tau)) > J(\hat{\mathcal{G}}(\tau)), \end{cases}$$

где τ – номер итерации; $\mathbf{G} = \frac{\partial P}{\partial \mathcal{G}} \in R^{3L \times 27}$; $E \in R^{27 \times 27}$

– единичная диагональная матрица; $\mu(\tau)$ – шаг настройки; $0 < \eta < 1$ – коэффициент изменения шага. Критерием окончания итерационного процесса (17) служит условие $|J(\hat{\mathcal{G}}(\tau) + \Delta \hat{\mathcal{G}}(\tau)) - J(\hat{\mathcal{G}}(\tau))| < \delta$, где δ – малая положительная константа. При этом на каждой итерации алгоритма вектор P обновляется согласно (6) с использованием уточненного вектора параметров $\hat{\mathcal{G}}(\tau)$.

В результате работы алгоритма (17) формируется оценка вектора \mathcal{G} параметров ММ, которые обеспечивают схождение точек $\hat{X}_{tool,i}^j$ на минимальное расстояние между собой в каждой i -й серии измерений. Использование рассчитанных кинематических параметров ММ в его контроллере вместо номинальных параметров позволит увеличить точность позиционирования рабочего инструмента подводного ММ в БСК.

■ Описание эксперимента

Целью эксперимента является верификация описанного выше метода. В процессе верификации необходимо было оценить точность расчета положения центра фланца ММ с использованием кинематических параметров, полученных в процессе идентификации. Для этой оценки был использован лазерный трекер, который позволяет определять координаты центра сферического отражателя с высокой точно-

стью в связанной с ним системе координат $O_T x_T y_T z_T$. Лабораторный стенд показан на рис. 2.

При использовании трекера для верификации предложенного метода возникают две основные проблемы. Первая – это несовпадение систем координат ММ O_{xyz} и трекера $O_T x_T y_T z_T$, что не позволяет напрямую произвести сопоставление координат, измеренных трекером, с рассчитанными координатами положения фланца ММ. Вторая – это несовпадение центра отражателя, то есть точки, положение которой измеряет трекер, с центром фланца ММ (см. рис. 2), координаты которого рассчитываются согласно (1) с использованием идентифицированных параметров.

Эти проблемы при проведении эксперимента решались следующим образом.

Для того чтобы обеспечить сопоставление измеренных трекером координат X^{FARO} с координатами \hat{X}^{UR} фланца, рассчитанными по модели (1) с использованием идентифицированных предложенными методом параметров, необходимо произвести серию измерений, после чего с помощью алгоритма ICP (Iterative Closest Points) провести совмещение облака, состоящего из точек \hat{X}^{UR} , с облаком, состоящим из точек X^{FARO} . Это обеспечит совмещение системы координат ММ с системой координат трекера. При этом оценка точности кинематической модели ММ, содержащей идентифицированные параметры, будет оцениваться по среднеквадратичному отклонению между точками этих облаков после их совмещения. Чем меньше эта величина, тем точнее определены кинематические параметры ММ. То есть в процессе

эксперимента точность полученной кинематической модели ММ будет оцениваться по точности расчета относительных перемещений фланца ММ.

Для того чтобы исключить влияние расположения центральной точки отражателя относительно центра фланца ММ, все перемещения ММ в процессе измерений производились при неизменной ориентации фланца. В этом случае измеренные координаты центральной точки отражателя всегда будут смещены на одну и ту же величину относительно центра фланца. Поэтому при оценке относительных перемещений, совершенных ММ, они не будут вносить погрешностей, так как при линейном перемещении отражатель будет перемещаться также, как и центральная точка фланца.

Таким образом, экспериментальные исследования метода идентификации параметров кинематической модели ММ состояли из следующих этапов.

На первом этапе собираются данные для идентификации кинематических параметров манипулятора согласно предложенному методу. Для этого не менее чем в трех фиксированных точках пространства $X^1 - X^3$ вручную выполняется не менее двадцати измерений (см. рис. 3) и формируется массив Ξ . На втором этапе по полученным данным будет выполнена идентификация кинематических параметров рассматриваемого манипулятора, то есть получена матрица $\hat{\Phi}$.

На третьем этапе с помощью лазерного трекера измеряется положение X^{FARO} отражателя, закрепленного на фланце робота, в системе координат $O_T x_T y_T z_T$

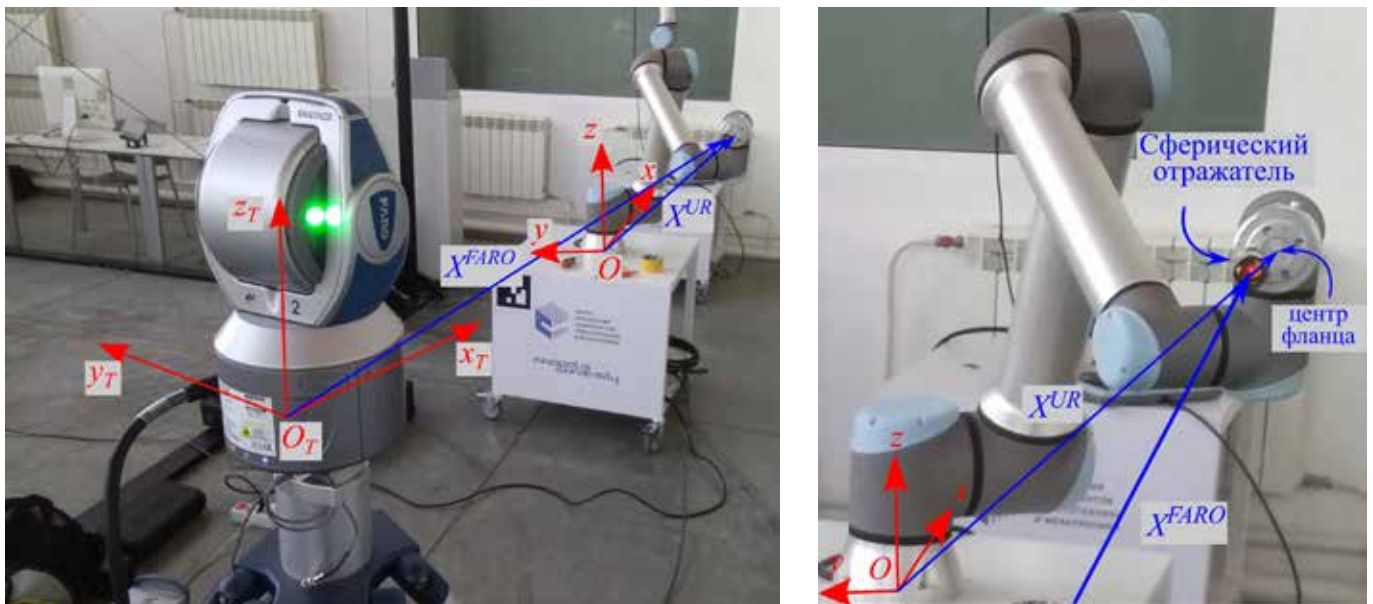


Рис. 2. Лабораторный стенд

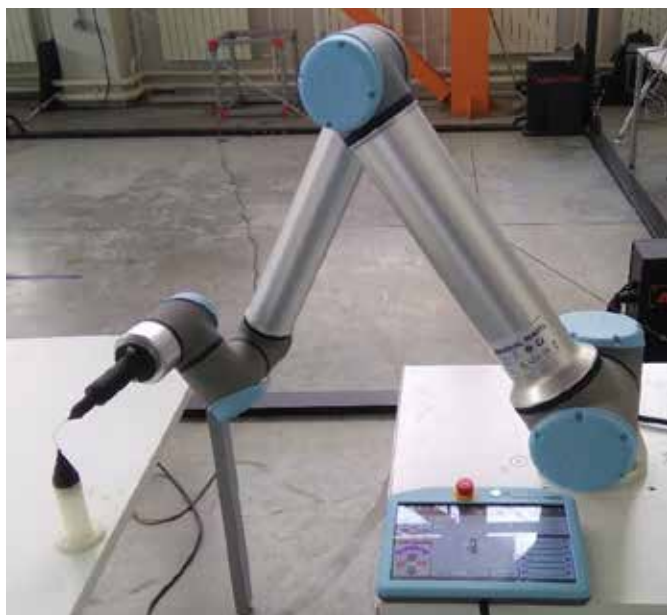


Рис. 3. Процесс сбора данных для идентификации кинематических параметров ММ

(см. рис. 2). Затем фланец перемещается и измерения выполняются вновь. Поскольку отражатель закреплен не в геометрическом центре фланца, то его ориентация должна сохраняться неизменной, то есть выполняются только линейные перемещения фланца ММ.

Одновременно с сохранением положения отражателя сохраняются также следующие данные: координаты положения центра фланца X^{UR} в БСК робота $O_{хуз}$, рассчитанные контроллером ММ, и соответствующие этим положениям величины Q_{UR} обобщенных координат. На основе Q_{UR} согласно (1) вычисляются координаты \tilde{X}^{UR} центра фланца в БСК $O_{хуз}$ при условии, что в кинематической модели робота (1) используются параметры из технической документации $\tilde{\Phi}$, а также координаты \hat{X}^{UR} , найденные с использованием идентифицированных предложенным методом параметров $\hat{\Phi}$. Таким образом, в процессе измерений будут получены четыре облака точек X^{FARO} , X^{UR} , \tilde{X}^{UR} , \hat{X}^{UR} .

На четвертом этапе для удобства дальнейшего анализа и упрощения процедуры совмещения систем координат с помощью алгоритма ИСР все геометрические центры облаков точек переносятся в начало системы координат. Для этого координаты всех точек в каждом облаке пересчитываются по формуле

$$x_p = x_p - \frac{1}{P_x} \sum_{p=1}^{P_x} x_p, \quad p = (\overline{1, P_x}),$$

где x_p – координаты конкретной точки в облаке точек; P_x – количество точек в этом облаке.

И, наконец, на пятом этапе выполняется совмещение облаков точек с помощью известного алгоритма ИСР. Причем облака X^{UR} , \tilde{X}^{UR} и \hat{X}^{UR} приводятся к X^{FARO} . Затем по отклонению точек трех облаков X^{UR} , \tilde{X}^{UR} и \hat{X}^{UR} от ближайших к ним точек X^{FARO} и по суммарному среднеквадратическому отклонению можно косвенно судить о качестве идентифицированных параметров. Чем меньше среднеквадратическое отклонение точек после совмещения двух облаков, тем меньше эти точки отклоняются от точно измеренных в облаке X^{FARO} и тем точнее кинематические параметры модели (1), с помощью которой эти координаты вычислены.

■ Результаты экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований использовался шестистепенной робот UR10e с последовательной кинематической схемой, отличной от схемы PUMA, и лазерный трекер FARO Vantage, точность измерения которого составляет до 0.015 мм (см. рис. 2).

На первом этапе были собраны данные для идентификации параметров ММ. Вывод инструмента осуществлялся вручную, а точность этого вывода оценивалась визуально (см. рис. 3). Было выполнено по двадцать одному ($m_1 = m_2 = m_3 = 21$) измерению в трех фиксированных точках пространства ($i=3$). При этом после каждого вывода инструмента сохранялись значения Q_j^i , то есть формировался набор данных Ξ .

На втором этапе была выполнена идентификация параметров ММ. Начальное значение J , рассчитанное с помощью (7), составляло 1120, а после трех итераций – 28,7. Матрицы идентифицированных и номинальных параметров имеют следующий вид:

$$\hat{\Phi} = \begin{bmatrix} \theta,^\circ & a,mm & d,mm & \alpha,^\circ \\ 0 & 0.0015 & 180.7 & 90.0193 \\ 0.0047 & -612.7056 & -0.0002 & -0.0682 \\ 0.0015 & -571.3064 & -0.0002 & -0.2073 \\ 0.0017 & -0.0756 & 174.1 & 89.9643 \\ 0.0467 & 0.1869 & 120.2671 & -90.0688 \\ -0.0253 & 0.0356 & 115.8641 & -0.0102 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Phi} = \begin{bmatrix} \theta,^\circ & a,mm & d,mm & \alpha,^\circ \\ 0 & 0 & 180.7 & 90 \\ 0 & -612.7 & 0 & 0 \\ 0 & -571.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 174.1 & 90 \\ 0 & 0 & 119.8 & -90 \\ 0 & 0 & 116.5 & 0 \end{bmatrix}$$

На рис. 4 показаны расстояния между точками во всех парах (всего их 630), координаты которых рассчитаны на основе $\tilde{\Xi}$ с помощью (1) и матриц $\tilde{\Phi}$ (серый график) и $\hat{\Phi}$ (синий график) соответственно. Из этого рисунка видно, что использование $\hat{\Phi}$, найденной с помощью предложенного метода, позволяет более чем в десять раз уменьшить расстояния в каждой из пар точек в сериях измерений $X^1 - X^3$.

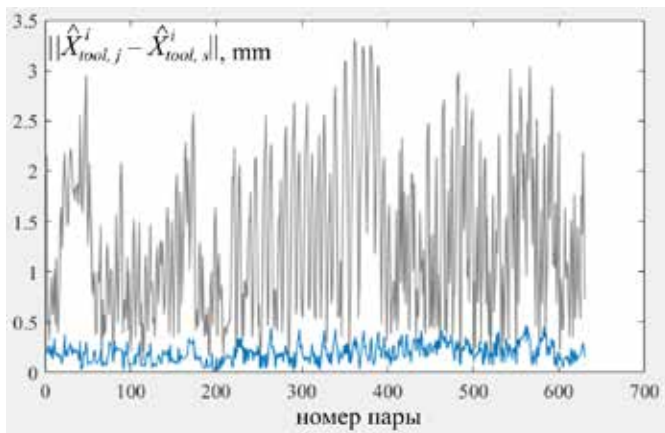


Рис. 4. Расстояния между точками во всех парах

На третьем этапе были получены координаты всех точек облаков $X^{FARO}, X^{UR}, \tilde{X}^{UR}, \hat{X}^{UR}$. Всего было измерено трекером 13 точек, они показаны красным на рис. 5. Для наглядности в этой же системе координат показаны расчетные точки: \hat{X}^{UR} обозначены синими крестами, \tilde{X}^{UR} – серыми окружностями, X^{UR} – оранжевыми знаками плюс.

На четвертом этапе были рассчитаны геометрические центры всех облаков точек и затем облака были перенесены в начало системы координат. Результат этого переноса показан на рис. 6. Из этого рисунка видно несовпадение осей систем координат ММ $Oxyz$ и трекера $O_Tx_Ty_Tz_T$, а также отличия, вызванные использованием разных наборов параметров ММ.

На последнем этапе выполнялось совмещение облаков точек из начального положения, показанного на рис. 6. Его результат показан на рис. 7. Указанное совмещение выполнялось в программе

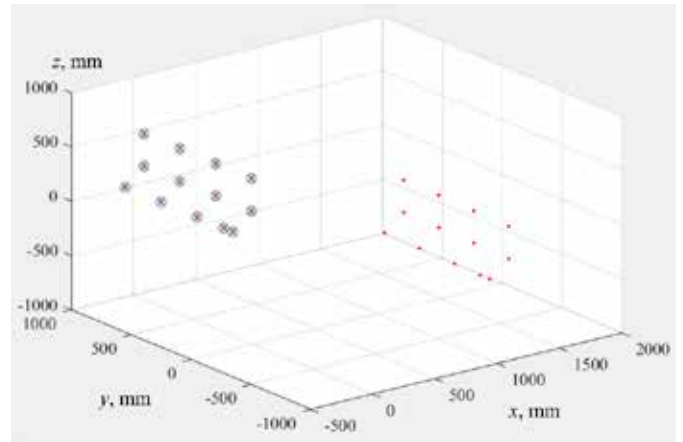


Рис. 5. Облака точек $X^{FARO}, X^{UR}, \tilde{X}^{UR}, \hat{X}^{UR}$

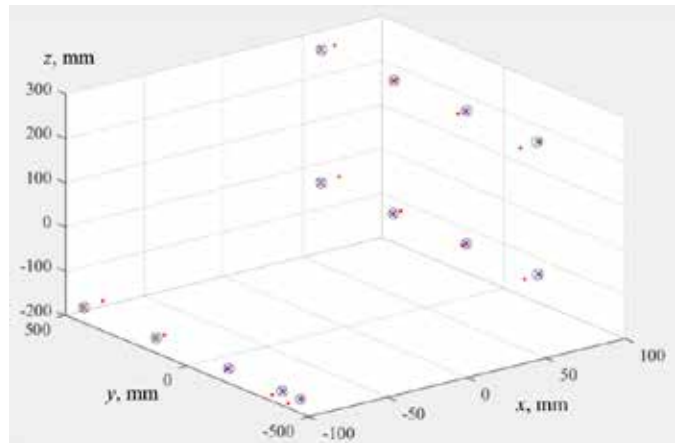


Рис. 6. Начальное положение точек перед совмещением

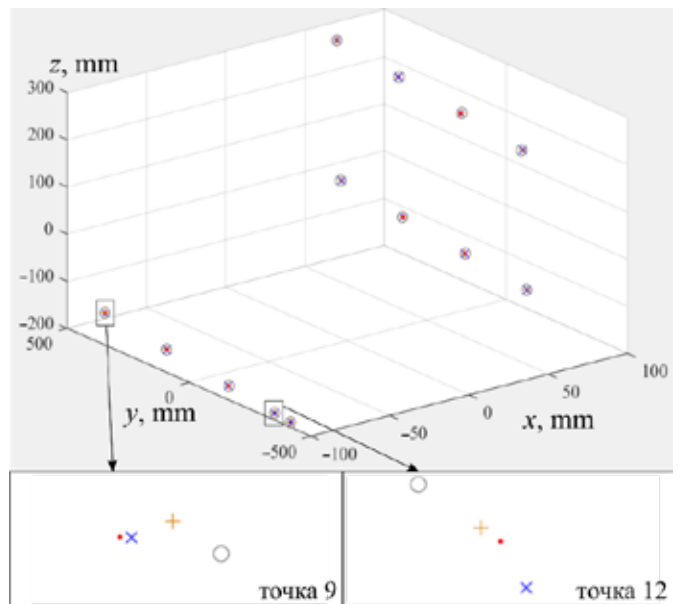


Рис. 7. Положение точек после совмещения

CloudCompare, которая использует открытую библиотеку PLC. В результате среднее квадратическое отклонение принимало следующие значения: при совмещении X^{FARO} и \hat{X}^{UR} оно составляло 0.2262 мм, X^{FARO} и X^{UR} – 0.2562 мм, X^{FARO} и \tilde{X}^{UR} – 0.6715 мм.

Отклонение каждой из точек облаков \hat{X}^{UR} , X^{UR} и \tilde{X}^{UR} от соответствующей точки X^{FARO} показано на рис. 8. Синим на рис. 8 обозначено отклонение от X^{FARO} точек облака \hat{X}^{UR} , оранжевым – X^{UR} , серым – \tilde{X}^{UR} .

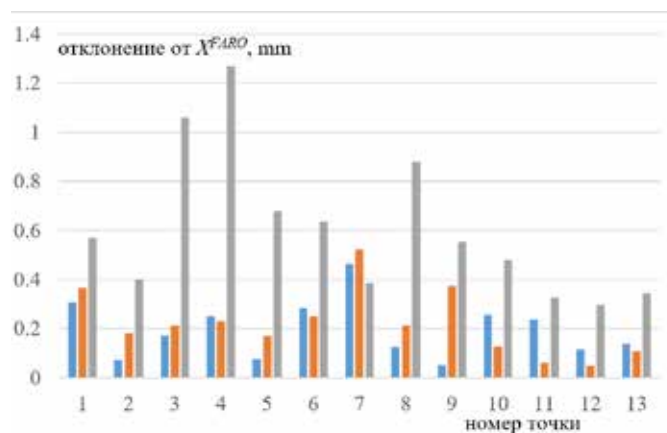


Рис. 8. Отклонение от X^{FARO}

Таким образом, идентифицированные предложенным методом параметры наилучшим образом приближают рассчитанные с их помощью координаты точек к координатам, полученным в ходе высокоточных измерений лазерным трекером. То есть предложенный метод обеспечил результат не хуже и даже немного лучше калибровки робота UR10e, выполненной в заводских условиях с помощью специальных прецизионных инструментов. В результате выполненные экспериментальные исследования полностью подтвердили работоспособность и эффективность метода идентификации параметров ММ без использования внешних измерительных устройств.

Заключение

В работе предложен метод идентификации кинематических параметров подводных ММ с после-

довательной кинематической схемой, не требующий использования внешних высокоточных измерительных систем. Предлагаемый метод состоит из двух этапов. На первом этапе вручную с помощью пульта оператора происходит вывод инструмента с разной ориентацией в одну и ту же фиксированную точку пространства и запись данных об углах поворота приводов ММ. На втором этапе с помощью метода Левенберга–Марквардта выполняется настройка кинематических параметров модели ММ так, чтобы уменьшить расстояния между положениями инструмента, рассчитанными на основе математической модели этого ММ с использованием сохраненных данных об углах поворота приводов. В результате выполнения предложенной процедуры можно уточнить кинематические параметры и тем самым, как показали результаты исследований, существенно увеличить точность движения ММ в БСК. Выполнены экспериментальные исследования предложенного метода, которые подтвердили его работоспособность и эффективность.

Предложенный метод может также быть использован для решения задачи идентификации эластостатических параметров ММ, которая до сих пор является актуальной. В работе [16] описаны результаты его использования, выполнено математическое моделирование. Экспериментальное исследование выполняется в настоящее время.

Наиболее эффективно предложенный метод может применяться для идентификации параметров вновь создаваемых ММ для морских робототехнических комплексов. Это объясняется тем, что указанные уникальные изделия с различным количеством звеньев, оси сочленений которых расположены под произвольными углами, собираются без использования дорогостоящих систем контроля пространственного положения его частей (вышеупомянутые контрольно-измерительные машины, лазерные трекеры и т.д.). В результате этот негативный, значительно влияющий на точность движения РИ ММ в автоматическом режиме, фактор можно эффективно устранить за счет простых, дешевых и доступных средств.

Работа поддержана РФФИ (грант 22-19-00392).

Авторы выражают благодарность Центру компетенций НТИ по направлению «Технологии компонентов робототехники и мехатроники» Университета Иннополис за предоставленное оборудование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филаретов В.Ф., Климчик А.С., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю., Зуев А.В. Интеллектуальные подводные робототехнические комплексы для выполнения осмотровых и технологических операций на морских газопроводах и добычных комплексах // Газовая промышленность. 2020. № 8(804). С. 30–38.

2. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А., Кацурин А.А. Система позиционно-силового управления подводными аппаратами с многозвенными манипуляторами для выполнения контактных манипуляционных операций // Подводные исследования и робототехника. 2022. №4 (42). С. 40–52.
3. Filaretov V., Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A., Mursalimov E. An new approach for automatization of cutting of flexible items by using multilink manipulators with vision system // Proceedings of the 22nd International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Ischia, Italy, 2014. P. 1330–1335. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2014.6872034>
4. Filaretov V., Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A., Mursalimov E. Method of Combination of Three-Dimensional Models of Details with Their CAD-Models at the Presence of Deformations // Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Fort Worth, Texas, USA, 2016. P. 257–261. <https://doi.org/10.1109/COASE.2016.7743415>
5. Roth Z., Mooring B., Ravani B. An overview of robot calibration // IEEE Journal on Robotics and Automation. 1987. Vol. 3, No. 5. P. 377–385. <https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087124>
6. Hollerbach J., Khalil W., Gautier M. Model Identification // Springer Handbook of Robotics. 2016. P. 113–138. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_6
7. Kolyubin S., Paramonov P., Shiriaev A. Robot Kinematics Identification: KUKA LWR4+ Redundant Manipulator Example // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2015. Vol. 659, 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/659/1/012011>
8. Klimchik A., Pashkevich A., Wu Y., Caro S., Furet B. Design of calibration experiments for identification of manipulator elastostatic parameters // J. of Mechanics Engineering and Automation. 2012. Vol. 2. P. 531–542.
9. Nubiola A., Bonev I.A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2013. Vol. 29, No. 1. P. 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.06.004>
10. Boby R.A. Identification of elasto-static parameters of an industrial robot using monocular camera // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2022. Vol. 74, 102276. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102276>
11. Khalil W., Garcia G., Delagarde J.F. Calibration of the geometric parameters of robots without external sensors // Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya, Japan, 1995. P. 3039–3044. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1995.525716>
12. Veitschegger W., Wu C. A method for calibrating and compensating robot kinematic errors // Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Raleigh, NC, USA, 1987. P. 39–44. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1987.1087839>
13. Tang G.R., Liu L.S. A study of three robot calibration methods based on flat surfaces // Mechanism and Machine Theory. 1994. Vol. 29, No. 2. P. 195–206. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0094-114X(94)90030-2)
14. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. New York: Mcgraw-Hill Book Company, 1987. 580 p.
15. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В., Коноплин А.Ю. Разработка метода формирования программных сигналов управления манипуляторами, установленными на подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2018. Т. 25, №1. С. 30–37.
16. Yukhimets D.A., Gubankov A.S. Method of identification of kinematic and elastostatic parameters of multilink manipulators without external measuring devices // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, No. 2. P. 9879–9884. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2694>

Сведения об авторах

ЮХИМЕЦ Дмитрий Александрович, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет»

Адрес: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Научные интересы: робототехника, информационно-управляющие системы, адаптивные и робастные системы управления

Тел.: +7(423)313783

E-mail: undim@iacp.dvo.ru

ORCID: 0000-0003-2676-9902

ГУБАНКОВ Антон Сергеевич, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

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

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

Адрес: 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

Научные интересы: теория управления, адаптивные системы управления, робототехника, подводные роботы, промышленные роботы

Тел.: +7(423)313783

E-mail: gubankov@iacp.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-8050-330X

Для цитирования:

Юхимец Д.А., Губанков А.С. МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСТЕПЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ // Подводные исследования и робототехника. 2023. №. 2 (44). С. 45–56. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_04. EDN: OMBEZG.

METHOD OF IDENTIFICATION OF KINEMATIC PARAMETERS OF MULTILINK MANIPULATORS DESIGNED TO PERFORM UNDERWATER TECHNOLOGICAL OPERATIONS

D.A. Yukhimets, A.S. Gubankov

The paper proposes a method for identifying the kinematic parameters of multilink manipulators with a sequential kinematic scheme. This method, using simple and affordable tools, allows to significantly increase the accuracy of moving the working tools of robots performing various technological operations. The proposed method has been experimentally tested and can be most effectively used to identify the parameters of newly created manipulators for marine robotic complexes. This is due to the fact that these unique products with a different number of links, the axes of the joints of which are located at arbitrary angles, are assembled without the use of expensive systems for monitoring the spatial position of its parts (control and measuring machines, laser trackers, etc.). As a result, this negative factor, which significantly affects the accuracy of the movement of manipulators' working tools in automatic mode, can be effectively eliminated by simple, cheap and affordable means.

Keywords: multilink manipulator, identification, kinematic parameters, calibration

References

1. Filaretov V.F., Klimchik A.S., Yukhimets D.A., Konoplin A.Yu., Zuev A. Intelligent underwater robotics for inspection and process operations on offshore gas pipelines and production systems, *GAS Industry of Russia*, 2020, No. 8(804), pp. 30-38.
2. 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), pp. 40–52.
3. Filaretov V., Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A., Mursalimov E. An new approach for automatization of cutting of flexible items by using multilink manipulators with vision system, *Proceedings of the 22nd International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Ischia, Italy, 2014, pp. 1330-1335, <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2014.6872034>
4. Filaretov V., Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A., Mursalimov E. Method of Combination of Three-Dimensional Models of Details with Their CAD-Models at the Presence of Deformations, *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, Fort Worth, Texas, USA, 2016 pp. 257-261, <https://doi.org/10.1109/COASE.2016.7743415>
5. Roth Z., Mooring B., Ravani B. An overview of robot calibration, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, vol. 3, no. 5, pp. 377-385, <https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087124>
6. Hollerbach J., Khalil W., Gautier M. Model Identification. *Springer Handbook of Robotics*, 2016 pp. 113–138, https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_6
7. Kolyubin S., Paramonov P., Shiriaev A. Robot Kinematics Identification: KUKA LWR4+ Redundant Manipulator Example. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 659, 012011, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/659/1/012011>
8. Klimchik A., Pashkevich A., Wu Y., Caro S., Furet B. Design of calibration experiments for identification of manipulator elastostatic parameters, *J. of Mechanics Engineering and Automation*, 2012, vol. 2, pp. 531-542.
9. Nubiola A., Bonev I.A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, vol. 29, no. 1, pp. 236-245, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.06.004>
10. Boby R.A. Identification of elasto-static parameters of an industrial robot using monocular camera, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2022, vol. 74, 102276, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102276>
11. Khalil W., Garcia G., Delagarde J.F. Calibration of the geometric parameters of robots without external sensors, *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, 1995, pp. 3039-3044, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1995.525716>
12. Veitschegger W., Wu C. A method for calibrating and compensating robot kinematic errors, *Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Raleigh, NC, USA, 1987, pp. 39-44, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1987.1087839>
13. Tang G.R., Liu L.S. A study of three robot calibration methods based on flat surfaces, *Mechanism and Machine Theory*, 1994, Vol. 29, No. 2, pp. 195-206, [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0094-114X(94)90030-2)
14. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence, *Mcgraw-Hill Book Company: New York*, 1987, 580 p.
15. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V., Konoplin A.Yu. Development of a method for generating program control signals for manipulators installed on underwater vehicles, *Underwater investigation and robotics*, 2018, Vol. 25, No.1, pp. 30-37.
16. Yukhimets D.A., Gubankov A.S. Method of identification of kinematic and elastostatic parameters of multilink manipulators without external measuring devices, *IFAC-PapersOnLine*, 2020, Vol. 53, No. 2, pp. 9879–9884. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2694>

About the authors

YUKHIMETS Dmitry Alexandrovich, Doctor of Science, associated professor, lead researcher
 Institute of Automation and Control Processes FEB RAS
Address: 690041, Vladivostok, Radio str., 5, Russia
 Sevastopol State University
Address: 299053, Sevastopol, st. University, 33
Research interests: robotics, information-control systems, adaptive and robust control systems
Phone: +7(423)313783
E-mail: undim@iacp.dvo.ru
ORCID: 0000-0003-2676-9902

GUBANKOV Anton Sergeevich, PhD, associated professor, senior researcher
 Institute of Automation and Control Processes FEB RAS
Address: 5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russia
 Federal State Budgetary Institution of Science M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences
Address: 5a, Sukhanova St., Vladivostok, 690091, Russia
 Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
Address: 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russia
Research interests: control theory, adaptive system, robotics, underwater robots, industrial robots
Phone: +7(423)313783
E-mail: gubankov@iacp.dvo.ru
ORCID: 0000-0001-8050-330X



Recommended citation:

Yukhimets D.A., Gubankov A.S. METHOD OF IDENTIFICATION OF KINEMATIC PARAMETERS OF MULTILINK MANIPULATORS DESIGNED TO PERFORM UNDERWATER TECHNOLOGICAL OPERATIONS. Underwater investigations and robotics. 2023. No. 2 (44). P. 45–56. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_04. EDN: OMBEZG.

