

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ДРЕВОВИДНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА АКТИВНОГО ЭКСОСКЕЛЕТА

Ж.Н. Исабеков

janibek_23.93@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложена кинематическая схема древовидного исполнительного механизма активного экзоскелета. Рассмотрены математические модели кинематики и динамики его исполнительного механизма. Представлены значения модифицированных параметров Денавита—Хартенберга, матрицы достижимости звеньев исполнительного механизма и вектора Z , характеризующего пространственное расположение осей вращения кинематических пар

Ключевые слова

Экзоскелет, синтез кинематической структуры, модифицированная система координат Денавита—Хартенберга, матрица достижимости, уравнение динамики исполнительного механизма экзоскелета

Поступила в редакцию 21.11.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Для постановки и расчета задач кинематики обычно составляют расчетную кинематическую модель робота, в основу которой должны быть положены предполагаемые или имеющиеся геометрические размеры звеньев, их типы, количество и распределение кинематических пар. Для шагающих роботов кинематической модели, как правило, решается следующая задача: определение законов изменения обобщенных координат в степенях подвижности. Для исследования динамики робота составляют динамическую модель, которая должна учитывать не только геометрические размеры звеньев и распределение кинематических пар, но и распределение масс и тензоров инерции звеньев робота.

Методам математического описания кинематики и динамики исполнительного механизма (ИМ) роботов посвящена обширная литература [1–3]. Одним из широко применяемых подходов является использование при записи кинематических соотношений матриц однородных преобразований размера (4×4) . Такой подход позволяет составить уравнения в более компактной форме путем единообразного описания преобразований перемещений в поступательных и вращательных кинематических парах. Данный метод базируется на теории графов, преобразованиях Денавита—Хартенберга и теории матриц. При этом число параметров, входящих в матрицу A_i (матрицу перехода) относительного положения последовательных звеньев ИМ, минимально, и естественным образом определяет взаимное их расположение. Вид матрицы A_i одинаков как для вращательного, так и для поступательного сочленений.

Преимуществом такого метода построения связанных систем координат (СК) является то, что можно указать только четыре параметра, определяющих относительное положение двух последовательных СК $i-1$ и i имеет следующий вид:

$$A_i = \begin{vmatrix} \cos(\theta_i) - \cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) \alpha_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) - \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) \alpha_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 \sin(\alpha_i) \cos(\alpha_i) d_i \\ 0001 \end{vmatrix} \quad (1)$$

Здесь α_i и α_i всегда постоянны и определяются конструкцией ИМ робота. Один из двух других параметров (θ_i либо d_i) является переменным. Для вращательно-го сочленения величина θ_i характеризует угол относительного поворота звеньев $i-1$ и i , а линейная величина d_i постоянна. Для телескопического соединения, наоборот, переменной величиной является d_i . Переменную величину i -го сочленения обычно называют обобщенной координатой ИМ робота [3]. При построении кинематических моделей роботов данный метод получил наибольшее распространение среди разработчиков благодаря его наглядности и привязке к конструктивным параметрам ИМ. Так как экзоскелет имеет древовидную кинематическую структуру, то использование данного метода для описания его кинематики затруднено.

Рассмотрим порядок назначения СК, связанных со звеньями древовидного ИМ [4]. С каждым звеном ИМ связывается столько СК, сколько звеньев-сыновей он имеет. Одну из СК, связанных со звеном, назначают за основную, остальные считают вспомогательными. В качестве примера на рис. 1 показаны три СК, связанные со звеном i , имеющим три звена-сына. Все СК назначают в соответствии с правилами Денавита—Хартенберга.

Переход из основной СК звена i в СК звена-отца $f(i)$, соответствующую этому звену, определяется матрицей преобразования A_i :

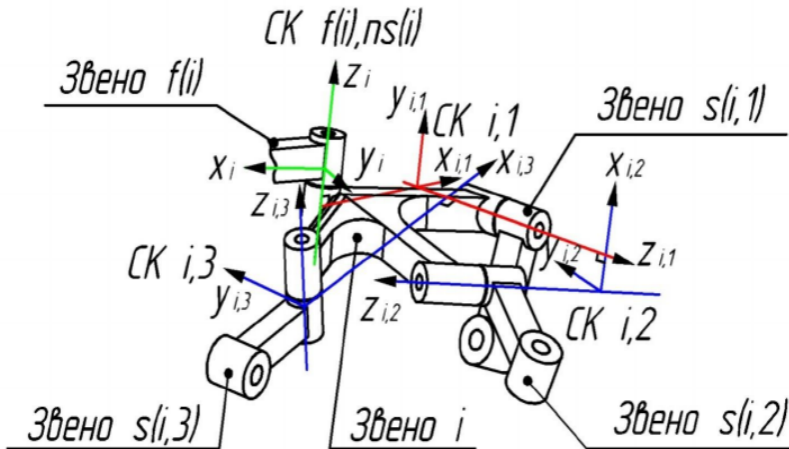


Рис. 1. Системы координат, связанные со звеном i

$$A_i = \left(\begin{array}{c|c} f(i), ns(i) R_i & f(i), ns(i) \bar{I}_i \\ \hline 000 & 1 \end{array} \right)$$

— матрица, задающая переход от основной СК звена i к СК звена $f(i)$, соответствующей звену i .

Переходы из вспомогательных в основную СК звена i определяют постоянные матрицы однородных преобразований $M_{i,ns(j)}$, где j — число звеньев сыновей звена i .

$$M_{i,ns(j)} = \begin{pmatrix} {}^i R_{M_{i,ns(j)}} & | & {}^i \vec{r}_{i,ns(j)} \\ \hline 000 & | & 1 \end{pmatrix} \quad \text{— постоянная матрица, задающая переход от} \\ \text{вспомогательной к основной СК звена } i.$$

Представлена кинематическая схема ИМ активного экзоскелета с назначенными СК Денавита—Хартенберга (рис. 2). Модифицированные СК Денавита—Хартенберга [5, 6] получены с помощью прототипа человека. Фиктивная цепь (от 0 до 5 звена) состоит из невесомых звеньев и характеризует положение и ориентацию корпуса экзоскелета в абсолютной СК. Она имеет восемь степеней подвижности, все вращательные кинематические пары [7]. Предложенная кинематическая схема может быть представлена ориентированным графом достижимости [8], где вершины графа обозначают звенья ИМ, а дуги — соединяющие их сочленения (рис. 3).

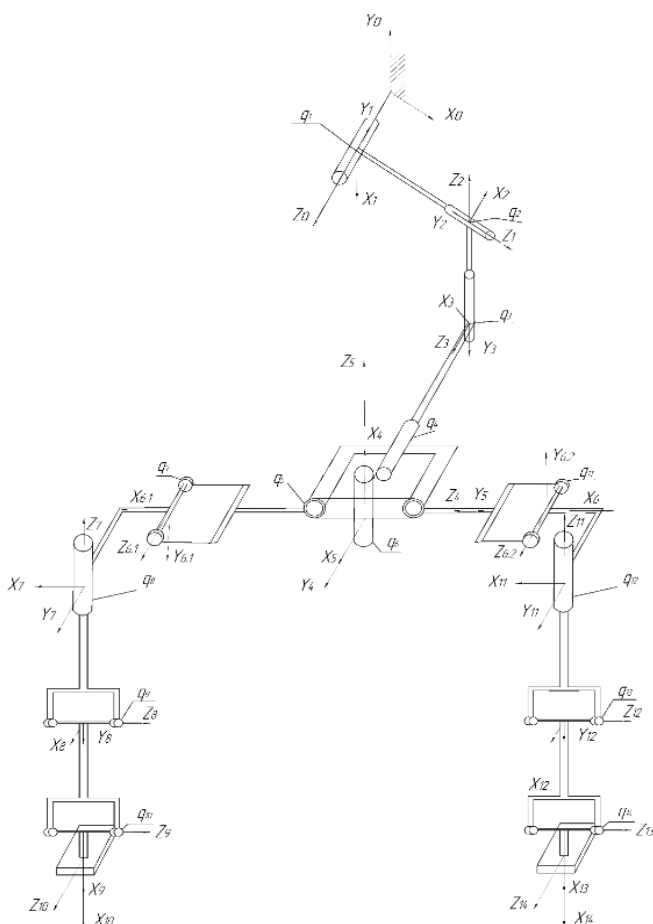


Рис. 2. Кинематическая схема исполнительного механизма экзоскелета

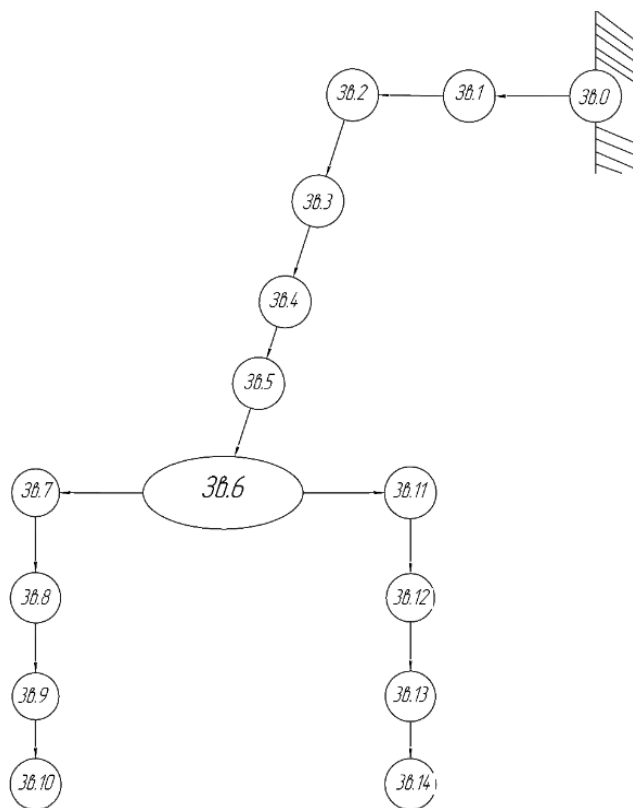


Рис. 3. Граф достижимости ИМ экзоскелета

Ориентация СК в древовидной кинематической структуре ИМ экзоскелета задается с помощью блочного вектора Z , определяющего направление осей вращения связанных систем координат ИМ и их взаимное расположение. Он определяет последовательность ортов осей Z , соответствующих сочленениям, соединяющим звенья ИМ с их звеньями-отцами. Блочный вектор Z для ИМ экзоскелета имеет следующий вид:

$${}^0\mathbf{z} = \left({}^0\mathbf{z}_1, {}^0\mathbf{z}_2, {}^0\mathbf{z}_3, {}^0\mathbf{z}_4, {}^0\mathbf{z}_5, {}^0\mathbf{z}_{6.1}, {}^0\mathbf{z}_7, {}^0\mathbf{z}_8, {}^0\mathbf{z}_9, {}^0\mathbf{z}_{10}, {}^0\mathbf{z}_{6.2}, {}^0\mathbf{z}_{11}, {}^0\mathbf{z}_{12}, {}^0\mathbf{z}_{13}, {}^0\mathbf{z}_{14} \right)^T. \quad (2)$$

Первым элементом является Z_0 абсолютной СК. Вторым элементом — орт оси Z первого звена.

Для математического описания древовидной кинематической схемы ИМ необходимо определить порядок расположения звеньев друг относительно друга. Он определяется матрицей достижимости D — квадратной матрицей. Каждый элемент матрицы $d_{ij} = 1$, если звено i вершина направленного графа, описывающего кинематическую структуру ИМ, достижимо из звена j и $d_{ij} = 0$, если звено i не достижимо из звена j .

Таким образом, предлагаемый метод построения модифицированной СК Денавита—Хартенберга позволяет определить значения параметров основных

и вспомогательных СК древовидного ИМ активного экзоскелета. Значения параметров Денавита—Хартенберга для основных и вспомогательных СК исполнительного механизма экзоскелета представлены в табл. 1 и 2, где θ_1 — угол, на который необходимо повернуть ось X_0 относительно оси Z_0 до совпадения направлений осей X_0 и X_1 ; d_1 — расстояние от начала координат СК $OX_0Y_0Z_0$ до точки пересечения осей Z_0 и X_1 ; a_1 — расстояние от точки пересечения осей Z_0 и X_1 до начала координат СК $OX_1Y_1Z_1$; α_1 — угол, на который необходимо повернуть ось Z_0 относительно оси X_1 до совпадения осей Z_0 и Z_1 ; $f(i)$ — номер звена, являющегося предыдущим (вершиной-отцом) для звена i ; $ns(i)$ определяет, каким по счету из числа непосредственно присоединенных (звеном-сыном) является звено i для своего предыдущего звена.

Таблица 1

Значения параметров Денавита—Хартенберга основных СК ИМ экзоскелета

№ СК	θ , рад	d , м	a , м	α , рад	$f(i)$	$ns(i)$
1	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	1	1
3	0	0	0	0	2	1
4	0	0	0	0	3	1
5	0	0	0	0	4	1
6	$-\pi/2$	0	0,238	$-\pi/2$	5	1
7	0	0,198	0,167	$\pi/2$	6	1
8	$\pi/2$	-0,107	0	$-\pi/2$	7	1
9	$\pi/2$	0	0,476	0	8	1
10	0	0	0,674	$\pi/2$	9	1
11	π	0,198	-0,094	$\pi/2$	6	2
12	$\pi/2$	-0,107	0	$-\pi/2$	11	1
13	$\pi/2$	0	0,476	0	12	1
14	0	0	-0,167	$\pi/2$	13	1

Таблица 2

Значения параметров Денавита—Хартенберга вспомогательных СК ИМ экзоскелета

№ СК	θ , рад	d , м	a , м	α , рад	$f(i)$	$ns(i)$
6,2	π	0	0,476	0	6	2

Численные значения матрица достижимости представлена в табл. 3.

Матрица достижимости ИМ экзоскелета

$$D(14 \times 14) =$$

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1

Уравнение динамики древовидного ИМ активного экзоскелета. Запишем кинематические и динамические зависимости для всех звеньев ИМ с древовидной КС, а также выражения, определяющие ускорения центров масс звеньев.

Рассчитаем угловые скорости и ускорения звеньев:

$${}^0w = (D \cdot {}^0z^d \cdot \sigma) \cdot \dot{q}; \quad (3)$$

$${}^0e = D \cdot {}^0z^d \cdot \sigma \cdot \ddot{q} + D \cdot \sigma \cdot \dot{q}^d \cdot {}^0\dot{z}. \quad (4)$$

Далее найдем скорости начал основных СК звеньев:

$${}^0v = (\Lambda^T ({}^0I_D) \cdot {}^0z^d \cdot \sigma + D \cdot {}^0z^d \cdot (E - \sigma)) \cdot \dot{q}. \quad (5)$$

Запишем ускорения начал основных СК звеньев:

$$\begin{aligned} {}^0\dot{v} = & (\Lambda^T ({}^0I_D) \cdot {}^0z^d \cdot \sigma + D \cdot {}^0z^d \cdot (E - \sigma)) \cdot \ddot{q} + \\ & + \Lambda^T ({}^0I_D) \cdot {}^0\dot{z}^d \cdot \sigma + \Lambda^T ({}^0\dot{I}_D) \cdot {}^0z^d \cdot \sigma + D \cdot {}^0\dot{z}^d \cdot (E - \sigma) \cdot \dot{q}. \end{aligned} \quad (6)$$

Теперь рассчитаем ускорения центров масс звеньев:

$$\begin{aligned}
 {}^0\bar{a}_{\text{И.М.}} = & \left(D \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot (E - \sigma) + \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma \right) \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \left(\Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot \Lambda^T({}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \times \right. \\
 & \times (D - E) \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}} + \Lambda^T \left(\Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot \sigma \cdot {}^0\dot{\mathbf{q}}^d \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot D + \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot (D - E) \cdot \sigma \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot {}^0\dot{\mathbf{q}}^d \right) \times \\
 & \left. \times {}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}} + 2 \cdot D \cdot \Lambda^T \left({}^0\mathbf{z}^d \cdot (E - \sigma) \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \right) \cdot (D - E) \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}} \right)
 \end{aligned} \quad (7)$$

Силы и моменты, действующие на звенья со стороны их звеньев-отцов, запишем как

$${}^0\mathbf{f} = D^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot {}^0\mathbf{a} \cdot D^T \cdot {}^0\mathbf{f}_e; \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 {}^0\mathbf{n} = & - \left[\Lambda({}^0\mathbf{c}_{fD}) \right]^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot {}^0\mathbf{a} \cdot D^T \cdot {}^0\mathbf{J}_C^d \cdot {}^0\mathbf{e} + D^T \cdot \Lambda({}^0\mathbf{w}^d) \cdot {}^0\mathbf{J}_C^d \cdot {}^0\mathbf{w} - \\
 & - \left(D^T - E \right) \cdot \Lambda({}^0\mathbf{s}^d) \cdot D^T \cdot {}^0\mathbf{f}_e - D^T \cdot {}^0\mathbf{n}_e - D^T \cdot \Lambda({}^0\mathbf{t}^d) \cdot {}^0\mathbf{f}_e.
 \end{aligned} \quad (9)$$

Далее найдем силы и моменты, развиваемые приводами:

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\tau} = & \sigma \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \left[- \left(\Lambda({}^0\mathbf{c}_{fD}) \right)^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot {}^0\mathbf{a} \cdot D^T \cdot {}^0\mathbf{J}_C^d \cdot {}^0\mathbf{e} + D^T \cdot \Lambda({}^0\mathbf{w}^d) \times \right. \\
 & \times {}^0\mathbf{J}_C^d \cdot {}^0\mathbf{w} - \left(D^T - E \right) \cdot \Lambda({}^0\mathbf{s}^d) \cdot D^T + D^T \cdot \Lambda({}^0\mathbf{t}^d) \cdot {}^0\mathbf{f}_e - D^T \cdot {}^0\mathbf{n}_e \left. \right] + \\
 & + (E - \sigma) \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \left[D^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot {}^0\mathbf{a} - D^T \cdot {}^0\mathbf{f}_e \right].
 \end{aligned} \quad (10)$$

Значения в формулах (3)–(10) определяются в соответствии с [3] и рис. 4.

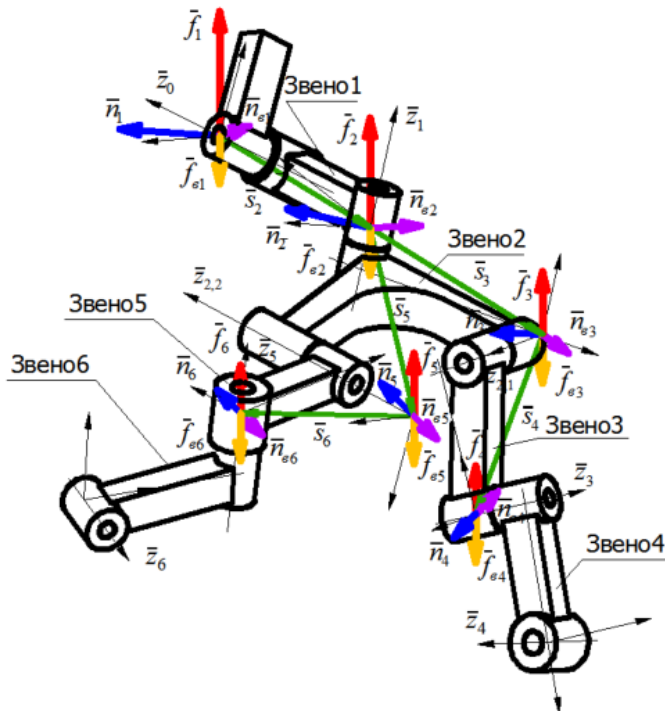


Рис. 4. К расчету сил и момента, действующих на звенья со стороны звеньев-отцов

Усилия, развиваемые приводами, выражены через обобщенные координаты и их производные. Путем группирования сомножителей $\dot{\mathbf{q}}$ и $\ddot{\mathbf{q}}$ получено уравнение динамики ИМ роботов, имеющих древовидные кинематические схемы, определяемые матрицей достижимости звеньев D , блочным вектором ${}^0\mathbf{z}$ и диагональной матрицей σ :

$$A(\mathbf{q}) \cdot \ddot{\mathbf{q}} + B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - C(\mathbf{q}) \cdot {}^0\mathbf{f}_g - H(\mathbf{q}) \cdot {}^0\mathbf{n}_g = \boldsymbol{\tau} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{где } A(\mathbf{q}) &= \sigma \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot \left(-(\Lambda({}^0\mathbf{c}_{fD}))^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot (D \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot (E - \sigma) + \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma) + \right. \\ &+ D^T \cdot {}^0\mathbf{J}_C^d \cdot D \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma) + (E - \sigma) \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot D^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot (D \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot (E - \sigma) + \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma); \\ B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \sigma \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot \left\{ -(\Lambda({}^0\mathbf{c}_{fD}))^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot \left[\Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot \Lambda^T({}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \cdot (D - E) + \right. \right. \\ &+ \Lambda^T \left(\Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot D + \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot ((D - E) \cdot \sigma \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \right) + \\ &+ 2 \cdot D \cdot \Lambda^T({}^0\mathbf{z}^d \cdot (E - \sigma) \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \cdot (D - E) \left. \right] + \\ &+ D^T \cdot {}^0\mathbf{J}_C^d \cdot D \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \cdot \Lambda^T({}^0\mathbf{z}^d) \cdot (D - E) + D^T \cdot \Lambda(D \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \cdot {}^0\mathbf{J}_C^d \cdot D \left. \right\} \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}} + \\ &+ (E - \sigma) \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot D^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot \left[\Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot \Lambda^T({}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \cdot (D - E) + \right. \\ &+ 2 \cdot D \cdot \Lambda^T({}^0\mathbf{z}^d \cdot (E - \sigma) \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \cdot (D - E) + \\ &+ \left. \Lambda^T \left(\Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot D + \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{fD}) \cdot ((D - E) \cdot \sigma \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \right) \right] \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}}; \\ C(\mathbf{q}) &= \sigma \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot \left((D^T - E) \cdot \Lambda({}^0\mathbf{s}^d) \cdot D^T + D^T \cdot \Lambda({}^0\mathbf{t}^d) \right) + (E - \sigma) \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot D^T; \\ H(\mathbf{q}) &= \sigma \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot D^T. \end{aligned}$$

В этих выражениях $\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_N)^T$ — матрица масс звеньев ИМ; $\mathbf{J}_C = (J_{C_1}, J_{C_2}, \dots, J_{C_N})^T$ — блочная матрица тензоров инерции звеньев; ${}^0\mathbf{t}^d = \text{diag}({}^0t_1^T, {}^0t_2^T, \dots, {}^0t_N^T)$ — блочная диагональная матрица векторов, соединяющих начала СК звеньев $\mathbf{f}(\mathbf{i})$, $\mathbf{ns}(\mathbf{i})$ с точками, через которые проходят равнодействующие внешних сил, приложенных к звеньям \mathbf{i} ; ${}^0\mathbf{c}_{fD}$ — матрица, объединяющая векторы, соединяющие начала СК звеньев $\mathbf{f}(\mathbf{i})$, $\mathbf{ns}(\mathbf{i})$ с центрами масс звеньев \mathbf{i} , в соответствии с взаимной достижимостью звеньев, описываемой матрицей D ; верхний индекс d обозначает представление векторной величины в диагональном виде.

В процессе движения активного экзоскелета его стопы взаимодействует с опорной поверхностью. Тогда уравнение динамики ИМ экзоскелета с учетом

воздействия внешних сил и моментов, а также наложенных внешних кинематических связей, запишем в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} A(\mathbf{q}) & -J_{VR}^T(\mathbf{q}) \\ J_I(\mathbf{q}) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ {}^0\mathbf{R}_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{P}(\mathbf{q}) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L(\mathbf{q})\mathbf{F}_e \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где \mathbf{q} — вектор обобщенных координат ИМ; $\boldsymbol{\tau}$ — вектор-столбец моментов, развиваемых приводами ИМ. Значения остальных блочных векторов и матриц уравнения (12) определяются в соответствии с [9].

Выводы. Эффективным подходом к построению математической модели динамики ИМ активного экзоскелета является использование модифицированной СК Денавита—Хартенберга и принципа Д’Аламбера, что позволяет определить его движение с учетом приложенных к нему внешних сил и моментов, а также сил и моментов от наложенных на него внешних кинематических связей и вычислить возникающие при этом силы и моменты реакций этих связей.

Литература

1. *Зенкевич С.Л., Ющенко А.С.* Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.
2. *Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С.* Системы управления манипуляционных роботов / Под ред. Е.П. Попова. М.: Наука, 1978. 416 с.
3. *Ковальчук А.К.* Модифицированная система координат Денавита—Хартенберга для исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/826673.html> DOI: 10.7463/1115.0826673
4. *Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е.* Блочнo-матричные уравнения движения исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2008. № 12. С. 5–21. URL: <http://izvuzmash.ru/catalog/calcmach/hidden/577.html>
5. *Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е.* Анализ и выбор кинематической структуры исполнительного механизма экзоскелета // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 7. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717676.html> DOI: 10.7463/0714.0717676
6. *Denavit J., Hartenberg R.S.* Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // J. Appl. Mech. 1955. No. 6. P. 215–221.
7. *Алексеев В.Е., Таланов В.А.* Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений. М.: Бином, 2006. 319 с.
8. *Основы теории исполнительных механизмов шагающих роботов* / А.К. Ковальчук, Б.Б. Кулаков, Д.Б. Кулаков, С.Е. Семенов, В.В. Яроц. М.: Рудомино, 2010. 170 с.
9. *Исабеков Ж.Н.* Проектирование кинематической схемы древовидного исполнительного механизма экзоскелета в МГТУ им. Н.Э. Баумана // Молодежный научно-технический вестник. 2016. № 11. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/851261.html>

Исабеков Жанибек Назарбекович — магистрант кафедры «Гидромеханика гидромашины и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — А.К. Ковальчук, канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидромеханика гидромашины и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

MATHEMATICAL MODEL OF KINEMATICS AND DYNAMICS OF POWERED EXOSKELETON TREE ACTUATOR

Zh.N. Isabekov

janibek_23.93@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We propose a kinematic scheme of a tree actuator of the powered exoskeleton. In our research we examine mathematical models of kinematics and dynamics of its actuator and present values of modified Denavit — Hartenberg parameters, reachability matrix of the actuator's units and the Z vector, which characterizes the spatial arrangement of the rotation axes of kinematic pairs

Keywords

Exoskeleton, synthesis of kinematic structure, modified Denavit—Hartenberg coordinate system, reachability matrix, dynamic equation of exoskeleton's actuator

© Bauman Moscow State Technical University, 2016

References

- [1] Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami [Basic concepts of manipulation robot control]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 480 p. (in Russ.).
- [2] Medvedev V.S., Leskov A.G., Yushchenko A.S. Sistemy upravleniya manipulyatsionnykh robotov [Manipulation robot control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 416 p. (in Russ.).
- [3] Koval'chuk A.K. Modified Denavit—Hartenberg coordinate system for robot actuating mechanisms with tree-like kinematic structure. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2015, no. 11. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/826673.html> (in Russ.). DOI: 10.7463/1115.0826673
- [4] Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. Block-matrix equations of robot actuating mechanism movements with tree-like kinematic structure. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2008, no. 12, pp. 5–21. URL: <http://izvuzmash.ru/catalog/calcmach/hidden/577.html> (in Russ.).
- [5] Vereykin A.A., Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. Analysis and choice of the exoskeleton's actuator kinematic structure. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2014, no. 7. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717676.html> (in Russ.). DOI: 10.7463/0714.0717676
- [6] Denavit J., Hartenberg R.S. Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *J. Appl. Mech.*, 1955, no. 6, pp. 215–221.
- [7] Alekseev V.E., Talanov V.A. Grafy i algoritmy. Struktury dannykh. Modeli vychisleniy [Graphs and algorithms. Data structures. Computational models]. Moscow, Binom Publ., 2006. 319 p. (in Russ.).
- [8] Koval'chuk A.K., Kulakov B.B., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V. Osnovy teorii ispolnitel'nykh mekhanizmov shagayushchikh robotov [Theory concept of walking robot actuating mechanism]. Moscow, Rudomino Publ., 2010. 170 p. (in Russ.).
- [9] Isabekov Zh.N. Kinematic diagram engineering of tree-like exoskeleton actuating mechanism in Bauman MSTU. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik* [Electronic Periodical Youth Scientific and Technical Bulletin], 2016, no. 11. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/851261.html> (in Russ.).

Isabekov Zh.N. — Master's Degree student of Department of Hydromechanics, Hydromachines and Hydro-pneumatics Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — A.K. Kovalchuk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Department of Hydromechanics, Hydromachines and Hydro-pneumatics, Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation.