

УДК 629.734  
DOI 10.22213/2413-1172-2018-1-12-18

И. Н. Ибрахим, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## УСТРОЙСТВО СВЕРХЛЕГКОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ РУКИ

### Введение

Значительное количество исследований последнего десятилетия было посвящено манипуляторам, предназначенным для использования в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Сочетание роботизированных манипуляторов и БПЛА, несомненно, расширяет диапазон их возможных применений [1]. Главным преимуществом является то, что при помощи подобной конфигурации мы можем использовать манипуляторы в труднодоступных для человека местах, например, для таких задач, как сборка при помощи трехзвенного манипулятора [2], сборка конструкций из стержней [3] и проверка моста с использованием манипулятора с четырьмя степенями свободы [4]. Также в научной литературе описаны некоторые промышленные системы из манипулятора с семью степенями свободы, установленного на вертолете [5]. В работах [6–8] представлена система из двух малоинерционных манипуляторов сверхлегкого веса и мультироторной платформы. Однако эти исследования не содержат данных, которые отражали бы реальную динамику системы в непредсказуемой среде с учетом таких помех, как ветер. Попытка изучить влияние возмущений и движений манипулятора, которые были смоделированы как силы и моменты,

на движение БПЛА была сделана нами в работе [9].

В данной статье мы предлагаем новый дизайн манипулятора, который может быть установлен на БПЛА, разработанный на основе предшествующих исследований [10]. Данный дизайн характеризуется малым весом и низкой инерцией, что приводит к незначительным возмущениям. Кроме того, математическая модель представленного дизайна учитывает его кинематику, силы Якоби и статические силы и нацелена на достижение состояния равновесия и определения сил, действующих на каждое звено манипулятора.

### Устройство роботизированного манипулятора, предназначенного для использования на БЛА

Ввиду сложности геометрической модели роботизированной руки с числом степеней свободы, равным 28, включающей 28 сочленений (шарниров) и 23 звена, целесообразно отдельно рассматривать две ее части – кисть и остальную часть руки (предплечье) с учетом двух основных систем координат, как показано на рис. 1. Каждая из этих частей имеет свои законы движения, математические формулы преобразования и векторы сил и моментов.

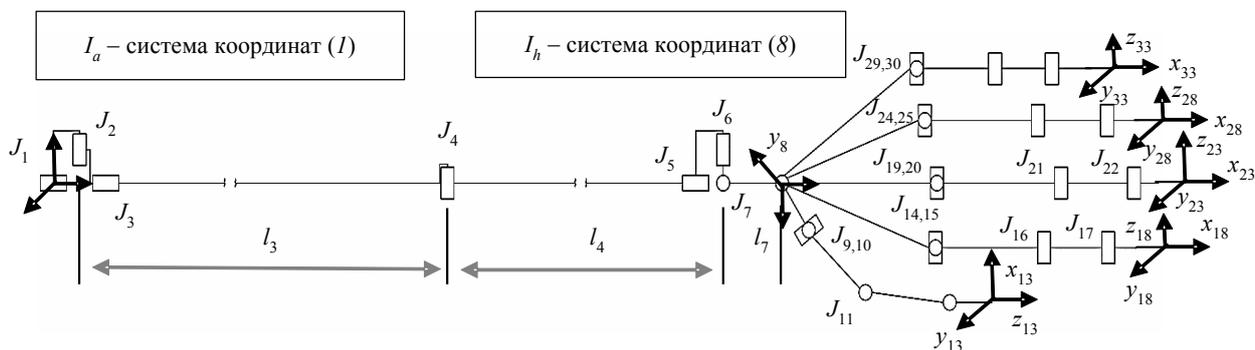


Рис. 1. Архитектура манипулятора

Предположим, что каждое сочленение имеет одну степень свободы вращательного движения, а каждое звено представляет собой твердое тело, рассматриваемое относительно системы ко-

ординат предплечья  $I_a(I)$ , центром которой является точка прикрепления к летательному аппарату, которая выбирается исходя из особенностей его конструкции, центра тяжести

и распределения массы. Центр второй системы координат  $I_h(8)$  (система координат кисти) располагается в центре кисти и рассматривается как исходная точка соединения и движения пальцев для выполнения более точного объектно-ориентированного захвата (рис. 2). Предплечье содержит 7 сочленений, которые рассматриваются относительно системы координат кисти: начальными являются сочленения плеча  $J_1, J_2, J_3$ , далее следует сочленение предплечья  $J_4$ , затем сочленения запястья  $J_5, J_6, J_7$  (табл. 1).

Таблица 1. Обозначения для предплечья роботизированной руки

$J_i$	Обозначения от $J_i$ до $J_i + 1$	Размер, мм
$J_1$	от $I_1$ до $I_2$	44
$J_2$	от $I_2$ до $I_3$	20
$J_3$	Верхняя часть руки (от $I_3$ до $I_4$ )	302
$J_4$	Предплечье (от $I_4$ до $I_5$ )	234,5
$J_5$	от $J_5$ до $J_6$	20
$J_6$	от $J_6$ до $J_7$	53
$J_7$	Запястье (от $J_7$ до $J_8$ )	53,2

Кисть включает 5 схожих по устройству с человеческими пальцев, соединенных как древовидная роботизированная система с началом в центре системы координат кисти. Каждый палец содержит 4 сочленения, принцип движения для всех пальцев является одинаковым, отличия проявляются в размерах (табл. 2) [11]. Каждое звено манипулятора характеризуется такими признаками, как тип материала, жесткость, прочность, передача, форма, вес, инерция, вид смазки и аэродинамические параметры.

Упрощенно задача захвата или прикосновения к объекту для манипулятора разбита на две подзадачи: первая стадия включает перемещение предплечья до тех пор, пока центр системы координат кисти не приблизится к объекту на достаточное расстояние; вторая стадия предполагает параллельное движение пальцев к объекту относительно системы координат кисти.

**Кинематическая модель**

Предположим, что каждое звено представляет собой твердое тело, которое соединяется с соседним при помощи шарнира. Трехмерный геометрический анализ требует описания движения каждого звена вокруг шарнира, а также описания каждого звена с использованием параметров Денавита – Хартенберга (длина звена, поворот звена, смещение звена и угол соединения). Матрицы преобразования  ${}^{i-1}T_i$ , которые связывают систему координат  $i$  с системой ко-

ординат  $i - 1$ , будут определены как в [12], где  $i$  относится к текущей системе, а  $i - 1$  – к предыдущей. Определяется совместное пространство  $J_\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{33}]^T$ , и через кинематические отношения выводится декартово пространство  $J_c = [x \ y \ z]^T$ , которое содержит положение и ориентацию центра тяжести каждого звена. Движение предплечья определяется в рабочем пространстве, в то время как движение пальцев определяется в пространстве задач. Планирование движения всей руки в пространстве требует кинематического анализа с целью определения углов соединения, затем динамического анализа для коррекции значений углов в соответствии с внешними силами и моментами, с учетом внешних помех [13].

Таблица 2. Обозначения для кисти роботизированной руки

	$J_i$	Обозначения от $J_i$ до $J_i + 1$	Размер, мм
Большой палец	L8e	Звено (от $J_8$ до $J_9$ )	10
	L9	от $J_9$ до $J_{10}$	20
	L10	звено (от $J_{10}$ до $J_{11}$ )	29
	L11	звено (от $J_{11}$ до $J_{12}$ )	27
	L12	звено (от $J_{12}$ до $J_{13}$ )	38
Указательный палец	L8d	звено (от $J_8$ до $J_{14}$ )	29
	L14	от $J_{14}$ до $J_{15}$	20
	L15	Звено (от $J_{15}$ до $J_{16}$ )	37
	L16	звено (от $J_{16}$ до $J_{17}$ )	21
	L17	звено (от $J_{17}$ до $J_{18}$ )	29
Средний палец	L8c	Звено (от $J_8$ до $J_{19}$ )	29
	L19	от $J_{19}$ до $J_{20}$	20
	L20	звено (от $J_{20}$ до $J_{21}$ )	37
	L21	звено (от $J_{21}$ до $J_{22}$ )	30
	L22	звено (от $J_{22}$ до $J_{23}$ )	29
Безымянный палец	L8b	звено (от $J_8$ до $J_{24}$ )	29
	L24	от $J_{24}$ до $J_{25}$	20
	L25	звено (от $J_{25}$ до $J_{26}$ )	37
	L26	звено (от $J_{26}$ до $J_{27}$ )	24
	L27	звено (от $J_{27}$ до $J_{28}$ )	29
Мизинец	L8a	звено (от $J_8$ до $J_{29}$ )	29
	L29	от $J_{29}$ до $J_{30}$	20
	L30	звено (от $J_{30}$ до $J_{31}$ )	29
	L31	звено (от $J_{31}$ до $J_{32}$ )	24
	L32	звено (от $J_{32}$ до $J_{33}$ )	27

Координатная связь между текущей и предыдущей системой координат:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_{i-1} \\ s_i c_{a_{i-1}} & c_i c_{a_{i-1}} & -s_{a_{i-1}} & -s_{a_{i-1}} d_i \\ s_i s_{a_{i-1}} & c_i c_{a_{i-1}} & c_{a_{i-1}} & c_{a_{i-1}} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Параметры звеньев предплечья манипулятора**

$i$	$a_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$l_0$	0	$\theta_1$
2	$-\pi/2$	0	0	$\theta_2$
3	$-\pi/2$	0	0	$\theta_3$
4	$-\pi/2$	$l_3$	0	$\theta_4$
5	0	$l_4$	0	$\theta_5$
6	$-\pi/2$	0	0	$\theta_6$
7	$-\pi/2$	0	0	$\theta_7$
8	0	$l_7$	0	$\theta_8 = 0$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & l_4 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^5_6T = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^6_7T = \begin{bmatrix} c_7 & -s_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_7 & c_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^7_8T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_7 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

**Параметры звеньев кисти манипулятора**  
Большой палец

$i$	$a_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
9	$\pi/2$	0	0	$\theta_9$
10	$-\pi/2$	0	0	$\theta_{10}$
11	0	$l_{8e}$	0	$\theta_{11}$
12	0	$l_{11}$	0	$\theta_{12}$
13	0	$l_{12}$	0	$\theta_{13} = 0$

Указательный палец

$i$	$a_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
14	$\pi/2$	$l_{8d}$	0	$\theta_{14}$
15	$-\pi/2$	0	0	$\theta_{15}$
16	0	$l_{15}$	0	$\theta_{16}$
17	0	$l_{16}$	0	$\theta_{17}$
18	0	$l_{17}$	0	$\theta_{18} = 0$

Средний палец

$i$	$a_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
19	$\pi/2$	$l_{8c}$	0	$\theta_{19}$
20	$-\pi/2$	0	0	$\theta_{20}$
21	0	$l_{20}$	0	$\theta_{21}$
22	0	$l_{21}$	0	$\theta_{22}$
23	0	$l_{22}$	0	$\theta_{23} = 0$

Безымянный палец

$i$	$a_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
24	$\pi/2$	$l_{8b}$	0	$\theta_{24}$
25	$-\pi/2$	0	0	$\theta_{25}$
26	0	$l_{25}$	0	$\theta_{26}$
27	0	$l_{26}$	0	$\theta_{27}$
28	0	$l_{27}$	0	$\theta_{28} = 0$

Мизинец

$i$	$a_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
29	$\pi/2$	$l_{8a}$	0	$\theta_{29}$
30	$-\pi/2$	0	0	$\theta_{30}$
31	0	$l_{30}$	0	$\theta_{31}$
32	0	$l_{31}$	0	$\theta_{32}$
33	0	$l_{32}$	0	$\theta_{33} = 0$

**Параметры звеньев большого пальца**

$${}^8_9T = \begin{bmatrix} C_9 & -S_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_9 & C_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^9_{10}T = \begin{bmatrix} C_{10} & -S_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_{10} & -C_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^{10}_{11}T = \begin{bmatrix} C_{11} & -S_{11} & 0 & l_{8e} \\ S_{11} & C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^{11}_{12}T = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l_{11} \\ S_{12} & C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^{12}_{13}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{12} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

**Параметры звеньев указательного пальца**

$${}^{14}_8T = \begin{bmatrix} C_{14} & -S_{14} & 0 & l_{8d} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_{14} & C_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^{14}_{15}T = \begin{bmatrix} C_{15} & -S_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_{15} & -C_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}_{15}^{16}T = \begin{bmatrix} C_{16} & -S_{16} & 0 & l_{15} \\ S_{16} & C_{16} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}_{17}^{16}T = \begin{bmatrix} C_{17} & -S_{17} & 0 & l_{16} \\ S_{17} & C_{17} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}_{18}^{17}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{17} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

**Параметры звеньев среднего пальца**

$${}_{8}^{19}T = \begin{bmatrix} C_{19} & -S_{19} & 0 & l_{8c} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_{19} & C_{19} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}_{20}^{19}T = \begin{bmatrix} C_{20} & -S_{20} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_{20} & -C_{20} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}_{21}^{20}T = \begin{bmatrix} C_{21} & -S_{21} & 0 & l_{20} \\ S_{21} & C_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}_{22}^{21}T = \begin{bmatrix} C_{22} & -S_{22} & 0 & l_{21} \\ S_{22} & C_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}_{23}^{22}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{22} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

**Параметры звеньев безымянного пальца**

$${}_{8}^{24}T = \begin{bmatrix} C_{24} & -S_{24} & 0 & l_{8b} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_{24} & C_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}_{25}^{24}T = \begin{bmatrix} C_{25} & -S_{25} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_{25} & -C_{25} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}_{26}^{25}T = \begin{bmatrix} C_{26} & -S_{26} & 0 & l_{25} \\ S_{26} & C_{26} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}_{27}^{26}T = \begin{bmatrix} C_{27} & -S_{27} & 0 & l_{26} \\ S_{27} & C_{27} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}_{28}^{27}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{27} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

**Параметры звеньев мизинца**

$${}_{8}^{29}T = \begin{bmatrix} C_{29} & -S_{29} & 0 & l_{8a} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_{29} & C_{29} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}_{30}^{29}T = \begin{bmatrix} C_{30} & -S_{30} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_{30} & -C_{30} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}_{31}^{30}T = \begin{bmatrix} C_{31} & -S_{31} & 0 & l_{30} \\ S_{31} & C_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}_{32}^{31}T = \begin{bmatrix} C_{32} & -S_{32} & 0 & l_{31} \\ S_{32} & C_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}_{32}^{33}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{32} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Эти уравнения являются нелинейными и неопределенными, и их решение требует значительных усилий и времени.

**Матрица Якоби и статические силы**

Для каждого звена определим линейную и угловую скорость, а также внешние силы, которые действуют на него. Анализ начинается с базовой системы координат предплечья  $I_a$ , каждое движение прикрепленного звена в системе координат  $i + 1$  получаем преобразованием относительно системы координат  $i$ . Отношения скорости и сил итеративны и их преобразования в системах координат происходит согласно  ${}_{i-1}^{i=1}\omega = {}_{i-1}^{i=1}R_i^i\omega + \dot{\theta}_{i+1} \hat{Z}_{i+1}$ ;  ${}_{i+1}^{i=1}v = {}_{i-1}^{i=1}R_i^i(v + {}_i^i\omega \times {}_i^iP)$ , где  $R$  – матрица вращения, которая соотносит системы координат  $i$  и  $i - 1$ .

Применяя эти отношения, можно вычислить  $[v_8 \ \omega_8]^T$  – угловую и линейную скорости кисти относительно базовой системы координат предплечья; при  $n = 13, 18, 23, 38$  и  $33$  – угловые и линейные скорости кончиков пальцев относительно системы координат кисти.

Данные скорости определяются согласно положению сочленений, что позволяет улучшить контроль при движении к объекту захвата. При управлении манипулятором на БЛА существуют принципиальные ограничения для скорости и ускорения, при этом ускорение должно быть минимальным, чтобы уменьшить воздействие на центр тяжести летательного аппарата. Кроме того, следует также избегать сингулярных конфигураций (нехарактерных точек) на границе рабочего пространства. Это условие выполняется, если матрица Якоби обратима. Если манипулятор попадает в подобную нехарактерную точку, он теряет одну или несколько степеней свободы, и, соответственно, контроль над ним также теряется.

Матрица Якоби:

$$\begin{bmatrix} v_8 \\ \omega_8 \end{bmatrix} = J(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \\ \dot{\theta}_7 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_{f13} \\ \omega_{f13} \end{bmatrix} = J(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_9 \\ \dot{\theta}_{10} \\ \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} v_{f_{18}} \\ \omega_{f_{18}} \end{bmatrix} = J(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{14} \\ \dot{\theta}_{15} \\ \dot{\theta}_{16} \\ \dot{\theta}_{17} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_{f_{23}} \\ \omega_{f_{23}} \end{bmatrix} = J(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{19} \\ \dot{\theta}_{20} \\ \dot{\theta}_{21} \\ \dot{\theta}_{22} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_{f_{28}} \\ \omega_{f_{28}} \end{bmatrix} = J(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{24} \\ \dot{\theta}_{25} \\ \dot{\theta}_{26} \\ \dot{\theta}_{27} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_{f_{33}} \\ \omega_{f_{33}} \end{bmatrix} = J(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{29} \\ \dot{\theta}_{30} \\ \dot{\theta}_{31} \\ \dot{\theta}_{32} \end{bmatrix}.$$

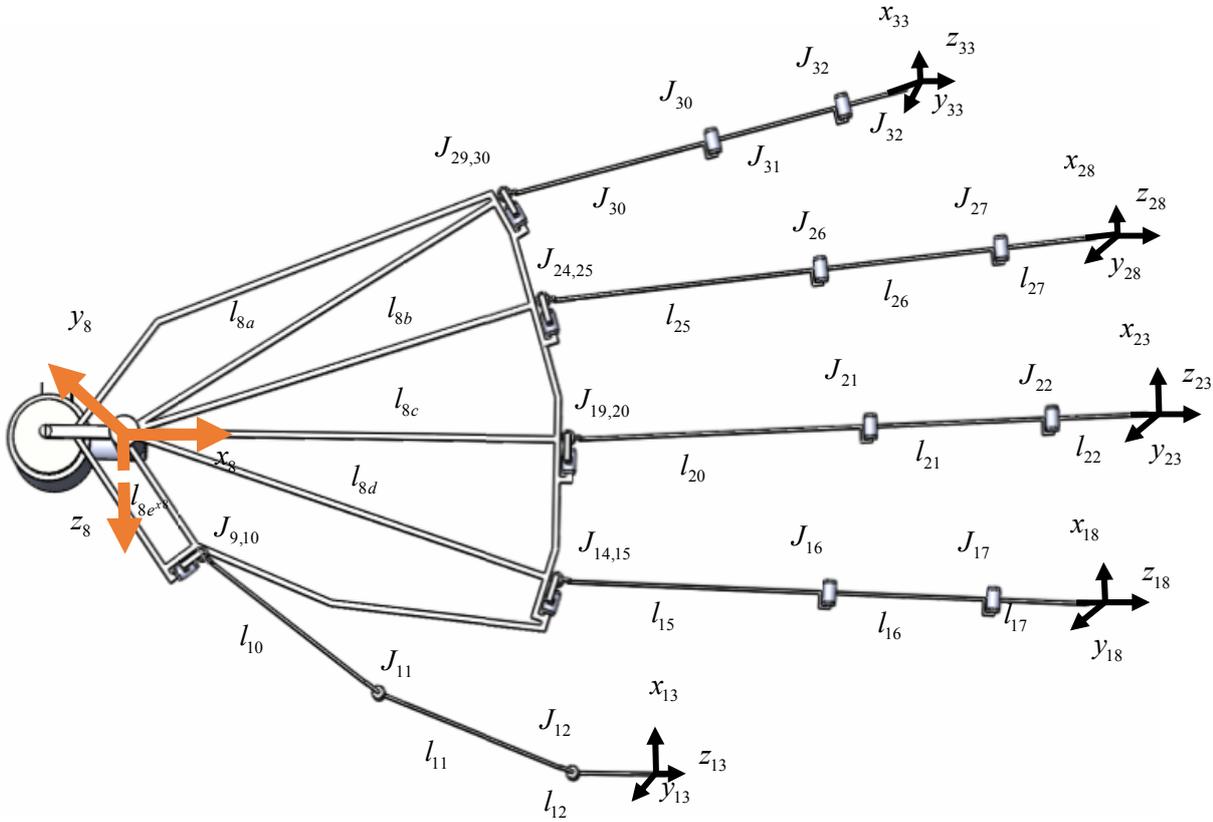


Рис. 2. I<sub>h</sub> – система координат кисти (8)

**Статические силы**

Внешние силы или нагрузки создают силы и моменты, действующие на конкретное звено; эти силы и моменты естественным образом распространяются с данного звена на другие. Возникает необходимость вычисления статического крутящего момента, который должен действовать относительно оси сочленения для достижения статического равновесия манипулятора с нагрузкой или без нее. Определим специальные символы для силы и крутящего момента, действующие на соседнее звено: *f<sub>i</sub>* – сила, действующая на *i*-е звено от звена *i* – 1; *n<sub>i</sub>* – крутящий момент, действующий на звено *i* от звена *i* – 1. Отношения можно написать как <sup>*i*</sup>*f* = <sup>*i*</sup>*R*<sub>*i+1*</sub><sup>*i+1*</sup>*f* и <sup>*i*</sup>*n* = <sup>*i*</sup>*R*<sub>*i+1*</sub><sup>*i+1*</sup>*n* + <sup>*i*</sup>*P* × <sup>*i*</sup>*f*. Необходимый крутящий момент для поддержания статического равновесия: <sup>*i*</sup>*τ* = <sup>*i*</sup>*n*<sup>*i+1*</sup>*Z*. Определяем отношения Якоби, которые устанавливают со-

ответствие между силами, действующими на кончики пальцев, в декартовой системе координат и эквивалентными крутящими моментами в сочленениях: *τ* = *J*<sup>*T*</sup>*F*.

**Заключение**

В данной статье представлено исследование сложной инженерной модели манипулятора, установленного на БПЛА, которая задает математические отношения и делает возможным определение движения, силы и момента на каждом звене манипулятора в определенный момент времени и для каждой системы координат. Принцип движения можно определить как задачу ориентированный. Интегральная задача манипулятора, установленного на БПЛА, была разбита на две фазы. Первая фаза заключается в перемещении системы координат кисти относительно системы координат предплечья с целью приблизить манипулятор к объекту, вторая фаза – в параллельном перемещении пальцев

относительно системы координат кисти для выполнения более точных задач, таких как проверка или захват.

#### Библиографические ссылки

1. Korpela C., Orsag M., Pekala M. and Oh P. (2013). Dynamic stability of a mobile manipulating unmanned aerial vehicle - 2013. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe*, pp. 4922-4927. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631280.

2. Jimenez-Cano A. E., Martin J., Heredia G., Ollero A. and Cano R. (2013). Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks - 2013. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe*, pp. 4916-4921. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631279.

3. Cano R., Pérez C., Pruaño F., Ollero A., Heredia G. (2013). Mechanical design of a 6-DOF aerial manipulator for assembling bar structures using UAVs. *RED-UAS*.

4. Bellicoso C. D., Buonocore L. R., Lippiello V. and Siciliano B. (2015). Design, modeling and control of a 5-DoF light-weight robot arm for aerial manipulation – 2015. *23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Torremolinos, pp. 853-858. DOI: 10.1109/MED.2015.7158852.

5. Kondak K. (2014). Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 degrees of freedom industrial manipulator, *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, pp. 2107-2112. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907148.

6. Suarez A., Jimenez-Cano A. E., Vega V. M., Heredia G., Rodríguez-Castaño A. and Ollero A. (2017). Lightweight and human-size dual arm aerial manipulator, *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, FL, USA, pp. 1778-1784. DOI: 10.1109/ICUAS.2017.7991357.

7. Suarez A., Heredia G. and Ollero A. (2016). Lightweight compliant arm with compliant finger for aerial manipulation and inspection, *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, pp. 4449-4454. DOI: 10.1109/IROS.2016.7759655.

8. Suarez A., Heredia G. and Ollero A. (2015). Lightweight compliant arm for aerial manipulation, *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, pp. 1627-1632. DOI: 10.1109/IROS.2015.7353585.

9. Ibrahim I. N. & Al Akkad M. A. (2017). Studying the Disturbances of Robotic Arm Movement in Space Using the Compound-Pendulum Method. *Bulletin of Kalashnikov ISTU*, vol. 20, no. 2, pp. 156-159. ISSN 2413-1172 (online). DOI: <http://dx.doi.org/10.22213/2413-1172-2017-2-156-159>.

10. Ibrahim N. I., Al Akkad M. A. (2017). The Dynamics Model of a Robotic Human like Index Finger. *Proceedings Fifth Forum of Young Researchers. Izhevsk, Kalashnikov ISTU*, pp. 204-218. ISBN 978-5-7526-0753-0.

11. Там же.

12. Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А. Методы управления робототехническими приложениями : учеб. пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2016.

13. Там же.

#### References

1. Korpela C., Orsag M., Pekala M. and Oh P. (2013). Dynamic stability of a mobile manipulating unmanned aerial vehicle - 2013. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe*, pp. 4922-4927. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631280.

2. Jimenez-Cano A. E., Martin J., Heredia G., Ollero A. and Cano R. (2013). Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks - 2013. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe*, pp. 4916-4921. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631279.

3. Cano R., Pérez C., Pruaño F., Ollero A., Heredia G. (2013). Mechanical design of a 6-DOF aerial manipulator for assembling bar structures using UAVs. *RED-UAS*.

4. Bellicoso C. D., Buonocore L. R., Lippiello V. and Siciliano B. (2015). Design, modeling and control of a 5-DoF light-weight robot arm for aerial manipulation – 2015. *23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Torremolinos, pp. 853-858. DOI: 10.1109/MED.2015.7158852.

5. Kondak K. (2014). Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 degrees of freedom industrial manipulator, *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, , pp. 2107-2112. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907148.

6. Suarez A., Jimenez-Cano A. E., Vega V. M., Heredia G., Rodríguez-Castaño A. and Ollero A. (2017). Lightweight and human-size dual arm aerial manipulator, *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, FL, USA, pp. 1778-1784. DOI: 10.1109/ICUAS.2017.7991357.

7. Suarez A., Heredia G. and Ollero A. (2016). Lightweight compliant arm with compliant finger for aerial manipulation and inspection, *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, pp. 4449-4454. DOI: 10.1109/IROS.2016.7759655.

8. Suarez A., Heredia G. and Ollero A. (2015). Lightweight compliant arm for aerial manipulation, *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, pp. 1627-1632. DOI: 10.1109/IROS.2015.7353585.

9. Ibrahim I. N. & Al Akkad M. A. (2017). Studying the Disturbances of Robotic Arm Movement in Space Using the Compound-Pendulum Method. *Bulletin of Kalashnikov ISTU*, vol. 20, no. 2, pp. 156-159. ISSN 2413-1172 (online). DOI: <http://dx.doi.org/10.22213/2413-1172-2017-2-156-159>.

10. Ibrahim N. I., Al Akkad M. A. (2017). The Dynamics Model of a Robotic Human like Index Finger. *Proceedings Fifth Forum of Young Researchers.*

Izhevsk, Kalashnikov ISTU, pp. 204-218. ISBN 978-5-7526-0753-0.

11. Ibid.

12. Borisov O. I., Gromov V. S., Pyrkin A. A. (2016). *Metody upravleniya robototekhnicheskimi*

*prilozheniyami* [Methods of control of robotic applications. allowance]. St. Petersburg: *Universitet ITMO* (in Russ.).

13. Ibid.

Получено 01.02.2018