

УДК 621.86

### Синтез кинематической схемы древовидного исполнительного механизма робота-стегозабра с использованием фотографических изображений скелета его биологического прототипа

Ковальчук А. К.<sup>1</sup>, Каргинов Л. А.<sup>1</sup>,  
Ахметова Ф. Х.<sup>1</sup>, Устюжанин А. Ю.<sup>1</sup>,  
Секерин С. С.<sup>1</sup>, Верейкин А. А.<sup>1,\*</sup>

\* [aautres@gmail.com](mailto:aautres@gmail.com)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Показана актуальность исследований, направленных на разработку методов синтеза сложных пространственных древовидных кинематических структур. Представлены результаты синтеза кинематической схемы древовидного исполнительного механизма робота-стегозабра. Синтез проведён в соответствии с предложенным алгоритмом восстановления кинематической схемы биологического прототипа по фотографическим изображениям его скелета. Показаны основные положения используемого алгоритма. В предположении, что звенья скелета стегозабра являются абсолютно жёсткими и соединены между собой кинематическими парами 5-го класса, построена кинематическая схема исполнительного механизма робота-стегозабра. Полученная кинематическая схема не идентична таковой для биологического прототипа, однако рассмотренный подход позволяет получить варианты кинематической схемы с требуемым приближением к биологическому прототипу, предоставляя разработчику право выбора наиболее приемлемого.

**Ключевые слова:** древовидный исполнительный механизм, система координат Денавита-Хартенберга, кинематическая схема робота, синтез исполнительного механизма робота, биологический прототип, скелет, робот-стегозабра

---

### Введение

При проектировании исполнительных механизмов (ИМ) шагающих роботов (ШР) разработчики стали обращать внимание на созданную природой рычажно-шарнирную систему передвижения человека и животных. Она наиболее приспособлена для передвижения по естественной земной поверхности. Отсутствие сплошной колеи, высокая проходимость и малые энергетические затраты привлекают использование такого способа передвижения в создаваемых ИМ ШР.

Работы ряда авторов [1-6] посвящены вопросам исследования и проектирования ШР. Однако кинематические схемы (КС) рассматриваемых ими ШР отличаются сравнительной простотой и их проектирование не вызывает существенных затруднений. Создаваемые в настоящее время ИМ ШР [7-30] имеют пространственные древовидные кинематические структуры, аналитические методы анализа и синтеза которых недостаточно исследованы. При проектировании их ИМ часто используют созданные природой и развитые в процессе эволюции КС человека и позвоночных животных [7, 9-23, 25, 28, 29]. Однако “вручную” воспроизвести такие КС весьма затруднительно. Поэтому разрабатывают автоматизированные методы синтеза, позволяющие восстановить КС биологического прототипа по фотографическим изображениям его скелета и построить математическую модель ИМ [31, 32]. Процесс получения КС робота по фотографическим изображениям скелета его биологического прототипа с использованием разработанного универсального метода показан на примере стегозабра.

В первом разделе рассмотрен предлагаемый метод восстановления КС, описаны используемые системы координат, показан процесс нахождения координат точек кинематической структуры по фотографическим изображениям. Во втором разделе показано применение метода восстановления КС на примере стегозабра. В качестве результатов представлены КС робота, значения модифицированных параметров Денавита-Хартенберга (Д-Х) и матрица достижимости.

## 1. Метод

Метод [31, 32] основан на совместном использовании алгоритма восстановления КС биологического прототипа по фотографическим изображениям его скелета и модифицированной системы координат Д-Х. Он позволяет в автоматизированном режиме синтезировать различные варианты КС древовидных ИМ ШР с требуемым приближением к биологическому прототипу, предоставляя разработчику право выбора наиболее приемлемого. Полученные в результате расчётов КС и модифицированные параметры Д-Х могут служить основой для дальнейшего проектирования ИМ.

При использовании метода принимаются следующие допущения:

- рассматриваются только степени подвижности, образованные скелетом;
- звенья скелета абсолютно жёсткие и соединены между собой кинематическими парами 5-го класса;
- количество звеньев в восстановленной КС выбирается в соответствии с приоритетами разработчика и может не совпадать с количеством степеней подвижности биологического прототипа.

В соответствии с предложенным методом [31, 32] выполняют следующую последовательность действий:

- получают  $N \geq 2$  фотографических изображений скелета животного. На каждом изображении в поле зрения должен находиться объект, положение которого относительно скелета неизменно, а геометрические характеристики известны;

- составляют граф, определяющий последовательность соединения интересующих звеньев кинематической цепи, их номера и количество;
- на фотографиях отмечают точками геометрические центры сустава и определяют их координаты;
- делают предположения относительно направления осей сочленений, которые восстанавливаются исходя из графа КС и найденных координат центров суставов.

### 1.1. Системы координат

Введём правую декартову систему координат (СК)  $0\bar{x}^K\bar{y}^K\bar{z}^K$ , привязанную к исследуемому объекту и обозначаемую в дальнейшем как  $СК^K$  (рис. 1). Имеющуюся  $i$ -ю фотографию ( $i \in 1..N$ ) можно виртуально расположить в пространстве так, чтобы линии, соответственно соединяющие любые две оригинальные точки пространства с их проекциями на фотографии, всегда проходили через одну и ту же точку пространства. Плоскость, расположенную параллельно размещённой так фотографии, и проходящую через точку  $0$   $СК^K$ , назовём фотографической плоскостью (ФП) (рис. 2). Свяжем с ней правую декартову СК  $0\bar{x}^\Phi\bar{y}^\Phi\bar{z}^\Phi$ , которую обозначим как  $СК^\Phi$ ; оси  $0\bar{x}^\Phi$  и  $0\bar{y}^\Phi$  принадлежат ФП (рис. 1). Фотографии, как правило, прямоугольные, поэтому, не теряя общности, положим, что оси  $0\bar{x}^\Phi$  и  $0\bar{y}^\Phi$  параллельны сторонам фотографии.

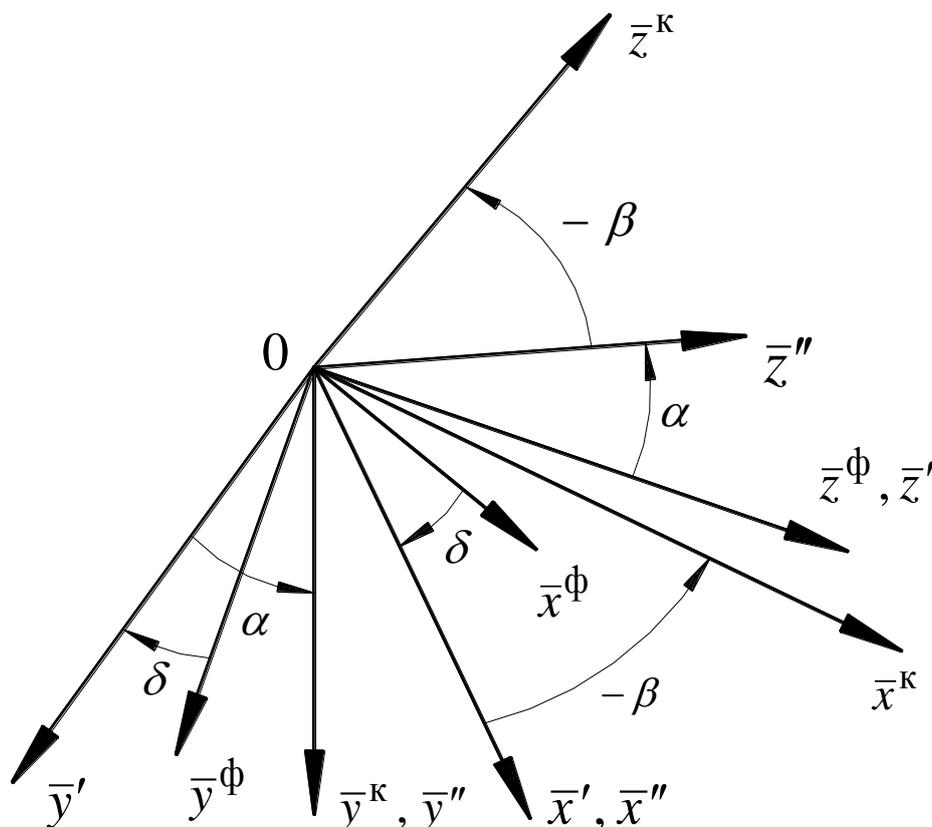


Рис. 1. Связь  $СК^K$  с  $СК^\Phi$

Совмещение  $СК^\Phi$  и  $СК^K$  осуществим тремя последовательными поворотами: поворотом  $СК^\Phi$  вокруг оси  $\bar{z}^\Phi$  на угол  $\delta$ , поворотом  $СК\ 0x'y'z'$  вокруг оси  $\bar{x}'$  на угол  $\alpha$  и поворотом  $СК\ 0x''y''z''$  вокруг оси  $\bar{y}''$  на угол  $\beta$  до совмещения всех осей с осями  $СК^K$  (рис. 1). В результате, получаем матрицу поворота  $R$ :

$$R = R'''R''R' = \begin{pmatrix} c(\delta)c(\beta) + s(\delta)s(\alpha)s(\beta) & -s(\delta)c(\beta) + c(\delta)s(\alpha)s(\beta) & -c(\alpha)s(\beta) \\ s(\delta)c(\alpha) & c(\delta)c(\alpha) & s(\alpha) \\ c(\delta)s(\beta) - s(\delta)s(\alpha)c(\beta) & -s(\delta)s(\beta) - c(\delta)s(\alpha)c(\beta) & c(\alpha)c(\beta) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $c \equiv \cos$ ,  $s \equiv \sin$ .

Тогда

$$X^K = RX^\Phi, \quad (2)$$

где  $X^K$  – координаты некоторой точки в  $СК^K$ ,  $X^\Phi$  – её координаты в  $СК^\Phi$ .

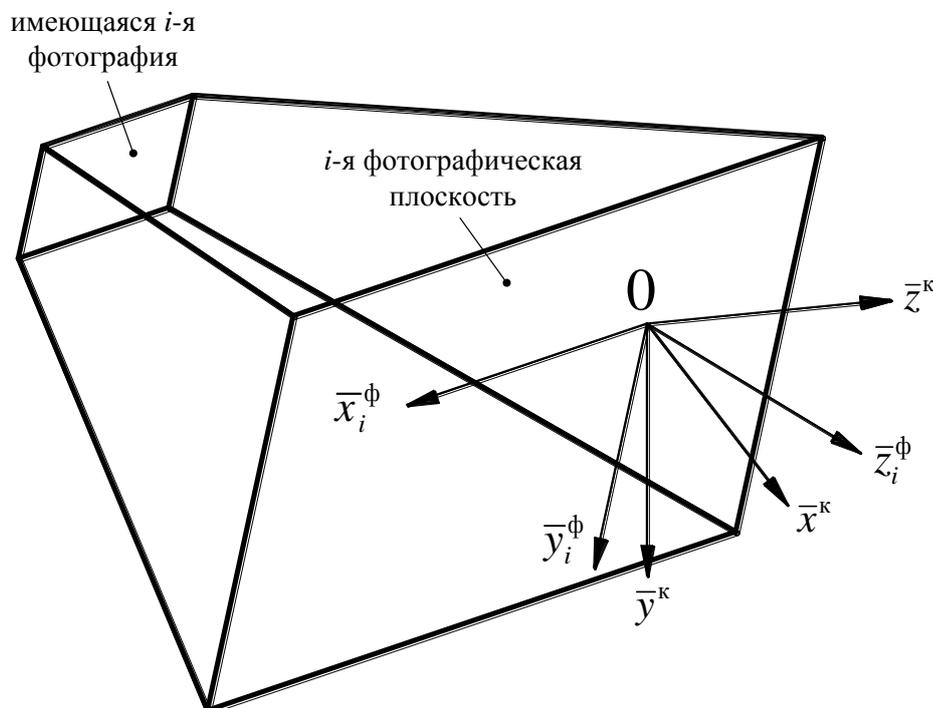


Рис. 2.  $i$ -я фотографическая плоскость, орты  $СК^\Phi$  и  $СК^K$

## 1.2. Определение координат характерных точек кинематической структуры по фотографическим изображениям

Пусть в пространстве имеется некоторая точка  $F$ , для которой известно её отображение на  $i$ -ю фотографию ( $i \in 1..N$ ). На рис. 3  $l_{xi}$ ,  $l_{yi}$  – расстояние от геометрического центра  $i$ -ой фотографии до её края вдоль осей  $\bar{x}_i^{\Phi B}$  и  $\bar{y}_i^{\Phi B}$  соответственно;  $x_{ци}^B$ ,  $y_{ци}^B$  – координаты геометрического центра фотографии в  $СК\ 0\bar{x}_i^{\Phi B}\bar{y}_i^{\Phi B}$ .  $O_i^B$  и  $F_{Vi}$  – проекции точек  $O$  и  $F$  на фотографию соответственно. Необходимо определить координаты точки  $F$  в  $СК^K$ .

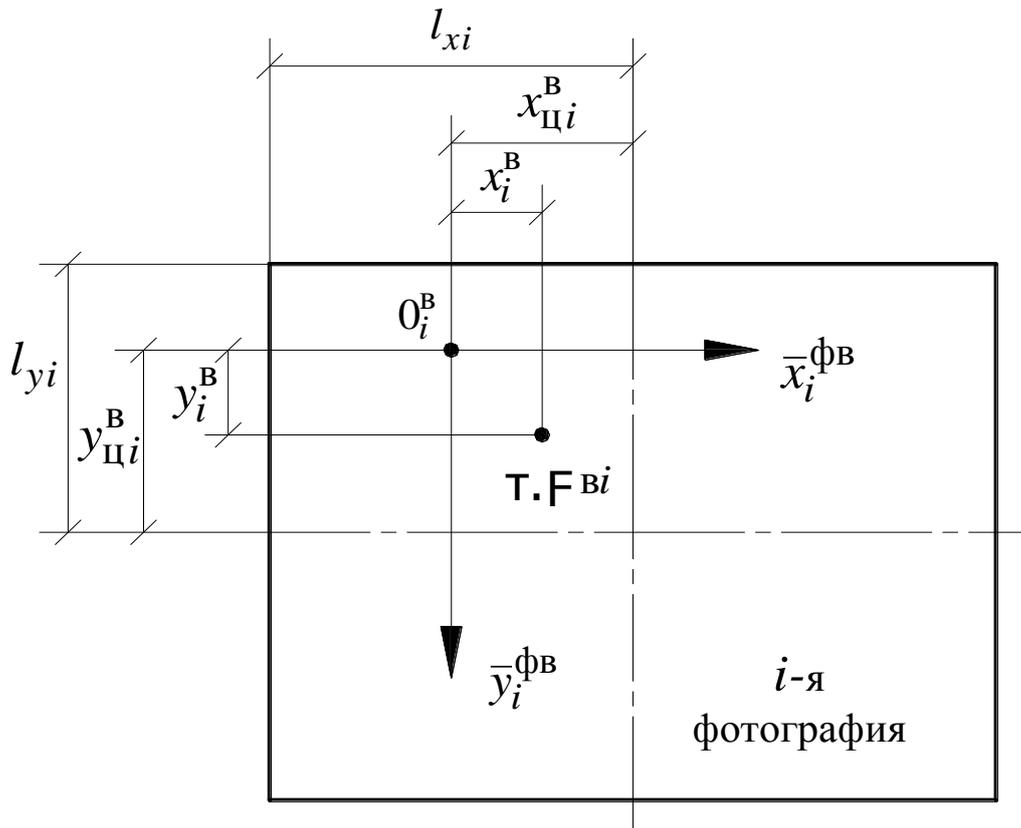


Рис. 3. Проекция на  $i$ -ю фотографию точек  $\mathbf{0}$  и  $\mathbf{F}$ , осей  $\bar{x}_i$  и  $\bar{y}_i$

На рис. 4 изображена проекция  $i$ -ой фотографии, ФП и точки  $\mathbf{F}$  на плоскость, содержащую ось  $\bar{x}_i^\Phi$  и перпендикулярную ФП. В соответствии с рис. 4

$$x_i^\Phi = x_i^B m_i - z_i^\Phi \operatorname{tg}(\gamma_i);$$

$$\operatorname{tg}(\gamma_i) = \frac{(x_{Цi}^B - x_i^B)(m_i - 1)}{z_{mi}},$$

где  $z_{mi}$  – расстояние между  $i$ -ми ФП и фотографией.

Принимая, что

$$\tilde{\gamma}_i \triangleq \frac{(m_i - 1)}{z_{mi}}, \quad (3)$$

получим

$$x_i^\Phi = x_i^B m_i + z_i^\Phi (-x_{Цi}^B + x_i^B) \tilde{\gamma}_i. \quad (4)$$

Аналогично

$$y_i^\Phi = y_i^B m_i + z_i^\Phi (-y_{Цi}^B + y_i^B) \tilde{\gamma}_i. \quad (5)$$

Объединив формулы (4) и (5), получим матрицу  $\mathbf{M}_i$ , позволяющую связать координаты точки  $(x_i^B, y_i^B, z_i^\Phi)^T$  с её координатами в СК фотографии  $\mathbf{X}^\Phi \triangleq (x_i^\Phi, y_i^\Phi, z_i^\Phi)^T$ :

$$\mathbf{M}_i = \begin{pmatrix} m_i & 0 & (-x_{Цi}^B + x_i^B) \tilde{\gamma}_i \\ 0 & m_i & (-y_{Цi}^B + y_i^B) \tilde{\gamma}_i \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $m_i$  – коэффициент масштаба.

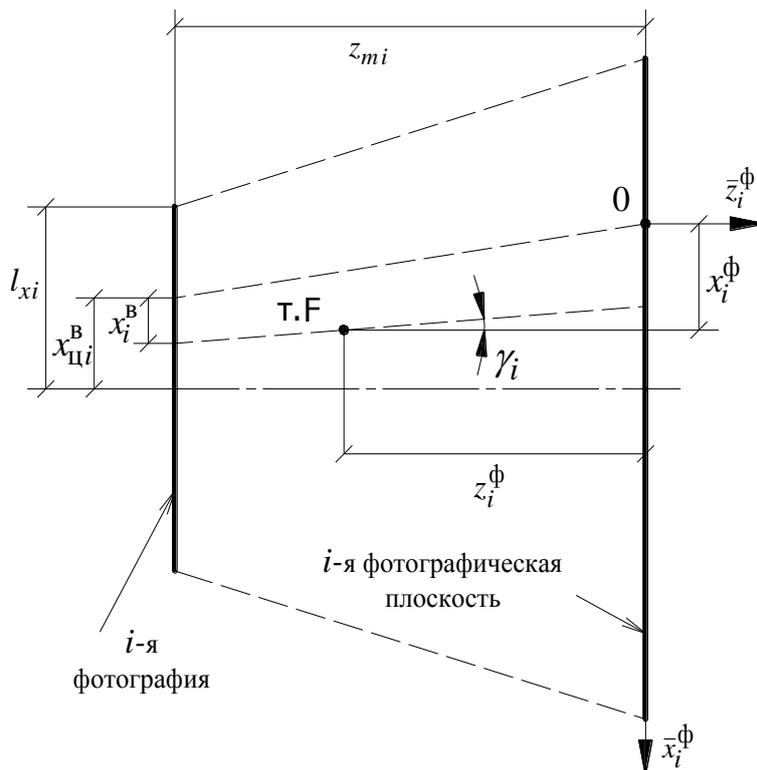


Рис. 4. Связь координаты  $x^Ф$  точки F в СК<sup>Ф</sup> и видимой координаты  $x^B$  этой же точки

Для  $i$ -й фотографии расстояние между отображениями точек на ФП получается при умножении расстояния между отображениями этих же точек на фотографии на  $m_i$  (пунктирные линии, проходящие через точки  $\mathbf{0}$  и  $\mathbf{F}$  на рис. 4). Согласно (6):

$$M_i = M_i(x_i^B, y_i^B);$$

$$X_i^Ф = M_i \cdot (x_i^B, y_i^B, z_i^Ф)^T. \quad (7)$$

В соответствии с (2) и (7), с учётом того, что из (1) следует  $R_i \triangleq R(\alpha_i, \beta_i, \delta_i)$ , получим соотношение

$$\begin{pmatrix} x^K \\ y^K \\ z^K \end{pmatrix} = R(\alpha_i, \beta_i, \delta_i) \cdot M(x_i^B, y_i^B, \tilde{\gamma}_i, m_i) \cdot \begin{pmatrix} x_i^B \\ y_i^B \\ z_i^B \end{pmatrix}, i = 1..N, \quad (8)$$

где  $X^K \triangleq (x^K, y^K, z^K)^T$  – координаты точки F в СК<sup>K</sup>.

Пусть известны параметры  $m_i, \tilde{\gamma}_i, \alpha_i, \beta_i, \delta_i$ . Тогда из (8) для каждой  $i$ -й фотографии получаем систему из двух линейных алгебраических уравнений относительно  $X^K$ :

$$\begin{pmatrix} x_i^B \\ y_i^B \\ x_i^B \end{pmatrix} = \underbrace{[M_i^{-1}(x_i^B, y_i^B, \tilde{\gamma}_i, m_i)]_{1,2 \text{ стр.}}}_{A_i} \cdot R_i^T(\alpha_i, \beta_i, \delta_i) \cdot \begin{pmatrix} x^K \\ y^K \\ z^K \end{pmatrix}; \quad (9)$$

здесь нижний индекс “1, 2 стр.” обозначает первую и вторую строки матрицы  $M$ .

Для определения  $\mathbf{X}^K$  необходимо как минимум две таких системы. Используя  $N \geq 2$  фотографий, имеем в силу (9) следующую систему уравнений вида  $\mathbf{X}_i^B = \mathbf{A}_i \mathbf{X}^K$ :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{X}_1^B \\ \mathbf{X}_2^B \\ \dots \\ \mathbf{X}_N^B \end{pmatrix}}_{\mathbf{X}^B} = \underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \dots \\ \mathbf{A}_N \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{X}^K. \quad (10)$$

Поскольку получающаяся система линейных алгебраических уравнений (10) избыточна, используем метод наименьших квадратов, увеличиваем точность и решаем следующую систему относительно  $\mathbf{X}^K$ :

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{X}^K = \mathbf{A}^T \mathbf{X}^B \quad (11)$$

Для каждой  $i$ -ой фотографии необходимо определить параметры  $\mathbf{m}_i, \tilde{\gamma}_i, \alpha_i, \beta_i, \delta_i$ . Это можно сделать, используя систему уравнений (9) для тех точек, у которых наряду с видимыми координатами  $\mathbf{X}^B$  известны координаты  $\mathbf{X}^K$ . В итоге получаем нелинейную систему уравнений относительно искомых параметров. Если таких точек меньше трёх, можно дополнительно воспользоваться информацией о наклоне проекций осей  $\mathbf{СК}^K$  на  $i$ -ю фотографическую плоскость относительно осей, связанных с ней  $\mathbf{СК}^\Phi$ .

Последнее требует пояснения. Система координат – понятие математическое, фотография – отражает физические объекты. Решение проблемы “материализации осей СК” состоит в том, чтобы орты  $\mathbf{СК}^K$  находились на рёбрах подходящего физического объекта, например, куба, неподвижного относительно точки  $\mathbf{F}$  и находящегося в поле зрения при фотосъёмке. Например, опишем ось  $\overline{\mathbf{OX}} \mathbf{СК}^K$  через обобщённую координату  $\mathbf{q}$ :

$$\mathbf{x}^K = \mathbf{q}; \mathbf{y}^K = \mathbf{0}; \mathbf{z}^K = \mathbf{0}. \quad (12)$$

Кроме того, для этой оси из  $i$ -й фотографии известно

$$\mathbf{y}_i^B = \mathbf{k}_{xi} \mathbf{x}_i^B. \quad (13)$$

Запишем в соответствии с (8)

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}_i^B, \mathbf{y}_i^B, \tilde{\gamma}_i, \mathbf{m}_i) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{x}_i^B \\ \mathbf{y}_i^B \\ \mathbf{z}_i^B \end{pmatrix} = \mathbf{R}_i^T(\alpha_i, \beta_i, \delta_i) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{x}^K \\ \mathbf{y}^K \\ \mathbf{z}^K \end{pmatrix}, i = 1..N; \quad (14)$$

согласно (14), (6), (12), (1) получим

$$\mathbf{k}_{xi} \mathbf{R}_{i11}^T - \mathbf{R}_{i21}^T + \tilde{\gamma}_i \mathbf{R}_{i31}^T (\mathbf{k}_{xi} \mathbf{x}_{\square i}^B - \mathbf{y}_{\square i}^B). \quad (15)$$

Возмем в (15) выражения для соответствующих элементов  $\mathbf{R}_i^T$  из (1), имеем

$$\begin{aligned} & \mathbf{k}_{xi} (c(\delta_i) c(\beta_i) + s(\delta_i) s(\alpha_i) s(\beta_i)) + (s(\delta_i) c(\beta_i) - c(\delta_i) s(\alpha_i) s(\beta_i)) - \\ & - \tilde{\gamma}_i c(\alpha_i) s(\beta_i) (\mathbf{k}_{xi} \mathbf{x}_{\square i}^B - \mathbf{y}_{\square i}^B) = \mathbf{0}; \end{aligned} \quad (16)$$

окончательно получим уравнения относительно неизвестных  $\tilde{\gamma}_i, \alpha_i, \beta_i, \delta_i$ .

Среди них не присутствует  $\mathbf{m}_i$ , поскольку при изменении масштаба наклоны осей сохраняются.

Аналогично получаем уравнения для осей  $\overline{\mathbf{Oy}}$  и  $\overline{\mathbf{Oz}}$ :

$$k_{yi}s(\delta_i)c(\alpha_i) - c(\delta_i)c(\alpha_i) + \tilde{\gamma}_i s(\alpha_i)(k_{yi}x_{\Pi i}^B - y_{\Pi i}^B) = 0; \quad (17)$$

$$k_{zi}(c(\delta_i)s(\beta_i) - s(\delta_i)s(\alpha_i)c(\beta_i)) + s(\delta_i)s(\beta_i) + c(\delta_i)s(\alpha_i)c(\beta_i) + \tilde{\gamma}_i c(\alpha_i)s(\beta_i)(k_{zi}x_{\Pi i}^B - y_{\Pi i}^B) = 0. \quad (18)$$

Далее получаем решение полученной системы линейных уравнений численными методами, используя встроенный инструментальный программный комплекс MATLAB.

## 2. Результат

Для синтеза КС робота-стегозабра воспользуемся методикой, изложенной в [31, 32]. Для этого сделаем  $N = 3$  фотографии макета скелета стегозабра, выполненного в масштабе 1:32. Фотографирование происходило с различных ракурсов с целью получения значений параметров скелета в трёхмерном пространстве. На каждой фотографии в поле зрения присутствует предмет (куб) со стороной 40 мм, положение которого неизменно в ходе съёмки. На фотографиях, представленных на рис. 5, 6 и 7, была проведена отметка точками геометрических центров суставов. Количество точек на скелете, выбираемых для отметки центров суставов, определяется разработчиком, исходя из требуемой степени приближения получаемой КС к её биологическому прототипу.

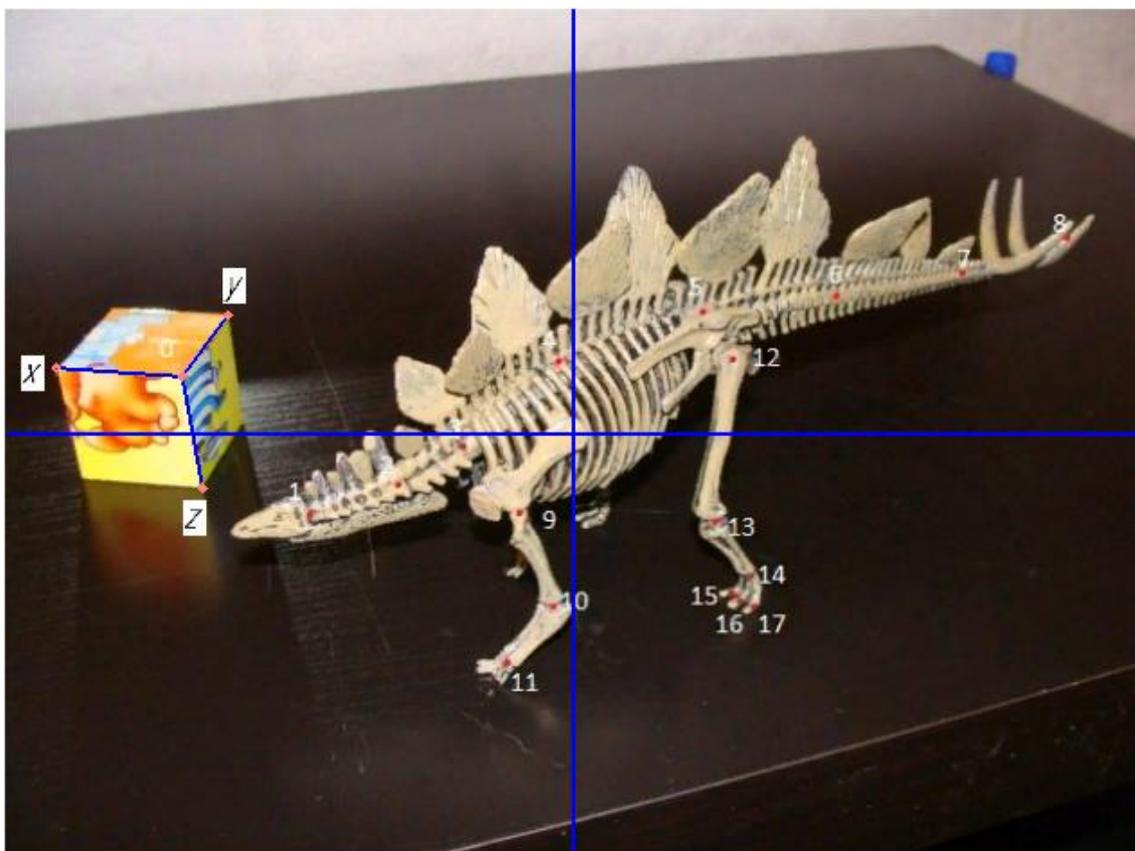


Рис. 5. Фотография 1 скелета стегозабра

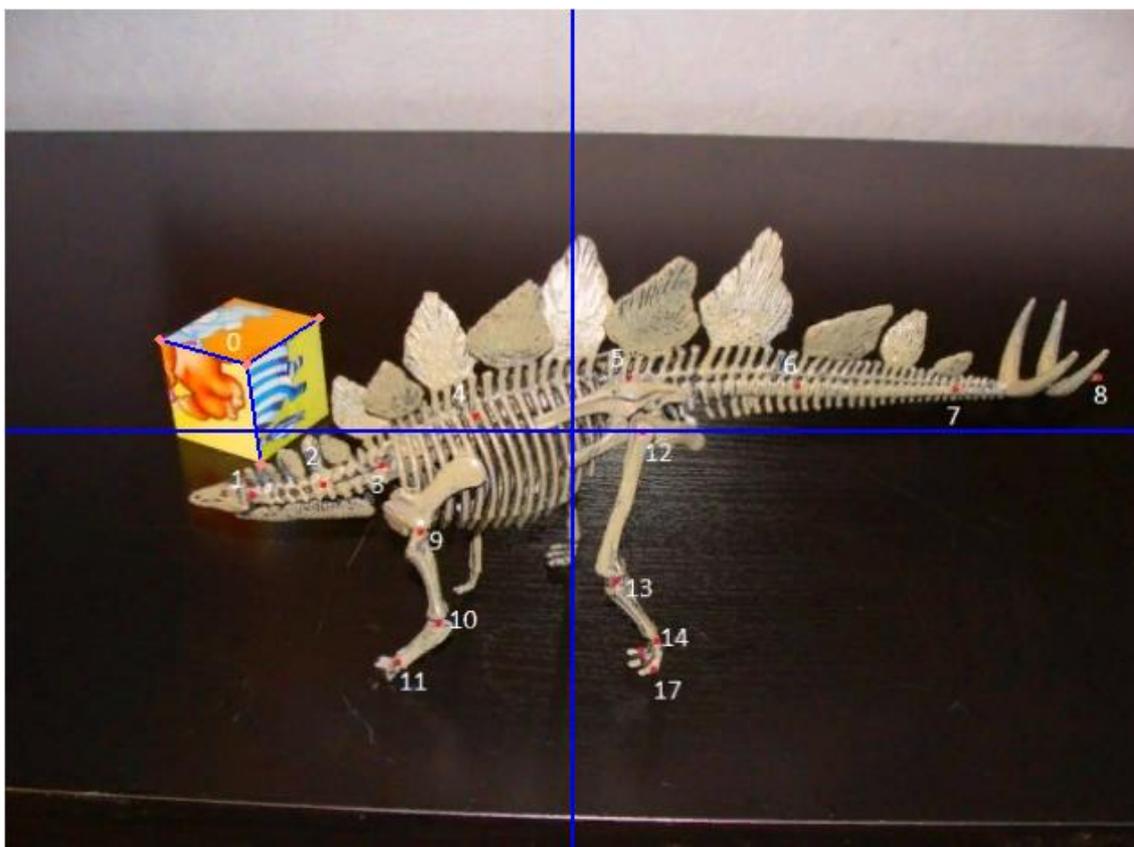


Рис. 6. Фотография 2 скелета стегозавра

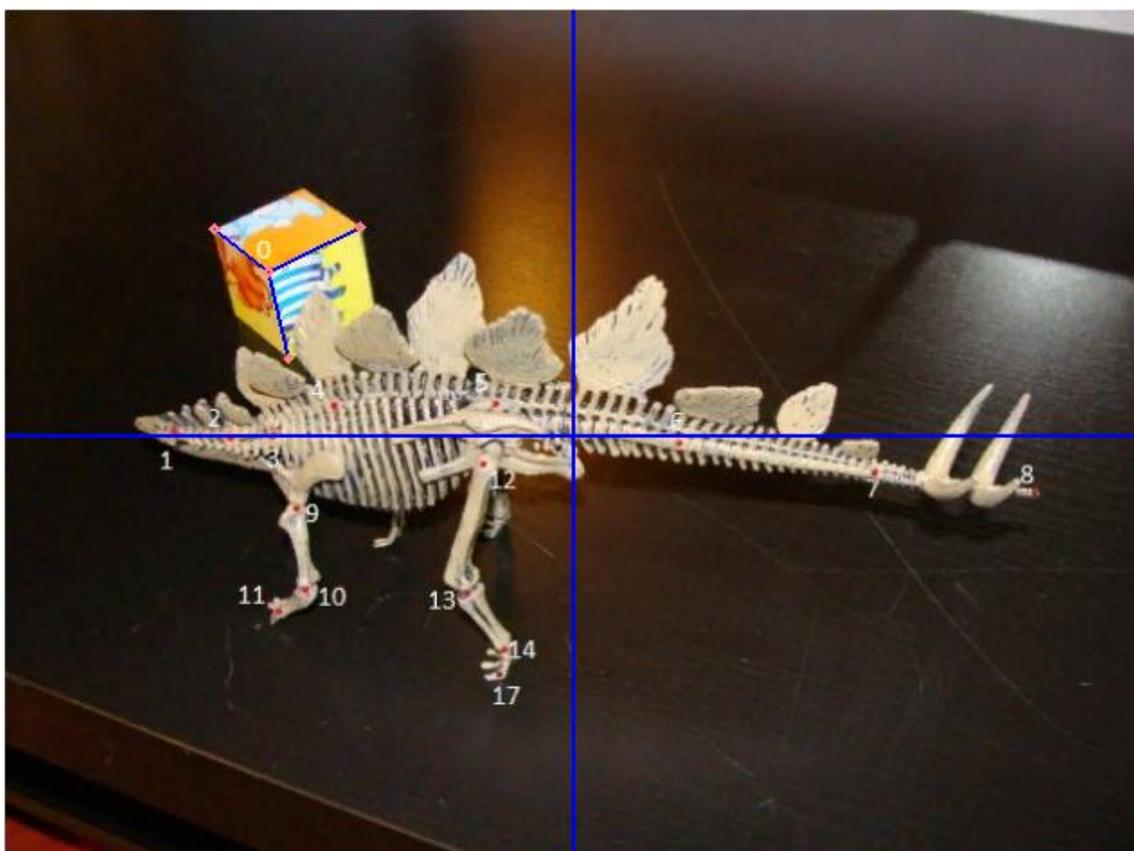


Рис. 7. Фотография 3 скелета стегозавра

В таблице 1 приведены полученные значения координат центров выбранных семнадцати суставов  ${}^B x_j^i, {}^B y_j^i$ , где  $i$  – номер фотографии,  $j$  – номер точки-центра сочленения. Координаты приведены в пикселях: определялось положение курсора при его наведении на исследуемую точку (открытие электронной фотографии происходило в программе Microsoft Paint). Прочерки в таблице соответствуют отсутствию информации, когда на соответствующей фотографии такого сочленения не видно.

**Таблица 1.** Значения координат точек-центров суставов скелета

$j$	$x_1$ , [пиксель]	$y_1$ , [пиксель]	$x_2$ , [пиксель]	$y_2$ , [пиксель]	$x_3$ , [пиксель]	$y_3$ , [пиксель]
1	171	285	138	275	95	237
2	221	268	179	269	127	241
3	257	246	212	259	151	240
4	311	199	265	231	183	222
5	392	171	351	208	276	222
6	466	161	445	214	379	243
7	538	149	535	216	489	260
8	597	129	616	209	579	272
9	289	285	234	297	164	281
10	308	338	245	349	168	327
11	281	370	221	370	154	339
12	409	198	359	239	269	256
13	398	289	343	324	261	328
14	419	320	366	359	281	361
15	–	–	–	–	–	–
16	–	–	–	–	–	–
17	421	338	358	370	275	375

В таблице 2 представлены значения координат точек, используемых для определения взаимной ориентации систем координат СК<sup>К</sup> и СК<sup>Ф</sup>.

**Таблица 2.** Значения координат точек, используемых для определения взаимной ориентации СК<sup>К</sup> и СК<sup>Ф</sup>

Координаты точек (x;y;z)	Фотография 1		Фотография 2		Фотография 3	
	${}^B x$	${}^B y$	${}^B x$	${}^B y$	${}^B x$	${}^B y$
(0;0;0)	100	208	136	201	149	148
(40;0;0)	29	203	88	188	118	124
(0;0;40)	110	269	144	258	160	197
(0;40;0)	125	172	175	176	200	123

Для анализа полученных результатов в программном комплексе MATLAB разработана программа, вычисляющая в соответствии с [31, 32] значения параметров преобразования  $\delta, \beta, \alpha, \gamma, \mu$  и координаты точек сочленений скелета в пространстве. Эти данные представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Значения параметров преобразования  $\delta, \beta, \alpha, \gamma, \mu$

№ фотографии	$\delta$	$\beta$	$\alpha$	$\gamma$	$\mu$
1	1.0580	1.9066	-0.7457	0.0052	1.7489
2	2.1830	-0.8936	0.7146	0.0003	1.7624
3	1.8094	-1.5460	-0.1450	-0.0104	2.2479

Таблица 4. Значения координат центров сочленений скелета в СК<sup>К</sup> и СК<sup>Ф</sup>

№ сочленения	$x^c$ , [мм]	$y^c$ , [мм]	$z^c$ , [мм]
1	105.2	125	39
2	101.1	111.4	42.7
3	98.5	101.1	42.7
4	94.98	85.8	35.4
5	86.2	56.7	15.3
6	81.5	50.4	2.3
7	79.5	51.2	-4.1
8	78.9	53.5	-7.7
9	92.9	92.6	33.9
10	90.5	89.9	26.4
11	91.3	93.6	25.4
12	84.7	61.4	17.4
13	85.6	71.3	19.6
14	84.9	71.2	16
15	–	–	–
16	–	–	–
17	84.7	72.4	16.4

На рис. 8 представлена восстановленная на основании полученных результатов кинематическая схема скелета стегозабра, дополненная шестью фиктивными кинематическими парами (три поступательных и три вращательных), характеризующими положение и ориентацию стегозабра в абсолютной системе координат.

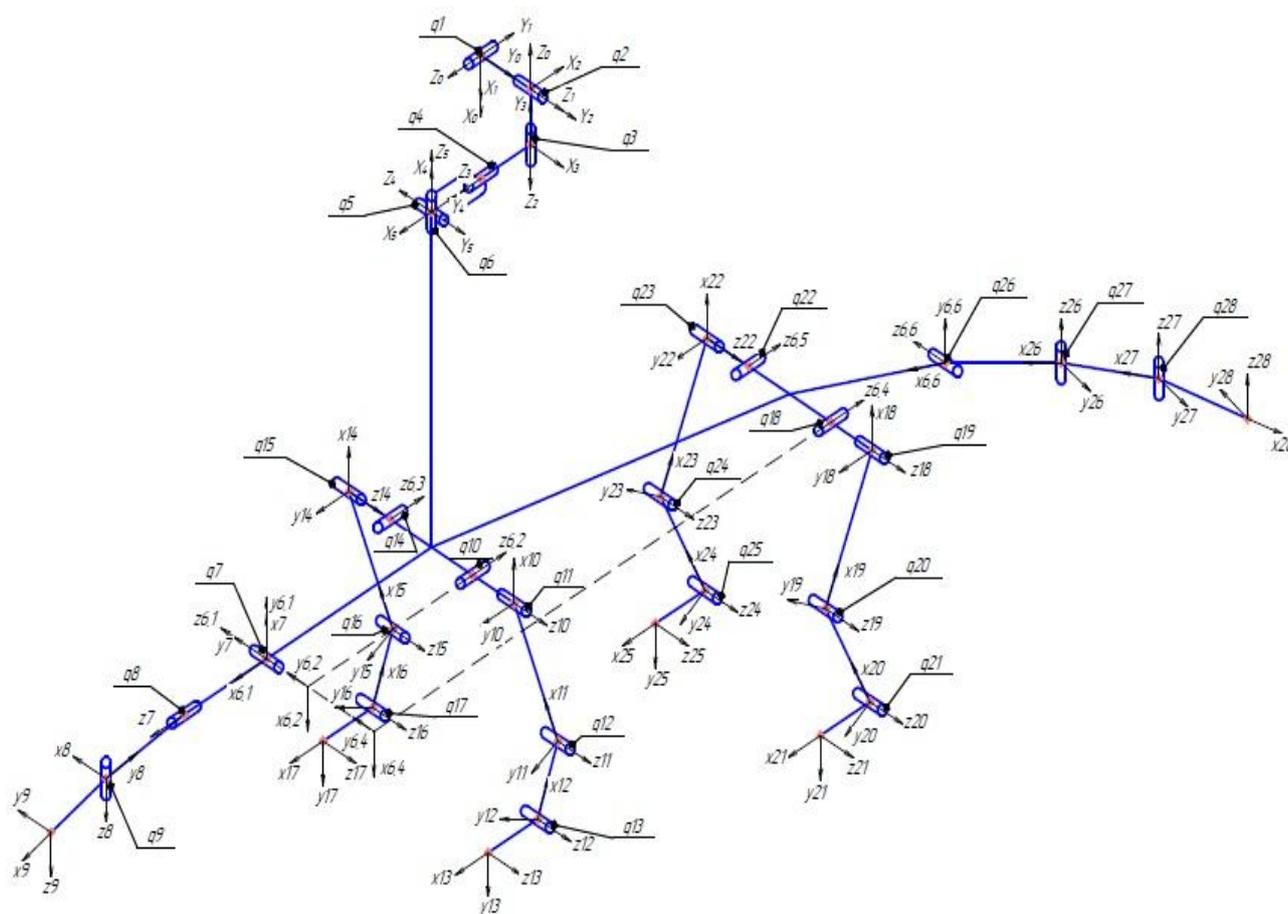


Рис. 8. Кинематическая схема скелета стегозабра

**Примечание:** оси  $x_{6,3}$ ,  $y_{6,3}$ ,  $x_{6,5}$ ,  $y_{6,5}$  не показаны. Начала соответствующих систем координат расположены симметрично относительно плоскости, проходящей через центры сочленений  $q_7$ ,  $q_6$ ,  $q_{26}$  и начала осей  $y_{6,2}$ ,  $x_{6,2}$ ,  $y_{6,4}$ ,  $x_{6,4}$ .

Определены значения модифицированных параметров Д-Х для основных и вспомогательных систем координат (таблицы 5, 6).

В таблице 7 представлены значения элементов матрицы  $D$  ( $28 \times 28$ ), которая характеризует кинематическую структуру ИМ робота-стегозабра, каждый элемент которой  $d_{ij} = 1$ , если звено  $i$  достижимо из звена  $j$ , и  $d_{ij} = 0$ , если звено  $i$  не достижимо из звена  $j$ .

**Таблица 5.** Значения модифицированных параметров Д-Х для основных систем координат

№	$\theta$ , [град]	$d$ , [мм]	$a$ , [мм]	$\alpha$ , [рад]	$f(i)$	$ns(i)$
1	0	0	0	$-\pi/2$	0	1
2	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$	1	1
3	$\pi/2$	0	0	$-\pi/2$	2	1
4	$\pi/2$	0	0	$-\pi/2$	3	1
5	$-\pi/2$	0	0	$-\pi/2$	4	1
6	0	0	0	$\pi/2$	5	1
7	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$	6	1
8	$\pi/2$	25	0	$-\pi/2$	7	1
9	$-\pi/2$	0	10	0	8	1
10	$\pi$	17.3	0	$-\pi/2$	6	2
11	$\pi/2$	0	-8	0	10	1
12	$-\pi/2$	0	-4	0	11	1
13	$3\pi/4$	0	10	0	12	1
14	$\pi$	17.3	0	$-\pi/2$	6	3
15	$\pi/2$	0	-8	0	14	1
16	$-\pi/2$	0	-4	0	15	1
17	$3\pi/4$	0	10	0	16	1
18	$\pi$	53.5	0	$-\pi/2$	6	4
19	$-\pi/4$	0	-10	0	18	1
20	$\pi/2$	0	-4	0	19	1
21	$\pi/2$	0	1.5	0	20	1
22	$\pi$	53.5	0	$-\pi/2$	6	5
23	$-\pi/4$	0	-10	0	22	1
24	$\pi/2$	0	-4	0	23	1
25	$\pi/2$	0	1.5	0	24	1
26	0	0	-6.7	$-\pi/2$	6	6
27	0	0	-4.3	0	26	1
28	$\pi$	0	10	0	27	1

**Таблица 6.** Значения модифицированных параметров Д-Х для вспомогательных систем координат

№	$\theta$ , [рад]	$d$ , [мм]	$a$ , [мм]	$\alpha$ , [рад]	$N_i$	$N_k$
6.2	$-\pi/2$	-2	5	$\pi/2$	6	2
6.3	$\pi/2$	2	5	$\pi/2$	6	3
6.4	$\pi/2$	-2.5	-1.5	$\pi/2$	6	4
6.5	$\pi/2$	2.5	-1.5	$\pi/2$	6	5
6.6	0	0	-53.5	0	6	6



скелетов их биологических прототипов. Дальнейшие исследования направлены на создание универсального программного обеспечения, способного восстановить КС любой сложности с учётом предложенных допущений.

### Список литературы

1. Gurfinkel V.S., Gurfinkel E.V., Shneider A.Yu., Devianin E.A., Lensky A.V., Shtilman L.G. Walking Robot with Supervisory Control // Mechanism and Machine Theory. 1981. Vol. 16, no. 1. P. 31-36. DOI: [10.1016/0094-114X\(81\)90047-1](https://doi.org/10.1016/0094-114X(81)90047-1)
2. Девянин Е.А., Карташев В.А., Ленский А.В., Шнейдер А.Ю. Силовая обратная связь в системе управления шагающего аппарата // Исследование робототехнических систем: сб. ст. М.: Наука, 1982. С. 147-159.
3. Devianin E.A., Gurfinkel V.S., Gurfinkel E.V., Kartashev V.A., Lensky A.V., Shneider A.Yu., Shtilman L.G. The Six-legged Walking Robot Capable of Terrain Adaption // Mechanism and Machine Theory. 1983. Vol. 18, no. 4. P. 257-260. DOI: [10.1016/0094114X\(83\)90114-3](https://doi.org/10.1016/0094114X(83)90114-3)
4. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. 312 с.
5. Okhotsimsky D.E., Platonov A.A., Cirilchenko A.A., Lapshin V.V. Walking machines // Advanced in Mechanics. 1992. Vol. 15, no. 1-2. P. 39-70.
6. Лапшин В.В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата // Известия РАН. Механика твёрдого тела. 1993. № 1. С. 38-43.
7. Vukobratovic M. Active exoskeletal systems and beginning of the development of humanoid robotics // In: Monograph of ANS: Academy of Nonlinear Sciences. Advances in Nonlinear Sciences II – Sciences and Applications. Vol. 2. Belgrade, 2008. P. 329-348.
8. Аустен Я., Формальский А.М., Шевальеро К. Виртуальный четырёхногий робот: конструкция, управление, моделирование, эксперименты // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11, № 8. С. 5-28.
9. Aoustin Y., Formalskii A.M. 3D Walking Biped: Optimal Swing of the Arms // Multibody System Dynamics. 2013. Vol. 32, no. 1. P. 55-66. DOI: [10.1007/s11044-013-9378-3](https://doi.org/10.1007/s11044-013-9378-3)
10. Лавровский Э.К., Письменная Е.В. О регулярной ходьбе экзоскелетона нижних конечностей при дефиците управляющих воздействий // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18, № 2. С. 208-225
11. Аведиков Г.Е., Жмакин С.И., Ибрагимов В.С., Иванов А.В., Кобрин А.И., Комаров П.А., Костенко А.А., Кузнецов А.С., Кузмичев А.В., Лавровский Э.К., Мартыненко Ю.Г., Митрофанов И.Е., Письменная Е.В., Формальский А.М. Экзоскелет: конструкция, управление // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 (Москва, 16-19 июня 2014 г.): тр. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 84-90.

12. Kazerooni H., Steger R. The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton // ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control. 2006. Vol. 128, iss. 1. P. 14-25. DOI: [10.1115/1.2168164](https://doi.org/10.1115/1.2168164)
13. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) // The International Journal of Robotics Research. 2006. Vol. 25, no. 5-6. P. 561-573. DOI: [10.1177/0278364906065505](https://doi.org/10.1177/0278364906065505)
14. Sankai Y. HAL: Hybrid Assistive Limb based on Cybernics. COE Cybernics, System and Information Engineering, University of Tsukuba, Japan // Sankai Laboratory. Cybernics Group: website. Режим доступа: [http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/sonota/ISSR\\_Sankai.pdf](http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/sonota/ISSR_Sankai.pdf) (дата обращения 28.01.2015).
15. Hanlon M. Raytheon XOS 2: Second-Generation Exoskeleton. Robotics Suit, United States of America // gizmag: website. Режим доступа: [www.gizmag.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479](http://www.gizmag.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479) (дата обращения 28.01.2015).
16. Rixen D. Biped Robot Johnnie // Institute of Applied Mechanics at the Technical University of Munich: website. Режим доступа: <http://www.amm.mw.tum.de/en/research/current-projects/humanoid-robots/johnnie/> (дата обращения 28.01.2015).
17. BigDog - The Most Advanced Rough-Terrain Robot on Earth // Boston Dynamics: website. Режим доступа: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_bigdog.html](http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html) (дата обращения 28.01.2015).
18. LS3 – Legged Squad Support Systems // Boston Dynamics: website. Режим доступа: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_ls3.html](http://www.bostondynamics.com/robot_ls3.html) (дата обращения 28.01.2015).
19. CHEETAH - Fastest Legged Robot // Boston Dynamics: website. Режим доступа: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_cheetah.html](http://www.bostondynamics.com/robot_cheetah.html) (дата обращения 28.01.2015).
20. ASIMO by Honda: website. Режим доступа: <http://asimo.honda.com> (дата обращения 28.01.2015).
21. Atlas – The Agile Anthropomorphic Robot // Boston Dynamics: website. Режим доступа: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_Atlas.html](http://www.bostondynamics.com/robot_Atlas.html) (дата обращения 28.01.2015).
22. Ковальчук А.К. Выбор кинематической структуры и исследование древовидного исполнительного механизма робота-собаки // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 8. С. 65-73.
23. Ковальчук А.К. Выбор кинематической структуры и исследование динамики древовидного исполнительного механизма робота-краба // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 7. С. 73-79.
24. Ковальчук А.К., Семенов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Д.Б., Верейкин А.А., Яроц В.В. Выбор кинематической структуры и исследование динамики древовидного исполнительного механизма робота-треножника // Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 10. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/654481.html> (дата обращения 01.04.2015).

25. Ковальчук А.К. Проектирование исполнительного механизма антропоморфного шагающего робота // Естественные и технические науки. 2014. № 2 (70). С. 162-166.
26. Ковальчук А.К., Ромашко А.М., Верейкин А.А., Каргинов Л.А., Малякина Е.А., Статива В.А. Кинематический и динамический анализ исполнительного механизма шестиногого шагающего робота // XIV Международная научно-практическая конференция “Современное состояние естественных и технических наук” (14.03.2014): матер. М.: "Спутник +", 2014. С. 60-79.
27. Ковальчук А.К., Ромашко А.М., Верейкин А.А., Каргинов Л.А., Малякина Е.А., Статива В.А. Определение моментов в сочленениях шестиногого шагающего робота // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 3-1. С. 78-85.
28. 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. Электронный журнал. 2014. №7. С. 72-93. DOI: [10.7463/0714.0717676](https://doi.org/10.7463/0714.0717676)
29. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Каргинов Л.А. Исследование динамики исполнительного механизма экзоскелета нижних конечностей с учётом реакций опорной поверхности // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2014. № 12. С. 256-278. DOI: [10.7463/1214.0745388](https://doi.org/10.7463/1214.0745388)
30. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г., Серов В.А., Мироненко К.Б., Устинов С.А. Отработка методов удалённого управления движением шагающего робота “Ортоног” // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 153-160.
31. Пупков К.А., Ковальчук А.К., Кулаков Б.Б. Использование биологических прототипов при построении кинематических схем современных шагающих роботов // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2009. № 4. С. 44-54.
32. Pupkov K.A., Kovalchuk A.K., Kulakov B.B. Usage of Biological Prototypes for Kinematical Scheme Construction of Modern Robots // Preprints of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. 3-5 June 2009. Moscow, 2009. P. 1829-1834.

## **Tree-like Robot-stegosaurus Actuator Kinematic Scheme Synthesis Using Photographic Images of its Biological Prototype Skeleton**

A.K. Kovalchuk<sup>1</sup>, L.A. Karginov<sup>1</sup>,  
F. Kh. Akhmetova<sup>1</sup>, A.Yu. Ustjuzhanin<sup>1</sup>,  
S.S. Sekerin<sup>1</sup>, A. A. Vereikin<sup>1,\*</sup>

\* [aautres@gmail.com](mailto:aautres@gmail.com)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** tree-like actuator, coordinate system of Denavit and Hartenberg, kinematic scheme of robot, synthesis of robot actuator, biological prototype, skeleton, robot-stegosaurus

---

Presently created walking robots often have higher vertebrates, including humans, as biological prototypes, due to their kinematic structures goodness. However, present-day state of the art doesn't allow the developer to fully implement the kinematic structure of the selected biological prototype. Therefore, investigations, aimed at the creation of methods to synthesize complex spatial tree-like kinematic structure, are highly relevant.

The results of robot-stegosaurus tree-like actuator kinematic scheme synthesis are represented. The synthesis was performed using a modified Denavit-Hartenberg coordinate system and algorithm for reconstruction of kinematic scheme of biological prototype for photographic images of its skeleton. It is assumed that the links of skeleton are absolutely rigid and interconnected with kinematic pairs of 5-th grade. The geometric centers of the joints are marked by points in the electronic photographs of skeleton, and Microsoft Paint program has been used to calculate their coordinates. The directions of coordinate axes in the centers of the joints have been selected in accordance with Denavit-Hartenberg rules. The kinematic scheme of the robot-stegosaurus actuator has been built. Numerical values of the modified Denavit-Hartenberg parameters for main and auxiliary systems of coordinates have determined.

The obtained kinematic scheme doesn't repeat exactly the kinematic scheme of biological prototype. However, the assumption of kinematic pairs 5th grade only presence, taken in the proposed method, greatly facilitate the implementation of the synthesized kinematic scheme in practice. The considered strategy provides to obtain kinematic scheme options with the required approximation to the biological prototype, providing the developer the right to choose the most appropriate according to the selected criteria.

The obtained results can be the basis for further researches, aimed at creating a robot-stegosaurus.

## References

1. Gurfinkel V.S., Gurfinkel E.V., Shneider A.Yu., Devianin E.A., Lensky A.V., Shtilman L.G. Walking Robot with Supervisory Control. *Mechanism and Machine Theory*, 1981, vol. 16, no. 1, pp. 31-36. DOI: [10.1016/0094-114X\(81\)90047-1](https://doi.org/10.1016/0094-114X(81)90047-1)
2. Devyanin E.A., Kartashev V.A., Lenskii A.V., Shneider A.Yu. Force feedback in walking machine control system. *Issledovanie robototekhnicheskikh sistem: sb. st.* [Robotics system study: collected articles]. Moscow, Nauka Publ., 1982, pp. 147-159. (in Russian).
3. Devianin E.A., Gurfinkel V.S., Gurfinkel E.V., Kartashev V.A., Lensky A.V., Shneider A.Yu., Shtilman L.G. The Six-legged Walking Robot Capable of Terrain Adaption. *Mechanism and Machine Theory*, 1983, vol. 18, no. 4, pp. 257-260. DOI: [10.1016/0094114X\(83\)90114-3](https://doi.org/10.1016/0094114X(83)90114-3)
4. Okhotsimskiy D.E., Golubev Yu.F. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem avtomaticheskogo shagayushchego apparata* [Mechanics and motion control of automatic walking vehicle]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 310 p. (in Russian).
5. Okhotsimsky D.E., Platonov A.A., Cirilchenko A.A., Lapshin V.V. Walking machines. *Advanced in Mechanics*, 1992, vol. 15, no. 1-2, pp. 39-70.
6. Lapshin V.V. Modeling estimates of power consumption of walking machine. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 1993, no. 1, pp. 38-43.
7. Vukobratovic M. Active exoskeletal systems and beginning of the development of humanoid robotics. In: *Monograph of ANS: Academy of Nonlinear Sciences. Advances in Nonlinear Sciences II – Sciences and Applications. Vol. 2.* Belgrade, 2008, pp. 329-348.
8. Aoustin Y., Formal'sky A., Chevallereau C. Virtual quadruped: Mechanical design, control, simulation, and experimentation. *Fundamental'naya i prikladnaya matematika*, 2005, vol. 11, no. 8, pp. 5-28. (English version of journal: *Journal of Mathematical Sciences*, 2007, vol. 147, iss. 2, pp. 6552-6568. DOI: [10.1007/s10958-007-0495-5](https://doi.org/10.1007/s10958-007-0495-5) ).
9. Aoustin Y., Formalskii A.M. 3D Walking Biped: Optimal Swing of the Arms. *Multibody System Dynamics*, 2013, vol. 32, no. 1, pp. 55-66. DOI: [10.1007/s11044-013-9378-3](https://doi.org/10.1007/s11044-013-9378-3)
10. Lavrovsky E.K., Pismennaya E.V. On the lower limb exoskeleton regular locomotion under input control deficit. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki*, 2014, vol. 18, no. 2, pp. 208-225. (English version of journal: *Russian Journal of Biomechanics*, 2014, vol. 18, no. 2, pp. 180-195.)
11. Avedikov G.E., Zhmakin S.I., Ibragimov V.S., Ivanov A.V., Kobrin A.I., Komarov P.A., Kostenko A.A., Kuznetsov A.S., Kuzmichev A.V., Lavrovskii E.K., Martynenko Yu.G., Mitrofanov I.E., Pis'mennaya E.V., Formal'skii A.M. Exoskeleton: Design, Control. *12 Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014: tr.* [Proc. of the 12 All-Russian Conference on Control Problems ARCCP-2014], Moscow, 16-19 June, 2014. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2014, pp. 84-90. (in Russian).

12. Kazerooni H., Steger R. The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton. *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control*, 2006, vol. 128, iss. 1, pp. 14-25. DOI: [10.1115/1.2168164](https://doi.org/10.1115/1.2168164)
13. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). *The International Journal of Robotics Research*, 2006, vol. 25, no. 5-6, pp. 561-573. DOI: [10.1177/0278364906065505](https://doi.org/10.1177/0278364906065505)
14. Sankai Y. *HAL: Hybrid Assistive Limb based on Cybernics*. COE Cybernics, System and Information Engineering, University of Tsukuba, Japan. Sankai Laboratory. Cybernics Group: website. Available at: [http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/sonota/ISSR\\_Sankai.pdf](http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/sonota/ISSR_Sankai.pdf) , accessed 28.01.2015.
15. Hanlon M. *Raytheon XOS 2: Second-Generation Exoskeleton*. gizmag: website. Available at: [www.gizmag.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479](http://www.gizmag.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479) , accessed 28.01.2015.
16. Rixen D. *Biped Robot Johnnie*. Institute of Applied Mechanics at the Technical University of Munich: website. Available at: <http://www.amm.mw.tum.de/en/research/current-projects/humanoid-robots/johnnie/> , accessed 28.01.2015.
17. BigDog - The Most Advanced Rough-Terrain Robot on Earth. Boston Dynamics: website. Available at: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_bigdog.html](http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html) , accessed 28.01.2015.
18. LS3 – Legged Squad Support Systems. Boston Dynamics: website. Available at: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_ls3.html](http://www.bostondynamics.com/robot_ls3.html) , accessed 28.01.2015.
19. CHEETAH - Fastest Legged Robot. Boston Dynamics: website. Available at: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_cheetah.html](http://www.bostondynamics.com/robot_cheetah.html) , accessed 28.01.2015.
20. ASIMO by Honda: website. Available at: <http://asimo.honda.com> , accessed 28.01.2015.
21. Atlas – The Agile Anthropomorphic Robot. Boston Dynamics: website. Available at: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_Atlas.html](http://www.bostondynamics.com/robot_Atlas.html) , accessed 28.01.2015.
22. Koval'chuk A.K. Choice of a kinematic structure and research of a "Robot-dog" tree-like actuator. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 8, pp. 65-73. (in Russian).
23. Koval'chuk A.K. Choosing the Kinematic Structure and Dynamics Study of Tree-like Robot Crab Actuator. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 7, pp. 73-79. (in Russian).
24. Koval'chuk A.K., Semenov S.E., Karginov L.A., Kulakov D.B., Vereikin A.A., Yarots V.V. Choice of kinematic structure and study of dynamics of tree-like actuator of robot-tripod. *Inzhenernyi vestnik MGTU im. N.E. Bauman = Engineering Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no. 10. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/654481.html> , accessed 01.04.2015. (in Russian).
25. Koval'chuk A.K. Design of actuator of anthropomorphic walking robot. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*, 2014, no. 2 (70), pp. 162-166. (in Russian).

26. Koval'chuk A.K., Romashko A.M., Vereykin A.A., Karginov L.A., Malyakina E.A., Stativa V.A. Kinematic and dynamic analysis of actuator of six-legged walking robot. *14 Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Sovremennoe sostoyanie estestvennykh i tekhnicheskikh nauk" (14.03.2014): mater.* [Proc. of the 14 International Scientific-Practical Conference "The current state of natural sciences and engineering" (14.03.2014)]. Moscow, "Sputnik+" Publ., 2014, pp. 60-79. (in Russian).
27. Koval'chuk A.K., Romashko A.M., Vereykin A.A., Karginov L.A., Malyakina E.A., Stativa V.A. Calculation of the Moments at the Joints of Six-legged Walking Robot. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoi nauki = Theoretical and applied aspects of modern science*, 2014, no. 3-1, pp. 78-85. (in Russian).
28. 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, pp. 72-93. DOI: [10.7463/0714.0717676](https://doi.org/10.7463/0714.0717676) (in Russian).
29. Vereykin A.A., Koval'chuk A.K., Karginov L.A. The Lower Extremities Exoskeleton Actuator Dynamics Research Taking into Account Support Reaction. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 12, pp. 256-278. DOI: [10.7463/1214.0745388](https://doi.org/10.7463/1214.0745388) (in Russian).
30. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Sharonov N.G., Serov V.A., Mironenko K.B., Ustinov S.A. Development of methods of remote control the movement of the walking robot "Ortonog". *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы = Electrotechnical Systems and Complexes*, 2013, no. 21, pp. 153-160. (in Russian).
31. Pupkov K.A., Koval'chuk A.K., Kulakov B.B. Usage of Biological Prototypes for Kinematical Scheme Construction of Modern Walking Robots. *Vestnik RUDN. Inzhenernyye issledovaniya = Bulletin of Peoples Friendship University of Russia. Engineering Researches*, 2009, no. 4, pp. 44-54. (in Russian).
32. Pupkov K.A., Kovalchuk A.K., Kulakov B.B. Usage of Biological Prototypes for Kinematical Scheme Construction of Modern Robots. *Preprints of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 3-5 June, 2009. Moscow, 2009, pp. 1829-1834.