
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОТОТИПОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ СОВРЕМЕННЫХ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ

К.А. Пупков, Б.Б. Кулаков

Российский университет дружбы народов
Ул. Миклухо-Макляя, 6, Москва, Россия, 117198

А.К. Ковальчук

Межотраслевой институт повышения квалификации
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2-я Бауманская ул., 5, Moscow, Russia, 105005

Одной из многочисленных задач, возникающих при разработке роботов, является проблема выбора и обоснования их кинематических схем (КС). Существующие КС шагающих роботов отличаются достаточной геометрической простотой (можно видеть на примере [3]). Это вызвано фактически «ручным» выбором КС робота исходя из выполняемых им технологических операций и логических соображений разработчика.

В данной работе предлагается метод восстановления КС высших позвоночных животных по фотографическим изображениям их скелетов.

Ключевые слова: кинематическая схема, шагающий робот, биологический прототип.

Постановка задачи. Для упрощения анализа будем восстанавливать КС позвоночных животных, обладающие следующими свойствами:

- рассматриваются лишь степени подвижности, образованные скелетом;
- звенья КС являются абсолютно жесткими;
- звенья КС образуют кинематические пары пятого класса (вращательные либо поступательные);
- количество звеньев в КС может не совпадать с количеством степеней подвижности животного и выбирается согласно приоритетам разработчика.

Восстановление КС позвоночных животных предлагается делать по ее фотографиям в результате выполнения следующих действий:

- получают $N_{\phi} \geq 2$ фотоизображений скелета животного. На каждом изображении в поле зрения должен находиться объект, положение которого относительно скелета неизменно, а геометрические характеристики известны (например, неподвижно лежащий рядом куб);
- составляется граф, определяющий последовательность соединения рассматриваемых звеньев кинематической цепи, их номера и их общее количество;
- на фотографиях производится отметка точками геометрического центра суставов, восстанавливаются их координаты;
- делаются предположения относительно направления осей сочленений, которые восстанавливаются исходя из графа КС и известных координат центров суставов.

Вводимые обозначения и используемые системы координат. Вводим правую декартовую СК $0\bar{x}^k\bar{y}^k\bar{z}^k$, привязанную к исследуемому объекту и обозначаемую в дальнейшем как СК^К (рис. 1).

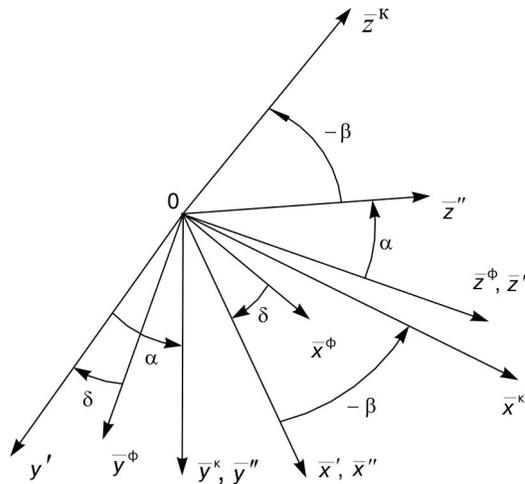


Рис. 1. Связь СК^К с СК^Φ

Имеющуюся i -тую фотографию ($i \in 1 \dots N_\Phi$) 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, расположенная параллельно имеющейся фотографии и проходящая через точку O СК^К, назовем *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^Φ; оси $0\bar{x}^\Phi, 0\bar{y}^\Phi$ принадлежат ФП (рис. 1). Фотографии, как правило, прямоугольные, поэтому, не теряя общности, положим, что оси $0\bar{x}^\Phi, 0\bar{y}^\Phi$ параллельны сторонам фотографии.

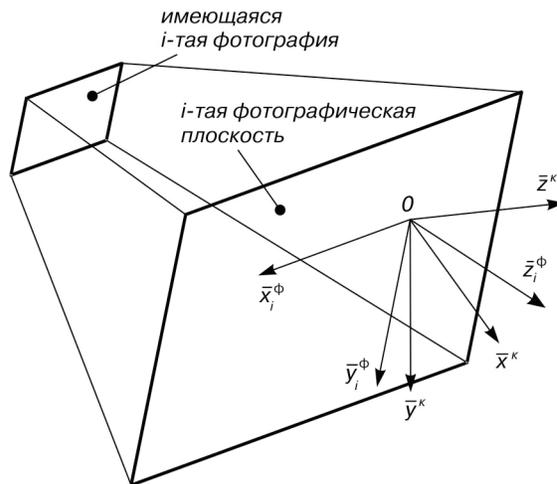


Рис. 2. i -тая фотографическая плоскость, орты СК^Φ и СК^К

Совмещение СК^Ф и СК^К осуществим тремя последовательными поворотами. Поворот СК^Ф вокруг оси \bar{z}^Φ на угол δ , поворот СК $0x'y'z'$ вокруг оси x' на угол α , поворот СК $0x''y''z''$ вокруг оси \bar{y}'' на угол β до совмещения всех осей с осями СК^К (см. 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 означает \cos , s — \sin .

Таким образом,

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

где X^K — координаты некоторой точки в СК^К, X^Φ — ее координаты в СК^Ф.

Определение координат точки в СК^К. Пусть в пространстве имеется некоторая точка \mathbf{F} , для которой известно ее отображение на i -тую фотографию $i \in [1 \dots N_\Phi]$. На рис. 3 l_{xi} , l_{yi} — расстояние от геометрического центра i -той фотографии до ее края вдоль осей $\bar{x}_i^{\Phi B}$ и $\bar{y}_i^{\Phi B}$ соответственно; $x_{\text{ц}i}^B$, $y_{\text{ц}i}^B$ — координаты геометрического центра фотографии в СК $0\bar{x}_i^{\Phi B}\bar{y}_i^{\Phi B}$; 0_i^B , точки \mathbf{F}^{Bi} — проекции точки O и точки \mathbf{F} на фотографию. Ставится задача определения координат точки \mathbf{F} в СК^К.

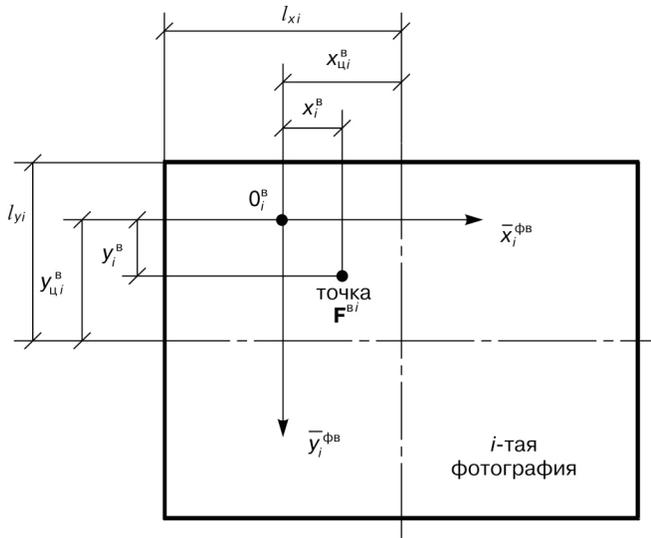


Рис. 3. Проекция на i -тую фотографию точек O , \mathbf{F} , осей \bar{x}_i , \bar{y}_i

Рис. 4 показывает проекцию i -той фотографии, ФП и точки \mathbf{F} на плоскость, содержащую ось \bar{x}_i^Φ и перпендикулярную ФП. Согласно рис. 4

$$x_i^\Phi = x_i^B m_i - z_i^\Phi \operatorname{tg} \gamma_i,$$

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

где z_{mi} — расстояние между i -тыми ФП и фотографией.

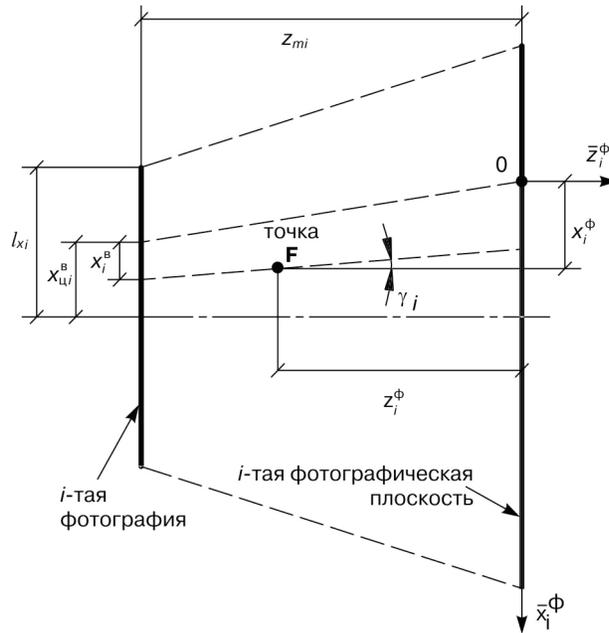


Рис. 4. Связь координаты $x^{\text{Ф}}$ точки F в $\text{СК}^{\text{Ф}}$ и видимой координаты $x^{\text{В}}$ этой же точки

Принимая

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

получим

$$x_i^{\text{Ф}} = x_i^{\text{В}} m_i + z_i^{\text{Ф}} (-x_{\text{ц}i}^{\text{В}} + x_i^{\text{В}}) \tilde{\gamma}_i. \quad (4)$$

Аналогично

$$y_i^{\text{Ф}} = y_i^{\text{В}} m_i + z_i^{\text{Ф}} (-y_{\text{ц}i}^{\text{В}} + y_i^{\text{В}}) \tilde{\gamma}_i. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) можно объединить в матрицу M_i , позволяющую связать координаты точки $(x_i^{\text{В}} \ y_i^{\text{В}} \ z_i^{\text{Ф}})^T$ с ее координатами в СК фотографии

$$X^{\text{Ф}} = \begin{pmatrix} x_i^{\text{Ф}} & y_i^{\text{Ф}} & z_i^{\text{Ф}} \end{pmatrix}^T.$$

$$M_i = \begin{pmatrix} m_i & 0 & (-x_{\text{ц}i}^{\text{В}} + x_i^{\text{В}}) \tilde{\gamma}_i \\ 0 & m_i & (-y_{\text{ц}i}^{\text{В}} + y_i^{\text{В}}) \tilde{\gamma}_i \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где m_i коэффициент масштаба.

Для i -той 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 0 и точки \mathbf{F} на рис. 4). Согласно (6) $M_i = M_i(x_i^B, y_i^B)$.

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

Тогда, согласно (2), (7), так как из (1) $R_i = R(\alpha_i, \beta_i, \delta_i)$, получим соотношение

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

где $X^K = (x^K, y^K, z^K)^T$ — координаты точки \mathbf{F} в СК^K.

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

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

Поэтому для определения X^K их необходимо как минимум две. Используя $N_\Phi \geq 2$ фотографий, имеем в силу (9) следующую систему уравнений $X_i^B = A_i X^K$:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} X_1^B \\ X_2^B \\ \dots \\ X_N^B \end{pmatrix}}_{X^B} = \underbrace{\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_N \end{pmatrix}}_A \cdot X^K. \quad (10)$$

Поскольку получающаяся система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (10) избыточна, используем метод наименьших квадратов и увеличиваем точность, решаем систему

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

относительно X^K .

Для каждой i -той фотографии необходимо определить параметры $m_i, \tilde{\gamma}_i, \alpha_i, \beta_i, \delta_i$. Это можно сделать, используя систему уравнений (9) для тех точек, у которых наряду с видимыми координатами X^B известны координаты X^K . В итоге по-

лучается нелинейная система уравнений относительно искомым параметрам. Если таких точек меньше трех, можно дополнительно воспользоваться информацией о наклоне проекций осей СК^K на *i*-тую *фотографическую плоскость* относительно осей, связанных с ней СК^Ф.

Последний абзац требует пояснения. Система координат — понятие математическое, фотография же отражает физические объекты. Решение проблемы «материализации осей СК» состоит в том, чтобы орты СК^K находились на ребрах подходящего физического объекта, например куба, неподвижного относительно точки **F** и находящегося в поле зрения при фотосъемке. Например, опишем ось \overline{ox} СК^K через обобщенную координату q

$$x^k = q, \quad y^k = 0, \quad z^k = 0. \quad (12)$$

Кроме того, для этой оси из *i*-той фотографии известно

$$y_i^B = k_{xi} x_i^B. \quad (13)$$

Запишем согласно (8)

$$M(x_i^B, y_i^B, \tilde{\gamma}_i, m_i) \cdot \begin{pmatrix} x_i^B \\ y_i^B \\ z_i^F \end{pmatrix} = R_i^T(\alpha_i, \beta_i, \delta_i) \cdot \begin{pmatrix} x^k \\ y^k \\ z^k \end{pmatrix}, \quad i = 1 \dots N_\Phi; \quad (14)$$

согласно (14), (6), (12), (1) получим

$$k_{xi} R_{i11}^T - R_{i21}^T + \tilde{\gamma}_i R_{i31}^T (k_{xi} x_{\text{ци}}^B - y_{\text{ци}}^B) = 0. \quad (15)$$

Подставляя в (15) выражения для соответствующих элементов R_i^T из (1)

$$k_{xi} (c\delta_i c\beta_i + s\delta_i s\alpha_i s\beta_i) + (s\delta_i c\beta_i - c\delta_i s\alpha_i s\beta_i) - \tilde{\gamma}_i c\alpha_i s\beta_i (k_{xi} x_{\text{ци}}^B - y_{\text{ци}}^B) = 0, \quad (16)$$

получим в итоге уравнения относительно неизвестных $\tilde{\gamma}_i, \alpha_i, \beta_i, \delta_i$. Среди них не присутствует m_i , поскольку при изменении масштаба наклоны осей сохраняются прежними.

Аналогично получаются уравнения для осей \overline{oy} и \overline{oz} :

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

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

Затем разрешаем полученную систему нелинейных уравнений численными методами, используя встроенную функцию программного комплекса Matlab.

Определение параметров Денавита—Хартенберга. Определение параметров Денавита—Хартенберга (Д.Х.) [1] можно осуществить исходя из предположений, дополнительных к выдвинутым в начале статьи:

- известны координаты СК^K центров сочленений;
- оси сочленений перпендикулярны отрезкам, соединяющим центр рассматриваемого сочленения с центрами сочленений соответствующих ему звеньев.

Как известно [2], для однозначного определения параметров Д.Х. в случае сочленений пятого класса необходимо задать положение и ориентацию СК, связанной с одним из звеньев (например, с первым).

Пример

Используем приведенные выкладки для восстановления части КС, представленной графом на рис. 5. В качестве основы для анализа используем фотографии скелета кошки (рис. 6, 7, 8). На представленных фотографиях точками отмечены центры соответствующих сочленений.

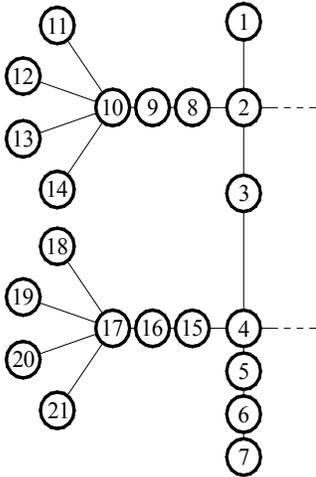


Рис. 5. Граф части восстанавливаемой КС

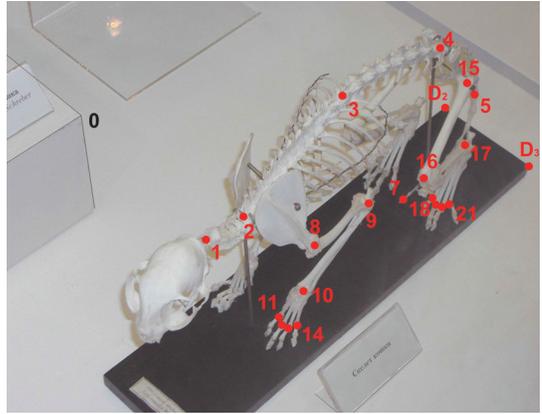


Рис. 6. Фотография 1 скелета кошки

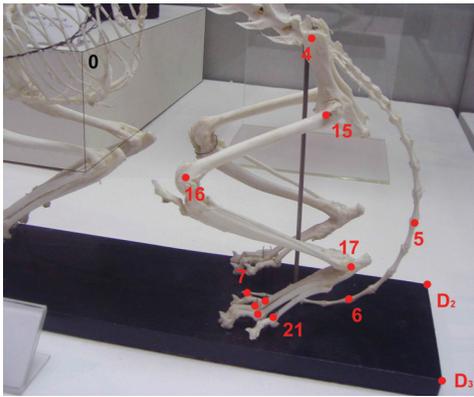


Рис. 8. Фотография 3 скелета кошки

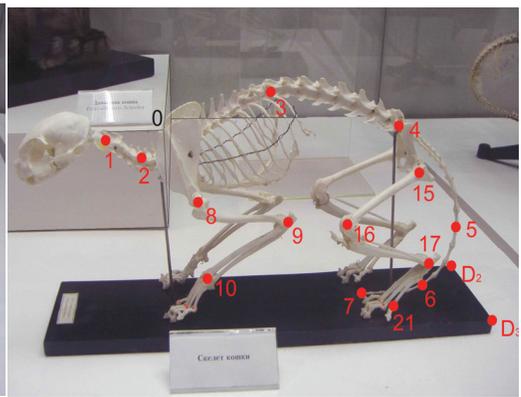


Рис. 7. Фотография 2 скелета кошки

Пусть ось $СК^K$, в которой необходимо определить координаты точек — центров сочленений, совпадает с ребрами прямоугольного тела, находящегося в поле зрения на каждой фотографии. При этом на каждом изображении начало $СК^K$ совпадает с ближайшей видимой вершиной тела, ось $o\bar{y}$ направлена вниз, ось $o\bar{x}$ — от нас. Для определения параметров $m_i, \tilde{\gamma}_i, \alpha_i, \beta_i, \delta_i$ i -той фотографии ($i = \overline{1, 3}$) в табл. 1 запишем данные о видимом наклоне осей $o\bar{x}$ и $o\bar{z}$, координаты ${}^Bx, {}^By$ вершины тела, находящейся на оси $o\bar{y}$ (в $СК^K$ эта точка имеет координаты $(0 \ 1 \ 0)^T$), а также видимый наклон одного из ребер тела, не совпадающего с осями $СК^K$.

Таблица 1

Координаты точек, используемых для определения взаимной ориентации СК^К и СК^Ф

	Фотография 1		Фотография 2		Фотография 3	
	${}^B x$	${}^B y$	${}^B x$	${}^B y$	${}^B x$	${}^B y$
k_x	11	195	654	240	738	16
k_z	8	570	28	489	89	161
Точка $(0/0)^T$ в СК ^К	315	728	650	784	299	620
Точка Ц	959	719	959	719	959	719
Точка Д	—	—	658	442	725	283
Точка Д2	1 528	379	1 607	906	1 540	1 030
Точка Д3	1 818	580	1 748	1 078	1 595	1 381
Точка 0	268	404	634	478	286	177

На основе данных табл. 1 по уравнениям (9), (16), (18) определяем параметры фотографий, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Параметры α , β , δ , γ , m для i -той фотографии

№ фотографии	Параметры				
	α	β	δ	γ	m
1	0,7773	-2,1462	-0,1421	$5 \cdot 10^{-5}$	0,0348
2	0,3562	-1,7407	0,0177	$9,6249 \cdot 10^{-3}$	0,0482
3	0,3468	-1,4581	0,0626	$6,179 \cdot 10^{-3}$	0,0343

Далее определяется положение точек — центров сочленений (вручную по фотографиям) и заносится в табл. 3.

Таблица 3

Координаты точек ${}^B x_j^i$, ${}^B y_j^i$ *

j	${}^B x_j^1$	${}^B y_j^1$	${}^B x_j^2$	${}^B y_j^2$	${}^B x_j^3$	${}^B y_j^3$
1	700	832	437	512	—	—
2	833	785	561	565	—	—
3	1 174	334	995	358	—	—
4	1 514	167	1 432	465	1 121	123
5	1 632	333	1 624	785	1 493	795
6	—	—	1 508	966	1 255	1 084
7	1 386	696	1 305	994	—	—
...
20	1 517	725	1 377	1 030	925	1 138
21	1 546	712	1 413	1 033	983	1 154

* i — номер фотографии, j — номер точки — центра сочленения. Координаты приведены в пикселях положения курсора, при его наведении на интересующую точку (при открытии электронной фотографии в Microsoft Photo Editor).

Примечание: Прочерки соответствуют отсутствию информации, когда на соответствующей фотографии такого сочленения не видно.

Далее на основании (11) получаем координаты точек — центров сочленений. Результат приведен в табл. 4

Таблица 4

Координаты центров сочленений в СК^к. СК

№	x^c	y^c	z^c
1	-1,9807	-0,3466	0,3207
2	-2,0762	-0,3174	0,0472
3	-1,8792	-0,7229	-0,9948
4	-1,7573	-0,4577	-1,9514
5	-1,4308	0,5758	-2,5620
6	-1,4801	1,0930	-2,2306
7	-1,6190	0,9548	-1,6782
...
20	-1,9308	0,9641	-1,7678
21	-1,9192	0,9887	-1,8565

На рис. 9 приведено графическое представление данных табл. 4, центры сочленений соединены согласно графу рис. 5, а также показаны оси z , совпадающие с осями сочленений.

Рис. 10 — восстановленная часть КС кошки по графу рис. 5.

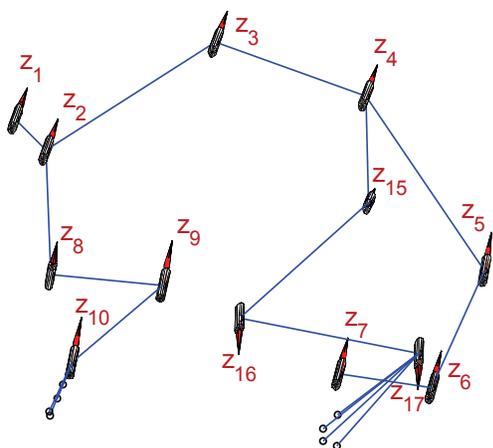


Рис. 9. Изометрическое изображение центров сочленений, соответствующих вершинам графа (рис. 5) и также показана их связь

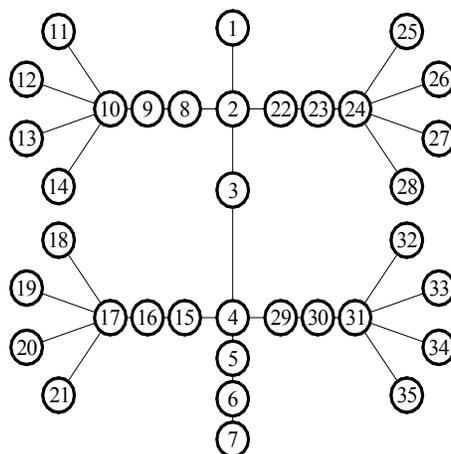


Рис. 10. Граф восстанавливаемой КС

Как видно из рис. 5, 9, по фотографиям восстанавливается лишь часть КС кошки. Принимая факт симметричности КС кошки относительно сагиттальной плоскости (рис. 10), восстанавливаем всю КС в два этапа.

1. Определяется сагиттальная плоскость, проходящая продольно строго по середине тела и делящая его на правую и левую половины (срединная сагиттальная плоскость).

2. Координаты центров сочленений 22—35 определяются из условия их симметричности относительно срединной сагиттальной плоскости соответствующим им центрам сочленений 8—21 (см. рис. 10).

Срединная сагиттальная плоскость определяется по методу наименьших квадратов при решении избыточной СЛАУ (19)

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}_{n \times 1}, \quad (19)$$

где a, b, c — коэффициенты уравнения $ax + by + cz = 1$ искомой плоскости; $(x_i \ y_i \ z_i)^T$ — координаты i -той точки, которая, как мы считаем, должна лежать в срединной сагиттальной плоскости — как правило, это центр сочленения, соответствующий позвоночнику. В нашем случае $i = \overline{1, n}$, $n = 7$.

В итоге получаем КС (рис. 11).

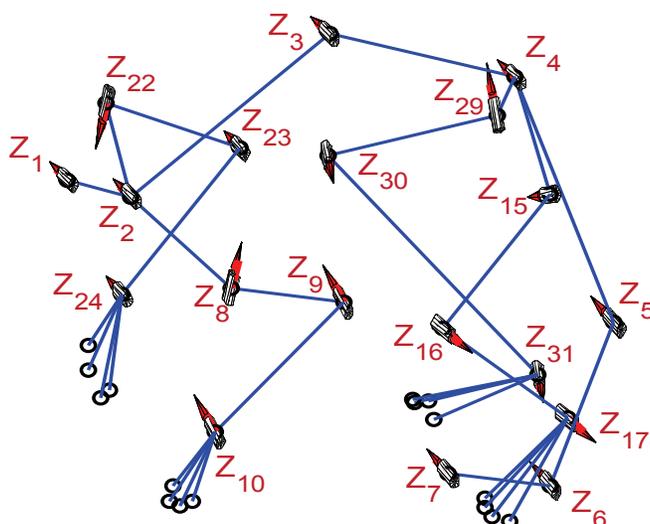


Рис. 11. Восстановленная часть КС кошки по графу рис. 10

Выводы. На основе представленного материала можно сделать вывод о возможности автоматизированного восстановления КС в рамках сделанных допущений.

Предлагаемый метод не всегда позволяет получить именно ту кинематическую схему, в которой нуждается разработчик в силу ограниченности метода допущениями, которые могут не всегда выполняться на практике. Однако полученная модель КС может явиться прототипом, облегчающим дальнейшую разработку модели робота.

Полученная КС может использоваться для описания кинематики и динамики робота с помощью универсального блочно-матричного представления [4; 5].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. — М.: Мир, 1989.
- [2] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. — М., 2004.
- [3] Ковальчук А.К., Ахметова Ф.Х. Роботы-футболисты. Проблемы создания и управления. — М., 2007.
- [4] Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семёнов С.Е. Математическое описание кинематики и динамики исполнительных механизмов с древовидной кинематической структурой // Известия вузов. Машиностроение. — 2008. — № 11. — С. 13—24.
- [5] Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семёнов С.Е. Блочно-матричные уравнения движения исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Известия вузов. Машиностроение. — 2008. — № 12. С. 5—21.

USAGE OF BIOLOGICAL PROTOTYPES FOR KINEMATICAL SCHEME CONSTRUCTION OF MODERN WALKING ROBOTS

К.А. Pupkov, B.B. Kulakov

Peoples Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

A.K. Kovalchuk

Automatic Control Systems Department
Bauman Moscow State Technical University
2-nd Baumanskaya str., 5, Moscow, Russia, 105005

Developing of modern robots includes a problem of kinematical scheme (KS) choice. In most cases existing KS are geometrical primitive. Biological evolution resulted in good suitability of the animals to their environment. That promise benefits of usage vertebrate animals KS in robot design. This article shows some ideas and principles how to get such KS.

Key words: the kinematic scheme, the walking robot, biological prototype.