



БИОМЕХАНИКА

УДК 531.132.1

И.В. МЕРКУРЬЕВ, д-р техн. наук, проф.

заведующий кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин¹

E-mail: merkuryeviv@ya.ru

Ч.Т. ЧУНГ

аспирант кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин¹

E-mail: velikikarol@gmail.com

Г.Р. САЙПУЛАЕВ

ассистент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин¹

E-mail: saypulaevgr@mail.ru

М.Р. САЙПУЛАЕВ, канд. техн. наук

старший преподаватель кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин¹

E-mail: saypulaevmr@mail.ru

Д. ДИБ

ассистент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин¹

E-mail: delshan2deeb@gmail.com

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Поступила в редакцию 04.05.2023.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КИНЕМАТИКИ ПАЛЬЦЕВ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ РУКИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПЕРЧАТКАХ

В работе рассматривается конструкция антропоморфного манипулятора в виде человеческой руки. Целью работы является описание кинематики роботизированной руки на примере одного пальца. На основе алгоритма Денавита–Хартенберга построена модель кинематики одного из пальцев роботизированной руки, определена его рабочая область с учетом ограничений на углы поворота фаланг пальца. Полученные кинематические уравнения использованы для решения задачи о скоростях кончика одного из пальцев руки. По результатам моделирования для заданных скоростей кончика пальца получены зависимости углов поворота звеньев роботизированной руки. В отличие от ранее используемых, разработанная модель позволяет учесть наличие геометрической связи между проксимальной и дистальной фалангами пальца, конструктивно исполненной в виде нерастяжимой нити. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и изготовлении новых робототехнических перчаток.

Ключевые слова: кинематика, управление, роботизированная перчатка, антропоморфный манипулятор, параметры Денавита–Хартенберга

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-106-113>

Введение. Сегодня актуальным является вопрос управления различными робототехническими системами с помощью интуитивно понятного интерфейса. Таким устройством, к примеру, может являться антропоморфный манипулятор, имитиру-

ющий движения руки человека. Указанные роботы способны работать в экстремальных условиях — там, где присутствие человека по различным причинам физически невозможно. Для управления таким роботом требуется разработать устройство, считыва-

вающее движения руки оператора и передающее их робототехнической системе.

При разработке таких устройств важную роль играет построение математической модели кинематики и динамики робототехнической системы [1–3]. Рассмотрим некоторые бионические протезы рук, имеющиеся на российском рынке (рисунок 1).

Компания Ottobock [4] предлагает роботизированную кисть *Bebionic Hand EQD* — протез, заменяющий кисть с предплечьем или плечом включительно. Он обладает возможностью отдельного управления каждым пальцем, однако малое количество управляющих сигналов не позволяет совершать все эти движения одновременно.

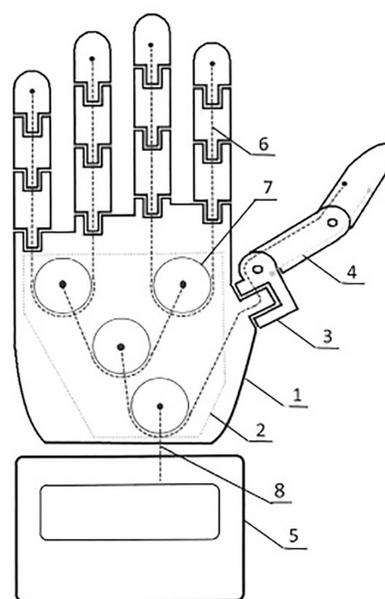
Конкуренцию иностранным предложениям составляет российская компания ООО «Моторика» [5]. По сложности схемы пальцев конструкции их протезов можно разделить на пальцы с одним и двумя суставами. Однако, как и у *Bebionic Hand EQD*, в их протезах не предусмотрена обратная связь по усилию.

Достойным ответом дорогостоящим зарубежным и внутренним массовым разработкам является патент на полезную модель бионического протеза Ляшко М.А. [6], схематичное изображение которого представлено на рисунке 2. Новизна конструкции заключается в возможности сгиба последней фаланги, что улучшает захват цилиндрических объектов. Также стоит выделить систему блоков, которая позволяет распределять величину сгиба в зависимости от возникающей нагрузки между всеми пятью пальцами, благодаря чему объекты захватываются более крепко, с равномерным усилием и максимальной площадью контакта. Простота конструкции и возможность создания деталей с помощью технологий 3D-печати ведет к значительному снижению цены на итоговое изделие. Из недостатков — отсутствие подвижности в плоскости кисти, управления каждым пальцем в отдельности и обратной связи по усилию.

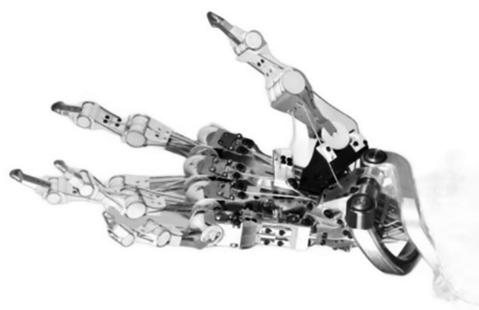
Создание механических верхних конечностей является задачей для исследователей и инженеров в области антропоморфных робототехнических систем.



Рисунок 1 — Примеры протезов рук:
 a — *Bebionic Hand EQD*; b — *Motorika MANIFESTO Hand*
 Figure 1 — Examples of prosthetic hands:
 a — *Bebionic Hand EQD*; b — *Motorika MANIFESTO Hand*



a



b

Рисунок 2 — Примеры конструкций протезов рук:
 a — схема протеза, предложенная в [6]; b — *DLR Hand*
 Figure 2 — Examples of prosthetic hand designs:
 a — prosthesis schematic, proposed in [6]; b — *DLR Hand*

Значительного успеха в этом достигла компания DLR, разработки которой описаны в статьях [7, 8].

В разработанных DLR протезах компанией было увеличено количество используемых приводов, что позволило управлять не только каждым пальцем в отдельности, но и всеми фалангами независимо друг от друга. Также стоит отметить возможность сдвигать и раздвигать пальцы, как в символе «ножницы». Данная конструкция также имеет упругие элементы, связывающие двигатели, и приводимые ими в движение элементы, что снижает нагрузку на эти устройства во время ударных воздействий, а также позволяет самой кисти отскакивать от этих воздействий, а не воспринимать их жестко.

Известно, что положение и ориентация твердого тела однозначно определяется шестью параметрами. Однако введение систем координат, связанных со звеньями роботов-манипуляторов, с помощью алгоритма Денавита–Хартенберга позволяет уменьшить число параметров, определяющих положение и ориентацию звена манипулятора, до четырех (называемых параметрами

Денавита–Хартенберга). В связи с этим, использование алгоритма Денавита–Хартенберга значительно упрощает моделирование кинематики роботов-манипуляторов.

При описании кинематики и динамики многозвенных роботизированных перчаток применяются различные методы: использование основных уравнений динамики в обобщенных координатах с определением коэффициентов уравнений на основе моделирования в системе автоматизированного проектирования [9]; с помощью комбинации методов однородных преобразований и геометрии [10]; с помощью комбинации методов геометрии и модифицированного алгоритма Денавита–Хартенберга [11]; формализм Эйлера–Лагранжа для составления уравнений динамики [12]. Однако к недостаткам указанных работ можно отнести принятие линейных зависимостей между углами звеньев, обоснованных различными феноменологическими допущениями. В рамках данной работы нелинейные зависимости между двумя углами поворота звеньев пальца руки будут обусловлены конструкцией роботизированной перчатки, что позволяет построить более общую математическую модель системы.

Далее звенья роботизированной руки будут называться аналогично наименованиям частей кисти человека, пояснения к которым приведены на рисунке 3.

Целью данной работы является математическое моделирование роботизированной руки, в конструкции которой дистальная и проксимальная фаланги связаны нерастяжимой нитью.

Постановка задачи. В рамках данной работы предлагается конструкция протеза руки, представляющая собой усовершенствование протеза кисти DLR Hand компании DLR и разрабатывается мо-

дель кинематики ее движения. 3D-модель сборки предлагаемой конструкции создана в САПР Autodesk Inventor и представлена на рисунке 4. Сложность исследования и создания антропоморфной кисти заключается в отличиях верхних конечностей человека в зависимости от таких факторов, как возраст, пол, травмы рук. Для проектирования модели размеры конструкции были выбраны из статей [13, 14]. На рисунке 4 указательный палец протеза показан в разрезе для демонстрации внутренней механической конструкции пальца.

Особенность конструкции проявляется в соединении проксимальной и пястной фаланг. Для создания соединения, обладающего двумя степенями свободы, были использованы две поверхности второго порядка — гиперболические параболоиды, в отличие от шарового шарнирного соединения, при котором возможно третье ненужное вращение. Главное достижение — это сохранение, а при некоторых воздействиях даже превосходство, по сравнению с обычным шарикоподшипниковым соединением, прочностных характеристик. Это свойство достигается благодаря тому, что поверхности образованы прямыми линиями, и, как следствие, в результате касания двух одинаковых фигур, ограниченных этими поверхностями, будут две прямые линии, по которым распределяется нагрузка (рисунок 5). В отличие от аналогичной фигуры, состоящей из двух конусов, результатом касания которых будет две точки, в которых возникают значительные нагрузки. Соединение, построенное на основе гиперболических параболоидов, было реализовано в протезе кисти DLR Hand [15]. В данной конструкции сустава на основе пересечения гиперболических параболоидов 1 и 2 удалены их центральные части (см. рисунок 5).

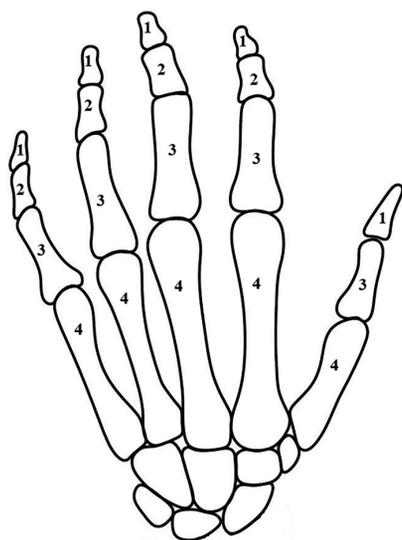


Рисунок 3 — Названия фаланг кисти человека:
1 — дистальные фаланги; 2 — промежуточные фаланги;
3 — проксимальные фаланги; 4 — пястные кости
Figure 3 — Names of human hand phalanges:
1 — distal phalanges; 2 — intermediate phalanges;
3 — proximal phalanges; 4 — metacarpal bones

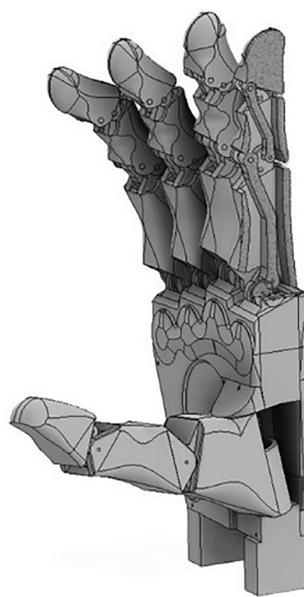


Рисунок 4 — 3D-модель предлагаемой конструкции протеза руки
Figure 4 — 3D model of the proposed hand prosthesis design

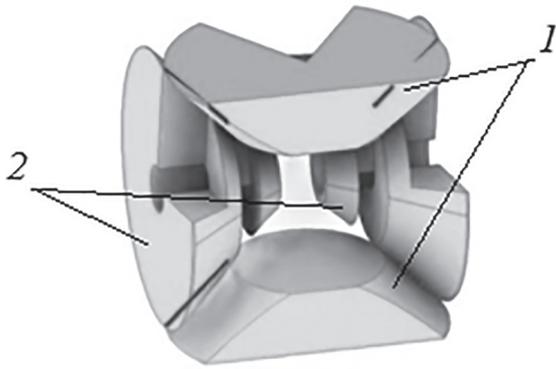


Рисунок 5 — Конструкция сустава на основе пересечения гиперболических параболоидов, созданная в среде Autodesk Inventor

Figure 5 — Joint design based on the intersection of hyperbolic paraboloids created in Autodesk Inventor environment

Из-за схожести структуры пальцев далее покажем конструкцию и расчет кинематики только для указательного пальца.

Во время движения проксимальной фаланги относительно пястной кости одна пара тел указанного сустава (см. рисунок 5) жестко закреплена на пястной кости. При этом вторая пара тел этого сустава может скользить по первой паре тел сустава, совершая согласованные вращательные движения вокруг двух перпендикулярных направлений. Эти вращения могут быть обеспечены за счет специального управления приводами пальца.

В созданной конструкции дистальная фаланга соединена с промежуточной посредством вращательного шарнира с одной степенью свободы, а также связана одной упругой и одной нерастяжимой нитью с проксимальной фалангой. При отсутствии внешних воздействий подобная связь обеспечивает однозначное позиционирование дистальной фаланги относительно других. Подобная связь наблюдается и у человека.

Для создания исследуемого макетного образца указательного пальца были использованы следующие значения, выбранные из работ [6–8, 16]:

- длина проксимальной фаланги — 48 мм;
- длина промежуточной фаланги — 28,8 мм;
- длина дистальной фаланги — 23 мм;
- параметры сустава между проксимальной и пястной фалангами:
 - ширина — 24 мм;
 - высота — 22 мм;
 - диапазон углов поворота вбок — от $-17,5^\circ$ до $17,5^\circ$;
 - диапазон сгибания — от -20° до 90° ;
- параметры сустава между промежуточной и проксимальной фалангами:
 - ширина — 19 мм;
 - высота — 16 мм;
 - диапазон сгибания — от -15° до 108° ;
- параметры сустава между дистальной и промежуточной фалангами:
 - ширина — 14 мм;

- высота — 12 мм;
- диапазон сгибания — от -15° до 82° .

Решение задачи кинематики и результаты численного моделирования. При описании движения пальца будем использовать кинематическую схему, представленную на рисунке 6. Для описания кинематической модели будем использовать алгоритм Денавита–Хартенберга [17, 18].

Кинематическая схема имеет два шарнирных соединения с одной вращательной степенью свободы и одно сложное соединение, представляющее собой два контактирующих одинаковых гиперблоида (отмечены цифрами 1 и 2 на рисунке 5), относительно движения которых можно свести к двум вращательным движениям. В кинематической схеме указаны два вращательных движения можно реализовать с помощью двух цилиндрических шарниров.

Введем неподвижную систему координат $Ox_0y_0z_0$, в которой плоскость Ox_0y_0 расположена в плоскости ладони (см. рисунок 6). Системы координат, связанные с каждым последующим звеном меха-

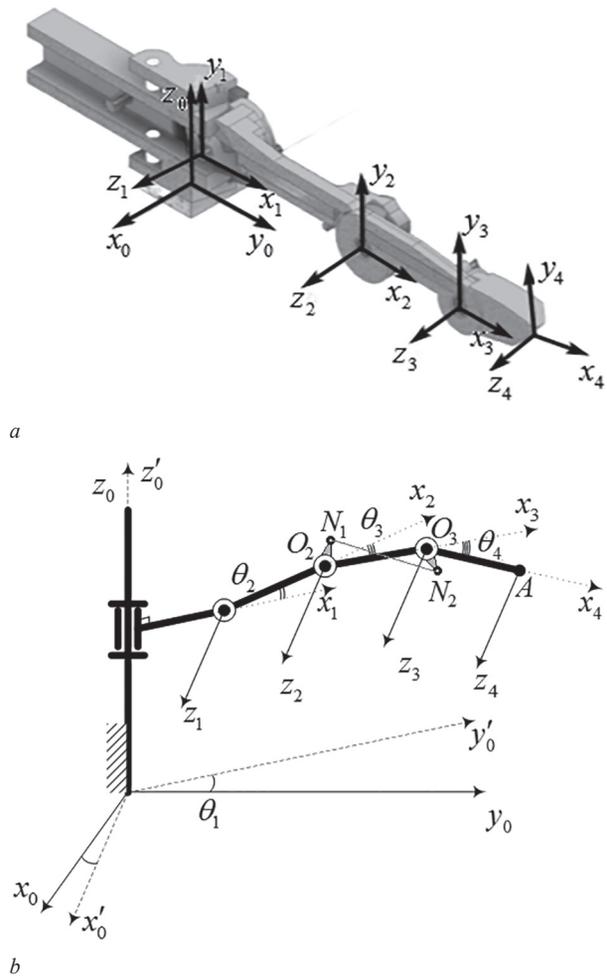


Рисунок 6 — Системы координат по алгоритму Денавита–Хартенберга для описания кинематики пальца: а — 3D-модель с локальными системами координат пальца; б — кинематическая схема пальца

Figure 6 — Coordinate systems by Denavit-Hartenberg algorithm to describe finger kinematics: a — 3D model with local coordinate systems of the finger; b — kinematic diagram of the finger

низма, вводим в соответствии с алгоритмом Дена-вита–Хартенберга [19]. Отметим, что с проксимальной фалангой связана система координат $O_2x_2y_2z_2$; с промежуточной фалангой — $O_3x_3y_3z_3$; с дистальной — $Ax_4y_4z_4$. Далее приведем параметры Дена-вита–Хартенберга для рассматриваемой модели в таблице.

По конструкции системы есть ограничения для углов поворота звеньев:

$$\begin{aligned} \theta_1 \in [-17,5^\circ; +17,5^\circ]; \quad \theta_2 \in [-90^\circ; +20^\circ]; \\ \theta_3 \in [-108^\circ; +15^\circ]; \quad \theta_4 \in [-82^\circ; +15^\circ]. \end{aligned} \quad (1)$$

В соответствии с параметрами Дена-вита–Хартенберга получаем уравнения, описывающие координаты кончика пальца x_A, y_A, z_A , в виде:

$$\begin{aligned} x_A &= -(a_1 + a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos \theta_3 + a_4 \cos \theta_4) \sin \theta_1; \\ y_A &= (a_1 + a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos \theta_3 + a_4 \cos \theta_4) \cos \theta_1; \\ z_A &= d_1 + a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin \theta_3 + a_4 \sin \theta_4. \end{aligned} \quad (2)$$

Из-за наличия нерастяжимой нити, соединяющей дистальную и проксимальную фаланги, существует зависимость между углами θ_4 и θ_3 , описываемая аналитически формулой:

$$\begin{aligned} [(a_3 + x_{N1} \cos \theta_3 - y_{N1} \sin \theta_3) - (x_{N2} \cos \theta_4 + y_{N2} \sin \theta_4)]^2 + \\ + ((x_{N1} \sin \theta_3 + y_{N1} \cos \theta_3) - (y_{N2} \cos \theta_4 - x_{N2} \sin \theta_4))^2 = l_N^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где l_N — длина нити; x_{N1} и y_{N1} — смещения точки крепления нити к проксимальной фаланге относительно точки O_2 ; x_{N2} и y_{N2} — смещения точки контакта крепления нити к дистальной фаланге относительно O_3 . Для рассматриваемой конструкции указанные смещения равны:

$$\begin{aligned} x_{N1} = -1,77 \text{ мм}; \quad y_{N1} = 2,84 \text{ мм}; \\ x_{N2} = -0,13 \text{ мм}; \quad y_{N2} = 4,10 \text{ мм}, \end{aligned} \quad (4)$$

а длина нити $l_N = 28$ мм. Для упрощения аналитического описания зависимости (3) между углами θ_4 и θ_3 используем интерполяцию методом Ньютона [20] по четырем известным положениям (нижние и верхние граничные значения углов, а также пара промежуточных положений). Полученная интерполяция при данных значениях (4) и ограничениях (1) имеет вид:

Таблица — Параметры Дена-вита–Хартенберга
Table — Denavit-Hartenberg parameters

№ шарнира	Θ_i , рад	d_i , м	a_i , м	α_i , рад
1	$\theta_1 + \pi/2$	0,014	0,003	$\pi/2$
2	θ_2	0	0,048	0
3	θ_3	0	0,0288	0
4	θ_4	0	0,023	0

Примечание: Θ_i — угол поворота вокруг оси z_{i-1} , отсчитываемый от оси x_{i-1} до оси x_i ; d_i — смещение начала оси z_i относительно начала оси z_{i-1} , отсчитываемое вдоль оси z_{i-1} ; a_i — угол поворота вокруг оси x_i , отсчитываемый от оси z_{i-1} до оси z_i ; a_i — смещение начала оси x_i относительно начала оси x_{i-1} , отсчитываемое вдоль оси x_i .

$$\begin{aligned} \theta_4 = f(\theta_3) = 0,0534 + 0,8279 \cdot \theta_3 + \\ + 0,0410 \cdot \theta_3^2 + 0,0081 \cdot \theta_3^3. \end{aligned} \quad (5)$$

Проекция угловой и линейной скоростей кончика пальца на неподвижные оси можно представить в виде:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \mathbf{J}_\omega(\theta_1, \theta_3) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Ax} \\ V_{Ay} \\ V_{Az} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_V(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \mathbf{J}_\omega(\theta_1, \theta_3) = \begin{bmatrix} 0 & \cos \theta_1 & (1 + f'(\theta_3)) \cos \theta_1 \\ 0 & \sin \theta_1 & (1 + f'(\theta_3)) \sin \theta_1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} —$$

матрица Якоби для вектора угловой скорости;

$$\mathbf{J}_V(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{\partial \mathbf{r}_A}{\partial \mathbf{q}} — \text{матрица Якоби для линейной}$$

скорости кончика пальца; $\mathbf{r}_A = [x_A \quad y_A \quad z_A]^T$ — ра-

диус-вектор кончика пальца; $\mathbf{q} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]^T$ — вектор обобщенных координат.

Задавая координаты начального положения кончика пальца $x_A(0), y_A(0), z_A(0)$, можно определить начальные условия для углов поворота звеньев $\theta_1(0), \theta_2(0), \theta_3(0)$ из уравнений (2). Полученные начальные значения углов далее будем использовать для численного интегрирования уравнений кинематики (6).

Зададим начальное положение кончика дистальной фаланги $x_A(0) = 0, y_A(0) = 9,99$ см, $z_A(0) = -0,95$ см. Из решения задачи о положениях получаем: $\theta_1(0) = 0, \theta_2(0) = -0,24606$ рад, $\theta_3(0) = -0,27551$ рад.

В качестве целевого (конечного) положения зададим координаты $x_A(T) = 0, y_A(T) = 6$ см, $z_A(T) = -4$ см, где $T = 10$ с — время движения. Проекция скоростей будем считать постоянными, вычисляя их по формулам:

$$\begin{aligned} V_{Ax} &= \frac{x_A(T) - x_A(0)}{T}; \\ V_{Ay} &= \frac{y_A(T) - y_A(0)}{T}; \\ V_{Az} &= \frac{z_A(T) - z_A(0)}{T}. \end{aligned} \quad (7)$$

Результаты интегрирования уравнений кинематики (6) при заданных скоростях (7) представлены на рисунке 7. При этом угол $\theta_1(t) = 0$ для рассматриваемого движения.

По графикам, представленным на рисунке 7, можно сделать вывод, что угол поворота проксимальной фаланги монотонно изменяется. А по зависимостям углов поворота промежуточной дистальной фаланг можно наблюдать изменение

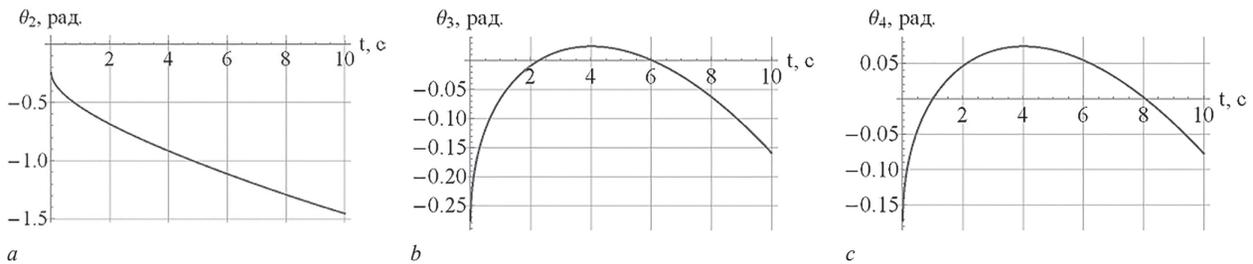


Рисунок 7 — Результаты моделирования: а — зависимость угла $\theta_2(t)$; б — зависимость угла $\theta_3(t)$; в — зависимость угла $\theta_4(t)$
 Figure 7 — Modeling results: а — dependence of angle $\theta_2(t)$; б — dependence of angle $\theta_3(t)$; в — dependence of angle $\theta_4(t)$

направления поворота указанных фаланг на противоположное через 4 с после начала движения.

Построим рабочую область кончика пальца в плоскости $Ox'_0y'_0$ с учетом зависимости (5) и ограничений (1). Для этого подставим значение угла $\theta_1 = 0$ в уравнениях (2) и построим рабочую область в виде зависимости координат $z_4(y_4)$. Покажем рабочую область и траекторию движения кончика пальца на рисунке 8.

По результатам моделирования определена рабочая область рассмотренной конструкции роботизированной перчатки (см. рисунок 7) и проведено моделирование движение кончика одного из пальцев по прямой. Из решения уравнений кинематики определены зависимости углов поворота фаланг пальца руки при заданном программном движении. Найденные зависимости углов поворота могут быть использованы в задачах распознавания жестов по движениям пальцев руки.

Заключение. Предложенная конструкция механической системы совмещает в себе несколько технологических решений ранее рассматривавшихся конструкций. К таким решениям относятся наличие связи между дистальной и проксимальной фалангами, реализованной в виде нерастяжимой нити, и конструкции шарнира, связывающего проксимальную и пястную фаланги.

В разработанной математической модели учитывается пространственное движение одного пальца, а при описании зависимости между углами промежуточной и дистальной фаланг используется полином третьей степени.

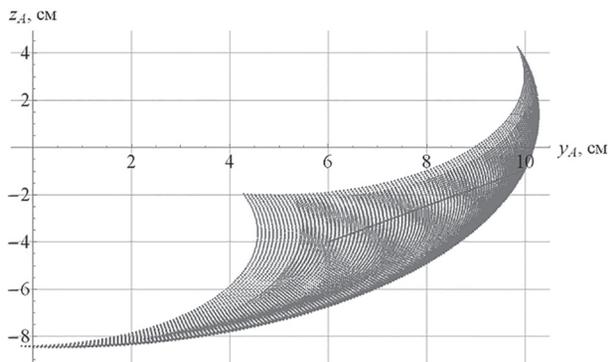


Рисунок 8 — Рабочая область и траектория движения кончика пальца (серая линия)
 Figure 8 — Working area and fingertip trajectory (gray line)

По результатам моделирования определена рабочая область, в пределах которой может находиться кончик указательного пальца руки.

Решение задачи о движении кончика пальца по заданной траектории (в частности, по прямой линии) дает возможность использовать найденные зависимости углов поворота звеньев пальцев при формировании управления робототехнической системой.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании и изготовлении новых робототехнических перчаток. В частности, в планах авторов статьи изготовить прототип робототехнической перчатки с учетом всех особенностей конструкции, описанных в этой работе.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка аппаратно-программного комплекса для дистанционного управления движением робототехнической системы» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет-2030: Технологии будущего» в 2022–2024 гг.».

Список литературы

1. A review of robotic gloves applied for remote control in various systems / G.R. Saypulaev [et al.] // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, 16–18 March 2023 / National Research University “MPEI”; ed.: R. Nasyrov, M.A. Tolba. — Moscow, 2023. — Pp. 1–6. — DOI: <https://doi.org/10.1109/REEPE57272.2023.10086822>.
2. Zheng, Y. A noble classification framework for data glove classification of a large number of hand movements / Y. Zheng // Journal of Electrical and Computing Engineering. — 2021. — Vol. 2021. — Pp. 1–11. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9472053>.
3. Гибадуллина, Л.Н. Моделирование движения пальцев для бионических кистей рук / Л.Н. Гибадуллина // Современные научные исследования и разработки. — 2018. — № 6(23). — С. 195–198.
4. Bionic Hand EQD [Electronic resource] // ottobock.com. — Mode of access: <https://www.ottobock.com/en-us/product/8E70>. — Date of access: 04.05.2023.
5. Официальный сайт ООО «Моторика» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://motorica.org/prosthetics/upper-limb#compare>. — Дата доступа: 14.04.2023.
6. Протез кисти руки: полез. модель RU 160806 U8 / М.А. Ляшко. — Опубл.: 10.04.2016.
7. The DLR hand arm system / M. Grebenstein [et al.] // 2011 IEEE Intern. conf. on Robotics and Automation, Shanghai, 9–13 May 2011 / Shanghai Int. Conf. Center; ed.: A. Bicchi [et al.]. — Shanghai, 2011. — Pp. 3175–3182. — DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980371>.
8. FRCEF: the new friction reduced and coupling enhanced finger for the Awiwi hand / W. Friedl [et al.] // 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Seoul, 3–5 November 2015 / Korea Institute of Science and Technology. — Seoul, 2015. — Pp. 140–147. — DOI: <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2015.7363527>.

9. The hand of the DLR hand arm system: designed for interaction / M. Grebenstein [et al.] // The International Journal of Robotics Research. — 2012. — Vol. 31, iss. 13. — Pp. 1531–1555. — DOI: <https://doi.org/10.1177/0278364912459209>.
10. Efficient human hand kinematics for manipulation tasks / S. Cobos [et al.] // 2008 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Nice, 22–26 September 2008 / Acropolis Convention Center. — Nice, 2008. — Pp. 2246–2251. — DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4651053>.
11. Veber, M. Assessment of human kinematics / M. Veber, T. Bajd // 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Orlando, 15–19 May 2006. — Orlando, 2006. — Pp. 2966–2971. — DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2006.1642152>.
12. Constraint study for a hand exoskeleton: human hand kinematics and dynamics / F.C. Chen [et al.] // Journal of Robotics. — 2013. — Vol. 2013. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/910961>.
13. Stillfried, G. Movement model of a human hand based on magnetic resonance imaging (MRI) / G. Stillfried, P. van der Smagt // 1st Int. Conf. on Applied Bionics and Biomechanics (ICABB), Venice, 14–16 October 2010. — Venice, 2010. — Pp. 1–5.
14. Van der Smagt, P. Using MRT data to compute a hand kinematic model / P. van der Smagt, G. Stillfried // 9th Int. Conf. on Motion and Vibration Control (MOVIC), Munich, 15–18 September 2008 / Technische Universitaet Muenchen; ed. H. Ulbrich, L. Ginzinger. — Munich, 2008. — Pp. 1–10.
15. Antagonistically driven finger design for the anthropomorphic DLR hand arm system / M. Grebenstein [et al.] // 2010 IEEE-RAS 10th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Nashville, 6–8 December 2010 / Sheraton Nashville Downtown. — Nashville, 2010. — Pp. 609–616. — DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHR.2010.5686342>.
16. The thumb: guidelines for a robotic design / M. Chalon [et al.] // 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Taipei, 18–22 October 2010 / Taipei International Conference Center; ed. R.C. Luo [et al.]. — Taipei, 2010. — Pp. 5886–5893. — DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5650454>.
17. Альчаков, В.В. Построение математической модели захвата антропоморфного робота на основе метода Денавита–Хартенберга / В.В. Альчаков, В.А. Крамарь // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. — 2019. — № 1(5). — С. 92–102.
18. Corke, P.I. A simple and systematic approach to assigning Denavit-Hartenberg parameters / P.I. Corke // IEEE Transactions on Robotics. — 2007. — Vol. 23, iss. 3. — Pp. 590–594. — DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.896765>
19. Борисов, О.И. Методы управления робототехническими приложениями: учеб. пособие / О.И. Борисов, В.С. Громов, А.А. Пыркин. — СПб.: Университет ИТМО, 2016. — 108 с.
20. Авхадиев, Ф.Г. Учебно-методическое пособие по численным методам анализа / Ф.Г. Авхадиев, Р.К. Губайдуллина, Р.Г. Насибуллин. — Казань: Казанский (Приволжский) фед. ун-т, 2019. — 113 с.

MERKURYEV Igor V., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Machine Strength¹

E-mail: merkuryeviv@ya.ru

CHUNG Chan T.

Postgraduate Student of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Machine Strength¹

E-mail: velikikarol@gmail.com

SAYPULAEV Gasan R.

Assistant of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Machine Strength¹

E-mail: saypulaevgr@mail.ru

SAYPULAEV Musa R., Ph. D. in Eng.

Senior Lecturer of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Machine Strength¹

E-mail: saypulaevmr@mail.ru

DEEB Delshan

Assistant of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Machine Strength¹

E-mail: delshan2deeb@gmail.com

¹National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

Received 04 May 2023.

DEVELOPMENT OF A KINEMATICS MODEL OF HUMAN FINGERS FOR APPLICATION IN ROBOTIC GLOVES

This paper considers the design of an anthropomorphic manipulator in the form of a human hand. The aim of the work is to describe the kinematics of a robotic hand, using the example of one finger. Based on the Denavit-Hartenberg algorithm, a kinematic model is developed for one finger of the robotic hand. The working area of the robotic finger is determined, taking into account the limitations on the rotation angles of the finger phalanges. These kinematic equations are used to solve the problem of the speeds of one fingertip. According to the results of modeling for given speeds of the fingertip, the dependencies of the rotation angles of the robotic hand links were obtained. Unlike the previously used models, the developed one makes it possible to

take into account the presence of a geometric constraint between the proximal and distal finger phalanges, which is structurally made with an inextensible thread. The results of the work can be used in the design and manufacture of new robotic gloves.

Keywords: kinematics, control, robotic glove, anthropomorphic grip, Denavit-Hartenberg parameters

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-106-113>

References

1. Saypulaev G.R., et al. A review of robotic gloves applied for remote control in various systems. *Proc. 2023 5th International youth conference on radio electronics, electrical and power engineering (REEPE)*. Moscow, 2023, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/REEPE57272.2023.10086822>.
2. Zheng Y. A noble classification framework for data glove classification of a large number of hand movements. *Journal of electrical and computing engineering*, 2021, vol. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9472053>.
3. Gibadullina L.N. Modelirovanie dvizheniya paltsev dlya bionicheskikh kistey ruk [Modelling of finger movement for bionic hands]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki*, 2018, no. 6(23), pp. 195–198 (in Russ.).
4. *Bebionic hand EQD*. Available at: <https://www.ottobock.com/en-us/product/8E70> (accessed 04 May 2023).
5. *Kakoy protez vam podkhodit?* [Which prosthesis is right for you?] Available at: <https://motorica.org/prosthetics/upper-limb#compare> (accessed 14 April 2023).
6. Lyashko M.A. *Protez kisti ruki* [Hand prosthesis]. Patent RU, no. 160806 U8, 2016 (in Russ.).
7. Grebenstein M., et al. The DLR hand arm system. *Proc. 2011 IEEE International conference on robotics and automation*. Shanghai, 2011, pp. 3175–3182. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980371>.
8. Friedl W., Chalou M., Reinecke J., Grebenstein M. FRCEF: The new friction reduced and coupling enhanced finger for the Awiwi hand. *Proc. 2015 IEEE-RAS 15th International conference on humanoid robots (humanoids)*. Seoul, 2015, pp. 140–147. DOI: <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2015.7363527>.
9. Grebenstein M., et al. The hand of the DLR hand arm system: designed for interaction. *The international journal of robotics research*, 2012, vol. 31, iss. 13, pp. 1531–1555. DOI: <https://doi.org/10.1177/0278364912459209>.
10. Cobos S., Ferre M., Sanchez Uran M.A., Ortego J., Pena C. Efficient human hand kinematics for manipulation tasks. *Proc. 2008 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems*. Nice, 2008, pp. 2246–2251. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4651053>.
11. Veber M., Bajd T. Assessment of human kinematics. *Proc. 2006 IEEE International conference on robotics and automation*. Orlando, 2006, pp. 2966–2971. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2006.1642152>.
12. Chen F.C., et al. Constraint study for a hand exoskeleton: human hand kinematics and dynamics. *Journal of robotics*, 2013, vol. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/910961>.
13. Stillfried G., van der Smagt P. Movement model of a human hand based on magnetic resonance imaging (MRI). *Proc. 1st International conference on applied bionics and biomechanics (ICABB) 2010*. Venice, 2010.
14. Van der Smagt P., Stillfried G. Using MRT data to compute a hand kinematic model. *Proc. 9th International conference on motion and vibration control (MOVIC)*. Munich, 2008.
15. Grebenstein M., Chalou M., Hirzinger G., Siegart R. Antagonistically driven finger design for the anthropomorphic DLR hand arm system. *Proc. 2010 IEEE-RAS 10th International conference on humanoid robots (humanoids)*. Nashville, 2010, pp. 609–616. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHR.2010.5686342>.
16. Chalou M., Grebenstein M., Wimböck T., Hirzinger G. The thumb: guidelines for a robotic design. *Proc. 2010 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems*. Taipei, 2010, pp. 5886–5893. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5650454>.
17. Alchakov V.V., Kramar V.A. Postroenie matematicheskoy modeli zakhvata antropomorfnoy robota na osnove metoda Denavita-Hartenberga [Construction of the mathematical model of the arm of an antropomorphic robot based on the Denavit-Hartenberg method]. *Automation and measurements in mechanical engineering and instrument engineering*, 2019, no. 1(5), pp. 92–102 (in Russ.).
18. Corke P.I. A simple and systematic approach to assigning Denavit-Hartenberg parameters. *IEEE transactions on robotics*, 2007, vol. 23, iss. 3, pp. 590–594. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.896765>.
19. Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A. *Metody upravleniya robototekhnicheskimi prilozheniyami* [Control methods for robotic applications]. Saint-Petersburg, Universitet ITMO Publ., 2016. 108 p. (in Russ.).
20. Avkhadiev F.G., Gubaydullina R.K., Nasibullin R.G. *Uchebno-metodicheskoe posobie po chislennym metodam analiza* [Educational and methodical manual on numerical methods of analysis]. Kazan, Kazanskiy (Privolzhskiy) federalnyy universitet Publ., 2019. 113 p. (in Russ.).