

---

---

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**  
**DESIGN OF ADAPTIVE AND ENERGY-EFFICIENT ROBOTIC SYSTEMS**

---

---

УДК 621.837.5  
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-3-155-163

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ  
ПЛОСКИХ НЕПОЛНОПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ  
ДЛЯ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КИСТЕЙ**

Е. Э. Хомутов<sup>1</sup>, Д. В. Иволга<sup>1</sup>, И. И. Борисов<sup>1\*</sup>, Н. А. Молчанов<sup>2</sup>, И. А. Максимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

\* *borisovii@itmo.ru*

<sup>2</sup> *Сбербанк, Москва, Россия*

**Аннотация.** Представлены результаты структурно-параметрического синтеза плоских неполноприводных механизмов со звеньями переменной длины. Синтез основан на принципе морфологического расчета, согласно которому желаемые свойства робота „программируются“ на уровне механической конструкции, а активное управление используется лишь для мягкой корректировки движений, обусловленных естественным поведением системы. Разработанный алгоритм был апробирован при создании адаптивной компактной кисти для антропоморфного робота iCub, способной выполнять все фундаментальные захваты и обладающей при сопоставимых габаритах более высокой грузоподъемностью по сравнению с оригинальным аналогом на тросовой тяге. Приведен пример синтеза механизма указательного пальца и представлены результаты тестирования опытного образца устройства. Разработанный прототип обладает 14 степенями свободы, но при этом управляется с помощью четырех двигателей. Минимизация количества приводов позволила упростить систему управления, уменьшить количество требуемых сенсоров и массогабаритные параметры и снизить затраты на комплектующие.

**Ключевые слова:** *антропоморфные хватные устройства, морфологический расчет, манипулирование объектами, звено переменной длины, моделирование контактного взаимодействия*

**Ссылка для цитирования:** *Хомутов Е. Э., Иволга Д. В., Борисов И. И., Молчанов Н. А., Максимов И. А. Структурно-параметрический синтез плоских неполноприводных механизмов для антропоморфных роботизированных кистей // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 3. С. 155—163. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-3-155-163.*

**STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS  
OF PLANAR UNDERACTUATED LINKAGES FOR ANTHROPOMORPHIC ROBOTIC HANDS**

E. E. Khomutov<sup>1</sup>, D. V. Ivolga<sup>1</sup>, I. I. Borisov<sup>1\*</sup>, N. A. Molchanov<sup>2</sup>, I. A. Maksimov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *ITMO University, St. Petersburg, Russia*

\* *borisovii@itmo.ru*

<sup>2</sup> *Sberbank, Moscow, Russia*

**Abstract.** The results of structural-parametric synthesis of planar underactuated linkages with variable length links are presented. The proposed synthesis is based on the principle of morphological computation, which means that robot's desired properties are „programmed“ at mechanical level, while active control is used only for soft motion correction caused by the natural behavior of the system. The proposed synthesis algorithm was tested to create an adaptive compact hand for the anthropomorphic robot iCub, capable of performing all fundamental grips and having a higher load capacity with dimensions similar to the original cable-driven hand design. An example of the synthesis for an index finger mechanism is given and the results of testing a prototype device are presented. The developed prototype has 14 de-

degrees of freedom, but it is controlled by just four motors. Minimizing the number of motors made it possible to simplify the hardware and software of its control system, reduce the number of required sensors and weight and size parameters and reduce the cost of components.

**Keywords:** grippers and other end-effectors, compliant joint/mechanism, variable length links, flexible robots, mechanism design

**For citation:** Khomutov E. E., Ivolska D. V., Borisov I. I., Molchanov N. A., Maksimov I. A. Structural-parametric synthesis of planar underactuated linkages for anthropomorphic robotic hands. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 3. P. 155—163 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-3-155-163.

**Введение.** Во многих робототехнических устройствах, например таких, как пальцы антропоморфных хватных устройств [1—3], роботы-манипуляторы [4], ноги шагающих роботов [5], используется простая, в понятиях механики, полноприводная конструкция открытой кинематики. Такой подход универсален, так как позволяет алгоритмически реализовать любую траекторию в рамках конфигурационного пространства, однако требует нетривиальных алгоритмов управления скоординированным движением всех сочленений робота одновременно. Кроме того, для полноприводной системы требуется количество приводов, равное количеству степеней свободы, что влияет на габариты, массу и стоимость устройства. Примерами антропоморфных хватов на основе полноприводной системы с открытой кинематической цепью являются DLR Hand II [1], Shadow EDC Hand [2] и бионическая рука [3]. Помимо сложности системы управления, из-за большого количества двигателей подобные роботизированные руки снабжаются массивными предплечьями, в которых располагаются двигатели, что ограничивает их практическое использование.

Для робототехнических устройств, движение которых не требует высокой степени реконфигурации, возможно синтезировать механизмы с минимумом управляющих двигателей, в том числе рычажные механизмы с одной степенью свободы. В работе [6] представлен метод синтеза многозвенных рычажных механизмов аниматронных персонажей, исполнительные элементы которых движутся по сложным траекториям, при этом используется минимум двигателей для обеспечения движения: так как конечности персонажей движутся по одной траектории, нет необходимости реконфигурировать траекторию их перемещения.

Некоторые протезы кисти оснащаются механизмами пальцев с одной степенью свободы, благодаря чему они надежны в эксплуатации и предсказуемы по поведению. Однако такие механизмы не способны адаптироваться к форме захватываемых объектов и поэтому количество жестов, которые может выполнять рука, сильно ограничено [7]. В робототехнике многие устройства тоже должны выполнять однотипные движения, но если устройство контактирует с внешней средой, оно должно быть способно адаптироваться, т.е. реконфигурироваться под действием силы контакта.

В настоящей статье представлен алгоритм синтеза неполноприводных рычажных механизмов замкнутой кинематики с эластичными элементами, необходимыми для требуемой реконфигурации при взаимодействии механизма с окружающей средой. Хотя рассматриваемый принцип применим для различных механизмов, например механизм ноги в работе [8] был синтезирован аналогичным образом, — в рамках данной статьи разработанный алгоритм описывается на примере синтеза механизмов пальцев антропоморфного хватного устройства. Предлагаемый алгоритм позволяет упростить управление, но при этом сохранить большое количество степеней свободы разрабатываемых механизмов с помощью интеграции элементов переменной геометрии и эластичности: пружин сжатия/растяжения и работающих на изгиб гибких элементов.

В рамках исследования была поставлена задача создать хватное устройство, способное обеспечить силовой адаптивный и точный щипковый типы захвата, а также повысить грузоподъемность, минимизировать массу кисти и количество двигателей, приводимых в

действие простыми алгоритмами управления, по сравнению с оригинальной конструкцией кисти робота iCub. Существующая оригинальная конструкция кисти робота iCub, построенная на основе неполноприводной схемы с открытой кинематической цепью с системой тросов и шкивов, обладает компактными размерами, высокой адаптивностью и богатой жесткостью, однако для нее свойственны ненадежный щипковый захват, низкая повторяемость движений и малая грузоподъемность (до 350 г) [9, 10].

**Структурно-параметрический синтез механизмов пальцев.** Цель синтеза механизмов пальцев заключается в определении *структуры* и *геометрических параметров* проектируемого механизма, при которых движение пальцев будет иметь требуемый характер.

В [11] предложен метод проектирования универсальных адаптивных захватных устройств, способных обеспечить оба фундаментальных вида захвата: точный щипковый и силовой обхватывающий, благодаря использованию звеньев переменной длины и механической декомпозиции каналов управления. Базирующийся на этом методе алгоритм структурно-параметрического синтеза механизма пальца может быть описан следующим образом.

*Шаг 1.* Задать требуемый характер движения (траекторию, рабочее пространство и пр.), количество фаланг и сформировать полноприводный механизм пальца открытой кинематики.

*Шаг 2.* Замкнуть кинематическую схему механизма путем дополнения голономных связей в целях перемещения приводов в корпус ладони без изменения их количества.

*Шаг 3.* Рассчитать возможные структуры присоединяемых групп звеньев для редуцирования количества степеней свободы механизма и выбрать из них оптимальную в смысле наиболее простой конструкторской реализации.

*Шаг 4.* Решить задачу оптимизации длин и расположения точек крепления звеньев выбранной присоединяемой группы для получения полноприводного механизма с редуцированным числом степеней свободы.

*Шаг 5.* Определить, какое из звеньев присоединяемой группы следует заменить на звено переменной длины для получения неполноприводных механически адаптивных пальцев захвата, соответствующих предъявляемым требованиям.

Поскольку указательный, средний, безымянный пальцы и мизинец обладают единой структурой, то пример синтеза дан только для механизма указательного пальца. Синтез механизма большого пальца приведен в [12, 13].

**Открытая кинематическая схема и характер движения.** При синтезе механизма указательного пальца в качестве базовой была взята полноприводная открытая кинематическая схема с двумя степенями свободы. На рис. 1, а показан требуемый характер сгибания пальца при отсутствии контактного взаимодействия. Палец вращается относительно корпуса ладони при сохранении расположения фаланг друг относительно друга.

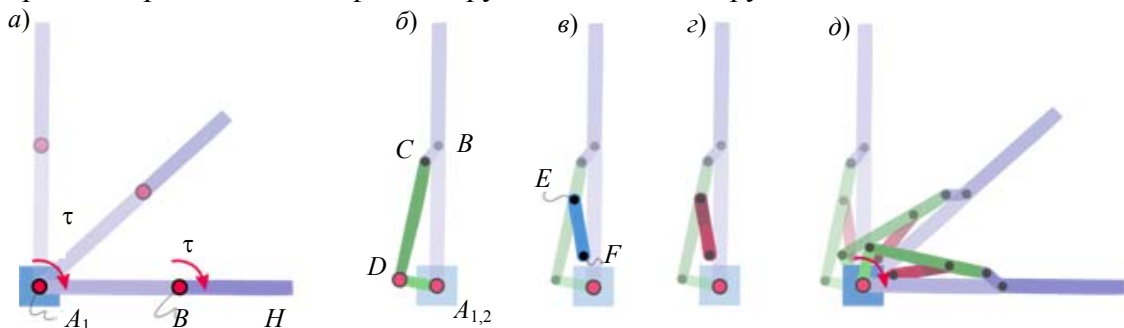


Рис. 1

**Перемещение двигателей в корпус ладони.** При проектировании антропоморфного захватного устройства важно сохранить пропорции человеческой кисти, что накладывает ограничения на габариты комплектующих элементов. Для обеспечения высокой грузоподъемности требуются габаритные двигатели, которые невозможно уместить в суставах пальца.

Двигатели можно разместить в корпусе ладони, а движение на суставы передать с помощью тросов, как в оригинальной конструкции iSub, либо с помощью рычажных механизмов, в частности механизмов замкнутой кинематики (см. далее).

У базового механизма пальца две степени свободы (см. рис. 1, а), что может быть рассчитано по формуле Чебышева для плоских механизмов

$$W_0 = 3n - 2P_5 = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 2 = 2,$$

где  $n$  — число подвижных звеньев,  $P_5$  — число кинематических пар с одной степенью свободы.

Для замыкания кинематической цепи базового механизма к нему следует присоединить группу звеньев, которая не дополняет и не редуцирует степень свободы, т.е. надо присоединить группу звеньев Ассур с количеством степеней свободы  $W_a = 0$ . С помощью формулы Чебышева можно рассчитать сочетания звеньев и кинематических пар групп звеньев, которые могут быть присоединены для замыкания механизма:

$$W_a = 3n_a - 2P_a = 0,$$

где возможны группы  $n_a = 2$  и  $P_a = 3$  или  $n_a = 4$  и  $P_a = 6$ , также может быть рассчитана группа с большим количеством звеньев, но увеличение числа звеньев не рационально. Самой простой группой звеньев в рассматриваемом примере является двухповодковая с  $n_a = 2$  и  $P_a = 3$ .

Для замыкания кинематической цепи один крайний поводок присоединяемой группы должен крепиться к крайнему звену базового механизма, т.е. к дистальной фаланге, а второй крайний поводок должен крепиться к стойке, т.е. к корпусу. При этом необходимо обеспечить следование пальца по требуемой траектории, для чего должна быть проведена параметрическая оптимизация координат точек крепления звеньев и их длин.

На рис. 1, б изображен механизм пальца с присоединенной группой звеньев с контуром  $ADC$ . Группа свободных параметров, определяемых в процессе оптимизации, состоит из длин  $l_1$  и  $l_2$  присоединяемых звеньев  $AD$  и  $DC$  соответственно и координат точек их присоединения к дистальной фаланге и стойке — координат точек  $C$  и  $A_2$  в локальных системах координат звеньев. Группа заданных проектировщиком фиксированных параметров, помимо длин фаланг пальца, определяется требуемым положением линии равновесия (подробности приведены ниже). Численная оптимизация параметров была проведена в программной среде MatLab с использованием пакета Global Optimization Toolbox и метода patternsearch. Целью оптимизации является минимизация длин присоединяемых звеньев и расстояния между требуемой и фактической траекториями двух крайних точек дистальной фаланги:

$$F_1 = k_1 l_1 + k_2 l_2 + k_3 \sqrt{\frac{1}{q} \sum_i \|p_{1,i}^* - p_{1,i}\|^2 + \|p_{2,i}^* - p_{2,i}\|^2},$$

где  $p_{1,i}^* = [x_{1,i}^*, y_{1,i}^*]^T$  и  $p_{2,i}^* = [x_{2,i}^*, y_{2,i}^*]^T$  — координаты требуемых траекторий движения крайних точек дистальной фаланги в момент времени  $i$ ;  $p_{1,i}$  и  $p_{2,i}$  — координаты фактических траекторий движения крайних точек дистальной фаланги в момент времени  $i$ ;  $q$  — количество измерений,  $k_i$  — весовые коэффициенты.

Минимизация длин присоединяемых звеньев гарантирует, что размеры присоединяемой группы будут наиболее компактными, потребуется меньше материала, а значит, механизм будет наиболее легким. Минимизация расстояния между желаемой и фактической траекториями гарантирует, что синтезированный механизм будет следовать по требуемой траектории. В процессе решения задачи оптимизации выполняется поиск координат точек крепления  $p_1$ ,  $p_2$  и длин звеньев  $l_1$ ,  $l_2$ , присоединяемых к базовому механизму, при которых обеспечивается минимум целевой функции  $F_1$ .

**Редуцирование количества степеней свободы механизма.** Полученный на предыдущем этапе механизм замкнутой кинематики имеет две степени свободы (см. рис. 1, б). Реду-

цирование количества степеней свободы до одной проведем путем наложения дополнительных голономных связей, присоединив группу звеньев с  $W_f$  степенями свободы:

$$W_f = -(W_n - A),$$

где  $W_n$  — степень свободы механизма замкнутой кинематики,  $A$  — требуемое число приводов пальца, в рассматриваемом примере  $A=1$ .

Аналогично предыдущему этапу, с помощью формулы Чебышева можно рассчитать сочетания звеньев и кинематических пар группы звеньев, которые могут быть присоединены для редуцирования степени свободы. В рассматриваемом примере  $A=1$ , а  $W_f=-1$ , т.е.

$$W_f = 3n_f - 2P_f = -1,$$

где возможны группы  $n_f=1$  и  $P_f=2$  или  $n_f=3$  и  $P_f=5$ ; также может быть рассчитана группа с большим количеством звеньев, но увеличение числа звеньев не рационально. Самым простым элементом в рассматриваемом примере является присоединение одного звена с  $n_f=1$  и  $P_f=2$ .

При интегрировании этого звена в механизм замкнутой кинематики необходимо обеспечить следование по требуемой траектории, для чего проводится параметрическая оптимизация положения точек крепления присоединяемого звена. Группа свободных параметров, определяемых в процессе оптимизации, состоит из координат точек крепления присоединяемого звена, выраженных в локальных системах координат звеньев, к которым звено присоединяется. Для двух звеньев определяется пара точек  $p_a$  и  $p_b$ , абсолютное расстояние между которыми изменяется минимально на протяжении всего цикла движения. Среднеквадратическое расстояние между двумя точками рассчитывается как

$$l_{ab} = \frac{1}{q} \sum_i \|p_{a,i} - p_{b,i}\|^2,$$

где  $p_{a,i}$  и  $p_{b,i}$  — координаты точек  $p_a$  и  $p_b$  в мировой системе координат в момент времени  $i$ .

Отклонение среднеквадратического расстояния между точками крепления звена

$$F_2 = \frac{1}{q} \sum_i \left( \|p_{a,i} - p_{b,i}\|^2 - l_{ab} \right)^2$$

используется в качестве целевой функции [9]; минимизация функции  $F_2$  гарантирует, что величина  $l_{ab}$  постоянна при движении механизма по требуемой траектории.

**Интеграция звеньев переменной длины.** На рис. 1, в изображен синтезированный механизм указательного пальца, в котором посредством звена  $EF$  вводятся дополнительные голономные связи. Полученная полноприводная закрытая кинематическая цепь обладает одной степенью свободы и приводится в движение одним приводом. Однако данный механизм не способен адаптироваться к форме объекта.

Для придания свойств адаптивности пальцу захватного устройства необходимо выбрать звено, которое будет заменено звеном переменной длины для обеспечения реконфигурации между щипковым и адаптивным захватами. Под звеном переменной длины будем понимать систему из двух твердых тел, образующих поступательную кинематическую пару, и упругого элемента в виде пружины сжатия, контролирующего расстояние в поступательной кинематической паре.

На рис. 1, г показано абсолютно твердое звено  $EF$ , замененное звеном переменной длины, которое способно растягиваться при приложении нагрузки к рабочим поверхностям фаланг. При отсутствии контактного взаимодействия палец следует требуемой траектории (рис. 1, д).

Взаимодействие указательного пальца с объектами манипулирования продемонстрировано на рис. 2. Для синтезированного неполноприводного механизма пальца замкнутой кинематики с двумя степенями свободы свойственна *линия равновесия* [14], разделяющая рабочую поверхность дистальной фаланги на зону щипкового захвата и зону адаптивного захвата. При захвате объекта кончиками пальцев будет выполняться щипковый захват (рис. 2, а), а если точки касания пальцев с объектами находятся ближе к сочленению, то будет выполнен адаптивный захват (рис. 2, б). Особенности параметрического синтеза механизмов пальца с учетом требуемого положения линии равновесия приведены в [14]. На рис. 2, в изображена адаптация пальца при захвате сферического объекта.

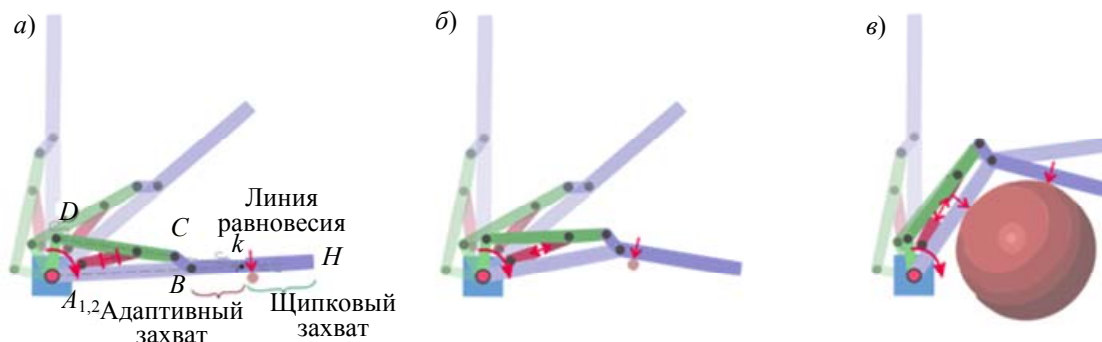


Рис. 2

**Тестирование захватного устройства.** На основе предложенного алгоритма синтеза механизмов пальцев была спроектирована конструкция антропоморфного реконфигурируемого неполноприводного захватного устройства для гуманоидного робота iCub. Была поставлена задача спроектировать конструкцию роботизированной кисти в габаритах оригинальной кисти iCub, массой до 0,5 кг, грузоподъемностью не менее 1 кг, которая способна выполнять большое количество жестов, захватывать и надежно удерживать объекты разных размеров, произвольной массы, формы и жесткости.

На рис. 3 представлен опытный образец захватного устройства, который производит захват произвольных объектов, выполняя как точные щипковые, так и силовые адаптивные захваты. Разработанный захват обладает 14 степенями свободы, но требует только четыре управляющих двигателя. Рабочие зоны захвата с предельными размерами объектов манипулирования изображены на рис. 4. Основные сравнительные характеристики оригинального захвата робота iCub и разработанной конструкции захватного устройства приведены в таблице.

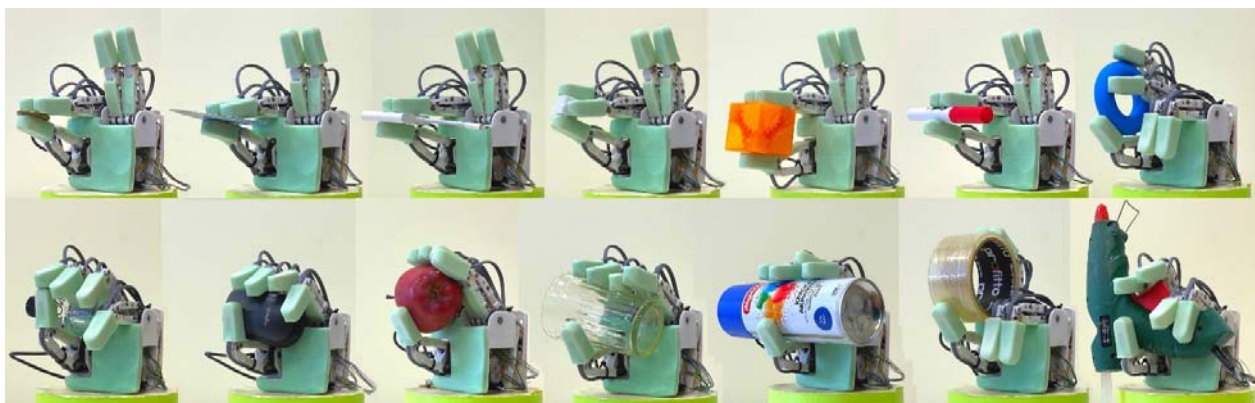


Рис. 3

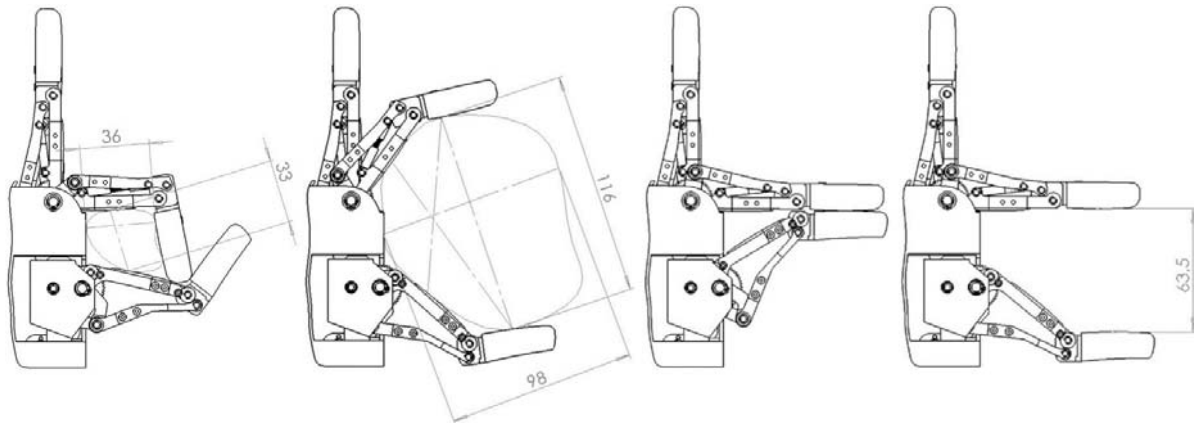


Рис. 4

Характеристика	iCub [12]	Захватное устройство
Усредненная сила, создаваемая одним пальцем, Н	До 2	До 9,6
Размеры, мм	165×138×40	186×170×40
Масса, г	250	495
Грузоподъемность, г	350	Более 1000
Количество актуаторов, шт	9	4
Габаритный диаметр сечения объекта при адаптивном захвате, мм	14—100	36—116
Габаритный диаметр сечения объекта при щипковом захвате, мм	25	0—63,5

Целями тестирования захвата антропоморфной кисти были следующие:

- проверка кинематики синтезированных пальцев для верификации их поведения при выполнении жестов и захватов;
- проверка работы эластичных элементов и адаптации пальцев к форме объекта при контакте;
- проверка функционирования системы управления с реализацией работы датчиков касания и датчиков углового положения.

Результаты тестирования показали, что кинематика синтезированных пальцев работает согласно ожиданиям и соотносится с результатами моделирования. При контакте только кончиков дистальных фаланг с объектом осуществляется щипковый захват. Когда задействованы проксимальные фаланги, звено переменной длины увеличивается и захват начинает адаптироваться к форме объекта. Несмотря на то, что указательный и средний пальцы приводятся в движение одним приводом, они могут адаптироваться к форме объекта благодаря подпружиненности входных звеньев пальцев относительно общего приводного вала. Если в контакте участвует только указательный палец, то средний палец продолжает двигаться по заданной траектории, и наоборот.

**Заключение.** Предложенный алгоритм структурно-параметрического синтеза адаптивных неполноприводных механизмов на основе принципа морфологического проектирования позволяет создавать робототехнические устройства, которые часть задачи управления выполняют благодаря своей механической конструкции, упрощая сложность вычислений алгоритмов системы управления и требования к техническому оснащению устройства. В результате в качестве апробации алгоритма синтеза спроектирована конструкция захватного устройства с 14 степенями свободы, но требующего только четыре двигателя для приведения в движение всего устройства: два для большого пальца, один для указательного и среднего пальцев и один для безымянного пальца и мизинца, тогда как для управления оригинальной кистью робота iCub требуется 9 приводов. Адаптация пальцев захвата к форме объектов манипулирования

происходит автоматически за счет механической структуры и не требует сложных алгоритмов управления для скоординированного движения большого количества приводов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Liu H.* et al. Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2008. P. 3692—3697.
2. *Rothling F.* et al. Platform portable anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-dof shadow and 9-dof tum hand // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2007. P. 2951—2956.
3. *Xu Z., Todorov E.* Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016. P. 3485—3492.
4. *Raiola G.* et al. Development of a safety-and energy-aware impedance controller for collaborative robots // IEEE Robotics and Automation Letters. 2018. Vol. 3, N 2. P. 1237—1244.
5. *Katz B., Di Carlo J., Kim S.* Mini cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control // Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019. P. 6295—6301.
6. *Thomaszewski B.* et al. Computational design of linkage-based characters // ACM Trans. on Graphics (TOG). 2014. Vol. 33, N 4. P. 1—9.
7. *Abd M. A.* et al. Surface Feature Recognition and Grasped Object Slip Prevention With a Liquid Metal Tactile Sensor for a Prosthetic Hand // Proc. of the 8th IEEE RAS/EMBS Intern. Conf. for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). IEEE, 2020. P. 1174—1179.
8. *Borisov I. I.* et al. Study on elastic elements allocation for energy-efficient robotic cheetah leg // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2019. P. 1696—1701.
9. *Metta G.* et al. The iCub humanoid robot: An open-systems platform for research in cognitive development // Neural Networks. 2010. Vol. 23, N 8—9. P. 1125—1134.
10. *Schmitz A.* et al. Design, realization and sensorization of the dexterous iCub hand // Proc. of the 10th IEEE-RAS Intern. Conf. on Humanoid Robots. IEEE, 2010. P. 186—191.
11. *Borisov I. I., Khomutov E. E., Kolyubin S. A., Stramigioli S.* Computational design of reconfigurable underactuated linkages for adaptive grippers // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2021.
12. *Borisov I. I.* et al. Novel optimization approach to development of digit mechanism for bio-inspired prosthetic hand // Proc. of the 7th IEEE Intern. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob). IEEE, 2018. P. 726—731.
13. *Борисов И. И., Защитин П. А., Борисова О. В., Колюбин С. А.* Алгоритм структурно-параметрического синтеза механизмов адаптивных захватных устройств со звеньями переменной длины // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 5. С. 467—475.
14. *Birglen L., Laliberté T., Gosselin C. M.* Underactuated Robotic Hands. Springer, 2007. Vol. 40.

#### Сведения об авторах

- Евгений Эдуардович Хомутов** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; E-mail: e.khomutov@itmo.ru
- Дмитрий Викторович Иволга** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; E-mail: ivolga.dv@itmo.ru
- Иван Игоревич Борисов** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; научный сотрудник; E-mail: borisovii@itmo.ru
- Никита Алексеевич Молчанов** — ПАО „Сбербанк“, лаборатория робототехники; ст. инженер-разработчик; E-mail: molchanov.n.al@sberbank.ru
- Иван Алексеевич Максимов** — ПАО „Сбербанк“, лаборатория робототехники; ст. инженер-разработчик; E-mail: maksimov.i.a@sberbank.ru

Поступила в редакцию 28.12.21; одобрена после рецензирования 10.01.22; принята к публикации 18.01.22.



## REFERENCES

1. Liu H. et al. *2008 IEEE/RSJ International Conference On Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2008, pp. 3692–3697.
2. Rothling F. et al. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2007, pp. 2951–2956.
3. Xu Z., Todorov E. *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016, pp. 3485–3492.
4. Raiola G. et al. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, no. 2(3), pp. 1237–1244.
5. Katz B., Di Carlo J., Kim S. *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, pp. 6295–6301.
6. Thomaszewski B. et al. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2014, no. 4(33), pp. 1–9.
7. Abd M.A. et al. *2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, 2020, pp. 1174–1179.
8. Borisov I.I. et al. *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019, pp. 1696–1701.
9. Metta G. et al. *Neural Networks*, 2010, no. 8-9(23), pp. 1125–1134.
10. Schmitz A. et al. *2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2010, pp. 186–191.
11. Borisov I.I., Khomutov E.E., Kolyubin S.A., Stramigioli S. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2021, pp. 6117–6123.
12. Borisov I.I. et al. *2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (Biorob)*, 2018, pp. 726–731.
13. Borisov I.I., Zashchitin R.A., Borisova O.V., Kolyubin S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 5(63), pp. 467–475, DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-467-475. (in Russ.)
14. Birglen L., Laliberté T., Gosselin C.M. *Underactuated Robotic Hands*, Springer, 2007, vol. 40.

**Data on authors**

<b>Evgeny E. Khomutov</b>	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechanics and Energy-Efficient Robotics; E-mail: e.khomutov@itmo.ru
<b>Dmitry V. Ivolga</b>	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechanics and Energy-Efficient Robotics; E-mail: ivolga.dv@itmo.ru
<b>Ivan I. Borisov</b>	—	PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechanics and Energy-Efficient Robotics; Researcher; E-mail: borisovii@itmo.ru
<b>Nikita A. Molchanov</b>	—	Sberbank, Robotics Laboratory; Senior Engineer-Designer; E-mail: molchanov.n.al@sberbank.ru
<b>Ivan A. Maksimov</b>	—	Sberbank, Robotics Laboratory; Senior Engineer-Designer; E-mail: maksimov.i.a@sberbank.ru

Received 28.12.21; approved after reviewing 10.01.22; accepted for publication 18.01.22.