

АЛГОРИТМ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА МЕХАНИЗМОВ АДАПТИВНЫХ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ СО ЗВЕНЬЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ

И. И. БОРИСОВ, Р. А. ЗАЩИТИН, О. В. БОРИСОВА, С. А. КОЛЮБИН

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: borisovii@itmo.ru

Представлен алгоритм структурно-параметрического синтеза механизмов пальцев универсальных хватных устройств, способных решать задачи надежной манипуляции объектами произвольной формы при внешних статических контактных воздействиях и использовании относительно простых регуляторов по положению и скорости. Требуемые характеристики работы устройства достигаются благодаря механической декомпозиции каналов управления, в частности за счет введения в конструкцию роботов активных либо пассивных звеньев переменной длины. Предложенный алгоритм может быть применен для синтеза механизмов как промышленных хватных устройств, так и антропоморфных протезов кисти.

Ключевые слова: *синтез механизмов, звенья переменной длины, хватные устройства, структурный синтез, адаптивность*

Введение. Согласно традиционной парадигме построения робототехнических комплексов (РТК), окружение робота должно быть определено и известно. По этой причине РТК оснащается системой технического зрения либо проектируется изначально таким образом, что все движения и действия робота однозначны: например, робот комплектуется уникально спроектированной технологической оснасткой рабочего стола. В таком случае достигается высокая точность позиционирования рабочего инструмента, при этом используются методы управления роботом по положению и скорости.

Однако область применения роботов расширяется и актуальным направлением развития робототехники является проектирование робототехнических устройств для использования в динамической заранее неопределенной среде [1]. Особенно это касается локомоционных и манипуляционных роботов, решающих задачи собственного перемещения и удержания объектов манипулирования соответственно. Робототехническое устройство, работающее в условиях неопределенной окружающей среды, должно обязательно обладать свойством адаптивности для обеспечения надежности и безопасности работы [2].

Принцип работы хватного устройства. Как правило, задачу захвата и удержания объектов произвольной формы решают с помощью хватных устройств (ЗУ), пальцы которых представляют собой полноприводные механизмы в виде открытых кинематических цепей (рис. 1, а). Данный способ универсален, но к техническому оснащению устройства предъявляются высокие требования [3], такие как оснащение большим количеством двигателей, датчиков и т.д. и использование сложных алгоритмов управления движением, например по механическому импедансу [4].

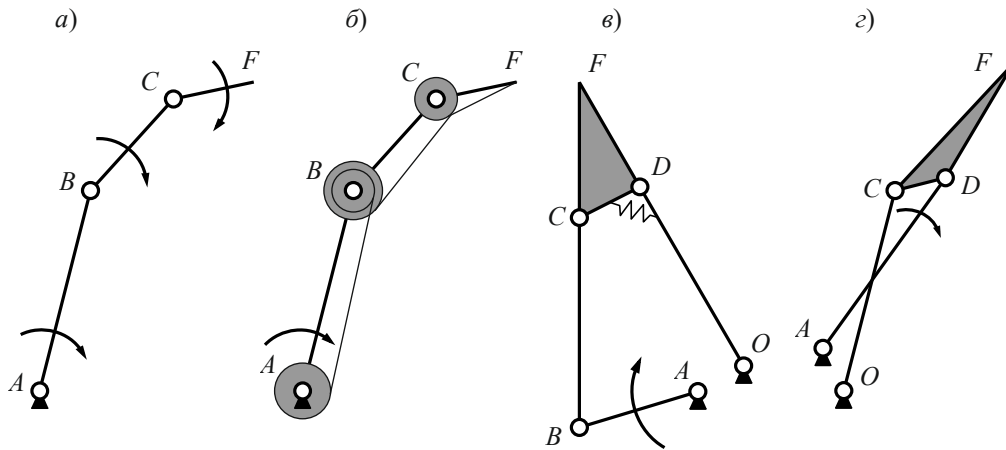


Рис. 1

Упростить систему управления можно, применив неполноприводный механизм, обладающий большим количеством степеней свободы, чем у управляющих двигателей. Таким образом можно обеспечить работу пальца при использовании только одного двигателя с одним датчиком, в результате чего устройство обладает меньшей массой и большей грузоподъемностью.

Неполноприводные механизмы могут быть реализованы не только на основе системы тросов и шкивов (рис. 1, б) — в этом случае устройство характеризуется невысокими показателями грузоподъемности и точности позиционирования [5, 6], но и с помощью рычажных механизмов в виде закрытых кинематических цепей (рис. 1, в), что значительно повышает грузоподъемность [7, 8]. Однако неполноприводные механизмы не способны обеспечить точный захват, который возможен только при использовании полноприводных механизмов (рис. 1, г).

Проблема нестабильности неполноприводных механизмов может быть решена гибридными механизмами, позволяющими осуществлять переключение между полноприводным и неполноприводным режимами работы. В [9] представлен тросовый механизм пальца искусственной руки, приводимый в движение двумя тросами с двумя катушками. Первый трос с катушкой воспроизводит традиционный неполноприводный принцип, тогда как второй трос с катушкой минимизирует зоны нестабильности захвата, дожигая палец. Другим примером является захватное устройство Multi-Modal (M2) Gripper [10], позволяющее адаптивно захватывать объекты различной формы, зажимать мелкие предметы и выполнять переориентирование захваченного объекта.

Для комбинирования в одном устройстве способности осуществлять фундаментальные виды захватов, на которые способна человеческая рука, — точный щипковый и силовой обхватывающий [11], а также обеспечивать высокую грузоподъемность и минимизацию массы самого ЗУ за счет использования минимального количества управляющих двигателей, приводимых в движение простыми алгоритмами управления, необходимо синтезировать механизм, способный реконфигурироваться из неполноприводного (см. рис. 1, в) в полноприводный (см. рис. 1, г) и обратно, повторяя руку человека на функциональном уровне.

В настоящей статье предлагается метод проектирования неполноприводных адаптивных захватных устройств, позволяющий решать задачи управления движением в условиях контактного взаимодействия на базе простых регуляторов по положению и скорости. Метод заключается в реализации конструкции решений, позволяющих механически декомпозировать каналы управления и задавать желаемый характер движения на механическом уровне, в частности, за счет введения в конструкцию роботов активных и пассивных *звеньев переменной длины* (ЗПД) в целях обеспечения адаптивности и энергоэффективности систем. ЗПД — это гибкое тело или система твердых тел, которое входит в две вращательные кинематиче-

ские пары. Расстояние между кинематическими парами может быть либо зафиксированным, либо переменным, при этом длина звена обусловлена голономными связями всего механизма и приложенной к нему внешней нагрузкой, т.е. длина напрямую не контролируется. Например, в работе [12] предложен подход, при котором кинематические цепи рассматриваются как системы тел переменной длины.

Алгоритм структурно-параметрического синтеза. В работах [13, 14] был рассмотрен частный случай структурного и геометрического синтеза гибридного механизма пальца универсального хватного устройства. Дальнейшее исследование выявило возможность применения данного метода проектирования для более широкого круга хватных устройств. Механизм пальца в общем виде представлен на рис. 2, а, где серым кружком обозначено расположение управляющего двигателя.

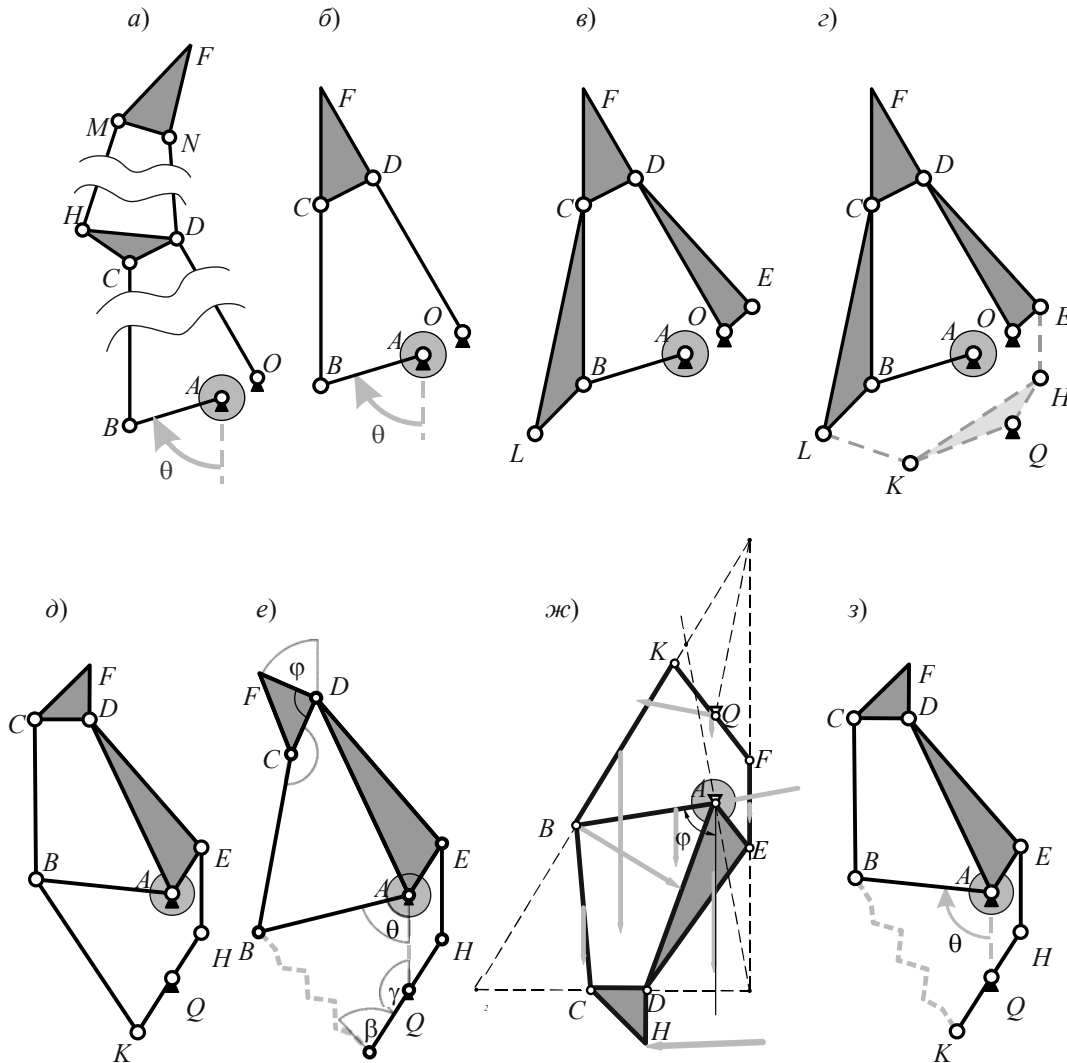


Рис. 2

Приведем алгоритм структурно-параметрического синтеза.

Структурный синтез.

1. Определить степень свободы W_0 базисного механизма по формуле Чебышева для плоских механизмов с низшими кинематическими парами (рис. 2, б):

$$W_0 = 3n - 2P_5 - P_4,$$

где n — количество подвижных звеньев, P_5 — количество кинематических пар пятого класса, P_4 — количество кинематических пар четвертого класса.

2. Определить степень свободы W_f присоединяемой группы звеньев для редуцирования степени свободы базисного механизма до единицы:

$$W_f = -(W_0 - A),$$

где $A=1$ — число управляющих двигателей пальца; принципиальной позицией является использование максимум одного двигателя для одного пальца.

3. Рассчитать массив возможных сочетаний числа кинематических пар P_f и подвижных звеньев n_f присоединяемой группы, накладывающих W_f голономных связей на базисный механизм, по формуле

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

учитывая, что P_f и n_f могут быть только целыми числами.

4. Определить варианты структуры присоединяемой группы, состоящей из рассчитанных сочетаний P_f и n_f , рассчитать количество свободных поводков присоединяемой группы и внести полученные данные в таблицу.

5. Определить звенья базисного механизма, к которым может быть добавлена рассчитанная присоединяемая группа (рис. 2, в). Для этого базисный механизм необходимо разбить на структурные группы Ассура и определить мнимые входные звенья, степень свободы которых равна единице, но которые не предполагается оснащать собственным двигателем. Мнимые двухвершинные входные звенья, а также двухвершинные звенья структурных групп II класса, не являющиеся выходными или базисными звеньями, необходимо заменить на трехвершинные и, таким образом, добавить свободные поводки. Количество свободных поводков базисного механизма должно быть равно

$$m_0 = 2(W_0 - 1).$$

6. Присоединить рассчитанную группу к свободным поводкам трехвершинных звеньев базисного механизма пальца для получения полноприводного механизма с одним управляющим двигателем (рис. 2, з). Может быть добавлена либо одна, либо W_0-1 групп. Количество кинематических пар P_f присоединяемой группы должно быть не меньше числа свободных поводков базисного механизма:

$$P_f \geq 2(W_0 - 1) + (n_f - 1).$$

7. Среди двухвершинных звеньев присоединяемой группы выбрать кандидатов на роль ЗПД и определить их минимально допустимую длину с учетом возможного конструктивного исполнения.

Оптимизация параметров.

8. Из всех кандидатов выбрать сочетание ЗПД, не проверенное ранее, зафиксировать их минимальную длину (см. п. 7), а для остальных звеньев оптимизировать геометрические параметры (рис. 2, д). В результате формируется кинематическая схема механизма со звеньями фиксированной длины в полноприводном режиме. Оптимизация может быть проведена численными методами для механизмов, состоящих из небольшого количества звеньев, либо приближенными методами для многозвенных структур, например методом синтеза по дискретным положениям — по двум крайним и i промежуточным, количество положений влияет на точность воспроизводимой траектории. Ограничения, накладываемые на геометрические параметры звеньев, определяются по крайним положениям выходного звена с учетом его желаемой траектории.

9. Для выбранного сочетания ЗПД определить их минимальную и максимальную длину, так что при изменении длины в данном диапазоне все возможные траектории выходных звеньев принадлежали бы заданной рабочей области (рис. 2, е), при этом минимальная длина не может быть меньше определенной в п. 7.

10. Задать динамические параметры всех звеньев механизма (массу, моменты инерции, координаты центров масс) с учетом применяемых конструкционных материалов и технологии изготовления устройства.

11. Провести силовой анализ механизма в обоих режимах для определения зависимости между геометрическими параметрами механизма и значениями сил реакций в кинематических парах и уравновешивающего момента на входном звене (рис. 2, ж).

12. Оптимизировать параметры звеньев механизма для минимизации сил реакции в кинематических парах и момента на входном звене. Если проверены не все варианты ЗПД, вернуться к п. 8, иначе — перейти к п. 13.

13. Выбрать наилучшую модификацию механизма с ЗПД исходя из оптимальных условий конструирования их элементов (рис. 2, з).

В результате должен быть получен механизм пальца роботизированного захватного устройства, который с помощью звеньев переменной длины с активным регулированием способен переключаться между полноприводным и неполноприводным режимами работы для обеспечения либо точного щипкового захвата, либо обхватывающего силового соответственно.

Пример синтеза механизма пальца. Рассмотрим подробный структурный синтез на примерах. Для обеспечения точного щипкового захвата необходимо от неполноприводного механизма перейти к полноприводному, чтобы структура пальца была полностью определена.

Количество степеней свободы плоского рычажного механизма можно рассчитать с помощью формулы Чебышева:

$$W_0 = 3n - 2P_5 = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 5 = 2.$$

Так, в рассматриваемом примере механизм обладает двумя степенями свободы. Для уменьшения степени свободы необходимо добавить группу звеньев, где степень свободы равна

$$W_f = -(W_0 - A) = -(2 - 1) = -1,$$

где $A=1$ — число приводов.

Так как число звеньев и кинематических пар может быть только целым, воспользуемся формулой

$$P_f = \frac{3n_f - W_f}{2}.$$

Применительно к данному примеру, формула определения количества кинематических пар принимает следующий вид:

$$P_f = \frac{3n_f + W_0 - 1}{2} = \frac{3n_f + 1}{2}.$$

Исходя из приведенных формул понятно, что число n_f должно быть только нечетным.

Определим минимальное количество поводков базисного механизма, к которым необходимо присоединить дополнительную структуру для уменьшения количества степеней свободы:

$$m_0 = 2(W_0 - 1) = 2 \cdot (2 - 1) = 2;$$

количество поводков присоединяемой группы рассчитывается по формуле

$$m_f = P_f - (n_f - 1).$$

Получаем, что присоединяемая группа звеньев должна удовлетворять условию $m_f \geq m_0$.

В табл. 1 приведены параметры присоединяемой группы к двухфаланговому пальцу захватного устройства, примеры групп звеньев изображены на рис. 3.

Таблица 1

Параметры присоединяемой группы	Значение				
Количество подвижных звеньев n_f	1	2	3	4	5
Число кинематических пар P_f	2	—	5	—	8
Число свободных поводков m_f	2	—	3	—	4

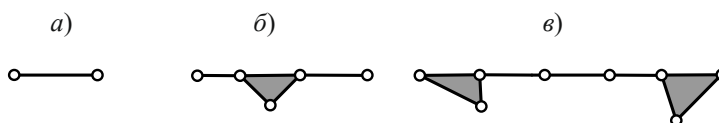


Рис. 3

На рис. 4, *a–в* представлен поэтапный структурный синтез двухфалангового пальца с присоединением группы, состоящей из одного звена ($n_f = 1$) и двух кинематических пар ($P_f = 2$) (см. рис. 3, *a*). На рис. 4, *г* изображен механизм пальца с присоединенной группой, состоящей из трех подвижных звеньев ($n_f = 3$) и пяти кинематических пар ($P_f = 5$) (см. рис. 3, *б*), а на рис. 4, *д* — механизм с той же группой, но присоединенной в ином порядке. Важно отметить, что замкнутые контуры механизма должны быть подвижными.

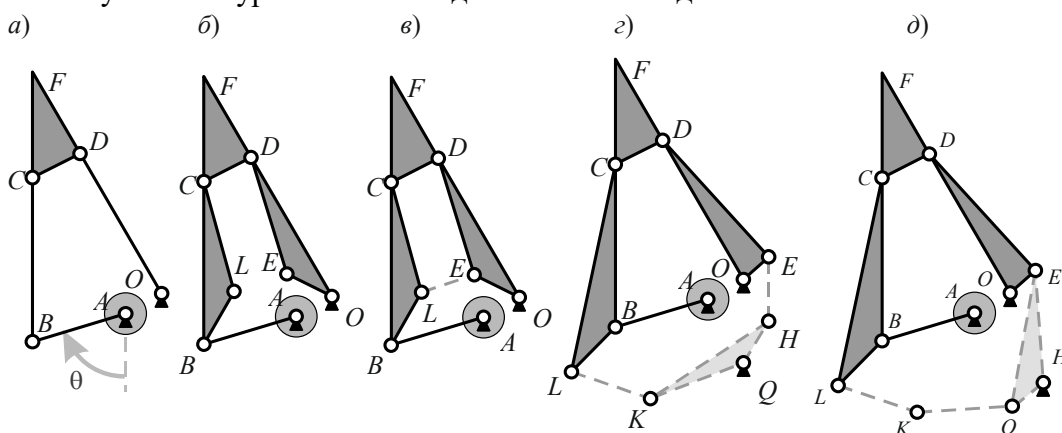


Рис. 4

Далее следует выбрать кандидатов на роль ЗПД среди двухвершинных звеньев присоединяемой группы. После оптимизации геометрических параметров (см. пп. 8–12 алгоритма) необходимо выбрать наилучший вариант механизма пальца с ЗПД.

Для наглядности приведем пример механизма трехфалангового пальца. Степень свободы представленного механизма $W_0 = 3$, рассчитанная степень свободы присоединяемой группы $W_f = -2$. В табл. 2 приведены параметры присоединяемой группы к трехфаланговому пальцу захватного устройства, примеры групп звеньев изображены на рис. 5.

Таблица 2

Параметры присоединяемой группы	Значение			
Количество подвижных звеньев n_f	1	2	3	4
Число кинематических пар P_f	—	4	—	7
Число свободных поводков m_f	—	3	—	4

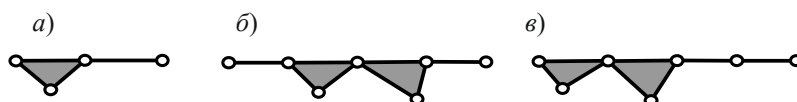


Рис. 5

На рис. 6 представлен поэтапный структурный синтез трехфалангового пальца с присоединением группы, состоящей из четырех подвижных звеньев ($n_f = 4$) и семи кинематических пар ($P_f = 7$) (см. рис. 5, *б*). Пунктиром (рис. 6, *в*) обозначена присоединяемая группа звеньев. Кандидатами на роль ЗПД являются двухвершинные звенья.

Аналогично ранее рассмотренному примеру, на последующих этапах синтеза необходимо решить задачу оптимизации геометрических параметров (см. пп. 8–12) и выбрать наилучший вариант механизма пальца с ЗПД.

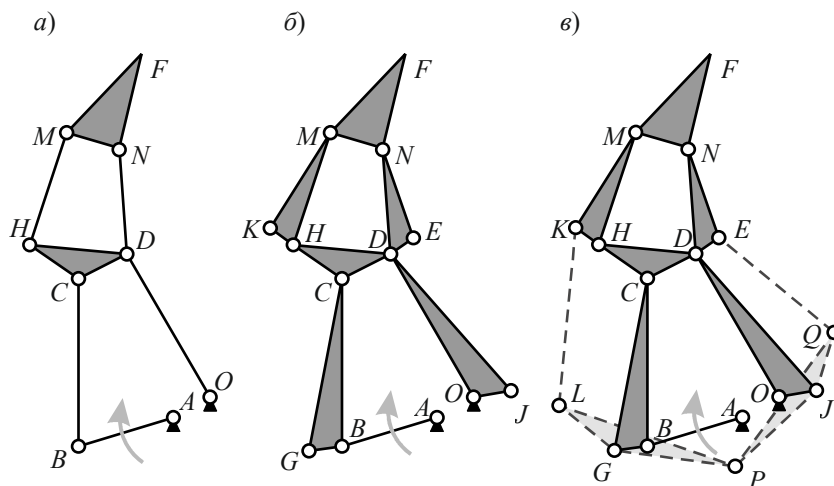


Рис. 6

Заключение. Разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза механизмов пальцев для адаптивных захватных устройств со звеньями переменной длины. Приведены примеры, демонстрирующие, что возможное число различных вариантов структурного синтеза зависит от поставленных задач. Однако базовый механизм может иметь неограниченное количество степеней свободы, к которым может быть присоединено неограниченное количество структурных групп, удовлетворяющих указанным выше условиям. В большинстве случаев для доработки базисного механизма достаточно минимального количества присоединяемых структурных звеньев. Это обусловлено тем, что при большом числе дополняемых структурных групп механизм становится громоздким и, с конструкторской точки зрения, трудно реализуемым.

Предложенный алгоритм может быть применен для синтеза механизмов как промышленных захватных устройств, так и антропоморфных протезов кисти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flexible joint robots: Model-based control revisited // Proc. Opening Ceremonies for the Munich School of Robotics and Machine Intelligence (MSRM) at TUM, Munich, Oct. 26, 2018 [Электронный ресурс]: <<http://www.diag.uniroma1.it/deluca/>>. 18.01.2020.
2. Groothuis S. S., Folkertsma G. A., Stramigioli S. A general approach to achieving stability and safe behavior in distributed robotic architectures // *Frontiers in Robotics and AI*. 2018. Vol. 5, N 108.
3. Beschi M. et al. Sensorless model-based object-detection applied on an underactuated adaptive hand enabling an impedance behavior // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017. Vol. 46. P. 38—47.
4. Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation // *Amer. Control Conf. IEEE*. 1984. P. 304—313.
5. Rothling F. et al. Platform portable anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-dof shadow and 9-dof tum hand // *Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. 2007. P. 2951—2956.
6. Bicchi A. Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road toward simplicity // *IEEE Transact. on Robotics and Automation*. 2000. Vol. 16, N 6. P. 652—662.
7. Laliberte T., Birglen L., Gosselin C. Underactuation in robotic grasping hands // *Machine Intelligence & Robotic Control*. 2002. Vol. 4, N 3. P. 1—11.
8. Kragten G. A. et al. Stable precision grasps by underactuated grippers // *IEEE Transact. on Robotics*. 2011. Vol. 27, N 6. P. 1056—1066.
9. Demers L.-A. A., Gosselin C. Kinematic design of an ejection-free underactuated anthropomorphic finger // *Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. 2009. P. 2086—2091.
10. Ward-Cherrier B., Cramphorn L., Lepora N. F. Tactile manipulation with a TacThumb integrated on the open-hand M2 gripper // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2016. Vol. 1, N 1. P. 169—175.

11. Feix T. et al. The grasp taxonomy of human grasp types // IEEE Transact. on Human-Machine Systems. 2015. Vol. 46, N 1. P. 66—77.
12. Борисов А. В. Динамика механических стержневых систем со звеньями переменной длины применительно к эндо- и экзоскелетам: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Смоленск, 2018.
13. Борисов И. И. Структурный и геометрический синтез механизма пальца универсального хватного устройства, осуществляющего точный щипковый и силовой обхватывающий захваты // Вестн. машиностроения. 2019. № 11. С. 55—62.
14. 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). 2018. P. 726—731.

Сведения об авторах

- Иван Игоревич Борисов** — Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: borisovii@itmo.ru
- Роман Александрович Защитин** — Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; инженер; E-mail: roman.zashchitin@itmo.ru
- Ольга Валерьевна Борисова** — Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; инженер; E-mail: ovborisova@itmo.ru
- Сергей Алексеевич Колюбин** — д-р техн. наук, доцент; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: s.kolyubin@itmo.ru

Поступила в редакцию
25.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Борисов И. И., Защитин Р. А., Борисова О. В., Колюбин С. А. Алгоритм структурно-параметрического синтеза механизмов адаптивных хватных устройств со звеньями переменной длины // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 5. С. 467—475.

ALGORITHM OF STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF ADAPTIVE GRIPPER MECHANISMS WITH VARIABLE-LENGTH LINKS

I. I. Borisov, R. A. Zashchitin, O. V. Borisova, S. A. Kolyubin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: borisovii@itmo.ru

An algorithm is proposed for the structural and parametric synthesis of finger mechanisms of universal gripping devices that can solve problems of reliable manipulation of objects of arbitrary shape under external static contact influences and the use of relatively simple position and speed controllers. The required performance characteristics are achieved due to the mechanical decomposition of the control channels, in particular due to introduction of active or passive units of variable length into the robot design. The algorithm can be used to synthesize the mechanisms of both industrial gripping devices and anthropomorphic hand prostheses.

Keywords: synthesis of mechanisms, variable-length links, gripping devices, structural synthesis, adaptivity

REFERENCES

1. *Flexible joint robots: Model-based control revisited*. Opening Ceremonies for the Munich School of Robotics and Machine Intelligence (MSRM) at TUM. Munich, October 26, 2018, <http://www.diag.uniroma1.it/deluca/>.
2. Groothuis S.S., Folkertsma G.A., Stramigioli S. *Front. Robot. AI* 5. 2018, vol. 108.
3. Beschi M. et al. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, vol. 46, pp. 38–47.
4. Hogan N. *IEEE 1984 American Control Conference*, 1984, pp. 304–313.
5. Rothling F. et al. *IEEE 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp. 2951–2956.
6. Bicchi A. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, no. 6(16), pp. 652–662.
7. Laliberte T., Birglen L., Gosselin C. *Machine Intelligence & Robotic Control*, 2002, no. 3(4), pp. 1–11.
8. Kragten G.A. et al. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, no. 6(27), pp. 1056–1066.
9. Demers L.-A.A., Gosselin C. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 2086–2091.

10. Ward-Cherrier B., Cramphorn L., Lepora N.F. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, no. 1(1), pp. 169–175.
11. Feix T. et al. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2015, no. 1(46), pp. 66–77.
12. Borisov I.I. *Dinamika mekhanicheskikh sterzhnevyykh sistem so zven'yami peremennoy dliny primenitel'no k endo- i ekzoskeletam* (Dynamics of Mechanical Core Systems with Variable-Length Units as Applied to Endo- and Exoskeletons), Doctor's thesis, Smolensk, 2018, 324 p. (in Russ.)
13. Borisov I.I. *Russian Engineering Research*, 2019, no. 11, pp. 55–62. (in Russ.)
14. Borisov I.I. et al. *7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob)*, 2018, pp. 726–731.

Data on authors

- | | |
|----------------------------|---|
| Ivan I. Borisov | — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: borisovii@itmo.ru |
| Roman A. Zashchitin | — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Engineer; E-mail: roman.zashchitin@itmo.ru |
| Olga V. Borisova | — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Engineer; E-mail: ovborisova@itmo.ru |
| Sergey A. Kolyubin | — Dr. Sci., Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: s.kolyubin@itmo.ru |

For citation: Borisov I. I., Zashchitin R. A., Borisova O.V., Kolyubin S. A. Algorithm of structural-parametric synthesis of adaptive gripper mechanisms with variable-length links. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 5. P. 467—475 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-467-475