Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 http://naukovedenie.ru/

Том 9, №2 (2017) http://naukovedenie.ru/vol9-2.php

URL статьи: http://naukovedenie.ru/PDF/79TVN217.pdf

Статья опубликована 24.04.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:
Лапиков А.Л., Масюк В.М. Анализ исторического развития многосекционных механизмов параллельной структуры // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) http://naukovedenie.ru/PDF/79TVN217.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.86/87

Лапиков Антон Леонидович
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Филиал в г. Калуга, Россия, Калуга[1]
Ассистент кафедры М6-КФ «Мехатроника и робототехника»
E-mail: anton.lapikov@inbox.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=801711

Масюк Владимир Михайлович
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Филиал в г. Калуга, Россия, Калуга
Доцент кафедры М6-КФ «Мехатроника и робототехника»
Кандидат физико-математических наук
E-mail: masyuk77@mail.ru
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3543-2781
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=110211
Scopus: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7801670833

Анализ исторического развития многосекционных механизмов параллельной структуры

Аннотация. Современные подходы к построению робототехнических систем требуют глубоких знаний по ряду технических дисциплин, начиная с материаловедения и заканчивая системами управления. Каждый из подходов обладает как значительными преимуществами, так и определенными недостатками, учитывать которые необходимо еще до стадии проектирования. Выбор рационального решения является, как правило, многофакторной задачей и не имеет единственного решения, и для эффективного использования существующих кинематических схем робототехнических механизмов необходим комплексный анализ всех существующих решений.

Основной целью данной работы является анализ исторического развития механизмов параллельной структуры, которые, как отдельный класс механизмов, в настоящее время способны повысить эксплуатационные характеристики и расширить функциональные возможности робототехнических систем. В работе анализируются важнейшие количественные показатели, характерные для основных структур параллельных механизмов. На примере нескольких конкретных прототипов показана необходимость дальнейшего исследования и развития механизмов параллельной структуры.

[1] 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

Ключевые слова: механизмы параллельной структуры; многосекционные механизмы параллельной структуры; классификация; фермы переменной геометрии; пространственные механизмы; модульные манипуляторы

Введение

Исторически первыми и самыми простыми механизмами параллельной структуры можно считать фермы с переменной геометрией. В качестве примера можно привести шарнирные фермы. Манипуляторы с параллельной структурой можно считать «наследниками» таких ферм, а первые упоминания о них появились в работах Миуры [1], Райнхольца [2] и Сегути [3]. На основании данных работ, в которых была описана геометрия и основные характеристики подобных ферм (рис. 1), было доказано, что характеристики системы зависят от типа секции. Предлагаемая ими ферма, структура которой представлена на рис. 1, состоит из соединенных между собой шарнирных октаэдров с тремя звеньями переменной длины. Практическую реализацию данной идеи [2], например, можно увидеть в конструкции, спроектированной в NASA (см. рис. 2):

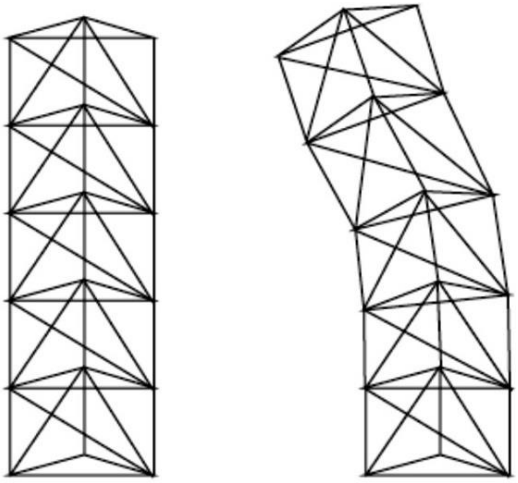


Рисунок 1. *Структура фермы, состоящей из соединенных между собой шарнирных октаэдров с тремя звеньями переменной длины [1]*

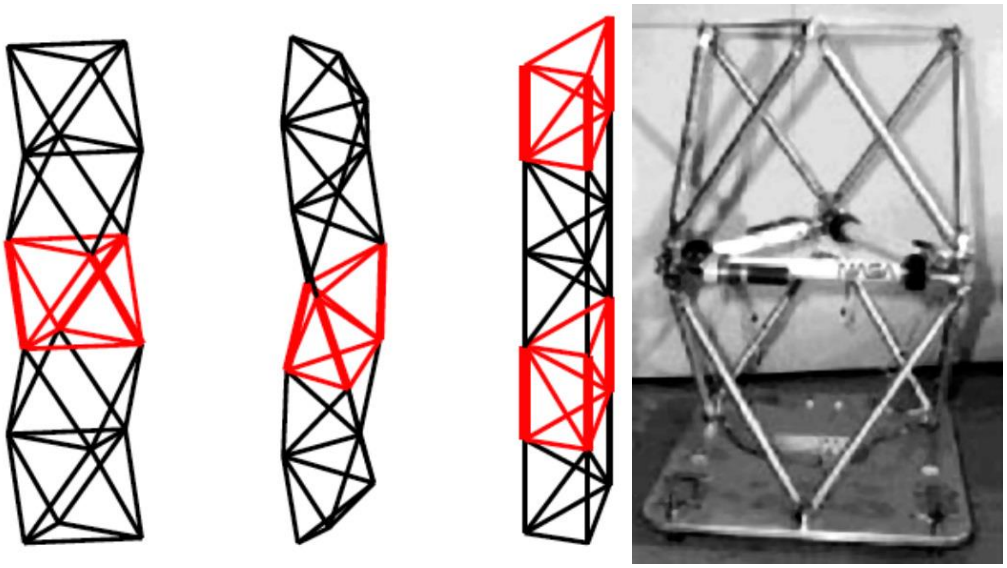


Рисунок 2*. Фермы переменной геометрии и элемент фермы, спроектированной в NASA [2]*

Исследования [2, 3] показали, что механизмы параллельной структуры по сравнению с механизмами последовательной структуры имеют ряд преимуществ, если сравнивать их с «классическими» механизмами последовательной структуры: высокую жесткость, равномерное распределение нагрузки по конструкции фермы, высокую точность позиционирования выходного звена манипулятора, грузоподъемность устройства при исходной одинаковой массе, что обеспечивается отсутствием консольного закрепления приводов.

Исходя из этих положений, в течение нескольких десятков лет механизмы параллельной структуры стали использоваться гораздо чаще, особенно в высокотехнологических областях, в том числе в космической отрасли, где на первый план вышли массогабаритные характеристики и высокая жёсткость конструкции.

Практические испытания показали, что возможно построение манипуляторов с высокой степенью избыточности и достаточно большим рабочим пространством. С другой стороны, имеются некоторые сложности при исследовании динамики подобных систем. По совокупности факторов, системы параллельной структуры хорошо зарекомендовали себя в некоторых областях техники, таких как космическая отрасль, медицина. В качестве уже реализованных систем можно привести системы, внедренные в космической отрасли США.

Рисунок 3. *Использование ферм переменной геометрии при сборке монтируемых структур в условиях микрогравитации*[2]

Ферма, спроектированная NASA (рис. 4), была ключевым элементом руки робота дальней досягаемости, разработанной для DOE с целью удаления отходов и космического мусора.

[2] OV-104/ATLANTIS: An International Vehicle for a Changing World [Электронный ресурс]. - Режим доступа https://www.nasaspaceflight.com/2011/07/ov-104atlantis-international-vehicle-changing-world/ (дата обращения 25.02.2017).

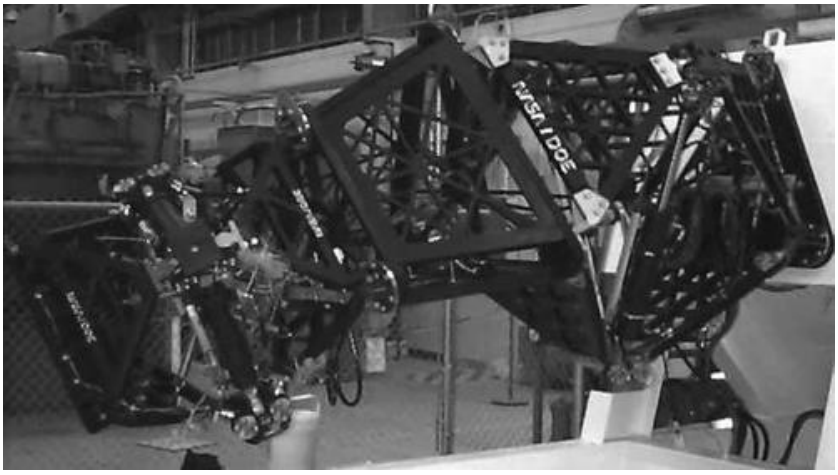


Рисунок 4. *Ферма, спроектированная NASA для DOE (Department of Energy) с целью удаления отходов*[3]

Также следует упомянуть манипулятор модульного типа, предложенный Арзуманяном К.С. и Колискором А.Ш. [4], представленный на рис. 5.

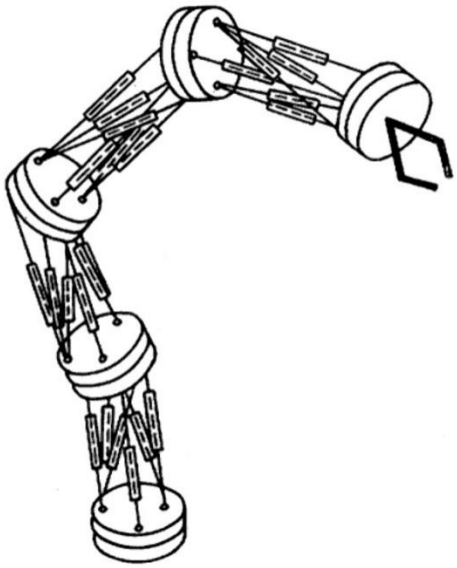


Рисунок 5. *Манипулятор модульного типа [4]*

Также следует упомянуть ферму Колискора [5], так как в ней была заложена основа для нового способа управления с использованием линейных приводов с двумя фиксированными положениями: либо полностью выдвинут, либо полностью убран. Такой манипулятор состоит из соединенных между собой параллельных механизмов с универсальными и сферическими шарнирами, применение которых при проектировании манипуляторов параллельной структуры было рассмотрено в работе Чирикяна [6]. Одной из особенностей данного манипулятора является огромное количество допустимых положений. Например, схват манипулятора Колискора, состоящий из 5 секций, характеризуется примерно 2^{30} допустимыми положениями, в то время как управлять им сравнительно просто. Реализованные подходы к построению таких манипуляторов нашли отражение в работах Массачусетского

[3] Variable Geometry Trusses: NASA Module and DOE System [Электронный ресурс] http://www.ohio.edu/people/williar4/html/Image.html (дата обращения 25.02.2017).

технологического института [7], серьезные исследования были проведены в работах Эберта-Апхоффа [8] и Ли [9]. Итогами исследований можно считать вывод о том, что механизмы весьма сложны, но могут быть применены в различных областях [10]. Наиболее перспективной из которых сейчас можно считать космическую отрасль.

Дальнейшее развитие идей манипуляторов параллельных структур перешло в технологическую плоскость: компания Logabex, в настоящее время прекратившая свое существование, осуществила эту идею в своем устройстве LX4, представленном на рис. 6. Этот тип манипулятора интересен тем, что он обладает крайне высокой избыточностью, большим рабочим пространством и высокими показателями полезной нагрузки при сравнительно невысоких массогабаритных характеристиках. Масса манипулятора составляет 120 кг при массе переносимого груза 75 кг (см. табл. 1). Однако, процесс управления данным роботом чрезвычайно сложен.

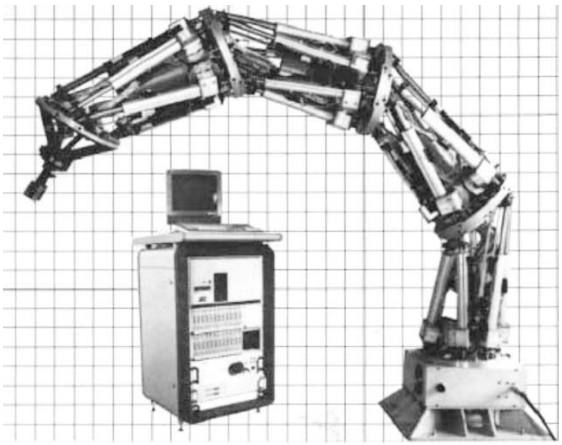


Рисунок 6. *Манипулятор LX4 компания Logabex*[4]

Еще одним примером манипулятора, реализованного на базе многосекционного механизма параллельной структуры, является манипулятор OctArm, спроектированный инженерами университета Миссисипи. В качестве секции для данного манипулятора использовался механизм параллельной структуры с тремя кинематическими цепями. Вместо стандартных механических приводов они использовали эластичные пневматические шланги, при нагнетании или при снижении в них давления изменяющие свою длину, фактически использовав в качестве идеи щупальце осьминога. Установив последовательно три секции, удалось получить очень гибкий манипулятор с большой рабочей зоной, внешний вид которого приведен на рис. 7, а технические характеристики представлены в таблице 1.

[4] Merlet J.P. Parallel robots. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 64.

Рисунок 7. *Манипулятор OctArm*[5]

Другим известным примером многосекционных манипуляторов параллельной структуры является Bionic Handling Assistant (BHA). Данное устройство было разработано немецкой компанией Festo совместно с институтом машиностроения и автоматизации Фраунгофера. Внешний вид манипулятора приведен на рис. 8.

Рисунок 8. *Многосекционный манипулятор BHA компании Festo*[6]

Конструкция, состоящая из четырех элементов типа «трипод», наглядно представлена на рис. 9. При проектировании манипулятора вместо обычных эластичных шлангов инженеры использовали специально разработанные гофрированные приводы. Festo удалось создать систему, сочетающую гибкие материалы, умеренный контроль, способную эффективно реализовывать широкий круг задач позиционирования.

[5] CAV Review'05 Penn State Research Team DevelopsOctArm Soft Robot Manipulator [Электронный ресурс]. - Режим доступа http://www.cav.psu.edu/Newsletters/CAVreview05.pdf (дата обращения 25.02.2017).

[6] Un bras robot qui trompe énormément. [Электронный ресурс]. - Режим доступа http://www.tomsguide.fr/actualite/robot-trompe,51.html (дата обращения 25.02.2017).

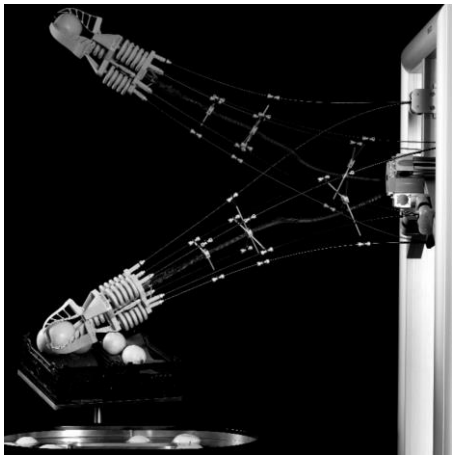


Рисунок 9. *Структура манипулятора ВНА*[7]

При реализации конструкции применялся материал полиамид, что позволило значительно уменьшить вес манипулятора, практически исключив металлические элементы из конструкции. Механизм оснащен тринадцатью приводами и характеризуется одиннадцатью степенями подвижности. Схват манипулятора адаптивен, что позволяет перемещать различные предметы: от малых, размером с куриное яйцо, до массивных. Технические характеристики манипулятора ВНА приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики манипуляторов

Манипулятор	Масса, кг	Грузоподъемность, кг	Тип механизма в секции	Количество секций	Количество степеней подвижности	Тип привода	Имеющиеся датчики
LX4	120	75	пространственный с 6 степенями подвижности	4	24	Э	ПО
OctArm	7	1	пространственный с 3 степенями подвижности	3	9	П	ПО, Д
ВНА	1,8	0,7	пространственный с 3 степенями подвижности	4	11	П/Г	ПО, Д

Где: Э - электрический, П - пневматический, Г - гидравлический, ПО - пространственной ориентации, Д - давления (составлена авторами)

В литературе вопрос исследования многосекционных механизмов параллельной структуры освещен недостаточно широко. Существует небольшое число работ, посвященной данной проблематике. Так, например, в работах Артеменко Ю.Н. и Карпенко А.П. с соавторами [11-15] проведен широкий спектр исследований, посвященных применению многосекционных механизмов параллельной структуры для ориентации космического телескопа «Миллиметрон». Рассмотрены вопросы структурного синтеза подобных механизмов, показана эффективность использования аппарата имитационного моделирования для решения задач динамики многосекционных механизмов параллельной структуры, предложена структура и произведен расчет основных элементов системы автоматического управления. Кроме того, предложена концепция построения интеллектуальной системы активной виброзащиты телескопа. В работах Каганова Ю.Т. и Карпенко А.П. [16-18] представлен вывод соотношений,

[7] Источник: каталог Festo [Электронный ресурс]. - Режим доступа https://www.festo.com (дата обращения 25.02.2017).

описывающих кинематику и динамику различных типов секций многосекционного механизма параллельной структуры. Вопросы геометрии манипулятора и его оптимальной структуры рассматривались Волкоморовым С.В. и Карпенко А.П. в [19-23], а исследование рабочей области для подобных механизмов проведено в [24]. Задачами, связанными с управлением подобными механизмами, занимались Буякин В.М., Гоменюк С.М., Карпенко А.П. [25-27], а также Рыбак Л.А. и Чичварин А.В. с соавторами [28].

Анализ литературы по данной тематике показал, что первоначальный интерес научного сообщества к данной тематике, частично схлынувший из-за вычислительной сложности проводимых исследований в 80-90-е годы в связи с несовершенством ЭВМ того периода, снова актуализируется в настоящее время. Мощности современных ЭВМ дают возможность проводить сложные вычислительноемкие исследования, что позволит внедрить и значительно расширить сферу применения манипуляционных устройств, построенных на базе многосекционных механизмов параллельной структуры. В связи с этим особую актуальность приобретают задачи синтеза и исследования подобных механизмов.

Классификация

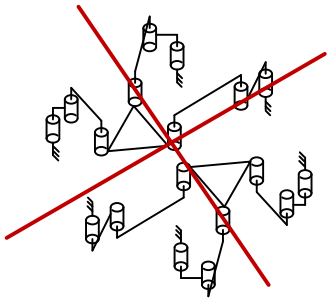
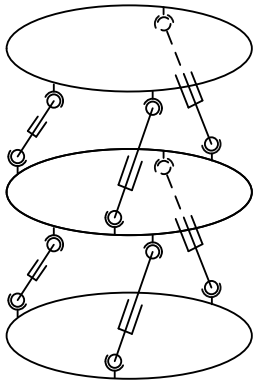
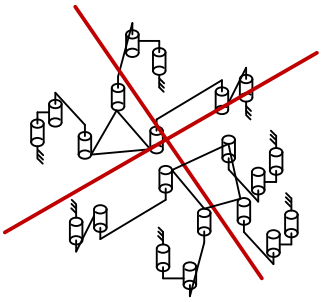
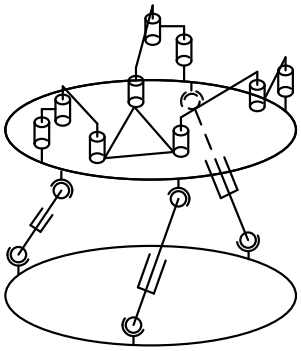
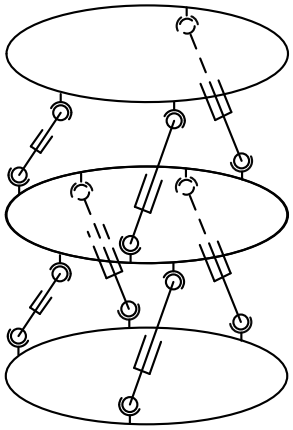
Из вышесказанного следует, что многосекционные механизмы параллельной структуры образуют широкий класс механизмов. Отличительной чертой представителей данного класса является высокая избыточность, являющаяся следствием консольного объединения нескольких параллельных механизмов. Однако не следует путать многосекционные механизмы и механизмы совместного относительного манипулирования, подробно рассмотренные в работах [29, 30]. При совместном относительном манипулировании происходит движение нескольких механизмов, однако в такой системе у каждого параллельного механизма присутствует свое выходное звено. В случае же многосекционных механизмов параллельной структуры выходное звено всегда одно - принадлежащее последней секции.

Рассмотренные примеры механизмов состоят из одинаковых секций, причем каждая секция является пространственным механизмом. Подобная особенность позволяет упростить построение математической модели, но не накладывает каких-либо ограничений на процедуру синтеза многосекционных механизмов параллельной структуры. В общем случае подобный механизм может состоять как из однотипных секций, так и различные, причем каждая секция не обязательно должна быть пространственным механизмом. Допускается применение плоских механизмов в сочетании с пространственными.

Классификация многосекционных механизмов параллельной структуры представлена в таблице 2.

Таблица 2

Классификация многосекционных механизмов по способу образования

		Тип механизма в секции		
		Плоский		Пространственный
Секции	Одинаковые			
	Разные			

Составлена авторами

Заключение

Проведенное в работе исследование на основании обзора и анализа исторических предпосылок развития и современного положения механизмов параллельной структуры при проектировании манипуляционных робототехнических систем, показало, что:

- применение многосекционных манипуляторов параллельной кинематики позволит устранить недостатки роботов-манипуляторов параллельной кинематики;
- на данный момент имеется незначительное число работ, посвященных исследованиям статических и динамических свойств многосекционных манипуляторов параллельной кинематики;
- создание моделей, позволяющих в целом описать кинематику и динамику многосекционных манипуляторов параллельной кинематики, и получение решения для основных задач кинематики и динамики, сопряжено с высокой сложностью и вычислительными затратами;
- трудности при построении моделей многосекционных манипуляторов параллельной кинематики обусловлены двумя основными причинами: во-первых, особенностями механизмов параллельной кинематики как секции

манипулятора, во-вторых, взаимовлиянием секций, обусловленным структурой механизма;

- отсутствуют методики и алгоритмы решения кинематических и динамических задач (в частности прямой задачи кинематики/динамики, как наиболее сложной).

Свойство избыточности обеспечивает данным механизмам возможность движения в условиях большого числа ограничений на рабочее пространство и высокие показатели сервиса. В то же время значительно повышается сложность построения моделей таких механизмов, так как для одного и того же положения выходного звена допустимы различные конфигурации механизма. Кроме того, задачи позиционирования подобных механизмов требуют тщательного изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Miura K., Furuya H. Variable geometry truss and its application to deployable truss and space crane arms // 35th Congress of the Int. Astronautical Federation (Lausanne, 7-13 October, 1984), 1984, p. 1-9.
2. Reinholtz C.F., Gokhale D. Design and analysis of variable geometry truss robots // 9th Annual Conf. on Applied Mechanisms, 1987, p. 1-5.
3. Seguchi Y., Tanaka M. Dynamic analysis of a truss-type flexible robot arm // JSME Int. J., 1990, №2, p. 183-190.
4. Манипулятор модульного типа: Авторское свидетельство СССР №558788, кл. B25 J 1/02 / К.С. Арзуманян, А.Ш. Колискор; № 3515513/25-08; опубл. 1976, Бюл. №31.
5. Koliskor A.Sh. Thel-coordinateapproachtotheindustrialrobotdesign. InVIFAC/IFIP/ IMACS/IFORSSymposium, pages 108-115, Suzdal, URSS, April, 22-25, 1986.
6. Chirikjian G.S. A binary paradigm for robotic manipulators. In IEEE 339 REFERENCES Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 3063-3070, San Diego, May, 8-13, 1994.
7. Culpepper M.L., Chen S-C. Design of precision manipulator using binary actuation and differential compliant mechanisms. In ASPE 18th Annual Meeting, Portland, October, 26-31, 2003.
8. Ebert-Uphoff I., Chirikjian G.S. Inverse kinematics of discretely actuated hyper-redundant manipulators using workspace densities. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 139-145, Minneapolis, April, 24-26, 1996.
9. Lee D.S., Chirikjian G.S. A combinatorial approach to trajectory planning for binary manipulators. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 2749-2754, Minneapolis, April, 24-26, 1996.
10. Mukherjee S., Murlidhar S. Massively parallel binary manipulators. ASME J. of Mechanical Design, 123(1):68-73, March 2001.
11. Артеменко Ю.Н. Синтез механизмов ориентации космического телескопа «Миллиметрон». 1. Возможности механизмов параллельной структуры для ориентации космического телескопа «Миллиметрон» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2013, 1, [Электронный ресурс] Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/534292.html.

12. Артеменко Ю.Н., Карпенко А.П., Пащенко В.Н., Мартынюк В.А., Волкоморов С.В., Темерев К.А., Шарыгин А.В. Синтез механизмов ориентации космического телескопа «Миллиметрон». 2. Синтез и оптимизация многосекционного манипулятора параллельной структуры для управления ориентацией космического телескопа «Миллиметрон» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2013, 3, [Электронный ресурс] Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/554360.html.

13. Артеменко Ю.Н., Глазунов В.А., Сильвестров Э.Е., Кореновский В.В., Демидов С.М. Синтез механизмов ориентации космического телескопа «Миллиметрон». 3. Синтез механизмов параллельной структуры для ориентации антенны космического телескопа // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2013, 5, [Электронный ресурс] Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/571127.html.

14. Артеменко Ю.Н., Саяпин С.Н. Синтез механизмов ориентации космического телескопа «Миллиметрон». 4. Концепция построения интеллектуальной системы активной виброзащиты и высокоточного наведения космического телескопа «Миллиметрон» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2013, 6, [Электронный ресурс] Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/574243.html.

15. Артеменко Ю.Н., Волкоморов С.В., Карпенко А.П., Мартынюк В.А., Пащенко В.Н., Темерев К.А., Шарыгин А.В. Многосекционный манипулятор параллельной структуры для управления ориентацией космической обсерватории "Миллиметрон" // Информационные технологии. 2012. №10. с. 14-21.

16. Карпенко А.П., Шмонин А.М. Исследование динамики многосекционного манипулятора типа «хобот» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2010. №9. С. 6.

17. Каганов Ю.Т., Карпенко А.П. Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа «хобот». 1. математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа «трипод» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2009. №10. С. 4.

18. Каганов Ю.Т., Карпенко А.П. Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа «хобот». 2. математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа «гексапод» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2009. №11. С. 1.

19. Волкоморов С.В., Карпенко А.П. Оптимизация геометрии многосекционного манипулятора типа "хобот" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №3. С. 21-27.

20. Волкоморов С.В., Карпенко А.П., Лелетко А.М. Оптимизация угловых и линейных размеров одно- и двухсекционного манипуляторов параллельной кинематики // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2010. №8. С. 4.

21. Карпенко А.П., Волкоморов С.В. Планирование конфигурации робота-манипулятора типа «хобот» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2010. №3. С. 7.

22. Волкоморов С.В., Карпенко А.П., Мартынюк В.А. Анализ кинематики параллельных механизмов средствами системы автоматизированного проектирования CATIA // Информационные технологии. 2010. №11. С. 45-51.

23. Волкоморов С.В., Карпенко А.П. Планирование оптимальной целевой конфигурации робота-манипулятора типа "хобот" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №8. С. 30-36.

24. Карпенко А.П., Семенихин А.С., Черная Л.А. Метод приближенного построения границы области достижимости многосекционного манипулятора типа «хобот» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. №1. С. 8.

25. Буянкин В.М. Управление электроприводами для механизмов параллельной кинематики робота манипулятора типа «хобот» // Исследования наукограда. 2012. №1. С. 29-36.

26. Буянкин В.М., Гоменюк С.М., Карпенко А.П., Литун Т.О. Нейросетевая идентификация и правление некоторыми механизмами параллельной кинематики // Информационные технологии. 2011. № S11. С. 1-32.

27. Гоменюк С.М., Карпенко А.П. Нейросетевые идентификация и управление механизмом параллельной кинематики типа «трипод» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2010. №9. С. 9.

28. Рыбак Л.А., Чичварин А.В., Мамаев Ю.А., Гапоненко Е.В. Синтез системы управления одно- и двухсекционного манипуляторов с параллельной кинематикой // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. №2-6 (292). С. 64-72.

29. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. - М.: Наука, 1991. - 94 с.

30. Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Терехова А.Н., ВуНгокБик Об особенностях устройств относительного манипулирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2007. - №2. - с. 77-85.

Lapikov Anton Leonidovich
Bauman Moscow state technical university
Kaluga (branch), Russia, Kaluga
E-mail: anton.lapikov@inbox.ru

Masyuk Vladimir Mihaylovich
Bauman Moscow state technical university
Kaluga (branch), Russia, Kaluga
E-mail: masyuk77@mail.ru

Analysis of historical development of multisectional parallel mechanisms

Abstract. Modern approaches to development of robotic systems demand deep knowledge in the variety of technical disciplines, from materials technology to control systems. Each of the approaches possesses considerable advantages as well as certain downsides that should be considered even before the stage of project development. The choice of an efficient solution, as a rule, is a multivariable task and does not have a single solution, so for efficient usage of existing kinematic constructions of robotic mechanisms it is necessary to comprehensively analyse all existing solutions.

The main purpose of this paper is the analysis of historical development of multisectional parallel mechanisms, which are able nowadays, as a separate category of mechanisms, to increase operational properties as well as to extend function capabilities of robotic systems. The paper analyses the most important quantitative indicators, characteristic to basic structures of parallel mechanisms. Using several particular prototypes as example, the necessity of further research and development of parallel mechanisms is shown.

Keywords: parallel mechanisms; multisectional parallel mechanisms; classification; variable geometry truss; multidimensional mechanisms; kinematic of robotic mechanisms; modular manipulators