

ШАГАЮЩИЕ РОБОТЫ – ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

М.Б. Игнатьев, зав. каф. Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, д-р техн. наук, проф., ignatmb@mail.ru

С.В. Владимиров, ген. дир. ЗАО «АРСЕНАЛ–207»

В.И. Сапожников, зам. ген. дир. ЗАО «АРСЕНАЛ–207»

М.Б. Сергеев, проф. Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, д-р техн. наук

Д.В. Кузьмин, ст. науч. сотр. ЗАО «АРСЕНАЛ–207»

В.Н. Соловьев, доц. Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, канд. техн. наук,

А.В. Рыжов, ст. науч. сотр. ЗАО «АРСЕНАЛ–207»

Я.А. Липинский, асп. Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

Рассматриваются проблемы создания шагающих роботов, которые имеют преимущества перед колесными машинами при преодолении препятствий, но требуют более сложной системы управления, анализируются перспективы применения шагающих роботов. В качестве примеров рассматриваются экспериментальные образцы автономного шагающего адаптивного робота для диагностики газопроводов и шестиногого робота с симметричной архитектурой на гидроприводах, который может без разворота двигаться в любом направлении, что важно при преодолении препятствий.

Ключевые слова: шагающие машины, адаптивные роботы, сенсорные системы, диагностика газопроводов, феномен адаптационного максимума, преодоление препятствий, сложные киберфизические системы.

WALKING ROBOTS – CHALLENGES AND PROSPECTS

M.B. Ignatiev, Head of the Chair, St. Petersburg state University of Aerospace Instrumentation, Ph.D. of Engineering, Professor, ignatmb@mail.ru

S.V. Vladimirov, General Director, CJSC «ARSENAL–207»

V.I. Sapozhnikov, Deputy General Director, CJSC «ARSENAL–207»

M.B. Sergeev, Professor, St. Petersburg state University of Aerospace Instrumentation, Ph.D. of Engineering

D.V. Kuzmin, Senior Researcher, CJSC «ARSENAL–207»

V.N. Solovyev, Assistant Professor, St. Petersburg state University of Aerospace Instrumentation, Doctor of Engineering

A.V. Ryzhov, Senior Researcher, CJSC «ARSENAL–207»

Y.A. Lipinski, Post Graduate Student, St. Petersburg state University of Aerospace Instrumentation

The Article discusses the issues of creating robots that have advantages over wheeled vehicles in overcoming obstacles, but requiring a more complex control system and analyzes the prospects for the use of robots. As examples the Article considers experimental samples of Autonomous adaptive walking robot for diagnostics of gas pipelines and a six-legged robot with symmetrical architecture of the hydraulic actuators, which can pivot to move in any direction, which is important when overcoming obstacles.

Key words: walking machine, adaptive robots, sensor systems, diagnostics of pipelines, the phenomenon of adaptation maximum, overcoming obstacles, complex cyber-physical systems.

Шагающие машины – это механизмы, передвигающиеся посредством перестановки опор с места на место. По аналогии с живыми организмами, опоры принято называть ногами, хотя они могут быть совсем не похожи на ноги животных или насекомых. История создания шагающих машин с древнейших времен представлена в работе В.Е. Павловского [9]. Прототипами шагающих машин, обычно, служили живые организмы. Это определило количество ног, имеющихся в таких машинах: 2 (человек), 4 (животные), 6 (насекомые). Реже встречаются проекты машин с большим количеством ног, прототипами для которых служат пауки (8 ног), ракообразные (10 ног) и многоножки (больше 10 ног). Подобно живым организмам, машины, обычно, проектируются с четным количеством ног. Вместе с тем, не существует никаких ограничений на количество ног у машины. Нет также необходимости иметь четное количество ног. Например, спроектированный нами автономный шагающий робот для диагностики газопроводов [3, 4] имеет девять ног.

В идеальном случае, количество ног должно соответствовать назначению машины. Меньшее количество ног означает лучшую маневренность машины на пересеченной местности. Однако, чем меньше ног, тем сложнее система управления машиной, обеспечивающая ее устойчивость.

В настоящее время создание шагающей машины является актуальной проблемой, которой занимаются многие организации во всем мире. Интерес к этой задаче обусловлен рядом преимуществ шагающих машин над колесными и гусеничными собратьями. Смысл создания шагающих машин, в первую очередь, заключается в обеспечении возможности передвигаться по пересеченной местности. В отличие от колеса, нога не имеет постоянного соприкосновения с поверхностью земли. Это позволяет шагающей машине переступать через препятствия, непроходимые для колесной и гусеничной техники. Нога также позволяет двигаться по крутым склонам. Изменение положения ног относительно корпуса машины позволяет избегать наклона самого корпуса и опрокидывания машины.

Исследования, связанные с созданием шагающих машин, направлены именно на обеспечение движения по пересеченной местности. Значительных результатов в этом направлении добились ученые MIT (Massachusetts Institute of Technology), а также исследователи японских компаний. Эти организации создали несколько действующих прототипов машин с двумя и четырьмя ногами. Двунogie машины – это человекоподобные роботы. Наиболее совершенные модели – роботы Atlas (The Agile Anthropomorphic Robot) и Petman. Наиболее совершенные модели четырехногих роботов – LS3 (Legged Squad Support Systems) и BigDog. Эти роботы способны перемещаться по сильно пересеченной местности. В том числе, проводились их испытания в лесу. Разработка этих роботов спонсируется DARPA – исследовательской организацией министерства обороны США.

Впечатляющие успехи двух- и четырехногих шагающих машин, однако, не привели к прекращению работ над созданием роботов с большим количеством ног. Среди них наиболее часто встречаются разработки машин с шестью ногами. Реже применяются восьминогие машины. Как это ни парадоксально звучит, управление такими машинами проще. Движение машины с шестью ногами можно организовать так, что центр тяжести всегда будет находиться между точками опоры. Это невозможно обеспечить для машин с четырьмя и, тем более, с двумя ногами. Шестиногая машина более устойчива, потенциально обладает лучшей проходимостью. Однако, за это по всей видимости придется расплачиваться большим весом машины и меньшей скоростью движения. Тяжелые машины, способные нести большой груз, целесообразно оснащать большим количеством ног.

Для создания автономного шагающего механизма необходимо решить несколько проблем. Эти проблемы включают:

- конструкцию шагающего движителя и его кинематическую схему;
- «походку» – алгоритмы движения по пересеченной местности;
- устойчивость к внешним механическим воздействиям;
- построение системы управления движением;

- бортовой вычислительной системы;
- бортовой вычислительной сети;
- человеко-машинного интерфейса;
- конструкцию сенсорной системы;
- энергетику, обеспечение машины энергоресурсами для достаточно длительной автономной работы.

Кинематическая схема. Количество ног шагающей машины, их расположение на корпусе машины и конструкция отдельной ноги определяются условиями местности, по которой должна передвигаться машина и требуемыми режимами работы – скоростью движения, величиной полезной нагрузки (переносимого груза), выполняемыми маневрами.

Рассмотрим для примера кинематическую схему шестиногой машины. Машина состоит из шестиугольной платформы, по периметру которой равномерно распределены шесть ног. Каждая нога имеет два сустава (рис. 1). Коленный сустав имеет одну степень подвижности – сгибается в вертикальном направлении. Бедренный сустав имеет две степени подвижности – вертикальную и горизонтальную (рис. 2). Так же каждая нога имеет датчик опоры.

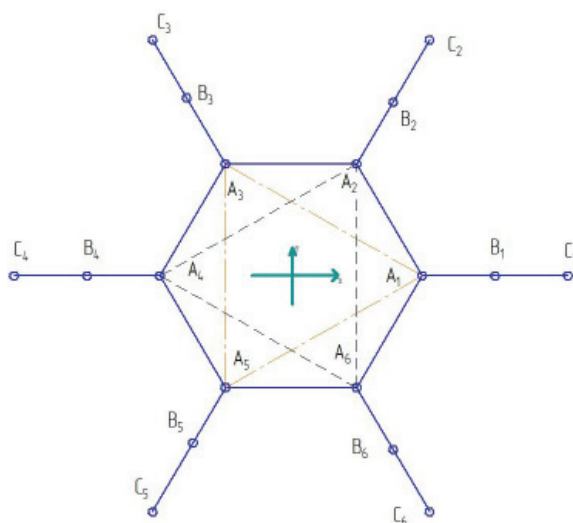


Рис. 1 Кинематическая схема машины

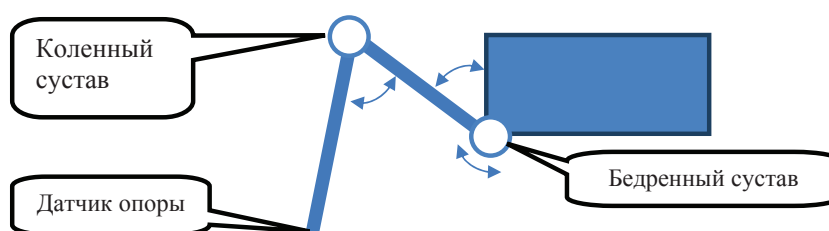


Рис. 2. Кинематическая схема ноги

Машина предназначена для движения по сильно пересеченной местности. На местности могут располагаться препятствия в виде углублений (ямы, канавы) и возвышений (большие камни, завалы), которые машина может перешагивать. Местность может иметь крутые скло-

ны, которые машина преодолевает изменением положения ног и без наклона корпуса. Машина предназначена для переноски значительных грузов, однако, не рассчитана на движение с большой скоростью. Машина способна двигаться в любом направлении, в том числе менять направление движения без поворота корпуса. Ниже представлены фото экспериментального образца шестиногого робота, который проходит испытания (рис. 3–4).



Рис. 3. Шестиногий робот с гидроприводами, вид сбоку



Рис. 4. Шестиногий робот, вид сверху

Выше были приведены материалы по автономному шагающему роботу для диагностики газопроводов [3, 4], который был представлен на выставке в Ганновере Hannover Messe 2013. Принцип действия этого робота ясен из этих приведенных материалов, это девятиногая машина, которая черпает энергию из газового потока, что и обеспечивает ее автономность (рис. 5–6).

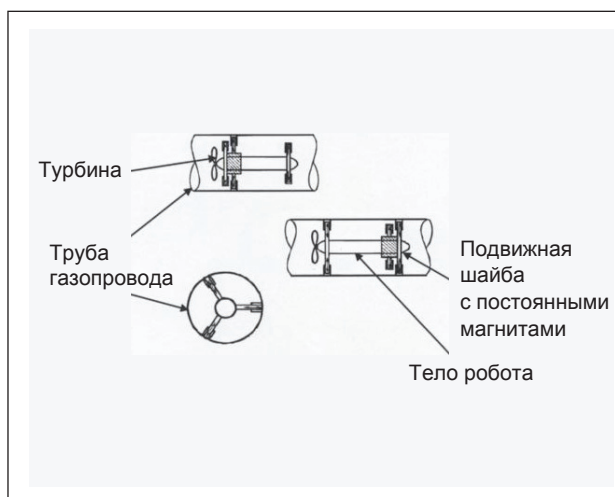


Рис. 5. Конструкция автономного шагающего робота для диагностики газопроводов



Рис. 6. Экспериментальный образец автономного шагающего робота для диагностики газопроводов

Алгоритмы движения. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию алгоритмов движения машин с различным количеством ног. Основное направление – выработка оптимальной походки при преодолении различных препятствий. Эффективность алгоритмов оценивается по энергозатратам, скорости перемещения и устойчивости машины во время движения. Отдельная тема исследований, преодоление наиболее сложных препятствий. В последние годы на эту тему выпущено много публикаций. В списке литературы мы приводим лишь некоторые из них.

Алгоритм движения описывает взаимное положение ног машины в динамике. Например, при движении шестиногой машины, в каждом шаге участвуют все шесть ног. Допустим, выбрана походка, при которой переносятся три ноги одновременно, а центр тяжести машина находится над треугольником, вершины которого образуют точки соприкосновения ног с землей. Машина, при этом, находится в устойчивом равновесии. Перенос корпуса машины происходит за счет изменения положения суставов опорных ног. В то же время свободные ноги поднимаются над землей и переносятся вместе с корпусом. Скорость движения будет зависеть от слаженности движения ног. Алгоритм движения сводится к описанию временной диаграммы угла отклонения каждого сустава. Задача усложняется, если поверхность, по которой движется машина неровная.

Устойчивость. Существуют два вида устойчивости машины: статическая и динамическая устойчивость. Статическая устойчивость – это способность машины сохранять равновесие, стоя на месте. Динамическая устойчивость – способность машины сохранять равновесие во время движения. Сохранение устойчивости тем сложнее, чем меньше ног у машины. Неустойчивость машины вызвана смещением ее центра тяжести. Если центр тяжести выходит за границы площади опоры, машина опрокидывается. Машины с двумя ногами имеют наименьшую площадь опоры. Центр тяжести машины смещается при изменении взаимного положения ее частей, например, при поднятии ноги, или действиях бортовым манипулятором. Динамическая устойчивость машины может быть нарушена при внезапной потере опоры одной из ног.

Дополнительной характеристикой устойчивости является способность сохранять равновесие при внешнем механическом воздействии, например ударе. Такие воздействия могут быть оказаны, как на стоящую, так и на движущуюся машину. В компании Boston Dynamics проводят, например испытания на устойчивость машин к удару сбоку шаром, весом несколько килограммов.

Системы управления движением. Для управления движением необходима сложная многоуровневая система реального времени. Система управления строится как бортовая вычислительная сеть, объединяющая множество контроллеров различной вычислительной мощности. Принципы построения аппаратной части сети те же, что и у бортовых сетей современных автомобилей. Можно использовать такие же микроконтроллеры и протоколы обмена данными. Вместе с тем топология сети и программное обеспечение контроллеров нужно разрабатывать заново.

Система включает несколько контуров управления, каждый из которых работает непрерывно. На нижнем уровне – это контуры управления отдельными суставами. Каждым суставом управляет отдельный микроконтроллер. Микроконтроллер постоянно опрашивает датчики положения сустава и выдает сигналы управления на привод сустава. Одновременно, микроконтроллер получает команды изменения положения сустава от контроллера вышележащего уровня управления.

Контроллер контура управления ногой постоянно общается с контроллерами суставов, получая информацию о текущем положении сустава и посылая команды корректировки положения. Следующий контур управления отслеживает взаимное расположение ног. Согласованное изменение положения ног определяет маневр, выполняемый машиной.

Следующий контур управления связан с планированием маневров. Уровень отслеживает состояние машины в целом. В задачу этого уровня входит, в частности обеспечение статической и динамической устойчивости машины.

Описанные выше четыре уровня контуров управления представляют собой систему управления движением. Над системой управления движением существуют еще два контура управления – контур автоматизированного управления миссией и контур управления с участием человека. Физически, эти контуры разделены человеко-машинным интерфейсом. Однако логически они решают по существу одну и ту же задачу – прокладку маршрута движения машины.

Контур автоматизированного управления миссией прокладывает траекторию на основании данных об окружающей среде, предоставляемых сенсорной системой. Траектория строится в виде предполагаемой кривой движения с допустимыми отклонениями. Отдельно обозначаются запретные зоны, то есть зоны, в которые вступать нельзя (например ямы). В результате планируемую траекторию можно представить как некоторый коридор, в пределах которого и должно осуществляться движение машины.

Нет необходимости передавать всю траекторию перед началом движения. Можно передавать части траектории по мере продвижения. Это, в частности, облегчает корректировку траектории. Такая потребность может возникнуть, например, из-за появления динамических препятствий в виде движущихся объектов.

Уровень Управления миссией должен возвращать рапорты о ходе выполнения миссии, например в форме сообщений на экране оператора.

Для использования адаптационных возможностей робота он должен находиться в зоне адаптационного максимума [1, 2, 3].

Сенсорная система. Сенсорная система собирает данные об окружающей среде и положении машины, а также производит первичную обработку этой информации. Данные от сенсорной системы поступают в контур управления миссией и используются для прокладки и корректировки траектории движения машины.

В качестве датчиков окружающей среды обычно используются видеокамеры, радары и лидары. В специальных применениях могут использоваться щупы, управляемые манипуляторами. Основная задача датчиков – сбор информации о местности в пределах траектории движения, то есть датчики вперед смотрящие. Это, как правило, достаточно для двуногих и четырехногих машин. Шестиногие машины, способные перемещаться в любом направлении без разворота корпуса, целесообразно оснащать датчиками кругового обзора.

Видеокамеры дают информацию в привычном для человека формате. Для машины же требуется создание сложного программного обеспечения, основанного на распознавании визуальных образов. Видеокамера не может определять расстояние до предметов. Поэтому создание трехмерной картины местности также является нетривиальной задачей.

Измерять расстояния можно с помощью радаров и лидаров. Основное отличие между ними заключается в том, что радары работают в радиочастотном диапазоне, в то время как лидары – в оптическом. Вследствие этого, радары могут использоваться в условиях плохой видимости. К сожалению, и те и другие обеспечивают менее четкую картину местности, чем видеокамеры. Поэтому, их целесообразно использовать в дополнение к видеокамерам.

Датчиками положения машины служат геолокационные датчики (GPS, ГЛОНАСС), гироскопы и акселерометры. Геолокационные датчики позволяют определять координаты машины в пространстве. Гироскопы и акселерометры дают информацию об ориентации и наклоне корпуса машины. Эти датчики очень важны для обеспечения устойчивости машины во время движения.

Контроллеры предварительной обработки информации должны быть достаточно мощными вычислительными устройствами, поскольку им требуется обрабатывать значительные объемы информации в реальном времени.

Энергетика. Обеспечение шагающей машины энергией для достаточно длительной автономной работы в настоящее время является нерешенной задачей. Ноги шагающей машины постоянно находятся «в тонусе». На приводы каждой ноги непрерывно подаются управляющие воздействия, даже если машина стоит на месте. Поэтому вопрос бортовых энергоресурсов для шагающей машины стоит более остро, чем для колесной или гусеничной техники.

Для работы бортовых контроллеров и вычислительных сетей необходима электрическая энергия. Приводы суставов можно также делать электрическими. Именно так и поступают при создании экспериментальных машин небольшого размера. Однако, для обеспечения работы механических приводов требуется значительно больше энергии, чем для бортовой электроники. Тяжелые шагающие машины в настоящее время оснащаются гидравлическими приводами. Гидравлический привод может обеспечить большее усилие, чем современные электрические приводы. Однако, для работы гидравлического привода нужен бортовой компрессор, создающий необходимое давление жидкости. Компрессоры можно строить как на основе электрических моторов, так и на основе двигателей внутреннего сгорания.

Электрическую энергию можно запасать в бортовых аккумуляторах, либо вырабатывать бортовыми генераторами. Современные аккумуляторы имеют значительный удельный вес. Фактически, они могут обеспечить работу небольшой машины в течение непродолжительного времени. Требуется существенно более легкие и емкие источники энергии. Большим недостатком аккумуляторов является длительное время зарядки. Вместе с тем, примерно та же задача стоит перед создателями легковых электромобилей. В шагающей машине могут быть использованы те же аккумуляторы, что и, скажем, в автомобилях Tesla.

Перспективным решением представляется использование топливных элементов. В топливных элементах проблема длительной зарядки отсутствует. Они пополняются топливом так же, как и бензиновые двигатели. Современные топливные элементы, однако, еще слишком громоздки.

Тяжелые шагающие машины, у которых компрессор приводится в движение двигателем внутреннего сгорания, могут использовать электрогенератор, вращаемый тем же двигателем. Точно также обеспечиваются энергией современные автомобили. Рассмотренный выше автономный адаптивно шагающий робот для диагностики газопроводов черпает необходимую энергию из газового потока, что позволяет ему перемещаться внутри трубы газопровода на многие километры.

Заключение

Итак, были рассмотрены проблемы создания шагающих роботов, которые продолжают бросать вызов мировому научно-техническому сообществу. В соответствии со спецификой передвижения по пересеченной местности, возможности преодоления препятствий, выполнения задач в условиях, опасных для жизни и здоровья человека, шагающие роботы могут быть созданы для работы на земле, под землей, под водой и в космосе. Они должны выполнять работу робота-спасателя в чрезвычайных ситуациях на территории радиоактивного, химического или бактериологического заражения. Они могут входить в состав специальных средств, придаваемых формированиям Министерства по гражданской обороне и чрезвычайным ситуациям. При проведении боевых действий шагающие роботы будут придаваться боевым единицам – взводам для переноса по пересеченной местности боеприпасов и раненых бойцов. Гексапод (шестиногий робот) сможет и сам в автоматическом адаптивном режиме вести боевые действия. Как показал опыт освоения других планет и астероидов, шагающая посадочная платформа является необходимым элементом оснащения космических миссий.

Список литературы

1. Игнатъев М.Б. «Голономные автоматические системы» изд. АН СССР, 1963.
2. Игнатъев М.Б., Кулаков Ф.М., Покровский А.М. «Алгоритмы управления роботами-манипуляторами». Машиностроение, Л., 1972, вг. изд., 1977 тр. изд., пер. на англ. Виргиния Пресс, 1973.

3. Игнатъев М.Б. «Кибернетическая картина мира. Сложные киберфизические системы». СПб, 2014.
4. Игнатъев М.Б., Липинский Я.А., Жаринов О.О., Ненашев В.А., Макин П.И., Герасимов Г.М. Автономный адаптивно шагающий робот для диагностики газопроводов». Патент № 151608 с приоритетом от 23.5.2014.
5. Гурфинкель В.С., Гурфинкель Е.В., Девянин Е.А., Ефремов Е.В., Жихарев Д.Н., Ленский А.В., Шнейдер А.Ю., Штильман Л.Г. «Макет шестиногого шагающего аппарата с супервизорным управлением» / Исследование робототехнических систем, Наука, М., 1982.
6. Брискин Е.С., Жога В.В., Малолетов А.В., Чернышов В.В. «Шагающие машины ВолгГТУ (опыт разработки, результаты исследований, практическое применение)» / Волгоградский государственный технический университет, 2008.
7. Буданов В.М. Алгоритмы планирования движений шестиногого шагающего аппарата. Фундаментальная и прикладная математика, 2005, том №, с. 197–206.
8. Луцкий В.А. Исследование адаптивных алгоритмов передвижения шестиногого шагающего робота // В кн.: Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. науч. тр. VII-й Международной научно-практической конференции (Коломна, 20–22 мая 2013). Т. 2. М.: Физматлит, 2013, с. 799–809.
9. Павловский В.Е. О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 101. 32 с. Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101>.
10. Rushworth A., Cobos-Guzman S., Axinte D., Raffles M., Pre-gait analysis using optimal parameters for a walking machine tool based on a free-leg hexapod structure, Robotics and Autonomous Systems, vol. 70, issue C.
11. Yang Jung-Min, Omni directional walking of legged robots with a failed leg. Mathematical and Computer Modeling: An International Journal, vol. 47, issue 11–12, June, 2008, pp. 1372–1388.
12. CN 201291928 Y. Six-foot walking robot device.
13. US 8657042 B2. Walking machine.
14. US 4527650 A. Walking machine.
15. Gang Wang, Lixun Zhang, Dongliang Chen, Defeng Liu, Xi Chen, Modeling and Simulation of Multi-legged Walking Machine Prototype Apr. 11, 2009 to Apr. 12, 2009 ISBN: 978-0-7695-3583-8, pp. 251–254.
16. Belter D., Skrzypczynsky P.A biologically inspired approach to feasible gait learning for a hexapod robot, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science – Computational Intelligence in Modern Control Systems, vol. 20, issue 1, Number-March 2010, pp. 69–84.
17. Wang Z.-Y., Ding X.-l., Rovetta A. Analysis of typical locomotion of a symmetric hexapod robot, Robotica, vol. 28, issue 6, pp. 893–907.
18. Vidoni R., Gasparetto A. Efficient force distribution and leg posture for a bio-inspired spider robot, Robotics and Autonomous Systems, vol. 59, issue 2, February, 2011, pp. 142–150.
19. Roy S.S., Singh A.K., Pratihar D.K. Estimation of optimal feet forces and joint torques for on-line control of six-legged robot, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 27 Issue 5, October, 2011, pp. 910–917.
20. Roy S.S., Pratihar D.K. Effects of turning gait parameters on energy consumption and stability of a six-legged walking robot. Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, issue 1, January, 2012, pp. 72–82.
21. Jin Bo, Cheng, Cheng I., Li W. Power Consumption Optimization for a Hexapod Walking Robot, Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 71, issue 2, August 2013, pp. 195–209.
22. Golubev Y.F., Korianov V.V., Pavlovsky V.E., Panchenko A.V. Motion control for the 6-legged robot in extreme conditions // Proc. of the 16th Int. Conf. CLAWAR-2013. 14–17 July 2013, Sydney, Australia. pp. 427–434.
23. Xilun Ding, Zhiying Wang, Rovetta A., Zhu J.M. Locomotion analysis of hexapod robot // Climbing and Walking Robots, 2010, InTech., pp. 291–309. Available at: <http://www.intechopen.com/books/climbing-and-walking-robots>.
24. Moore E.Z. Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod. Department of Mechanical Engineering McGill University, 2002. p. 91.

References

1. Ignat'ev M.B. (1963) *Golonomnye avtomaticheskie sistemy* [Holonomic automatic systems] *Izd. AN SSSR [AS SU]*.
2. Ignat'ev M.B., Kulakov F.M., Pokrovskii A.M. (1977) *Algoritmy upravleniya robotami-manipulyatorami* [Control Algorithms for robotic manipulators] *Mashinostroenie 1972, vtoroe izdanie, Virginiya Press, 1973, tret'e izdanie, Mashinostroenie 1977* [Machinery, Leningrad, 1972, second edition, Virginia Press, 1973, third edition, Moscow, 1977].
3. Ignat'ev M.B. (2014) *Kiberneticheskaya kartina mira. Slozhnye kiberfizicheskie sistemy* [Cybernetic picture of the world. Complex cyber-physical systems] *SPb [SPb]*.
4. Ignat'ev M.B., Lipinski Y.A., Zharinov O.O., Nenashev A.V., Makin I.P., Gerasimov G.M. (2014) *Avtonomnyy adaptivno shagayushchiy robot dlya diagnostiki gazoprovodov» Patent No.151608 s prioritetom ot 23.5.2014* [Autonomous adaptive walking robot for diagnostics of pipelines. Patent No. 151608 with priority from 23.5.2014].
5. Gurfinkel V.S., Gurfinkel E.V., Devyanin E.A., Efremov E.V., Zhikharev D.N., Lensky A.V., Schneider A.Y., Shtilman L.G. (1982) *Maket shestinogogo shagayushchego apparata s supervizornym upravleniem. Issledovanie robototekhnicheskikh sistem* [The Layout of a six-legged hexapod walking machine Supervisory control. The Study of robotic systems] *Nauka, Moskva [Nauka, Moscow]*.
6. Briskin E.S., Goga V.V., Maloletov A.V., Chernyshov V.V. (2008) *Shagayushchie mashiny VolgGTU (opyt razrabotki, rezul'taty issledovaniy, prakticheskoe primeneniye)* [Walking machine state technical University (experience of development, research results, practical application)] *Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet [Volgograd state technical University]*.
7. Budanov V.M. (2005) *Algoritmy planirovaniya dvizheniy shestinogogo shagayushchego apparata* [Algorithms of motion planning for six-legged hexapod walking machine] *Fundamental'naya i prikladnaya matematika [Fundamental and applied mathematics]*, pp. 197–206.
8. Lutsky V.A. (2013) *Issledovanie adaptivnykh algoritmov peredvizheniya shestinogogo shagayushchego robota. V kn.: Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte* [The study of adaptive algorithms for the movement of six-legged hexapod walking robot. In the Book: Integrated models and soft computing in artificial intelligence] *Sb. nauchnykh trudov VII-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Kolomna, 20–22 maya 2013) Moskva. Fizmatlit [SB. scientific works of the VII-th International scientific-practical conference (Kolomna, may 20–22, 2013) Moscow. FIZMATLIT Publishers]*, Vol. 2, pp. 799–809.
9. Pavlovsky V.E. (2013) *O razrabotkakh shagayushchikh mashin* [On the development of walking machines] *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* [Preprint IPM named after M.V. Keldysh], No. 101, 32 p. Available at: <http://library.keldysh.EN/preprint.asp?id=2013-101>.
10. Rushworth A., Cobos-Guzman S., Axinte D., Raffles M. Pre-gait analysis using optimal parameters for a walking machine tool based on a free-leg hexapod structure, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 70, Issue C.
11. Jung-Min Yang (2008) Omni directional walking of legged robots with a failed leg. *Mathematical and Computer Modeling: An International Journal*, Vol. 47, Issue 11–12, pp. 1372–1388.
12. CN 201291928 Y Six-foot walking robot device.
13. US 8657042 B2 Walking machine.
14. US 4527650 A Walking machine.
15. Wang G., Zhang L., Chen D., Liu D., Chen X. (2009) Modeling and Simulation of Multi-legged Walking Machine Prototype Apr. 11 ISBN: 978-0-7695-3583-8 pp. 251–254.
16. Belter D., Skrzypczynsky P. (2010) A biologically inspired approach to feasible gait learning for a hexapod robot, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science – Computational Intelligence in Modern Control Systems*, Vol. 20, Issue 1, No. 1. March, pp. 69–84.
17. Wang Z.-Y., Ding X.-L., Rovetta A. Analysis of typical locomotion of a symmetric hexapod robot, *Robotica*, Vol. 28, Issue 6, pp. 893–907.
18. Vidoni R., Gasparetto A. (2011) Efficient force distribution and leg posture for a bio-inspired spider robot, *Robotics and Autonomous Systems* Vol. 59, Issue 2, February, pp. 142–150.

19. Roy S.S., Singh A.K., Pratiha D.K. (2011) Estimation of optimal feet forces and joint torques for on-line control of six-legged robot, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 27, Issue 5, October, pp. 910–917.
20. Roy S.S., Pratihari D.K. (2012) Effects of turning gait parameters on energy consumption and stability of a six-legged walking robot. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60, Issue 1, January, pp. 72–82.
21. Bo Jin, Cheng Cheng, Wei Li (2013) Power Consumption Optimization for a Hexapod Walking Robot, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 71, Issue 2, August, pp. 195–209.
22. Golubev Yu.F., Korianov V.V., Pavlovsky V.E., Panchenko A.V. (2013) Motion control for the 6-legged robot in extreme conditions. *Proc. of the 16th Int. Conf. CLAWAR*. 14–17 July, Sydney, Australia. pp. 427–434.
23. Ding X., Wang Z., Rovetta A., Zhu J.M. (2010) Locomotion analysis of hexapod robot. *Climbing and Walking Robots*, InTech, pp. 291–309. Available at: <http://www.intechopen.com/books/climbing-and-walking-robots>.
24. Moore E.Z. (2002) Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod. Department of Mechanical Engineering McGill University. 91p.