

Введение

Мобильная робототехника представляет собой область, которая стала объектом интенсивных исследований и технологического развития в последние десятилетия. Эта дисциплина объединяет знания из различных областей, таких как механика, электроника, компьютерное зрение и искусственный интеллект, с целью создания и развития автономных и мобильных роботов.

История мобильной робототехники насчитывает уже несколько десятилетий и тесно связана с прогрессом в области вычислительной техники и сенсорной технологии. От исследовательских прототипов до применения в промышленности и повседневной жизни, мобильные роботы стали неотъемлемой частью нашего современного общества.

В данном реферате делается упор на шагающую роботов, в особенности, роботы, которые могут применяться в пещерах. Пещеры являются одним из наиболее примечательных мест для раскрытия максимального потенциала данных типов движителей.

Мобильная шагающая робототехника представляет собой одну из наиболее захватывающих и перспективных областей современной робототехники. Шагающие роботы представляют собой уникальный класс роботов, способных передвигаться в окружающем пространстве, имитируя движение человеческой походки. Они обладают широким спектром применений, включая исследования в непригодных для людей условиях, помощь в спасательных операциях и выполнение задач в промышленности.

В реферате будут рассмотрены классификации мобильной шагающей робототехники, которые являются важным аспектом для понимания разнообразия шагающих роботов и их особенностей. Классификация помогает систематизировать и категоризировать различные типы шагающих роботов в соответствии с их основными характеристиками, а также определить их преимущества и ограничения.

В ходе исследования мы рассмотрим различные критерии классификации, включая конструкцию, приводы, механизмы передвижения, типы ног и контакт с поверхностью. Каждый из этих критериев играет важную роль в определении способностей и характеристик шагающих роботов, а также в их адаптации к различным условиям и задачам.

Мы также обсудим различные типы шагающих роботов, включая двуногих, четырехногих и многоногих роботов, а также роботов с адаптивным числом ног. Будут рассмотрены примеры существующих роботов каждого типа, а также их применения в различных областях, таких как исследования в труднодоступных местах, медицина, помощь людям с ограниченными возможностями и другие.

Изучение классификации мобильной шагающей робототехники имеет важное значение для понимания разнообразия и специфики шагающих роботов. Это позволяет углубиться в их структуру и функционирование, а также предоставляет основу для развития новых концепций и улучшения существующих решений.

В заключение, исследование классификации мобильной шагающей робототехники является важным шагом для продвижения этой области вперед. Понимание разнообразия и характеристик шагающих роботов позволяет исследователям и инженерам разрабатывать более эффективные и адаптивные решения, что способствует развитию мобильной шагающей робототехники в целом.

0.1 Классификация машин, использующих ноги в качестве движителя

Эта классификация основана на работе [12]. Первые попытки создания многоногих роботов были предприняты в эпоху до нашей эры. В настоящее время можно найти десятки конструкций шагающих роботов, но, как правило, это только экспериментальные прототипы. Из-за обилия различных конструкций, их классификация является нетривиальной задачей. Более того, термин «ходьба» имеет различные трактовки, что также является усложняющим фактором для классификации [1; 7; 14; 15].

Определяющей особенностью аппарата, которая в целом позволяет говорить о шагании, является наличие специальных механизмов (ног, шагающих механизмов), которые обеспечивают движение аппарата в результате дискретного взаимодействия с опорой. Под дискретным взаимодействием понимают ситуацию, когда есть моменты времени, в которые механизм контактирует с опорной площадкой, и моменты времени, в которые с опорой механизм не взаимодействует.

Ходьба — только один из нескольких возможных видов локомоции с помощью ног. Для двуногой системы: ходьба — чередование опоры на одну ногу

и опоры на обе ноги (потом на другую ногу); спортивная ходьба — чередование опоры на одну ногу и на другую; бег — чередование опоры на одну из ног и безопорного движения (потом на другую ногу); скачки — чередование одноопорной, двухопорной и безопорной фаз; прыжки — чередование опоры на обе ноги и безопорной фазы; прыжки на одной ноге - то же, что и прыжки, но одна нога вообще опоры никогда не касается.

Для многоногой системы понятие ходьбы легко обобщается. Спортивная ходьба и прыжки на одной ноге теряют смысл. А вот граница между бегом, прыжками и скачками уже не так очевидна [1].

Если фаза движения машины с опорой на ноги чередуется с фазой покоя, в которой машина неподвижно лежит на опорной поверхности, то такое движение называется ползанием. Ноги могут быть оснащены специальными устройствами - захватами, присосками и т.п., позволяющими устройству осуществлять удерживающие связи с опорной поверхностью. Тип движения такого устройства называется лазанием.

Подводя итог, профессор Белецкий в своей книге использовал следующую классификацию. Важно отметить, что в одном экземпляре может сочетаться несколько типов движителей.

Псевдошагающие машины похожи на роботов с ногами, но их ноги всегда контактируют с опорной поверхностью. Другими словами, эти машины могут только имитировать полноценную походку. Одним из распространенных примеров является механическое устройство, называемая шагающий слон (рис. 1).



Рисунок 1 — Механический слон

К классу шагающих машин с дополнительными опорами относятся устройства, имеющие помимо дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью шагающих движителей дополнительные механизмы, постоянно контактирующие с опорой [12]. Необходимость в дополнительных опорах обычно возникает тогда, когда шагающих движителей недостаточно для обеспечения устойчивости машины. Чаще всего для этой цели шагающее транспортное средство оснащается колесной тележкой (рис. 2,3)[2; 3; 7; 13; 15; 16].



Рисунок 2 — Робот рикша

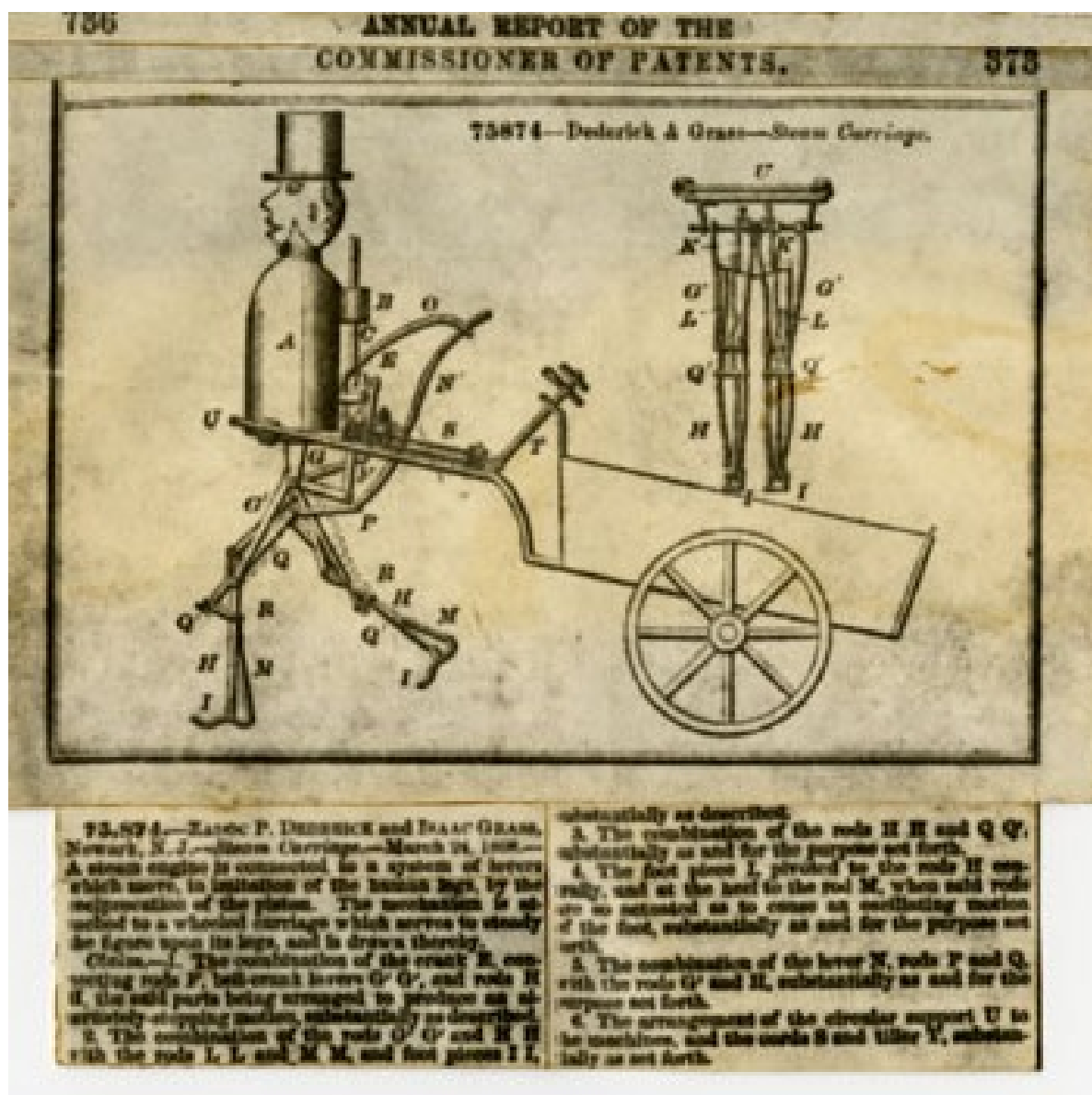


Рисунок 3 — Робот паровой человек

Такие машины обычно используются для демонстраций и отладки систем. Их применение бессмысленно, потому что они не обладают никакими преимуществами в сравнении с колесным роботом.

Шагающие машины с циклическими движителями имеет несколько особенностей. Он характеризуется тем, что опорные точки шагающих механизмов движутся по одной и той же траектории относительно корпуса машины, и не решают проблемы адаптации к грунту и выбора точек постановки ног на землю. Такие машины имеют лучшую проходимость по сравнению с колесами меньшее сопротивление движению от земли, лучшее сцепление с основной поверхностью, большие возможности для снижения давления на грунт [27]. Примеры машин с циклическими движителями: (рис. 4,5).

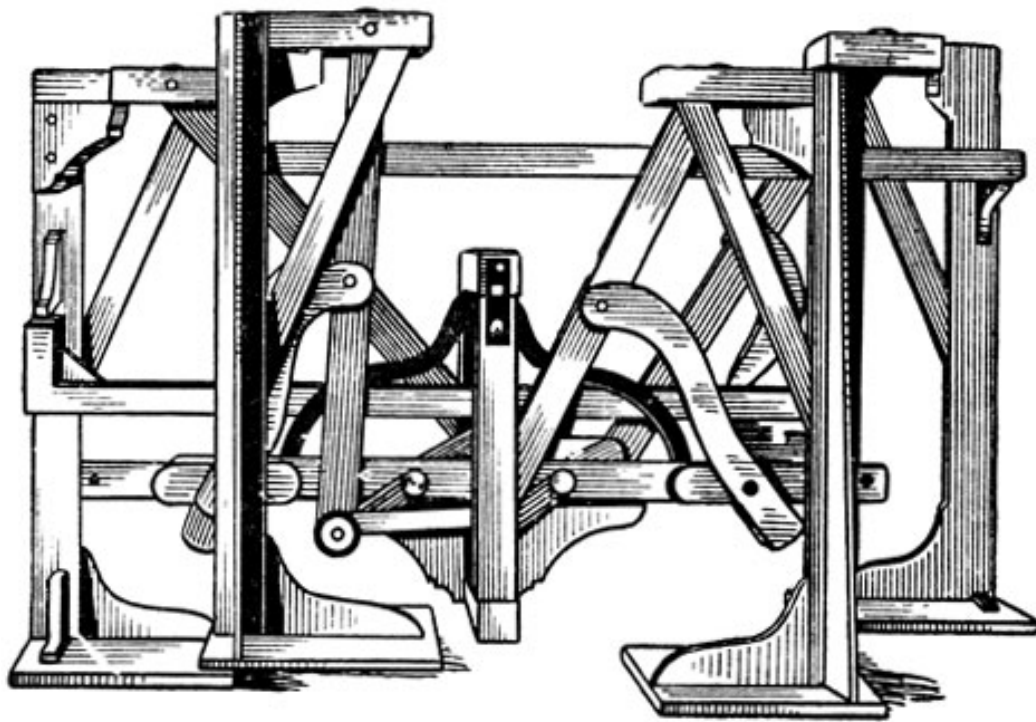


Рисунок 4 — Машина Чебышева



Рисунок 5 — Робот ВолгГТУ Кубань

Главной особенностью циклических шагающих машин является их простота конструкции и управление.

Полноценная ходьба — модификация предыдущего типа движителя и она дает наибольшие преимущества по сравнению с другими заявленными типами движителей.

Данный способ передвижения позволяет использовать произвольный закон изменения скорости движения ноги как на этапе взаимодействия с землей, так и на этапе переноса. Такие машины обычно превосходят традиционные транспортные средства не только по грунтовой, но и по профильной проходимости. А их главным недостатком является сложность конструкции и системы управления. Это самый разнообразный и многообразный класс шаговых машин в мире, и многие из приведенных здесь примеров относятся к этому классу.

Колесно-шагающими машинами традиционно называют класс устройств, в которых колеса шагающих движителей служат упорами. Такие машины могут работать в двух режимах: в режиме колесной машины и в режиме шагающей машины. В первом случае машина движется только с помощью колес. Во втором случае машина совершает шагающие движения, отрывая поочередно колеса от земли и переставляя их на новое место. В этом случае те, что соприкасаются с землей, могут либо блокироваться, либо поворачиваться в соответствии с движением опорных ног. Известно несколько примеров (рис. 6,7,8) [37].

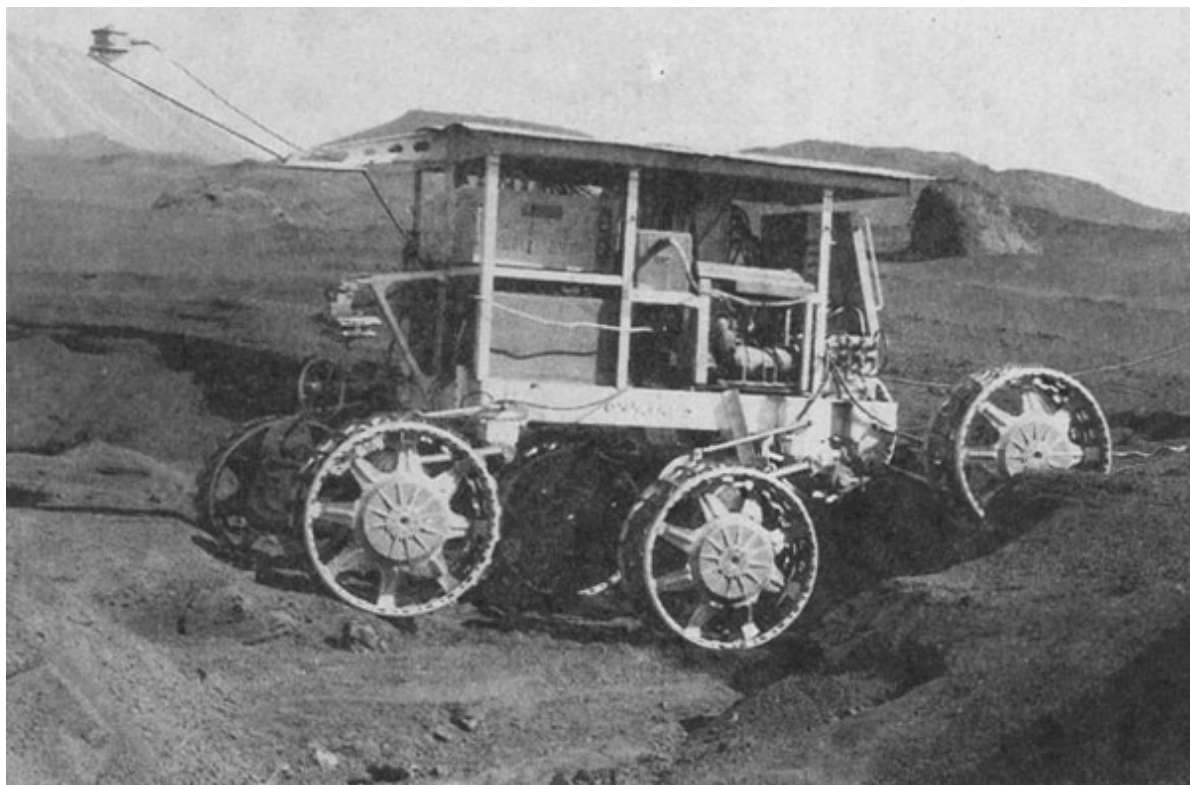


Рисунок 6 — VNIITM

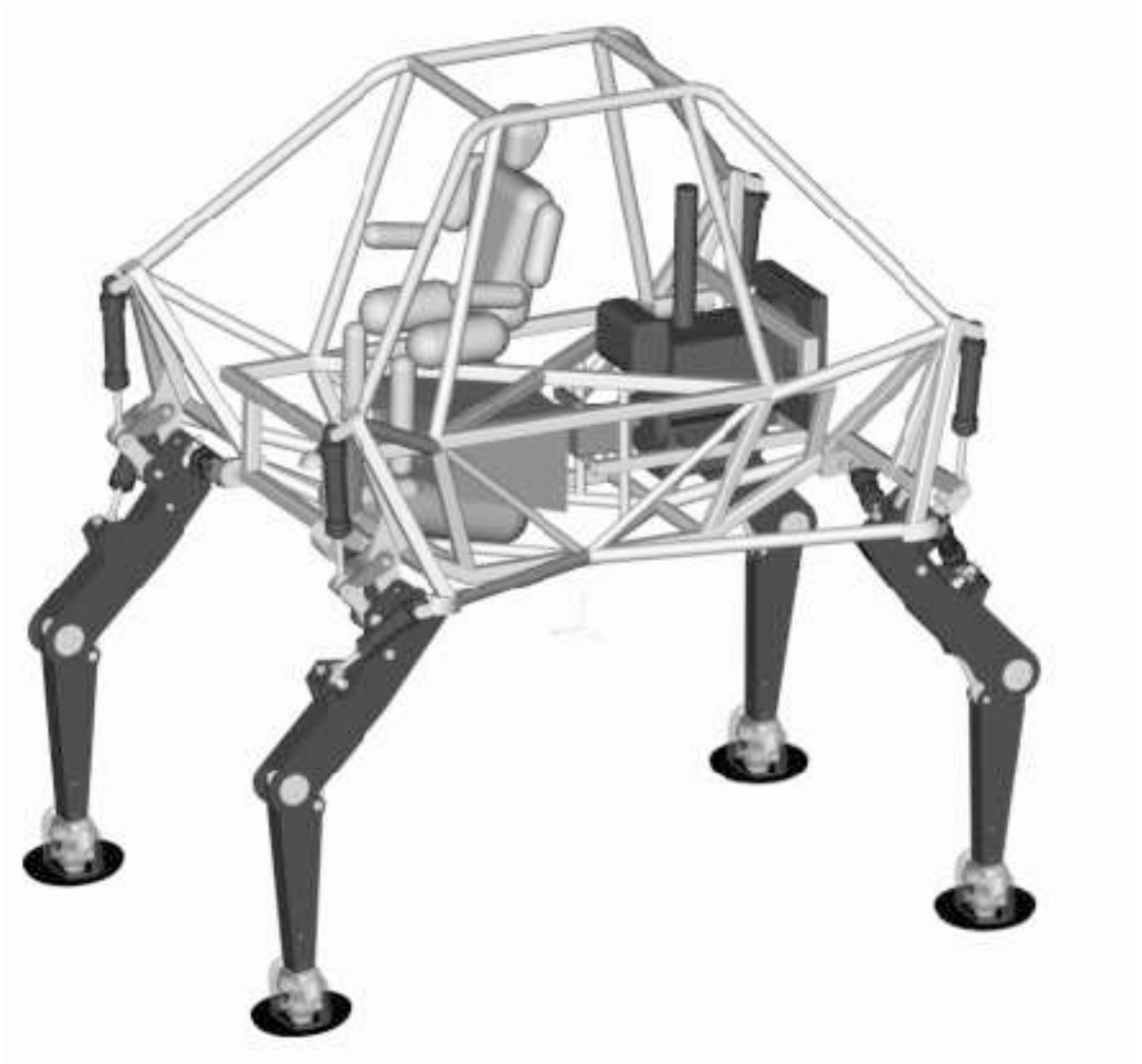


Рисунок 7 — Робот Alduro

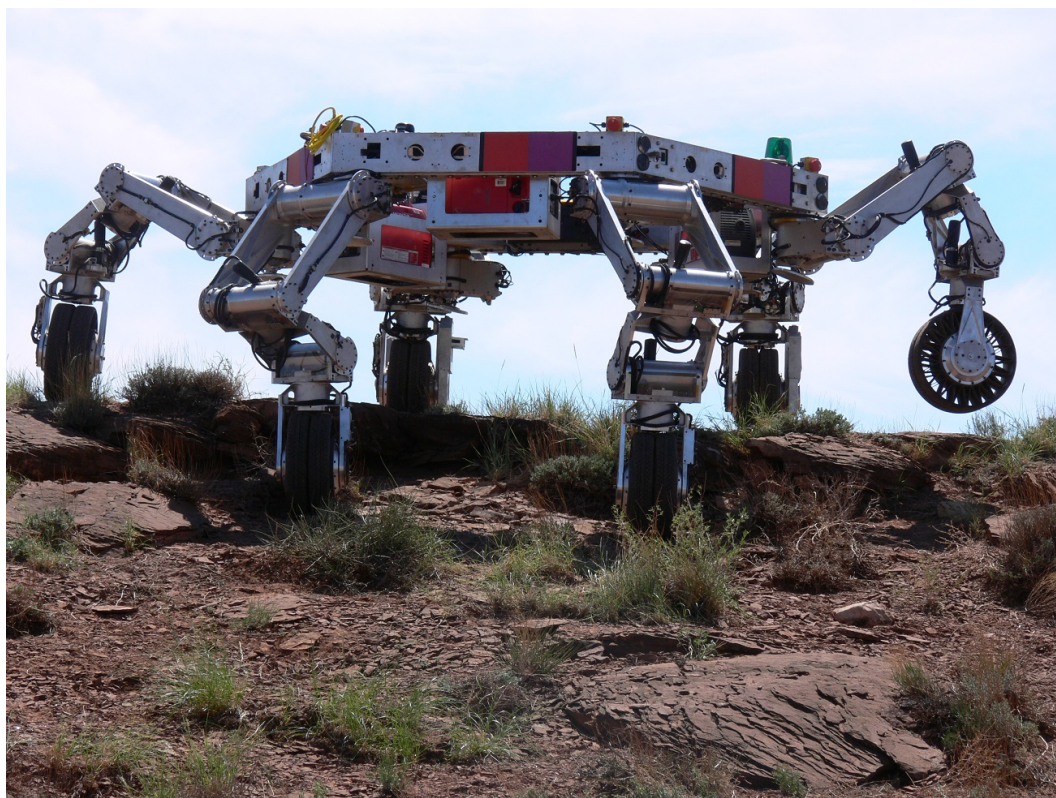


Рисунок 8 — Робот Athlete

Есть несколько машин, которые могут не только прыгать или бегать, но и шагать. Примеры следующие [4; 5; 15; 43] (рис. 9).

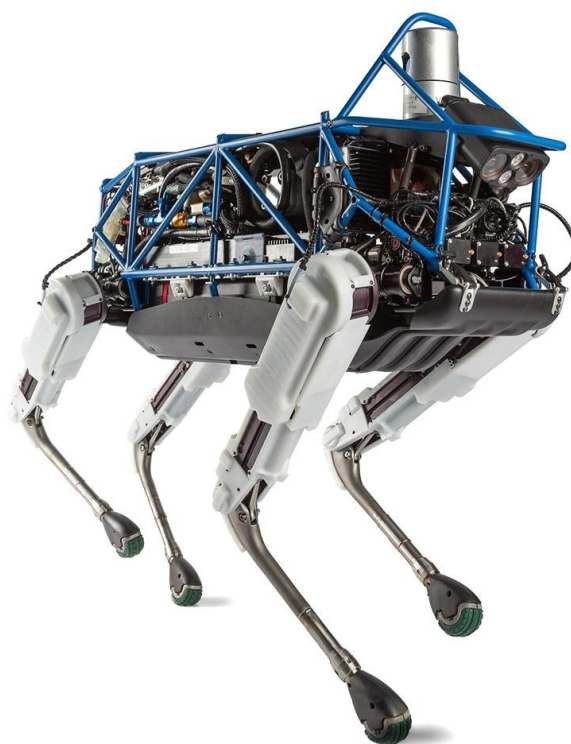


Рисунок 9 — BigDog

В соответствии с определением выше, к ползающим экскаваторам относится большинство таких машин, как шагающие экскаваторы (рис. 10). Несмотря на название "шагающие" такие машины перемещаются, поднимаясь по лестнице и ложась на опору при передвижении ног [6; 20; 43].



Рисунок 10 — Ползающий экскаватор Российского производства

Специфика взаимодействия с опорной поверхностью и область применения лазающих машин настолько сильно отличаются, что сравнение их показателей (за исключением общетехнических) становится практически бессмысленным. Следует также отметить, что многие ползающие и лазающие роботы не имеют ног или какого-то их подобия, передвигаясь, например, за счет движений гибкого тела.



Рисунок 11 — BrickWall робот

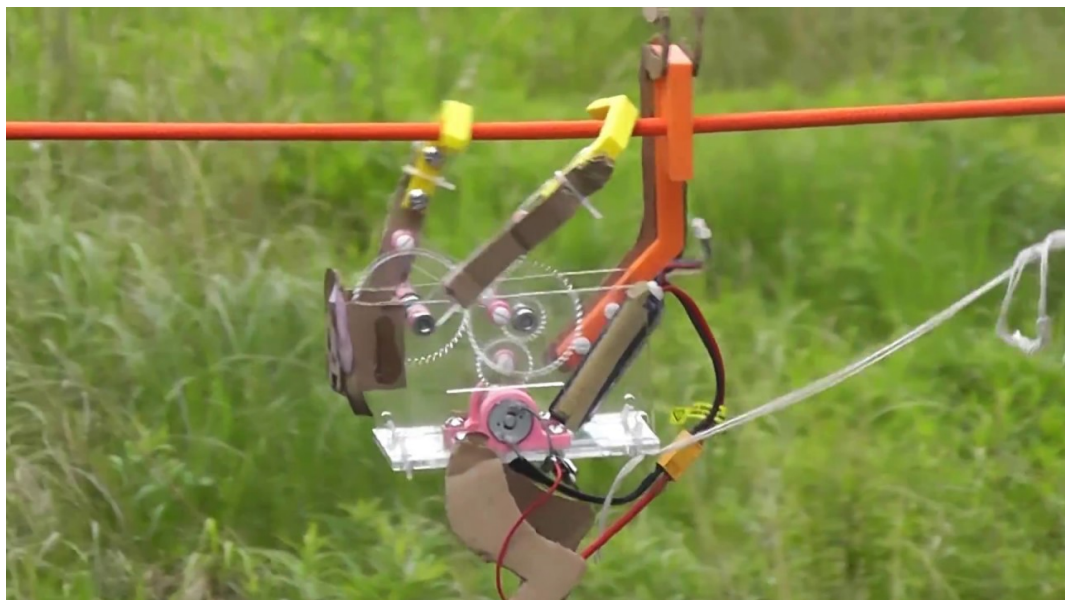


Рисунок 12 — Робот, взбирающийся по канату

Согласно этой классификации, робот, который используется в экспериментальной части, относится к категории «Шагающие машины с циклическим действием движителей».

В течении разработки робототехнической системы, были спроектированы и изготовлены несколько прототипов шагающих роботов. Первым всемирно известным прототипом с подобной системой движения является робот RHex [58] от Boston Dynamics. Группы ученых по всему миру развивали эту идею. Таким образом появились 3 новых подмножества. Роботы, которые умеют много сочленений. Системы, которые могут трансформироваться в колесных роботов и обратно. А также системы, которые являются псевдоколесными, то есть количество ног на одном моторе больше одной. Как итог, было решено добавить сочленение в разрабатываемую конструкцию. Также было оценен концепт с псевдоколесными роботами, так как это увеличивает проходимость по грунтам.

0.2 Роботы, которые могут использоваться для исследования пещер

Как было отмечено выше, одной из основных областей применения разрабатываемых роботов являются пещеры. Исследование пещер естественного происхождения является комплексной задачей, сопряженная со множественными трудностями [41; 63]. Деграция сенсоров [32], перебои в коммуникации между роботами из-за потери сигналов [35; 74], сложный рельеф пещер [35], обилие грязи [18], жидких препятствий [53], требующие герметизацию корпуса, являются только малой частью встречаемых проблем в пещерах.

В пещерах возможно встретить почти все типы поверхностей, с которыми приходится сталкиваться роботам в мире. Это и твердые поверхности: мрамор, кварц, базальт. Осадочные горные породы, такие как: мел, гипс, известняк. Часто встречаются водные препятствия — как лужи, так и целы залы, погруженные в воду. Особую опасность для человека вносят сифоны. Скользкие поверхности: лед, мох, глина, а так же разрушаемые поверхности — каменная гряда и паутина [8—11]. Знание типов поверхностей и габаритов пещер влияет на типы сенсоров, которые будут установлены на робота и на на необходимую автономность робототехнической системы [19].

Для преодоления сложного рельефа различные роботы, робототехнические системы и типы движителей были предложены исследователями по всему миру [23]. Разрушение пещер нежелательно, поэтому роботы, которые для перемещения ломают породу, не рассмотрены в данном обзоре [17]. Для исследования

пещер используются, как наземных роботов, так и летающие аппараты, робототехнические комплексы. Из летающего транспорта это коптеры [21; 47; 75] и дирижабли [32]. Дирижабль намного более автономен и может нести большую нагрузку. Наземных роботов очень много типов, но основными являются: шагающие [46; 66] колесные [50; 74], трековые [54] и специфичные. Специфичные движители это движители роботов, которые не поддаются классификации, например змеевидные [22; 31], шарообразные [35; 38; 39] и другие.

Для исследования пещер система роботов является самым эффективным способом разведки. Для использования систем роботов необходимо решать дополнительные задачи, как архитектурного характера, телекоммуникационного и управленческого. Обычно системы состоят из нескольких одинаковых роботов [74], связка – коптер и шагающий [24; 73].

Ползающие роботы [60] являются перспективными для исследования пещер по причине их высокой проходимости по узким и невысоким лазам. Например, известны ползающие роботы для исследования пещер, находящихся на других планетах [44].

Важным критерием для выполнения задач разведки пещер, является способность перемещаться по вертикальным поверхностям, благодаря высокой адгезии с поверхностью. Это достигается следующими способами: существуют магнитный [25; 29; 42; 67], электрический [45], негативного давления [21; 25; 67], пневматический или помощью присосок [51; 69], зацепов ("когтей"), что иногда называют механической адгезией [36; 44; 62; 64]. Последний способ является самым применимым для пещер, так как стены рельефные. Рельефные стены с одной стороны препятствуют другим способам прикрепления к поверхности, а с другой стороны облегчают использование зацепов.

Навигация в пещерах является нетривиальной задачей, поэтому рассмотрены сенсоры и алгоритмы, а также архитектурные решения, которые используются в представленных выше роботах. Целесообразно рассмотреть работы в близких и смежных областях. К примеру, исследование трубопровода [59] или завалов после техногенных катастроф. С точки зрения навигации основной проблемой является недостаток света, а также сильная неоднородность территории и обилие гранулированных поверхностей. Решение данной проблем сейчас уделено много внимания, одним из подтверждений данного тезиса является прошедшее соревнование DARPA Subterranean Challenge. В данном направлении используются как лазерные дальномеры (лидары), так и визуальные SLAM алгоритмы [19; 33; 34;

68]. С точки зрения архитектуры, наблюдается тенденция к модульности, а также к возможным защитам от потерь робота [49; 77]. при работе роботов в группе один робот был потерян, то остальные роботы все равно должны передавать друг другу данные.

Очень важно уметь правильно передвигать робота по сыпучим грунтам, следующие работы посвящены этим проблемам [28; 57; 59; 61; 66; 68; 70; 76]. Критичным критерием навигации является решение задачи в реальном времени.

Тип опорной поверхности является одним из ключевых параметров для адаптации управления робота. Зная тип опорной поверхности возможно оптимально построить маршрут по исследуемой территории. Следующие статьи и их обзоры покрывают основные способы решения данной задачи [40; 56; 65].

Подводя итог, в данном разделе были представлены причины проблем, возникающие при разведке пещер роботами. Представлены причины, к примеру типы опорных поверхностей, которые влияют на подбор сенсоров и алгоритмов, а также сделаны выводы как это влияет на робототехническую систему. После этого показаны решения, предложенные исследователями по всему миру, связанные с навигацией, подбором движителя, выбором сенсоров и архитектурными решениями, дающие надежную систему.

0.3 Исследования роботов с цикловым движителем

Одной из разновидностью роботов с цикловым движителем является гексаподы. Гексапод это разновидность мобильных шагающих роботов с 6 конечностями. Такая форма демонстрирует качественное поведение сороконожки. То есть, чаще всего роботы гексаподы — биомиметические роботы, то есть роботы, вдохновленные природой.

Не смотря на это, существуют интересные попытки создать гибриды между колесными роботами и многоножками, чтобы получить «лучшее из обоих миров».

Boston Dynamics RHex [55] - это шестиногий робот (рис. 13). Данный робот является идейным вдохновителем множества разработок по всему миру, в том числе и для робота, разработанного автором диссертации. Независимо управляемые ноги создают специальные походки, которые перемещают его по неровной местности, такой как лестница, каменная гряда и т.д. Данный робот умеет пры-

гать. Форма ног обеспечивает плавность движений. Однако у робота есть и ряд недостатков. Прежде всего, это высокое энергопотребление, так как он содержит шесть двигателей. Кроме того, у этого робота есть некоторые трудности с управляемостью.



Рисунок 13 — Boston Dynamics робот RHex

Gakken Mechamo Centipede [48; 49] - робот (рис. 14), который имеет схожую кинематическую схему с СтриРусом. Стрирус это разработанный автором робот. Большое количество ног может обеспечить ему хорошую проходимость на пересеченной местности, и потеря ноги не будет критичной для робота. Однако это увеличило количество компонентов робота, что удорожает производство и техническое обслуживание. Минусом данной конструкции это малая длина педипулятора снижает возможности передвижения по пересеченной местности.

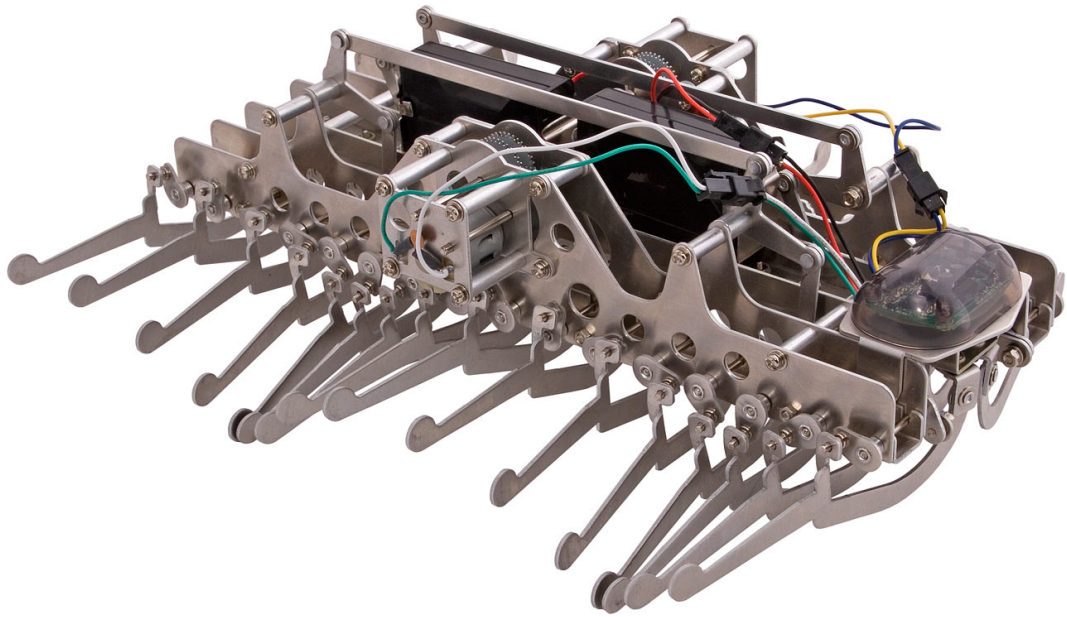
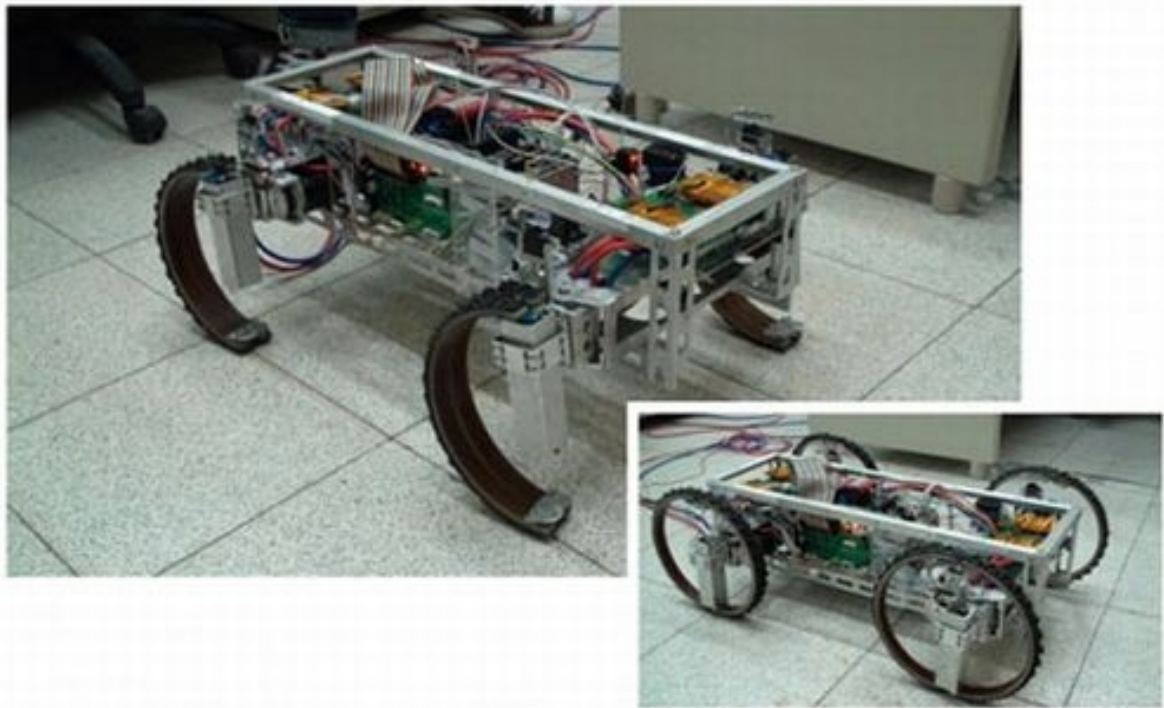
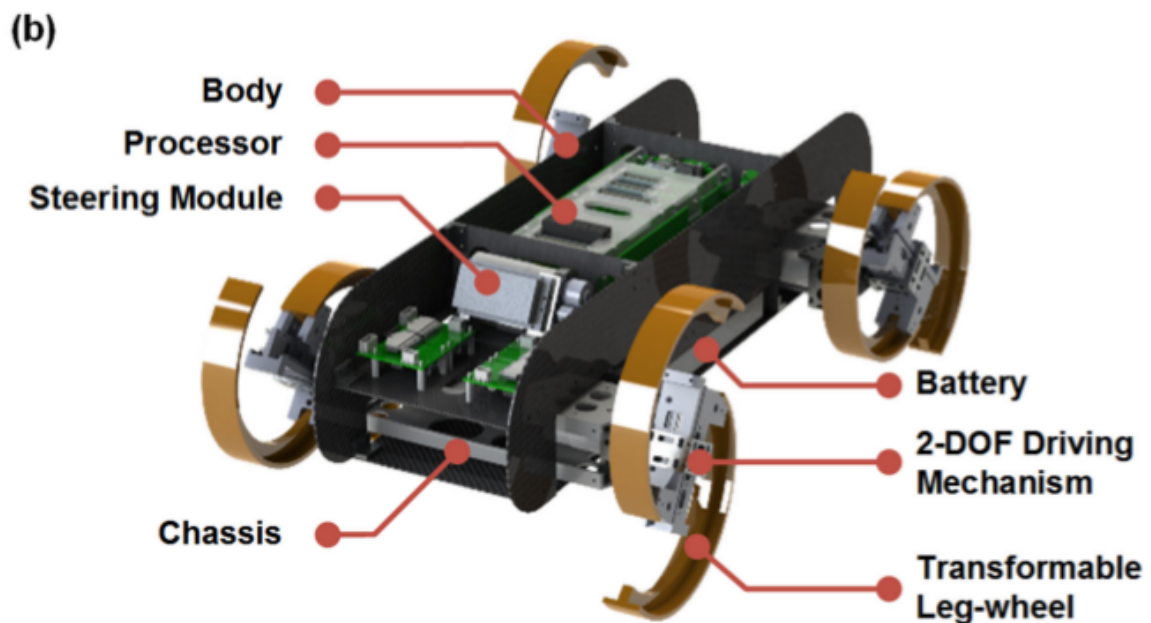


Рисунок 14 — Gakken Mechamo Centipede робот

Quattroped и TurboQuad [30; 52; 72] — это роботы, трансформирующие колеса в ноги (рис. 15). Когда он использует ноги, его кинематическая схема похожа на робота RHex, в случае режима работы колес он похож по управлению представляет собой четырёхколёсное транспортное средство. Данный инженерный прием обеспечивает высокую скорость на ровной местности, но конструкция робота становится конструкционно сложной, что снижает надежность системы. У робота 4 ноги, что делает его неустойчивым в некоторых ситуациях.



a) Quattroped robot



б) TurboQuad robot

Рисунок 15 — Quattroped семья роботов

Whegs [26] (рис. 16) использует стратегию локомоции, которая сочетает простоту колеса с преимуществами преодоления препятствий ногой. Робот обладает сегментированным телом, что позволяет ему при малой длине педипуляторов соперничать по проходимости с остальными представителями данного класса роботов. Сегментированность корпуса делает робота более сложным в изготовлении и управлении.



Рисунок 16 — Whegs II

Сравнительный анализ между представленными выше роботами приведен в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнительный анализ гексаподов

Параметры, СИ	RHex	Gakken Mechamo Centipede	Quattroped	Whegs II
Длина, мм	540	320	600	470
Ширина, мм	200	140	190	360
Высота, мм	127	100	140	50
Масса, кг	8.2	1.1	8.6	3.86
Количество ног	6	32	4	18
Высота ноги, мм	175	50	175	100
Масса ноги, кг	0.1	0.02	0.38	0.05
Скорость, м/с	1.6	0.1	2	1.5

Все эти роботы, кроме Gakken Centipede, были созданы для разведки, в том числе и пространствах искусственного происхождения, поэтому значения параметров можно легко объяснить. Ширина должна быть меньше ширины дверного проема. Еще лучше, если ширина робота будет меньше $2/3$ размера двери, и все прототипы удовлетворяют этому условию. При навигации внутри помещений

длина также должна быть минимально возможной, иначе он не сможет передвигаться в коридорах и тесных помещениях. Масса зависит от других параметров. Высокая скорость не нужна в помещениях и опасных зонах.

Роботы с цикловым движителем, такие как Boston Dynamics RHex [55], Gakken Mechamo Centipede [49], Quattroped and TurboQuad [52; 71; 72], а также Whegs [26] были рассмотрены. Рассмотрев других представителей выбранного класса роботов и определив причины таких параметров, было решено, что не следует превышать длину аппарата в один метр, в ширину — меньше 70 см (стандартная ширина дверного проема). Иметь меньше 32 лапок и высота лапки должна быть больше 10 см. При большем количестве лапок начинаются большие проблемы с трением и КПД, что негативно сказывается на проходимости и энергопотреблении конструкции.

Вывод

В ходе данного реферата мы исследовали классификацию мобильной шагающей робототехники, выявляя разнообразие и характеристики этого уникального класса роботов. Классификация позволила систематизировать различные типы шагающих роботов в соответствии с их основными характеристиками, от конструкции и приводов до типов ног и механизмов передвижения. Это помогло нам понять преимущества и ограничения каждого типа, а также определить их потенциальные применения в различных областях.

Мобильная шагающая робототехника имеет огромный потенциал и открывает новые возможности в области исследований, промышленности и помощи людям. Шагающие роботы могут эффективно передвигаться по сложным территориям, преодолевая препятствия, и быть полезными в задачах, где требуется подвижность и маневренность. Они могут применяться в исследованиях и разведке в труднодоступных или опасных местах, способствовать развитию автономных систем доставки и помогать людям с ограниченными возможностями.

Однако, несмотря на значительные прогрессивные достижения в этой области, мобильная шагающая робототехника все еще сталкивается с некоторыми вызовами и ограничениями. Это включает сложности в поддержании равновесия и стабильности, энергопотребление, ограниченную скорость и маневренность.

Также существуют технические и программные сложности в разработке надежных алгоритмов управления и навигации для шагающих роботов.

Список литературы

1. *Белецкий В. В.* Двухногая ходьба модельные задачи динамики и управления [Текст] // Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. — 1984.
2. *Брискин Е. С., Шаронов Н. Г.* Об управлении движением механических систем с избыточным числом управляющих воздействий [Текст] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2019.
3. *Брискин Е. С., Леонард А. В., Малолетов А. В.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки [Текст] // Теория механизмов и машин. — 2011. — Т. 9, № 1. — С. 14—24.
4. Виброробот для вертикального движения по металлической шероховатой поверхности [Текст] / С. Яцун [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2010. — Т. 12, № 4—3.
5. *Волкова Л., Яцун С.* Моделирование движения многозвеного прыгающего робота и исследование его характеристик [Текст] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2013. — № 4. — С. 137—137.
6. *Градецкий В., Князьков М.* Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред [Текст] // Робототехника и техническая кибернетика. — 2014. — № 1. — С. 9—16.
7. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями [Текст] / Е. С. Брискин [и др.] // М.: Машиностроение. — 2009. — С. 192.
8. Карст и пещеры Пермской области [Текст] / Г. А. Максимович [и др.]. — Пермский государственный университет, 1992.
9. *Максимович Г. А.* Основы карстоведения: Том II. Вопросы гидрогеологии карста, реки и озера карстовых районов, карст мела, гидротермокарст (учебное пособие) [Текст]. — Книжная типография № 2. Пермь, 1969.
10. *Максимович Г. А., Лобанов Ю. Е.* Пещеры урала [Текст]. — Физкультура и спорт. — 1971.
11. *Максимович Г.* Основы карстоведения: Том I. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста [Текст]. — Книжная типография № 2. Пермь, 1963.

12. *Малолетов А. В.* Динамика и оптимизация структуры, параметров и алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными шагающими движителями [Текст] / Малолетов Александр Васильевич. — Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Волгоград, 2015.
13. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями [Текст] / Е. С. Брискин [и др.] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2014.
14. *Охоцимский Д. Е.* Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата [Текст] // Москва. — 1984.
15. *Павловский В. Е.* О разработках шагающих машин [Текст] // Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. — 2013. — № 0. — С. 101—32.
16. *Петриашвили Б., Маргвелашвили В., Билашвили М.* К задаче организации движения опорных звеньев многоногих шагающих машин [Текст] // Мецниереба. — 1986.
17. A Brief Overview of a Novel, Highly-Integrated Hydraulic Servo Actuator with Additive-Manufactured Titanium Body [Text] / C. Semini [et al.] // IROS Workshop 2016. — 2016.
18. A Campaign in Autonomous Mine Mapping [Text] / C. Baker [et al.] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2004.
19. A Multi-Modal Mapping Unit for Autonomous Exploration and Mapping of Underground Tunnels [Text] / F. Mascarich [et al.] // IEEE Aerospace Conference Proceedings. — 2018.
20. A Prototype Climbing Robot for Inspection of Complex Ferrous Structures [Text] / G. Peters [et al.] // Emerging Trends in Mobile Robotics. — World Scientific, 2010. — P. 150—156.
21. Autonomous Aerial Robotic Exploration of Subterranean Environments Relying on Morphology-Aware Path Planning [Текст] / С. Papachristos [и др.] // 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2019. — 2019.
22. *Borenstein J., Hansen M., Borrell A.* The OmniTread OT-4 Serpentine Robot - Design and Performance [Текст] // Journal of Field Robotics. — 2007.

23. Case Studies of a Borehole Deployable Robot for Limestone Mine Profiling and Mapping [Текст] / A. Morris [и др.] // Springer Tracts in Advanced Robotics. — 2006.
24. *Chen J. Y.* UAV-guided Navigation for Ground Robot Tele-Operation in a Military Reconnaissance Environment [Текст] // Ergonomics. — 2010.
25. Combot: Compliant Climbing Robotic Platform with Transitioning Capability and Payload Capacity [Текст] / G. Lee [и др.] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2012.
26. Comparing Cockroach and Whegs Robot Body Motions [Текст] / R. Schroer [и др.] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004. T. 4. April. — IEEE, 2004. — 3288—3293 Vol.4.
27. Control of Hexapod Walking-a Decentralized Solution Based on Biological Data [Текст] / H. Cruse [и др.] // Climbing and Walking Robots: From Biology to Industrial Applications. Proceedings of the Fourth International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2001). — 2001. — С. 79—86.
28. DeepGait: Planning and Control of Quadrupedal Gaits Using Deep Reinforcement Learning [Текст] / V. Tsounis [и др.]. — 2019.
29. Design and Optimization of a Magnetic Wheel for a Grit-Blasting Robot for Use on Ship Hulls [Текст] / Z. Xu [и др.] // Robotica. — 2017.
30. Design of a Leg-Wheel Hybrid Mobile Platform [Text] / S.-Y. Shen [et al.] // 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. — IEEE, 10/2009. — P. 4682—4687.
31. Development of a 3D Snake-like Robot: Perambulator-II [Текст] / С. Ye [и др.] // Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2007. — 2007.
32. Duckiefloat: A Collision-Tolerant Resource-Constrained Blimp for Long-Term Autonomy in Subterranean Environments [Текст] / Y.-W. Huang [и др.]. — 2019.
33. *Fairfield N., Kantor G., Wettergreen D.* Towards Particle Filter SLAM with Three Dimensional Evidence Grids in a Flooded Subterranean Environment [Текст] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2006.

34. Field-Hardened Robotic Autonomy for Subterranean Exploration [Текст] / T. Dang [и др.]. — 2019.
35. Flying, Hopping Pit-Bots for Cave and Lava Tube Exploration on the Moon and Mars [Текст] / J. Thangavelautham [и др.]. — 2017. — 26 янв.
36. Free-Climbing with a Multi-Use Robot [Текст] / T. Bretl [и др.] // Springer Tracts in Advanced Robotics. — 2006.
37. *Germann D., Bruckmann T., Hiller M.* Joystick Force Feedback Based on Proximity to the Linearised Workspace of the Four-Legged Robot ALDURO [Текст] // Proceedings Fourth International Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR2001. Karlsruhe, Germany. — Citeseer. 2001.
38. Graph-Based Path Planning for Autonomous Robotic Exploration in Subterranean Environments [Текст] / T. Dang [и др.] // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — IEEE, 11.2019. — С. 3105—3112.
39. Hopping Mobility Concept for Search and Rescue Robots [Текст] / S. Dubowsky [и др.] // Industrial Robot. — 2008.
40. Integrated Ground Reaction Force Sensing and Terrain Classification for Small Legged Robots [Text] / X. A. Wu [et al.] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2016. — July. — Vol. 1, no. 2. — P. 1125—1132.
41. Karst Terrain in the Western Upper Galilee, Israel: Speleogenesis, Hydrogeology and Human Preference of Manot Cave [Текст] / A. Frumkin [и др.] // Journal of Human Evolution. — 2019. — Июнь. — С. 102618.
42. *Kotay K. D., Rus D. L.* Navigating 3D Steel Web Structures with an Inchworm Robot [Текст] // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. — 1996.
43. Learning Approach to Study Effect of Flexible Spine on Running Behavior of a Quadruped Robot [Текст] / H. J. BIDGOLY [и др.] // Emerging Trends in Mobile Robotics. — World Scientific, 2010. — С. 1195—1201.
44. LEMUR 3: A Limbed Climbing Robot for Extreme Terrain Mobility in Space [Текст] / A. Parness [и др.] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2017.

45. *Li J., Xu T., Zhang K.* Real-Time Feature-Based Video Stabilization on FPGA [Текст] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. — 2017. — Апр. — Т. 27, № 4. — С. 907—919.
46. *Lynch D. J., Lynch K. M., Umbanhowar P. B.* The Soft Landing Problem: Minimizing Energy Loss by a Legged Robot Impacting Yielding Terrain [Текст]. — 2019. — Сент.
47. MAV Navigation through Indoor Corridors Using Optical Flow [Текст] / S. Zingg [и др.] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2010.
48. *Miller L.* Extreme Makeover for a Heian-Era Wizard [Текст] // Mechademia. — 2008. — Т. 3, № 1. — С. 30—45.
49. Mine Tunnel Exploration Using Multiple Quadrupedal Robots [Текст] / I. D. Miller [и др.]. — 2019.
50. *Molyneaux L., Carnegie D. A., Chitty C.* HADES: An Underground Mine Disaster Scouting Robot [Текст] // SSRR 2015 - 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. — 2016.
51. *Nagakubo A., Hirose S.* Walking and Running of the Quadruped Wall-Climbing Robot [Текст] // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 1994.
52. Quattroped: A Leg–Wheel Transformable Robot [Текст] / S.-C. Chen [и др.] // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. — 2014. — Апр. — Т. 19, № 2. — С. 730—742.
53. Recent Developments in Subterranean Robotics [Текст] / A. Morris [и др.] // Journal of Field Robotics. — 2006.
54. *Reddy A. H., Kalyan B., Murthy C. S.* Mine Rescue Robot System – a Review [Текст] // Procedia Earth and Planetary Science. — 2015.
55. RHex: A Biologically Inspired Hexapod Runner [Текст] / R. Altendorfer [и др.] // Autonomous Robots. — 2001.
56. Robotic Tactile Perception of Object Properties: A Review [Text] / S. Luo [et al.] // Mechatronics. — 2017. — Dec. — Vol. 48. — P. 54—67.
57. Rolling in the Deep – Hybrid Locomotion for Wheeled-Legged Robots Using Online Trajectory Optimization [Текст] / M. Bjelonic [и др.]. — 2019.

58. *Saranli U., Buehler M., Koditschek D. E.* RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot [Текст] // The International Journal of Robotics Research. — 2001. — 2 июля. — Т. 20, № 7. — С. 616—631.
59. *Savin S., Vorochaeva L.* Footstep Planning for a Six-Legged in-Pipe Robot Moving in Spatially Curved Pipes [Текст] // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). — IEEE, 06.2017. — С. 1—6.
60. *Schmidt D., Berns K.* Climbing Robots for Maintenance and Inspections of Vertical Structures - A Survey of Design Aspects and Technologies [Текст] // Robotics and Autonomous Systems. — 2013.
61. Sensitive Dependence of the Motion of a Legged Robot on Granular Media [Текст] / С. Li [и др.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. — 2009. — Март. — Т. 106, № 9. — С. 3029—3034.
62. *Sintov A., Avramovich T., Shapiro A.* Design and Motion Planning of an Autonomous Climbing Robot with Claws [Текст] // Robotics and Autonomous Systems. — 2011.
63. SmartCaveDrone: 3D Cave Mapping Using UAVs as Robotic Co-Archaeologists [Текст] / G. Zhang [и др.] // 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2017. — 2017.
64. SpinybotII: Climbing Hard Walls with Compliant Microspines [Текст] / Sangbae Kim [и др.] //. — 2005.
65. Tactile Sensing and Terrain-Based Gait Control for Small Legged Robots [Text] / X. A. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Robotics. — 2020. — Feb. — Vol. 36, no. 1. — P. 15—27.
66. *Tan N., Mohan R. E., Elangovan K.* Scorpio: A Biomimetic Reconfigurable Rolling–Crawling Robot [Текст] // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2016. — 8 сент. — Т. 13, № 5. — С. 172988141665818.
67. *Tavakoli M., Marques L., De Almeida A. T.* OmniClimber: An Omnidirectional Light Weight Climbing Robot with Flexibility to Adapt to Non-Flat Surfaces [Текст] // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. — 2012.
68. Terrain Trafficability Analysis and Soil Mechanical Property Identification for Planetary Rovers: A Survey [Текст] / S. Chhaniyara [и др.]. — 2012.

69. *Tlale N.* A Modular Design of a Wall-Climbing Robot and Its Mechatronics Controller [Text] // The South African Journal of Industrial Engineering. — 2012.
70. Trajectory Optimization for Wheeled-Legged Quadrupedal Robots Using Linearized ZMP Constraints [Текст] / Y. De Viragh [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2019.
71. Trajectory Planning for Stair Climbing in the Leg-Wheel Hybrid Mobile Robot Quattroped [Текст] / Shen-Chiang Chen [и др.] // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. — IEEE, 05.2011. — С. 1229—1234.
72. TurboQuad: A Novel Leg–Wheel Transformable Robot with Smooth and Fast Behavioral Transitions [Текст] / W.-H. Chen [и др.] // IEEE Transactions on Robotics. — 2017. — Окт. — Т. 33, № 5. — С. 1025—1040.
73. UAV/UGV Cooperation for Surveying Operations in Humanitarian Demining [Текст] / L. Cantelli [и др.] // 2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, SSRR 2013. — 2013.
74. *Vaquero T., Troesch M., Chien S.* An Approach for Autonomous Multi-rover Collaboration for Mars Cave Exploration : Preliminary Results [Текст] // International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space. — 2018.
75. Vision-Controlled Micro Flying Robots [Текст] / B. D. Scaramuzza [и др.] // Robotics & Automation Magazine, IEEE. — 2014.
76. Walking Posture Adaptation for Legged Robot Navigation in Confined Spaces [Текст] / R. Buchanan [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2019.
77. *Wei J., Ma H.-w.* Study on Mine Rescue Robot System [Текст] //. — 2009. — С. 1065—1072.