

ВЕРОЯТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ



А.П. Софьин¹,
доцент, кандидат
технических наук,
vka@mil.ru;
A.P. Sofin

В связи с бурным развитием в последние десятилетия робототехники, внедрением искусственного интеллекта практически во все сферы деятельности возникла необходимость пересмотреть и систематизировать космические робототехнические устройства. В статье приводится анализ существующих космических роботов, а также возможные направления развития космической робототехники.

Ключевые слова:
космическое пространство;
космические роботы;
манипулятор;
самодвижущие устройства;
амёбный способ движения.

DOI: 10.26162/LS.2025.67.1.010

введение

Использование роботов в различных областях жизнедеятельности человека становится все более актуальным (Ардашов А.А. и др., 2018; Сасункевич А.А. и др., 2017). При рассмотрении конструктивных особенностей выполнения и условий применения роботов их можно разделить на различные группы.

¹ Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Россия, г. Санкт-Петербург.

PROBABLE DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF SPACE ROBOTICS



И.Г. Уханов¹,
доцент, кандидат
технических наук,
vka@mil.ru;
I.G. Ukhonov

Due to the rapid development of robotics in recent decades, the introduction of artificial intelligence into almost all areas of activity, there has been a need to review and systematize space robotic devices. The article provides an analysis of existing space robots, as well as possible directions for the development of space robotics.

Keywords:
outer space;
space robot;
manipulator;
self-propelled devices;
amoeboid mode of movement.

Обычно такое разделение связывают: с традициями создания и историей появления тех или иных конструктивных решений; с непосредственными задачами использования того или иного робота; с местом и условиями непосредственного использования; с особенностями конструирования.

Military-Space Academy named after A.F. Mozhayskiy, Russia, Saint-Petersburg.

Развитие космических роботов активизируется только в последнее время. К настоящему времени наработан значительный опыт и накоплены знания только в отношении манипуляторов. Для них целесообразно акцентировать внимание на двух группах требований:

- определяющих возможность применения устройств и материалов манипулятора в условиях космического пространства;
- связанных с особенностями выполнения манипуляторами манёвров и движением их отдельных узлов и звеньев.

Функциональное назначение, вид роботов и их элементов должны уточняться для конкретных условий последующего их применения в космическом пространстве. В этом качестве могут выступать: широкий температурный диапазон применения; низкое давление; специфические гравитационные условия; наличие космической радиации; метеорные потоки; межпланетная пыль; космический мусор; химическое взаимодействие конструкционных материалов и космических объектов.

Основные направления создания роботов тесно связано с конструктивными вариантами их исполнения и выполняемыми ими задачами. Таким образом, можно определить основные группы таких устройств:

- манипуляторы;
- планетоходы;
- природоподобные объекты.

Заимствование образцов и конструкций из состава наземной техники являлось вполне логичным путём развития космической робототехники.

1. Манипуляторы

Преимущественные тенденции развития космических манипуляторов связаны как раз с их широким внедрением на Земле и определены развитием функциональных возможностей технических средств, оперирующих непосредственно в космическом пространстве. При этом контактно-силовое воздействие направляется на элементы относительно небольших по размерам аппаратов, станций и оборудования. Работоспособность элементов манипулятора необходимо обеспечить в условиях космического пространства: при перепадах температур и давлений; ударном воздействии со стороны космических частиц и космического мусора.

В космических условиях первыми начали использоваться перенесённые с земных производств и технологических комплексов аналоги манипуляторов различных типов. Основные вопросы их создания и применения полностью соответствуют уже заложенным на земле требованиям и направлениям развития робототехники. Отличия формируются только

в рамках условий космического пространства. Независимо от выбранных при проектировании функций все космические работы должны, в общем случае, иметь в своём составе манипуляционную систему (системы) и устройство для передвижения (двигатель). В качестве главного элемента манипуляционной системы выступает механический манипулятор. Он представляет собой выбранную совокупность плоских или пространственных механизмов (частей) на основе различных кинематических цепей, обеспечивающих движение относительно стойки (опоры, фундамента или основания). Такие цепи чаще собираются из звеньев, образующих кинематические пары с вращательным или поступательным относительным движением и системой приводов. Следует отметить не только космические условия, но и особенности конструкции манипулятора и возможные траектории движения как инструментальной части оборудования, так и отдельных звеньев.

По функциональному назначению можно выделить два типа манипуляторов:

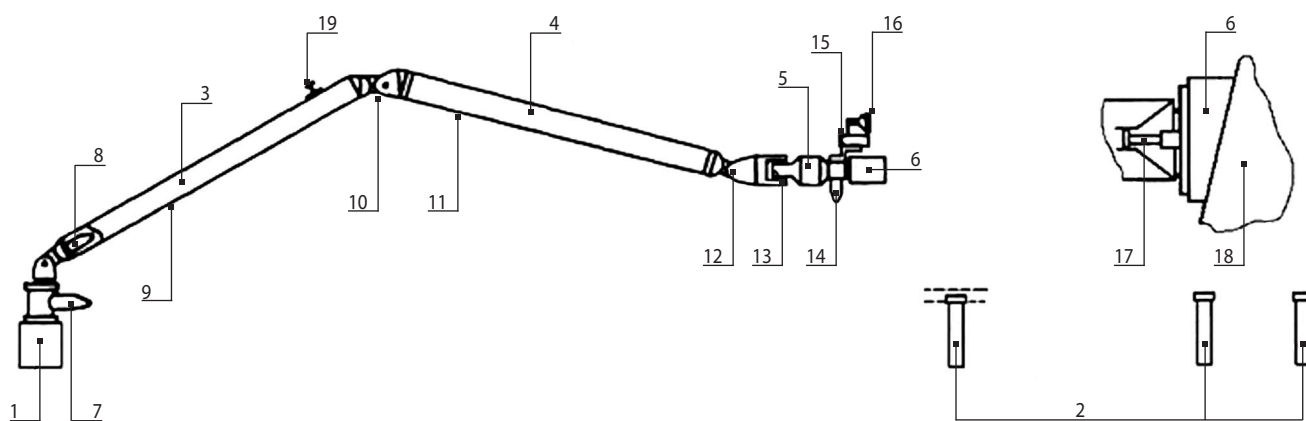
- предназначенные для выполнения сервисных операций над различными техническими и природными объектами;
- входящие в состав средств передвижения.

Уровень развития техники и технологии производства обеспечивает технологическую возможность создания практически любых элементов манипуляторов, при этом реализуемость производственных задач определяется сложностью космического производства и стоимостью работ.

Среди основных требований при создании аналогичного оборудования следует отметить:

- технологическую и экономическую возможность проектирования и реализации устройства на уровне необходимой функциональности в установленных условиях;
- возможность дальнейшего развития и модификации конструкции;
- обеспечение необходимого уровня унификации и стандартизации конструктивных элементов с ориентацией на дальнейшее серийное производство;
- достижение требований по оптимальной компактности и весу;
- эксплуатационные параметры должны соответствовать заданному набору задач (выбранному набору операций).

Работа по созданию космических манипуляторов тесно связана с уменьшением массы всех элементов и узлов и применением безззорных, герметичных соединений. Широкое применение манипуляторов связано с их широкой функциональностью и традиционными задачами, выполняемыми в рамках транспортировочных и подъёмно-перегрузочных работ.



рисунки 1. Схема манипулятора

Структура и состав кинематической схемы космического манипулятора должна обеспечить подачу исполнительного (рабочего) органа в нужную точку пространства и проведение сервисных операций над некоторым техническим или природным объектом.

Можно определить основные функциональные параметры и группы свойств космических манипуляторов:

1. Функциональные параметры: грузоподъемность; размеры рабочей зоны; быстродействие; точность позиционирования.

2. Соответствие условиям или вводимым ограничениям: необходимость превышения массы объекта манипулирования (не менее, чем на 10%); размерам, форме и расположению рабочих зон, обслуживаемого оборудования; числу требуемых рабочих позиций; способам подачи и удаления объекта из рабочей зоны самого манипулятора.

3. Особенности построения кинематических схем: количество и тип кинематических пар; число звеньев; конфигурация рабочего пространства; размещения привода.

Становится очевидным, что функциональность робота достигается необходимой подвижностью его манипулятора, его размерами и точностью, и оперативностью вывода инструмента в заданную точку пространства. Число степеней подвижности должно учитывать структурные условия (геометрические ограничения), а учёт количества внутренних связей в кинематических парах отдельных механизмов должен дополняться способами компоновки элементов самого манипулятора. Если рассматривать уже имеющиеся и типичные схемы манипуляторов, то стоит отметить следующие характерные особенности:

- необходимость приближения конструкции к схеме «руки»;
- именно конструкция определяет число степеней подвижности и функциональные возможности манипулятора.

Развитие манипуляционных систем чаще связывают с операциями погрузки-разгрузки, проводимыми на земле и в космосе с объектами, грузами, аппаратурой и самими манипуляторами. К настоящему времени они выполняют и ранее не свойственные им функции: захват, локальное маневрирование и швартовку аппаратов. К типичным примерам разработанных за последние десятилетия космических роботов следует отнести манипуляторы космических кораблей «Спейс Шаттл» (Space Shuttle) и «Буран». В первом случае дистанционно-управляемый манипулятор (Remote Manipulator System, RMS, или Shuttle Remote Manipulator System, SRMS) Canadarm (рисунки 1 и 2) разработан и изготовлен фирмой SparAerospace ещё в 1975 году.

Манипулятор Canadarm долгое время был не просто основным, но единственным космическим манипулятором с несколькими сегментами, то есть построенным по принципу человеческой руки. Выполненный по аналогичной схеме манипулятор «Бурана» представлен на рисунке 1.

С появлением и решением задач на международной космической станции (МКС), появился новый манипулятор Canadarm-2, имеющий семь шарниров: крена плеча (shoulderroll), рыскания плеча (shoulderyaw), тангажа плеча (shoulderpitch), тангажа локтя (elbowpitch), тангажа кисти (wristpitch), рыскания кисти (wristyaw) и крена кисти (wristroll).

На рисунках 2–5 представлены варианты использования Canadarm и Canadarm-2. Практически весь



рисунок 2. Манипулятор Canadarm во время миссии Дискавери STS-116



рисунок 3. Захват расположенного в грузовом отсеке шаттла Discovery телескопа Хаббл (HubbleSpaceTelescope) в процессе выведения его на орбиту в апреле 1990 года

спектр современных космических манипуляторов связывают с МКС и орбитальными кораблями.

Современные манипуляторы характеризуются значительным числом степеней подвижности (таблица). Конструкция и число степеней подвижности для различных устройств, практически, совпадают или достаточно близки. К настоящему времени широкий диапазон решаемых вопросов позволил накопить значительный опыт создания устройств манипуляторного типа. Общий подход к обеспечению функциональности разрабатываемых устройств может меняться в зависимости от места установки и использования.

К примеру, робот European Robotic Arm (ERA) разработан для размещения на базовых точках крепления на российской научной энергетической платформе (НЭП). Но в мае 2021 года манипулятор ERA был установлен на многофункциональный лабораторный модуль «Наука» из-за отказа от энергетической платформы. Дальнейшее использование этого устройства, связанное с его состоянием, находится под вопросом.

При создании манипулятора должны быть учтены все значащие факторы космической среды и условия применения. Эффективность использования манипулятора определяется связанными с геометрией манипулятора свойствами достижимости и манипулятивности.

2. Планетоходы

В последнее время некоторые страны (Россия, США, Китай, Индия, Евросоюз) заявили о своих амбициозных планах по освоению в ближайшие десятилетия Луны и Марса.

Реализация таких программ невозможна без предварительных разведывательно-исследовательских миссий с применением планетоходов. Планетоход – это транспортное средство, предназначенное для передвижения по поверхности других планет, спутников или астероидов. Такие аппараты должны выдерживать перегрузки, существенные перепады температур и воздействие космической радиации.

За десятилетия космической деятельности были созданы различные варианты аппаратов для исследования других планет. В качестве первичных, хорошо известных устройств такого типа можно считать «ЛУНОХОД-1, -2» (рисунок 6) – серию советских дистанционно управляемых самоходных аппаратов-планетоходов для исследования Луны, современные роботы-марсоходы Spirit и Opportunity (рисунок 7), кроме того, уже сейчас созданы устройства, способные летать в условиях разреженной атмосферы планет солнечной системы (рисунок 8), а в недалёком будущем возможно появление роботов для перемещения в подпланетном пространстве.

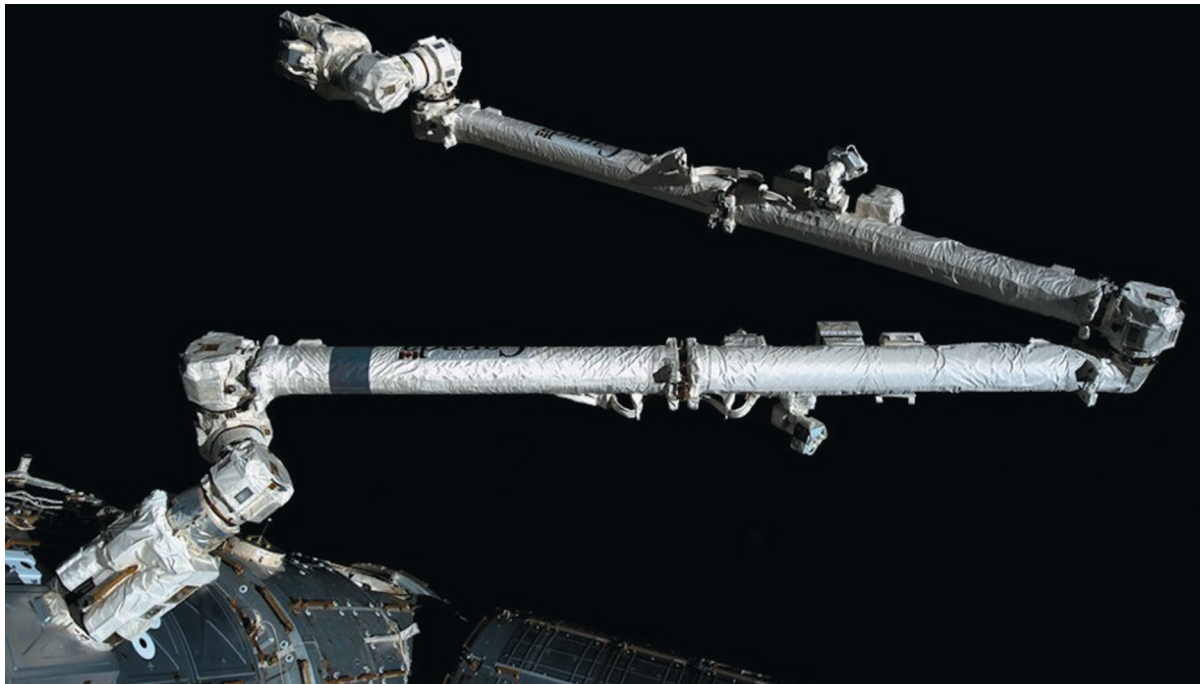


рисунок 4. Внешний вид Canadarm-2

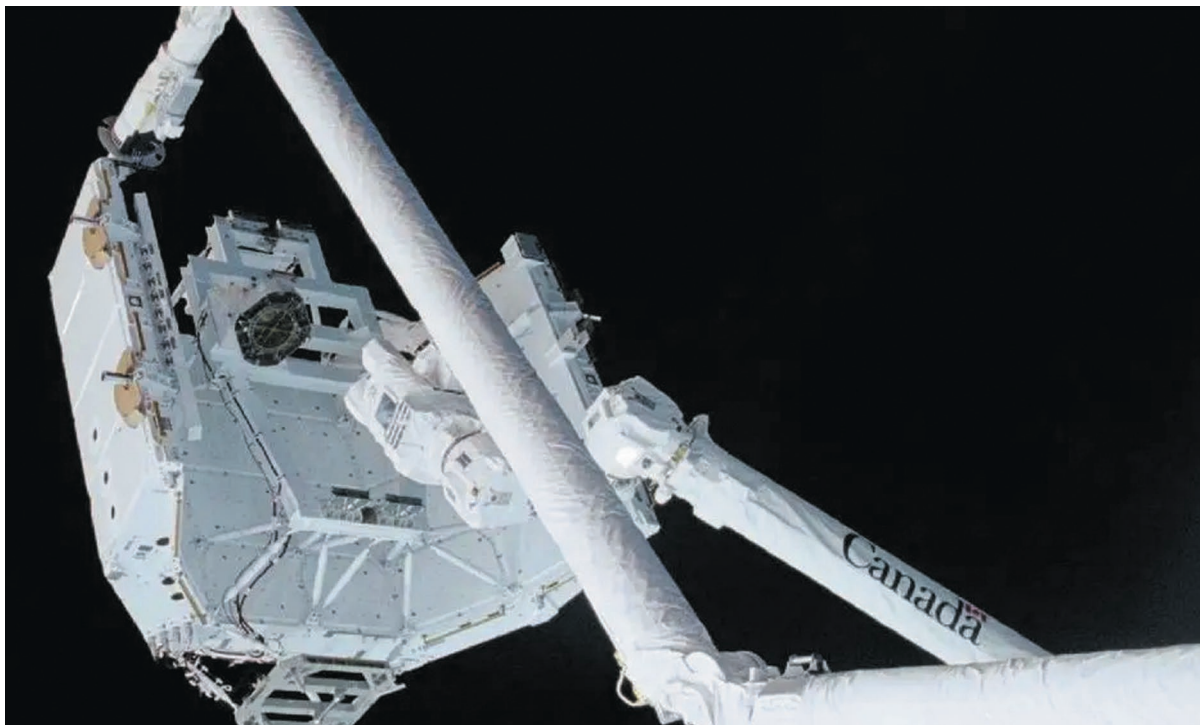


рисунок 5. Совместная работа Endeavour Canadarm и Canadarm-2

таблица – Общая информация по современным космическим манипуляторам

наименование	Canadarm (SRMS)	Canadarm-2 (SSRMS)	Dextre (SPDM)	JEMRMS	ERA	«Аист» (для «Бурана»)
характеристика						
страна	Канада	Канада	Канада	Япония	Нидерланды	СССР
тип	механическая рука	механическая рука	составной манипулятор	механическая рука	механическая рука	механическая рука
статус	выведен из эксплуатации	в эксплуатации	в эксплуатации	в эксплуатации	с 2022 года – не ясно	проект закрыт
количество степеней подвижности	6	7	–	6	6	6



1 – магнитометр; 2 – всенаправленная антенна; 3 – остронаправленная антенна; 4 – солнечная батарея; 5 – верхняя навигационная ТВ-камера; 6 – нижние навигационные ТВ-камеры; 7 – уголкового отражатель; 8 – выносной блок аппаратуры «РИФМА»; 9 – герметический контейнер с научными приборами; 10 – панорамные ТВ-камеры; 11 – прибор оценки проходимости (ПрОП); 12 – штыревая антенна; 13 – мотор колеса.

рисунок 6. Схема «ЛУНОХОДА-2»

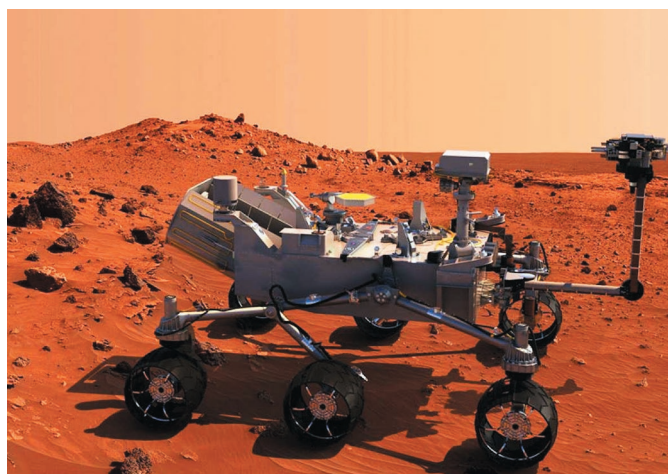


рисунок 7. Роботы-марсоходы Spirit и Opportunity



рисунок 8. Ingenuity – небольшой летающий дрон для тестирования технологии полётов на Марсе, вошёл в состав миссии NASA Mars-2020

В наземном варианте группа этих устройств получила активное развитие, начиная с первой половины прошлого века. Очевидно, что передвижение на космических объектах более удобно организовать с помощью аналогов разработанного на Земле оборудования.

К типовым роботам можно отнести самодвижущие устройства транспортного типа – танкетки, краны, разминированные устройства, заменители персонала по мелким вопросам, транспортировщики и даже охранные механизмы. Их использование в космосе получит широкое применение после выхода на реальные объекты, имеющие значительные размеры. Например, на спутники и планеты (Луна, Марс). Несмотря на внешнее различие с манипуляторами, для обеспечения требуемой функциональности их состав определяется следующими признаками:

1. Связанные с внешней функциональностью: наличие связи; дистанционное или автономное управления; информационное накопление данных; наличие исполнительных органов; обеспечение возможности выполнения дополнительных задач.

2. Внутреннего устройства – внутренние и непосредственные функции, обеспечивающие передвижение: организация привода и непосредственного передвижения; организация энергообеспечения; способы управления (дистанционное или автономное).

3. Формирование состава конструкции: типы модулей и устройств передвижения, обеспечения готовности, приёма и обработки информации; типы модулей сбора, приёма и трансформации; вид конструктивных модулей (элементов) для выполнения операций.

Главная задача данной группы устройств – размещение и транспортировка на своей базе различного типа технических средств. В космосе роботы будут часто и долгое время служить для прямой замены людей. В настоящее время их связывает очевидный общий признак – они работают под управлением человека. В то же время в космосе приобретает более высокое значение возможность самостоятельной работы роботов. Соответственно и подход к безопасности персонала должен быть иным. Таким образом, целью дальнейших технических разработок могло бы стать создание автономных машин, способных не только функционировать в заданных условиях, но и имеющих возможность формировать решение на проведение операций без участия человека. Дополнительной проблемой при этом может стать распознавание своих и чужих устройств.

Существует достаточно глубокая оценка достоинств и недостатков наземных роботов. Это, в первую очередь, связано с расширением использования роботов в качестве военных устройств в последние десятилетия. На современном этапе развития техники

подавляющее большинство роботов по существу являются опытными образцами, которые проходят лабораторные, полевые и натурные испытания. Речь о самостоятельности аппаратов и полной замене человека пока не идёт. Кроме того, проблема заключается в разных подходах к созданию техники, большом количестве участвующих в создании организаций и остающейся осторожности при обеспечении реализуемости отдельных признаков, в том числе связанных с управлением аппаратами. Дополнительно следует отметить высокую стоимость работ. В настоящее время чаще всего речь идёт о переделке или частичном, или полном приспособлении уже существующих промышленных образцов техники.

Можно уверенно говорить о появлении значительного опыта создания робототехнических устройств, который может с некоторыми ограничениями быть перенесён для космических условий и на космические объекты. С точки зрения функциональности устройств возможно говорить о полном переносе функций или о частичном использовании возможностей оборудования с учётом космических условий, а также о соединении функций имеющихся устройств. Наряду с дистанционным управлением может рассматриваться нахождение принимающего решение оператора внутри машины или на отдельном подвижном пункте.

Опыт разработки современных наземных устройств позволяет выделить две подгруппы роботов: свыше и до одной тонны. Конструкция, тип и состав оборудования данных аппаратов определяется функциональным назначением роботов, решающих задачу по замене или усилению возможностей человека, а также обеспечения безопасности его работы. В идеальном случае робот должен обладать искусственным интеллектом.

Таким образом, наряду с манипуляторами, формируется вполне очевидное направление – переоборудование существующих изделий или создание на их базе новых образцов, выполняющих нужные функции.

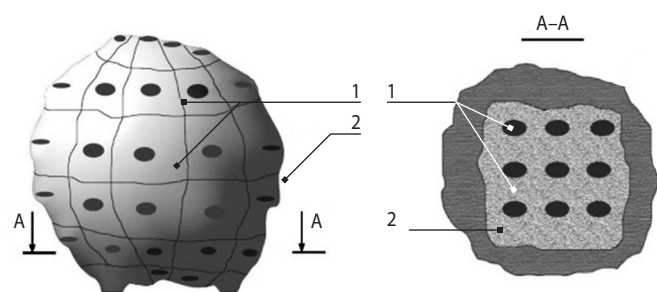
3. Природоподобные формы

В последнее время следует обратить внимание на рост интереса к природоподобным формам и процессам (*Указ Президента Российской Федерации от 02.11.2023 № 818*). Широкий переход к «природным» признакам связан с необходимостью выполнения сложных операций, проходящих за пределами возможностей человека и отличающихся крайней уникальностью. Кроме того, появилась возможность экспериментального исследования новых идей, появления и проверки новых конструкций и, наконец, способов разработки и создания уникальных



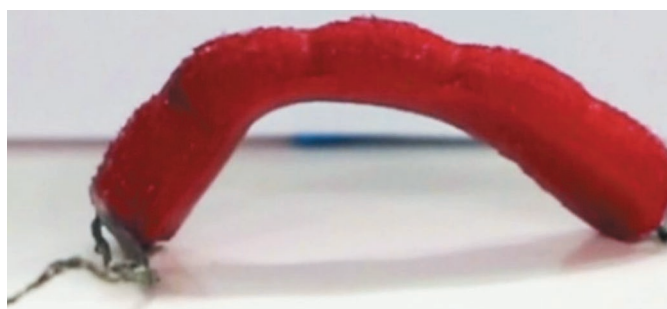
1 – робот-гусеница;
2 – робот-краб;
3 – робот-птица.

рисунки 9. Образцы моделей природоподобных роботов



1 – отсек корненожки;
2 – внешняя оболочка.

рисунки 10. Внешняя оболочка устройства, реализующего амёбный вариант передвижения



рисунки 11. Роботы, основанные на механике движения ленточных червей

технических устройств. Среди появившихся в последнее время моделей можно встретить настоящий «зоопарк» роботов: робот-осьминог, робот-ястреб, робот-краб, робот в виде хобота африканского слона и другие устройства (рисунки 9). В отдельных случаях наблюдается элементарное желание создателей представить что-нибудь удивительное и не созданное до сего времени. Можно только надеяться на создание сложных и, одновременно, реально необходимых конструкций.

Таким образом, появляющиеся устройства можно отнести к третьей группе. Очевидные моменты использования новых устройств – подгруппы:

- роботов, способ движения которых не использовался до настоящего времени или недостаточно широко применялся;
- роботов, созданных под очень узкое функциональное предназначение;
- роботов для первоначального развлечения, когда его возможности позволяют достигнуть положительного эффекта в дальнейшем.

Детальное изучение вариантов реализации каждого способа движения показывает значительное число их разновидностей, и оно полностью зависит от конкретных условий и реализуемых функций. Наряду с типовыми, необходимо также учитывать наличие множества переходных и комбинированных форм движений и типов конструкций.

Становится более удобным выбор конструкций и движителей, повторяющих что-то существующее и связанное с имитационным клонированием типичных природных движений, уже использованное в технике. Но более интересен анализ до настоящего времени не применяемых процессов и признаков тех или иных природных явлений.

Для примера рассмотрим два варианта перспективных устройств: с одной стороны, это амёбный движитель, с другой – появляющиеся роботы-червяки различных конструкций. В обоих случаях признаки связаны с очевидным перераспределением массы внутри устройства.

Амёбный способ движения, характерный для амёб, а также некоторых клеток у многоклеточных животных (например, лейкоцитов крови человека) остаётся к настоящему моменту времени практически не используемым в технике. На основе изучения движения амёб можно предложить ещё один способ передвижения современных роботов и транспортных средств. Для него потребуются использовать корпус, позволяющий проводить перераспределение внутренней массы (Горшков Л.К. и др., 2022; Софьин А.П. и др., 2023). Выбранные способы изменения формы или элементов корпуса определяют уровень возможности разработки различных вариантов конструкций (Софьин А.П. и др., 2024).

Рассмотрение амёбоидного способа движения показывает его основной отличительный признак – отказ от колёс или гусениц, которые однозначно определяют главный недостаток существующих и широко используемых средств передвижения – довольно низкую проходимость и надёжность. При функционировании робота, использующего амёбоидный способ движения, естественным образом исчезает необходимость учёта многих факторов окружающей среды. На рисунке 10 представлен вариант выполнения внешней оболочки устройства, реализующего амёбоидный вариант передвижения (*Горишков Л.К. и др., 2022*).

Узко специфические особенности использования приводят к появлению роботов, движение которых учитывает специфику движения живых существ. Например, учёные из Шотландии создали роботов, имитирующих движение ленточных червей (рисунок 11).

Разработка инженеров может применяться в протезировании, спасательных операциях и промышленности. Причём, перспективы применения этими направлениями далеко не ограничиваются.

заклучение и перспективы развития

Наряду с существующими направлениями развития, всё шире рассматривается возможность заимствования для технических устройств (роботов и транспортных агрегатов) природных процессов и явлений, позволяющих расширить диапазон применимости транспортных, сервисных и иных средств и снижающих уровень их воздействия на объекты окружающей природной среды.

В основе создания любого робота стоят два однозначных момента: функциональное назначение, конкретные условия применения.

Возможно выделить приоритетные признаки и направления, связанные с особенностями эксплуатации и условиями применения. Отметим, что за неопределённостью применения и неясным целевым назначением могут скрываться вполне очевидные задачи, которые авторы не желают афишировать по той или иной причине.

Предполагается, что в настоящее время будут параллельно развиваться все варианты конструкции робототехнических устройств. Непосредственно эффективность применения космических роботов пока все ещё остаётся под вопросом по следующим причинам:

- автономные аппараты полноценными роботами не являются, так как лишены искусственного интеллекта;
- до сих пор не существует единого сформированного подхода к целевому использованию роботов.

Опыт создания разноплановых систем позволил конкретизировать перспективные разработки в рамках следующих направлений:

- подбор манипуляционных и иных систем под конкретные условия;
- разработка устройств, имитирующих полностью или частично природные объекты;
- создание универсальных систем, как развитие традиционных устройств и получающих развитие в рамках дополнительных требований;
- появление робототехнических устройств на абсолютно новых, возможно неизвестных принципах.

По мере развития робототехнических устройств возможно выделение ещё одной группы – бытовых устройств. По всей видимости, более широкое внедрение искусственного интеллекта в эти изделия позволит перейти к созданию широкофункционального оборудования.

При этом очевидным ограничением должна стать сама технологическая и экономическая возможность реализации того или иного проекта, а в дальнейшем и возможность дальнейшего развития и модификации конструкции.

список литературы

Ардашов А.А., Сасункевич А.А., Софьин А.П., Федорова Л.А. Обоснование геометрических параметров звеньев манипулятора космического робота // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2018. № 660. С. 130-137.

Горишков Л.К., Софьин А.П., Федорова Л.А., Уханов И.Г. К вопросу о разработке и создании устройств с амёбоидными движителями // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2022. № 3. С. 52-56.

Сасункевич А.А., Софьин А.П., Федорова Л.А. Факторы космического пространства и защита космических роботов от внешнего воздействия // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2017. № 656. С. 170-175.

Софьин А.П., Федорова Л.А., Горишков Л.К., Уханов И.Г. О режимах плоского движения космического робота, имеющего аморфные признаки // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 3. С. 51-57.

Софьин А.П., Федорова Л.А., Уханов И.Г., Кукушкин И.О. Конструктивные особенности космического робота с амёбоидным движителем // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2024. № 2. С. 91-96.

Указ Президента Российской Федерации от 02.11.2023 № 818 «О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации».

Статья поступила в редакцию 04.12.2024

Статья после доработки 10.12.2024

Статья принята к публикации 11.12.2024