

Робототехника и комплексная автоматизация

название факультета

РК5 – Прикладная механика

название кафедры

**Прототип антропоморфной шагающей платформы
и оптимальный алгоритм её перемещения**

название работы

Автор:

Архипова Александра Сергеевна

фамилия, имя, отчество

**МАОУ Лицей научно-инженерного
профиля, 10 класс**

наименование учебного заведения, класс

Научный руководитель:

Иванов Илья Игоревич

фамилия, имя, отчество

МГТУ им. Баумана

место работы

ассистент

звание, должность

подпись научного руководителя

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Актуальность темы исследования и описание проблемы.....	2
2 Гипотеза исследования.....	3
3 Цель исследования	3
4 Задачи исследования	3
5 Материалы и методы исследования.....	4
6 Основная часть исследования	5
7 Практические рекомендации	12
8 Научно-техническая новизна.....	13
9 Выводы... ..	13
10 Планы на будущее.....	14
11 Список использованной литературы	15
Приложение	

1 Актуальность темы исследования и описание проблемы

Проблема перенаселения земли, ухудшения экологической обстановки, истощения природных ресурсов всегда остается актуальной. Человечество рано или поздно будет вынуждено переселиться на другие планеты. Учёные с помощью современных технологий, в том числе радиотелескопов, открыли множество новых планет, среди которых есть пригодные для развития жизни. В сентябре 2016 года в Китае открылся самый большой в мире радиотелескоп FAST. Среди основных задач подобных телескопов - поиск гравитационных волн, радиоизлучения от звезд и галактик, а также обнаружение сигналов от внеземных цивилизаций.

Для дальнейшего исследования уже открытых планет с твердым грунтом необходима мощная роботизированная техника, обладающая высокой проходимостью. Не известно, какие формы рельефа будут там преобладать, поэтому необходимо найти самый выигрышный вариант мобильной платформы. В пример можно привести американский колёсный марсоход Opportunity, который за десять лет своей миссии прошел по красной планете всего 40 километров, а его близнец Spirit уже через 8 км завяз в песках[10]. Подобным примером служит китайский луноход Юйту[6]. Стадо антилоп гну в день способно преодолевать расстояние до 50 км по пересечённой местности, а горные козлы с легкостью взбираются на непокоримые горные кручи[3]. Подобные сравнения наглядно показывают преимущества ходьбы, как способа передвижения в природных условиях.

В сравнении с колесной и гусеничной техникой, способность машины перемещаться посредством ходьбы придаст ей большую устойчивость на неровных поверхностях, обеспечит возможность выбирать точки опоры, повысит ее маневренность и проходимость, позволит снизить затраты энергии на единицу пути, а также даст возможность свободно двигаться в среде обитания человека. В связи с этим во многих странах активно ведутся разработки шагающих машин и роботов (шагающих платформ), схожих с живыми существами. Известны антропоморфные роботы имеющие два педипулятора:

Asimo, Atlas, HRP-4C, и зооморфные роботы снабженные четырьмя педипуляторами например BigDog и LS3 [7,8]. Однако ходьба созданных на данный момент шагающих роботов не совершенна, требует значительных затрат энергии. В полной мере не решена задача правильного выбора точек опоры для педипуляторов, а походка антропоморфных роботов зачастую напоминает ходьбу больных людей. В связи с этим в настоящее время спектр использования биоморфных шагающих платформ существенно ограничен. Данная проблема и послужила мотивацией для проведения исследования.

2 Гипотеза

При подготовке к реализации исследования, была сформулирована гипотеза: если конструкция антропоморфной шагающей платформы будет точнее воспроизводить природный аналог - ноги человека и копировать алгоритм естественных локомоций, то ее ходьба станет более естественной, а энергоэффективность и устойчивость возрастут.

3 Цель исследования

Разработать прототип энергоэффективной антропоморфной шагающей платформы и алгоритм ее оптимального перемещения.

4 Задачи исследования

1. Разработать шарнир с гибкими элементами, предложить классификацию и условные обозначения шарниров с гибкими элементами для ГОСТа.
2. Изучить свойства шарнира с гибкими элементами, уточнить траектории и амплитуду движений гибких элементов шарнира, определить факторы влияющие на них.
3. Написать уравнения зависимости координат общего центра масс прототипа антропоморфной шагающей платформы друг от друга для трех плоскостей.
4. Вывести систему уравнений, описывающих зависимость координат траекторий общего центра масс прототипа шагающей платформы от времени.

5. Изготовить плоскостную модель антропоморфной шагающей платформы и ее трехмерный прототип, изучить условия поддержания его в положении устойчивого равновесия и необходимые усилия для перемещения вперед.
6. Изучить силы, действующие на внутренний гибкий элемент шарнира в одноопорном периоде шага.
7. Теоретически обосновать эффект уменьшения силы реакции опоры в середине одноопорного периода шага антропоморфной шагающей платформы.
8. Изучить возможности преобразования потенциальной энергии антропоморфной шагающей платформы в кинетическую энергию и разработать механизмы её рекуперации.
9. Предложить оптимальную траекторию перемещения общего центра масс антропоморфной шагающей платформы в цикле целого шага и алгоритм энергоэффективной ходьбы.

5 Материалы и методы исследования

В основе работы лежит экспериментальный метод, ведь именно на практике устанавливается истинность фактов. Он эффективен, так как полученные результаты однозначно и наглядно показывают, в ту ли сторону движется исследовательская мысль. Для получения точных данных использовался математический метод: проведение расчётов и формализация законов. С целью упрощения реальных объектов, использовался метод моделирования. Примером служат модели шарового шарнира, прототипа антропоморфной шагающей платформы, созданные перед воплощением технических решений. Гипотетический метод позволил выдвинуть в начале исследования гипотезу, которая явилась вектором последующего исследования. Анализ и синтез полученных данных позволил сделать верные выводы и заключения из проделанной работы.

6 Основная часть исследования

Одним из наиболее распространенных видов локомоций человека является ходьба. Её особенности изучались нами путем наблюдения и анализа видеозаписей походки друзей и знакомых в замедленном режиме. Детальное исследование закономерностей ходьбы человека в норме проводилось с применением демо-версии программы VISUAL 3D Version 3.05 компании C-Motion, для Системы видеоанализа движений, рисунок 1. Средствами программы изучена траектория движения общего центра масс тела идущего человека и вращательные перемещения всех сегментов пояса нижних конечностей во всех трех плоскостях в различные периоды шага.

Современными исследованиями показано, что при ходьбе и поддержании вертикального положения тела, кроме мышц важная роль принадлежит связкам. Одной из важнейших связок человека, участвующих в реализации ходьбы, является связка головки бедренной кости находящаяся в тазобедренном суставе. По аналогии с ним, нами разработан «Шарнир с гибкими элементами» - аналогами суставных связок, который подробно описан в нашей заявке на изобретение [1], рисунок 2.

С целью изучения особенностей функционирования шарнира с гибкими элементами и оптимизации алгоритма ходьбы, мы сконструировали «Стенд для испытания цилиндрических и шаровых шарниров» [2], рисунок 3, который подробно описан в нашей заявке на изобретение. Стенд явился прототипом кормовой части разрабатываемой нами антропоморфной шагающей платформы. На стенде изучены особенности функционирования шарового шарнира с гибкими элементами для разрабатываемой нами антропоморфной шагающей платформы.

В технике известны разъемные и неразъемные шаровые шарниры. Мы предложили шарниры с внутренними и внешними гибкими элементами. Они могут быть использованы в робототехнике, машиностроении, а также при создании экзоскелетов человек и животных. Поэтому предлагаем условные обозначения шаровых шарниров с гибкими элементами для ГОСТ, рисунок 4.

Количество внешних и внутренних гибких элементов зависит от того, какой именно должна быть его амплитуда движений. Возможно создавать шарниры с множеством внешних гибких элементов и одним внутренним, например, как наш тазобедренный шарнир.

Введенные нами условные обозначения для шарниров с гибкими элементами были использованы на чертежах разработанного нами прототипа антропоморфной шагающей платформы, рисунок 5.

Затем мы сконструировали трехмерный прототип антропоморфной шагающей платформы из металла и его плоскостную модель. Он состоял из двух педипуляторов – аналоги нижних конечностей человека и кормовой части – аналога таза человека. Каждый педипулятор содержит сегмент бедра, сегмент голени и сегмент стопы. Сегмент бедра и голени был выполнен из металлических трубок, сегмент стопы изготовлен из толстого резинового листа, а кормовая часть собиралась из отдельных деталей – пластин и кронштейнов. Сегменты голени, стопы и бедра соединялись петлевыми шарнирами, а сегмент бедра с кормовой частью соединялся шаровым шарниром с гибкими элементами.

Для уточнения особенностей перемещения внутреннего гибкого элемента шарнира в одноопорном периоде шага антропоморфной шагающей платформы была создана трехмерная модель головки шарнира из надувного шарика, содержащего аналог внутреннего гибкого элемента, рисунок 6. Замечено, что движения внутреннего гибкого элемента и гнезда шарнира в сагитальной плоскости могут быть описаны уравнениями для прямого маятника.

С целью подробного изучения свойств шаровых шарниров с гибкими элементами был сконструирован стенд для изучения шаровых и цилиндрических шарниров. Эксперименты показали, что перемещение вперед корпуса испытательного стенда, который явился прототипом кормовой части антропоморфной шагающей платформы, может происходить в автоматическом режиме под действием веса корпуса стенда с прикрепленной к нему нагрузкой. Анализ полученных данных свидетельствует, что скорость перемещения кор-

пуса испытательного стенда в горизонтальной плоскости вперед, может регулироваться фронтально расположенным приводом. В крайнем положении, когда происходило натяжение гибких элементов шарнира, корпус стенда занимал устойчивое фиксированное положение. Для его поддержания в положении равновесия не требовалось дополнительного усилия, кроме сил реакции гибких элементов. Построены графики движения общего центра масс стенда в проекции на сагиттальную, горизонтальную и фронтальную плоскости при движении.

По полученным координатам проекций нагрузки корпуса стенда на плоскости построена пространственная кривая ее движения, рисунок 7.

Пространственная траектория представляла собой плавную кривую, напоминающую часть нисходящей спирали. В крайнем положении движения для удержания корпуса стенда в равновесии дополнительного усилия не требовалось, привод был полностью разгружен. Соответственно, при введении в конструкцию антропоморфной шагающей платформы шарниров с гибкими элементами можно повысить устойчивость кормовой части, снизить нагрузку на приводы, удерживающие ее в одноопорном положении при ходьбе и в положении покоя, а значит уменьшить общие затраты энергии. Замечено, что наклон корпуса стенда приводил к натяжению внутреннего гибкого элемента, что и уменьшало усилие регистрируемого динамометром фронтального привода, рисунок 8.

В первом опыте моделировано условие равновесия кормовой части шагающей платформы в начале одноопорного периода шага без натяжения внутреннего гибкого элемента. При этом силы действовали по разные стороны от центра вращения, значит, указанную схему нагрузки головки шарнира можно описать условием равновесия рычага первого рода: $LP=L_mF_m$, где L – плечо веса тела, м; L_m – плечо усилия фронтального привода стенда или фронтального привода антропоморфной шагающей платформы, м; F_m – усилие фронтального привода стенда или привода антропоморфной шагающей

платформы, кг м/с². В данном случае результирующая сила действует на головку шарнира сверху.

Условие равновесия кормовой части антропоморфной шагающей платформы в конце одноопорного периода шага при натяжении внутреннего гибкого элемента шарнира опорного педипулятора без участия фронтального привода - условие равновесия рычага второго рода, может быть выражено формулой: $LP = L_l F_l$, где F_l – вертикальная составляющая силы реакции внутреннего гибкого элемента шарнира, кг м/с²; L_l – плечо вертикальной составляющей силы реакции внутреннего гибкого элемента шарнира, м. В данном случае результирующая сила действует на головку шарнира сверху. При этом натянутый внутренний гибкий элемент не только стопорит шарнир во фронтальной плоскости, но и способен полностью разгрузить привод удерживающий кормовую часть шагающей платформы.

В середине одноопорного периода шага кормовая часть шагающей платформы может быть удержана за счет одновременного натяжения внутреннего гибкого элемента шарнира и усилия фронтального привода, рисунок 9.

Условие равновесия может быть выражено формулой: $LP = L_m F_m - L_l F_l$. В данном случае результирующая сила действует на головку шарнира сверху и снизу, распределяясь в зависимости от степени натяжения внутреннего гибкого элемента и усилия фронтального привода. Под действием подвешенной нагрузки, происходило спонтанное движение корпуса стенда, который поворачивался вперед и наклонялся вниз. В дальнейшем это можно будет использовать для перемещения антропоморфной шагающей платформы. Данный эксперимент показал возможность преобразования части потенциальной энергии корпуса стенда во вращательное движение динамо-машины, рисунок 10. Изменение потенциальной энергии корпус стенда рассчитаны и в виде диаграммы представлены на рисунке 11.

Изучены условия равновесия прототипа антропоморфной шагающей платформы и величины сил, способных удержать ее в неподвижном положении. Особенности конструкции тазобедренного и коленного шарнира позво-

лили их стопорить за счет сил упругости коленной пружин и натяжения имеющих гибких элементов, которые не препятствовали совершать отдельные виды движений. Все это обеспечивало поддержание вертикального положения только за счет использования внутренних усилий системы, без затрат дополнительно энергии.

Продемонстрировано, что при выведении из равновесия антропоморфной шагающей платформы, она может самостоятельно перемещаться вперед. При этом вперед смещается кормовая часть платформы, которая представляет собой аналог обратного маятника.

При отклонении антропоморфной шагающей платформы от вертикали, сила тяжести смещает ее все далее из вертикального положения, не позволяя вернуться в исходное. Это позволяет создать машину, которая сможет спонтанно перемещаться вперед за счет действия силы тяжести.

Экспериментами на модели головки шарнира выяснено, что в горизонтальной плоскости смещение области крепления внутреннего гибкого элемента шарнира к гнезду шарнира вызывает тангенциальная сила. В соответствии с закономерностями движения маятника с верхней точкой подвеса и закономерностями движения по окружности, конечной, самой низкой точке траектории своего движения, на область крепления внутреннего гибкого элемента шарнира к гнезду шарнира действует центробежная и центростремительная сила, рисунок 12.

В конце поворота кормовой части антропоморфной шагающей платформы в одноопорном периоде шага на нее будет действовать сила тяжести, сила реакции внутреннего гибкого элемента шарнира, центростремительное ускорение, а в направлении от центра головки шарнира сила реакции поверхности головки шарнира и центробежная сила. Результирующая центростремительной и центробежной силы имеет направление снизу-вверх, снаружи-внутри что обуславливает тенденцию к смещению кормовой части вверх и внутрь. Это уменьшит нагрузку на внутренний гибкий элемент шарнира опорного педипулятора, уменьшит давление шагающей платформы на грунт.

Нами был сконструирован прототип кормовой части антропоморфной шагающей платформы на котором, воспроизводился одноопорный период шага, рисунок 13. Он состоял из тазобедренного шарнира с гибкими элементами, аналогов переносного и опорного педипуляторов, динамо-машины, снабженной мультиметром, системы блоков и тяг. В начале эксперимента кормовая часть была максимально приподнята, отведена в сторону, то есть полная механическая энергия системы была сосредоточена в потенциальной, в этом положении она удерживалась рукой. Отпустив систему, она перемещалась вперед, это движение было вызвано частичным преобразованием потенциальной энергии в кинетическую. Посредством динамо-машины, оставшаяся часть потенциальной энергии преобразовалась в электрическую. За счёт движения общего центра масс прототипа по дуге вперед и вниз, возникала подъемная сила, которая компенсировала силу тяжести прототипа в середине одноопорного периода шага. Аналог педипулятора переносился вперед с помощью системы блоков и тяг, на это тоже была затрачена запасенная ранее энергия.

Графики движения общего центра масс антропоморфной шагающей платформы в одноопорном периоде шага представляют собой параболические кривые. Их кривизна обусловлена влиянием сил реакции гибких элементов шарнира. Кривые движения общего центра масс можно описать уравнениями квадратичных функций $y(x)$ – для фронтальной плоскости, $z(x)$ – для горизонтальной и $y(z)$ – для сагиттальной. Уравнения графиков были написаны координатным методом, то есть по координатам точек в плоскости, путем подстановки известных значений переменных в уравнения вида $v(n)=an^2+bn+c$, где n и v переменные. Таким способом были найдены постоянные коэффициенты уравнения и свободный член, а именно a , b , c . Приведем полученные уравнения для координат:

$$z(y)=0,1y^2-1,9y; y(x)=0,01x^2+0,43x; x(z)=-1,4z^2+16,4z$$

С помощью математической программы построения графиков по точкам было установлено, что в горизонтальной плоскости координата по оси ОХ

находится в линейной зависимости от времени, аналогично для сагиттальной плоскости. Уравнение прямой имело вид: $l(t)=kt+c$, где l и t – переменные, k – угловой коэффициент прямой, c – свободный член.

Зависимости координат от времени могут быть описаны выражениями:

$$y(t)=300t; \quad x(t)=266,7t; \quad z(t)=9000t^2-570t$$

Математический аппарат позволяет построить пространственную кривую движения общего центра масс антропоморфной шагающей платформы в зависимости от изменения скорости движения машины, ее размеров и длины внутреннего гибкого элемента тазобедренного шарнира.

Опираясь на данные изучения ходьбы человека в норме, мы предложили рабочую классификацию периодов фаз опоры её цикла с целью использования при разработке алгоритма ходьбы антропоморфного робота. В фазе опоры различаем: период подъема общего центра масс, период его спиралевидного снижения, период дугообразного снижения, период торможения движения. Проанализировав алгоритм естественной ходьбы человека, данные полученные в экспериментах на прототипе антропоморфной шагающей платформы и используя результаты математических расчетов мы предложили оптимальный алгоритм ходьбы антропоморфной шагающей платформы, рисунок 14. Пространственная траектория перемещения общего центра масс шагающей платформы в цикле ходьбы при оптимальном алгоритме представлена на рисунке 15.

Внешние особенности современных антропоморфных роботов послужили причиной нам предложить конструкцию, в которой машина не имеет человекоподобной головы, рисунок 16. Одним из вариантов применения разрабатываемой нами антропоморфной шагающей платформы является изучение иных планет, в том числе Марса. Шагающие роботы обладают наибольшей проходимостью, поэтому станут идеальным транспортом для людей в неземных условиях. В связи с этим, предлагаем собственную конструкцию шагающего робота. У него видеокамеры расположены на башнях верхнего корпуса и соединены вогнутой плоскостью, что создает визуальный эффект глаз и

улыбки лица не человеко-подобного существа. Это повысит комфорт при его коммуникации с человеком, исключит эффект ожидания агрессии и безжалостно-разумного поведения. Расположение видеокамер на расстоянии друг от друга более чем обычно, позволит повысить качество стереоскопического машинного зрения. Предлагаем бело-зеленую окраску робота для повышения его заметности на Марсе, где цвета ландшафта преимущественно оранжево-красные в связи с высокой концентрацией в грунте оксида железа.

В отличие от антропоморфного робота Valkyrie, который разрабатывается в США для изучения Марса, в конструкции нашего робота будут использованы шарниры с гибкими элементами. Их внедрение сделает ходьбу робота более энергоэффективной, повысит его устойчивость и позволит ходить по хрупким поверхностям благодаря эффекту уменьшения силы реакции опоры в середине одноопорного периода шага, например, по поверхности зыбучих Марсианских песков, в которых погиб один из марсоходов[9].

7 Практические рекомендации

1. При создании шагающих биоморфных платформ для роботов, транспортных средств и научно-исследовательских комплексов рационально использовать шарниры с гибкими элементами нашей конструкции.

2. Для обозначения шарниров с гибкими элементами мы предлагаем использовать разработанные нами пиктограммы, а для дальнейшего совершенствования шарниров с гибкими элементами предлагаем применять разработанную нами их классификацию.

3. При организации передвижения шагающих антропоморфных платформ не обходимо учитывать положительные свойства, которые придают машине шарниры с гибкими элементами.

8 Научно-техническая новизна исследования

1. Впервые предложены и изготовлены шарнир с гибкими элементами для мобильной биоморфной платформы и стенд для его испытания.
2. Впервые разработана классификация шаровых шарниров с гибкими элементами, а также их условные обозначения на чертежах и схемах.
3. Впервые изучено влияние наружных и внутреннего гибкого элемента шарового шарнира на амплитуду движений в нем.
4. Впервые в эксперименте удалось переместить полезную нагрузку прототипа шагающего транспортного средства вперед, путем преобразования потенциальной энергии его массы в кинетическую энергию, а также опробовать механизм рекуперации энергии.
5. Впервые уточнена оптимальная траектория перемещения общего центра масс кормовой части антропоморфной шагающей платформы в одноопорном периоде шага.
6. Впервые разработан и сконструирован прототип антропоморфной шагающей платформы, имеющий в конструкции шарниры с гибкими элементами.
7. Впервые разработан алгоритм энергоэффективной ходьбы антропоморфной шагающей платформы и классификация фаз опорного периода шага на основе перемещения общего центра масс.
8. Впервые предложено техническое решение позволяющее снизить вес шагающей платформы в одноопорном периоде шага.

9 Выводы

1. Шарнир с гибкими элементами – аналог естественного сустава позвоночного животного, технически исполним, он способен порождать вращательный момент в горизонтальной плоскости и являться подвижной опорой для шагающей антропоморфной платформы.

2. Введенные условные обозначения шарнира упростят разработку механизмов с использованием шарниров с гибкими элементами.
3. Амплитуда движений в шарнире с гибкими элементами зависит от их длины и точек крепления, а стопоря ими шарнир, можно повысить устойчивость машины и снизить нагрузку на приводы.
4. Уравнения графиков движения общего центра масс антропоморфной шагающей платформы в одноопорном периоде шага представляют собой квадратичные функции.
5. Изготовление плоскостной модели антропоморфной шагающей платформы и ее объемного прототипа является важными этапами конструирования биоморфного робота.
6. Поддержание положения устойчивого равновесия антропоморфной шагающей платформы можно обеспечить, используя в конструкции тазобедренные шарниры с гибкими элементами.
7. В середине одноопорного периода шага тазобедренный шарнир с внутренним гибким элементом может порождать подъемную силу, уменьшающую вес шагающей платформы и ее удельное давление на грунт.
8. Энергоэффективное передвижение вперед антропоморфной шагающей платформы возможно за счет преобразования потенциальной энергии ее веса в кинетическую энергию, при использовании шарниров с гибкими элементами и воспроизведении алгоритмов естественных локомоций.
9. Предложенная оптимальная траектория перемещения общего центра масс антропоморфной шагающей платформы в цикле шага и оригинальный алгоритм ходьбы позволят повысить энергоэффективность машины и обеспечить естественность походки.

10. Планы на будущее

Я считаю, что антропоморфные роботы имеют большие перспективы применения в научных целях при изучении космоса, а также они станут отличными транспортными средствами для перемещения по рельефам неизве-

данных планет. Антропоморфные роботы могут принять участие в построении инопланетных лабораторий или жилых баз, таким образом подготавливать планету для высадки на неё первых космонавтов. Их сходство с человеком позволит роботам работать с ним в одной среде, не испытывая сложностей передвижения и пользования различными предметами.

Подводя итоги проектной работы, хотелось бы заметить, что исследование имеет перспективы продвижения вперед. Выбранная тема настолько обширна, что требует дальнейших работ. Например, планируется создать прототип зооморфной шагающей платформы с четырьмя педипуляторами и доработать прототип антропоморфной шагающей платформы, воспроизведя на нем двойной период шага.

11 Список использованной литературы

1. Архипов, С.В., & Архипова, А.С. (2014). Шарнир с гибкими элементами. Заявка на изобретение №2014142675/11(068934) от 22.10.2014 г.
2. Архипов, С.В., & Архипова, А.С. (2015). Стенд для испытания цилиндрических и шаровых шарниров. Заявка на изобретение №2015102125/17(003265) от 23.01.2015 г.
3. Брезина, М.Ф. (2008). Современная школьная энциклопедия. Мир животных. Москва: Росмен.
4. Математический маятник. Дата обновления: 06.03.2015. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Математический_маятник (дата обращения: 19.04.2015).
5. Скворцов, Д.В. (2007). Диагностика двигательной патологии инструментальными методами: анализ походки, стабилметрия. Москва: Т.М.Андреева.
6. Столкновение с камнем стало возможной причиной поломки лунохода Юй-ту. Дата обновления: 21.07.2014. URL: <http://ria.ru/space/20140721/1016877140.html> (дата обращения 19.04.2016).
7. ASIMO Technical information. Дата обновления: 2015. URL:

<http://asimo.honda.com/downloads/pdf/asimo-technical-information.pdf> (дата обращения 19.04.2015).

8. Atlas - The Agile Anthropomorphic Robot. Дата обновления: 2013. URL: http://www.bostondynamics.com/robot_Atlas.html (дата обращения 19.04.2015).

9. NASA Робот Valkyrie. Дата обновления: 09.09.2014. URL: <http://rutube.ru/video/4222c94ae6f3da730de4a781c1f260a8/>. (дата обращения: 19.04.2015).

10. Spirit and Opportunity. Дата обновления 18.04.2015. URL: http://www.nasa.gov/mission_pages/mer/index.html (дата обращения 19.04.2015).

Приложение

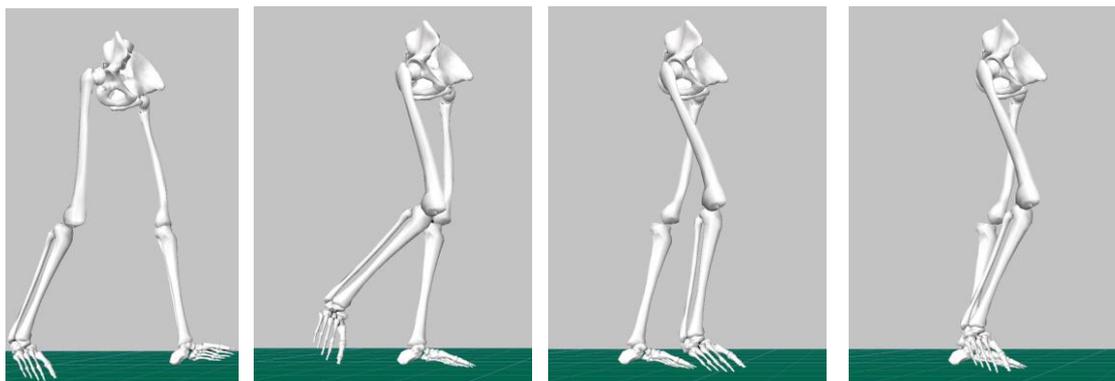


Рисунок 1 - Кадры анимации движений пояса нижних конечностей при ходьбе в норме; программа VISUAL 3D компании C-Motion, для Системы видеоанализа движений

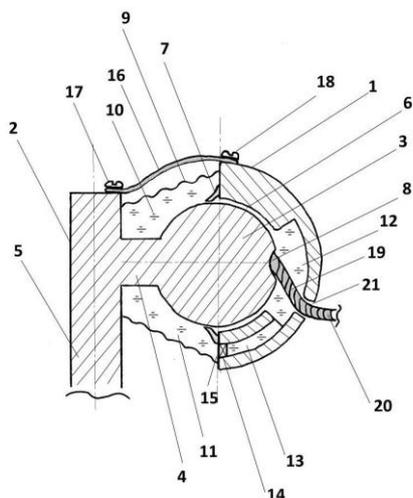


Рисунок 2. Шарнир с гибкими элементами; содержит корпус 1, шаровой палец 2, шаровую головку 3, стержень 5, шейку 4, гнездо 6, упруго-эластичное кольцо 7, углубление 8, герметичный чехол 9, полость шарнира 10, смазочную жидкость 11, фасонное углубление 12, канал 13, в котором установлен клапан 14, у наружного края 15, наружные гибкие элементы 16, закрепленные винтами 17, 18, внутренний гибкий элемент 19, конец 20, проведен и закреплен в отверстии 21

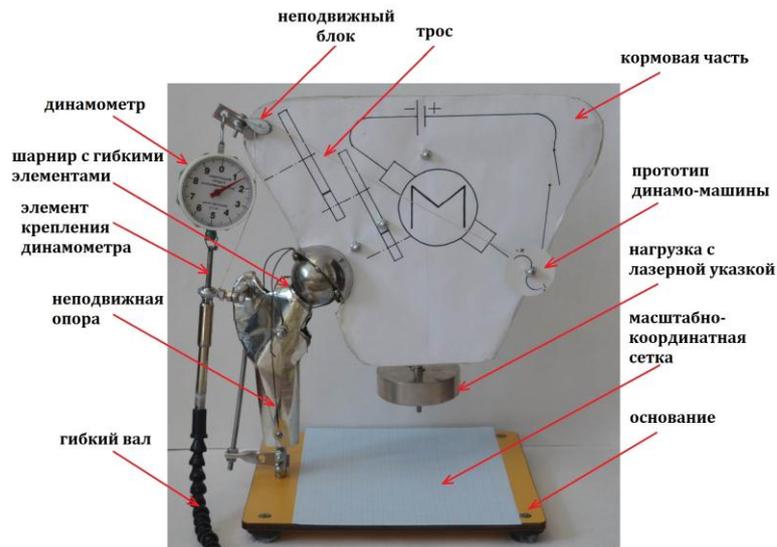


Рисунок 3 – Стенд для испытания цилиндрических и шаровых шарниров, с шарниром с гибкими элементами и прототипом системы рекуперации энергии, в данном случае фронтальный привод снабжен пружинным динамометром

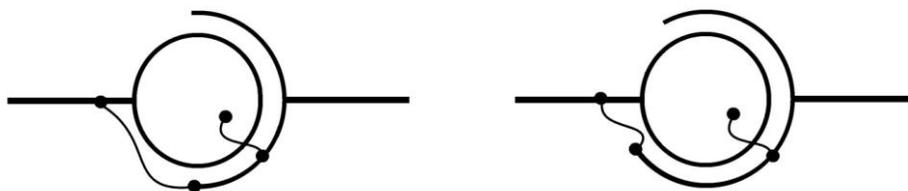


Рисунок 4 - Разъемный (слева) и неразъемный (справа) шаровой шарнир с внутренним и внешним гибким элементами

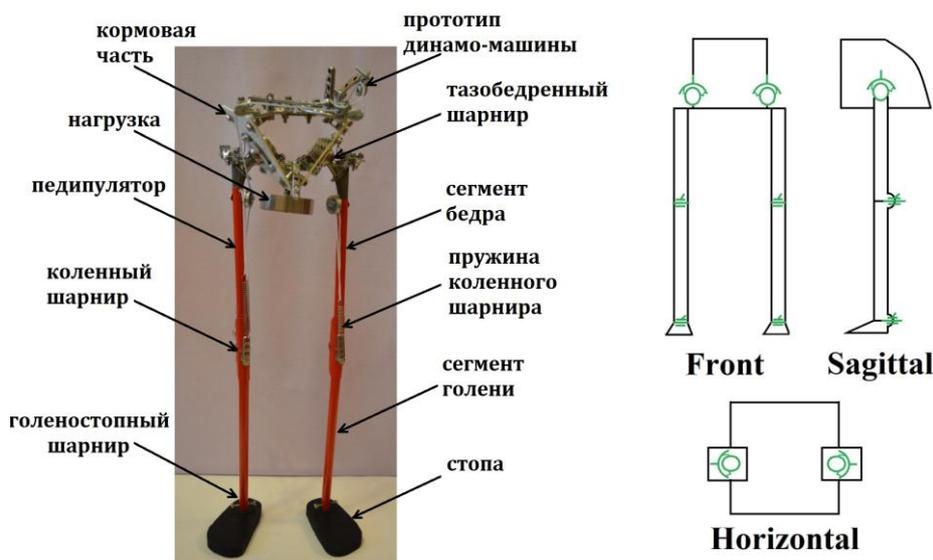


Рисунок 5
Прототип антропоморфной шагающей платформы (слева) и её чертеж (справа)

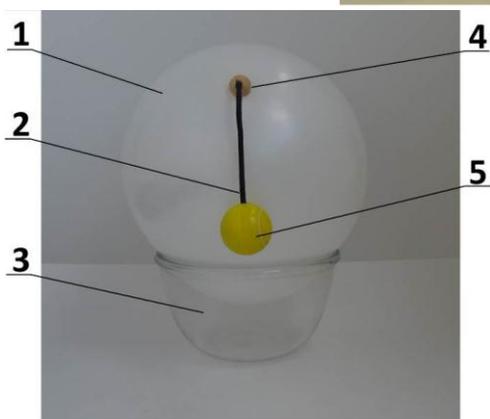


Рисунок 6 - Модель головки шарнира; 1 – надувная резиновая оболочка; 2 - аналог внутреннего гибкого элемента шарнира; 3 – опора надувной резиновой оболочки; 4 – область крепления аналога внутреннего гибкого элемента шарнира; 5 – модель крепления внутреннего гибкого элемента шарнира к гнезду шарнира

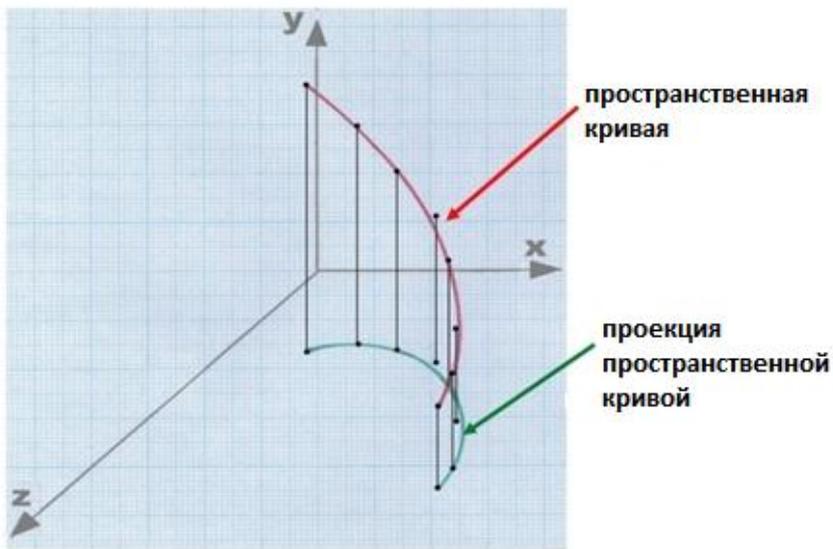


Рисунок 7
 Пространственная кривая
 движения нагрузки
 корпуса испытательного
 стенда

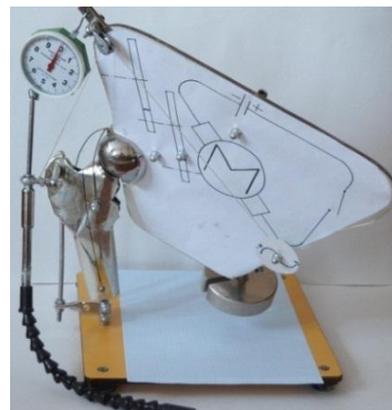
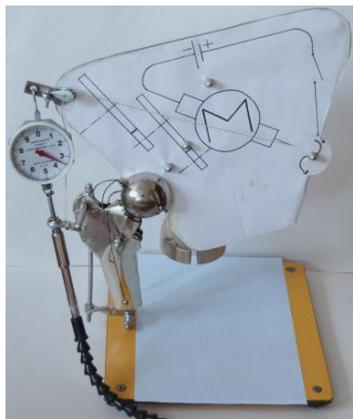
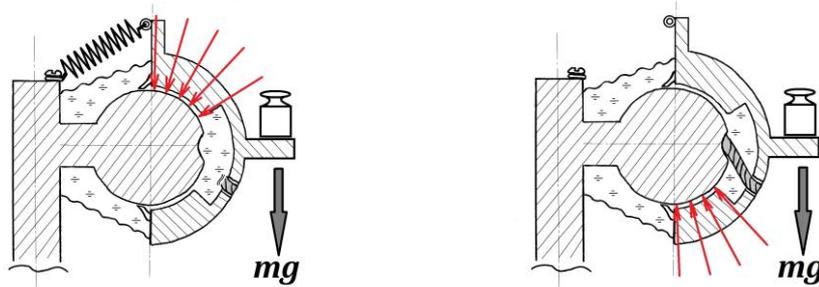


Рисунок 8 – Изучение величины усилия фронтального привода, необходимого для удержания корпуса стенда при моделировании начала и конца одноопорного периода шага и распределение нагрузки по поверхности шаровой головки шарнира; слева – начало одноопорного периода шага, усилие привода максимально, нагрузка действует на верхний сектор шаровой головки; справа – конец одноопорного периода шага, усилие привода минимально, нагрузка действует на нижний сектор шаровой головки

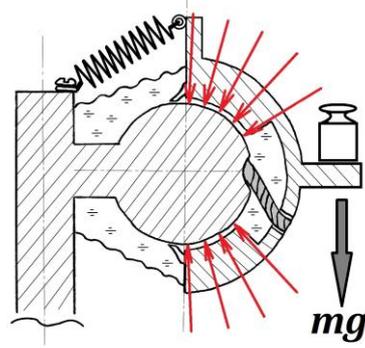
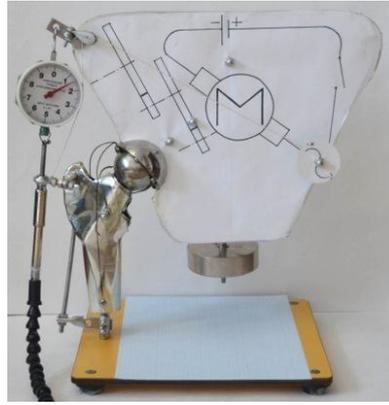


Рисунок 9 – Условия равновесия корпуса стенда и распределение нагрузки на поверхности шарнира при моделировании середины одноопорного периода шага, присутствует усилие фронтального привода и натянут внутренний гибкий элемент шарнира; показан вид стенда (слева), схема действующих сил и распределение нагрузки на головку шарнира (справа)

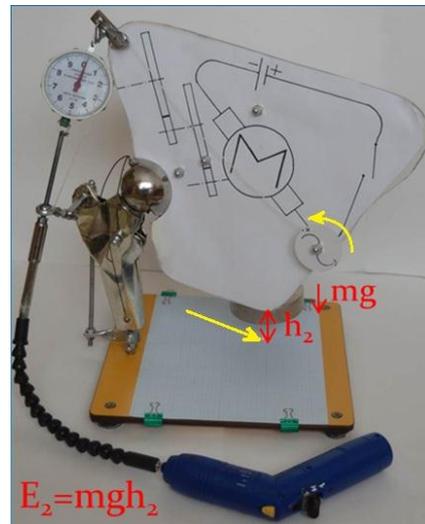
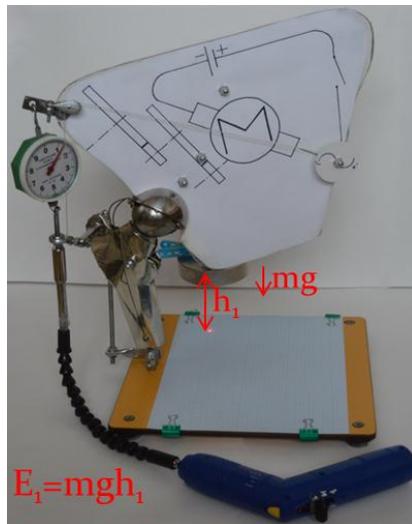


Рисунок 10 – Иллюстрация движений корпуса стенда и модели ротора динамо-машины, желтыми стрелками показано направление движений; красными изменение высоты расположения нагрузки; слева исходное положение, справа конечное

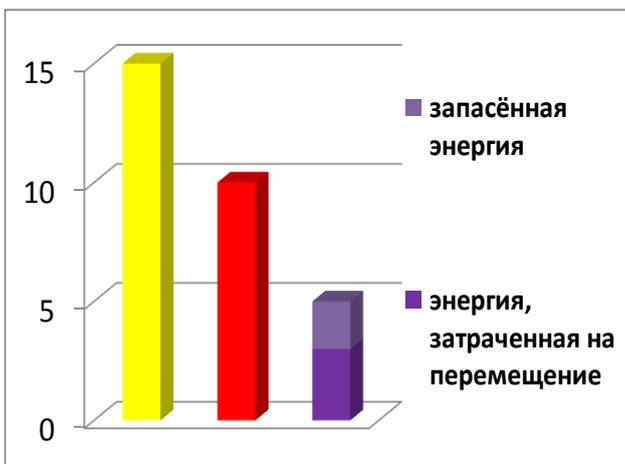


Рисунок 11 – Изменение потенциальной энергии корпус стенда при его перемещении; желтым цветом обозначена величина потенциальной энергии в исходном положении; красным цветом обозначена величина потенциальной энергии в конечном положении; оттенками фиолетового цвета обозначено соотношение запасенной и затраченной потенциальной энергии

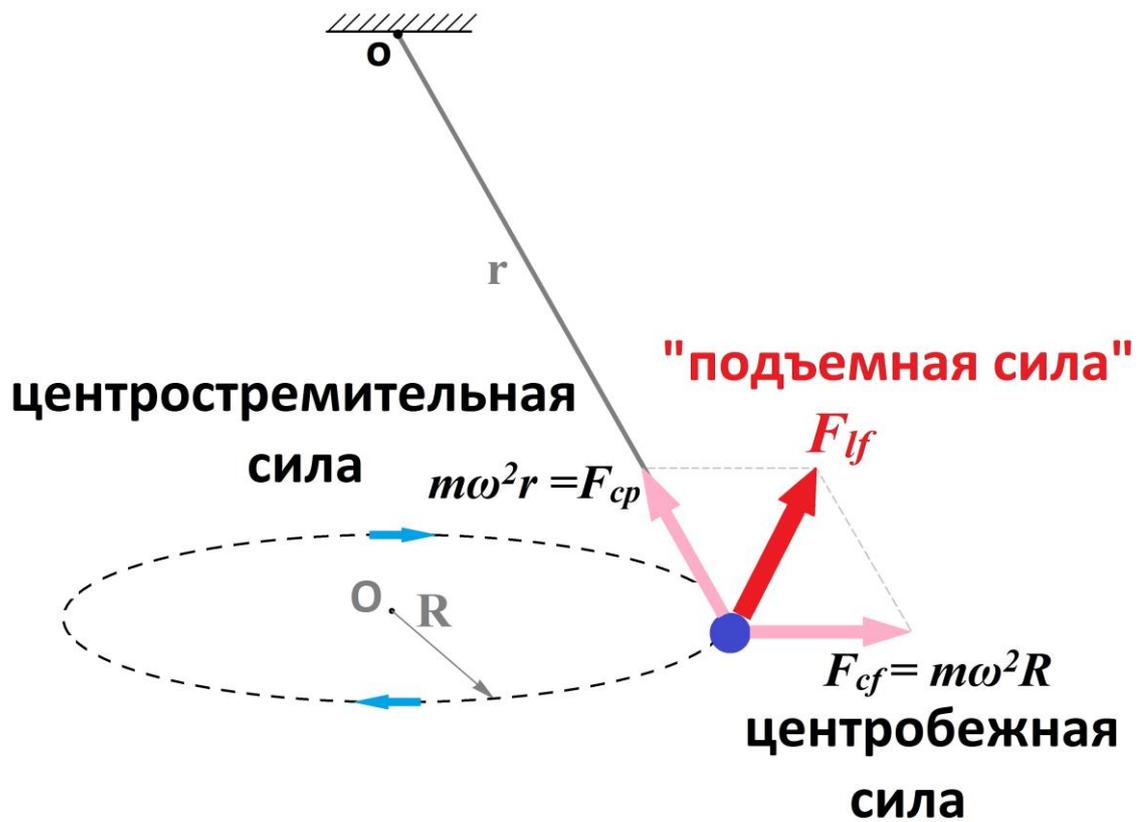


Рисунок 12 - Схема движения области крепления внутреннего гибкого элемента шарнира к гнезду шарнира и перемещения внутреннего гибкого элемента шарнира в одноопорном периоде шага антропоморфной шагающей платформы



Рисунок 13 – Прототип кормовой части антропоморфной шагающей платформы; а) вид спереди, б) вид сверху

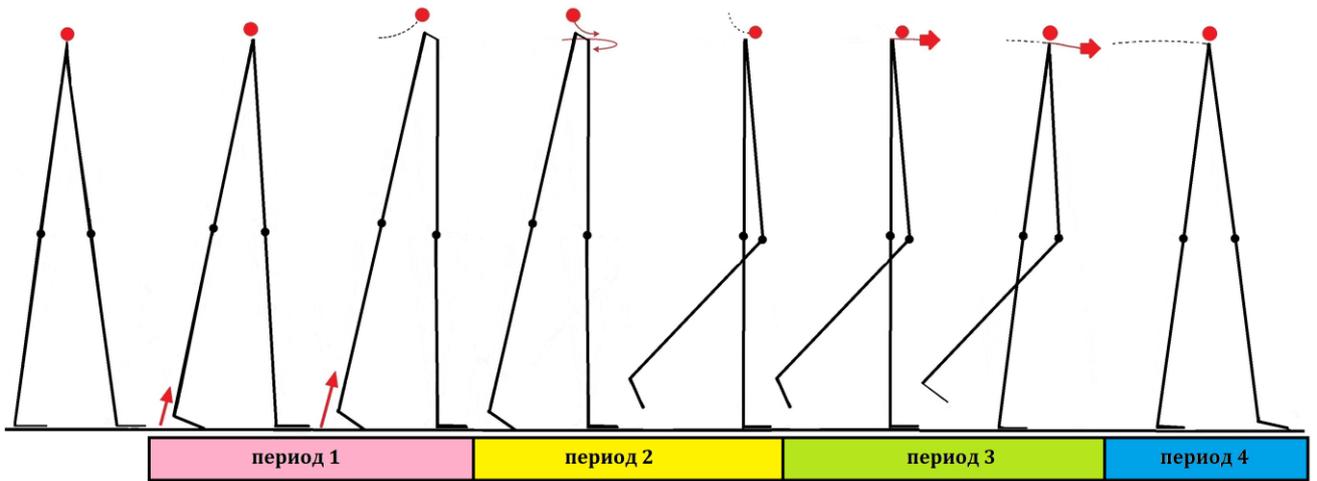


Рисунок 14 – Оптимальный алгоритм перемещения антропоморфной шагающей платформы и классификация периодов опорной фазы шага

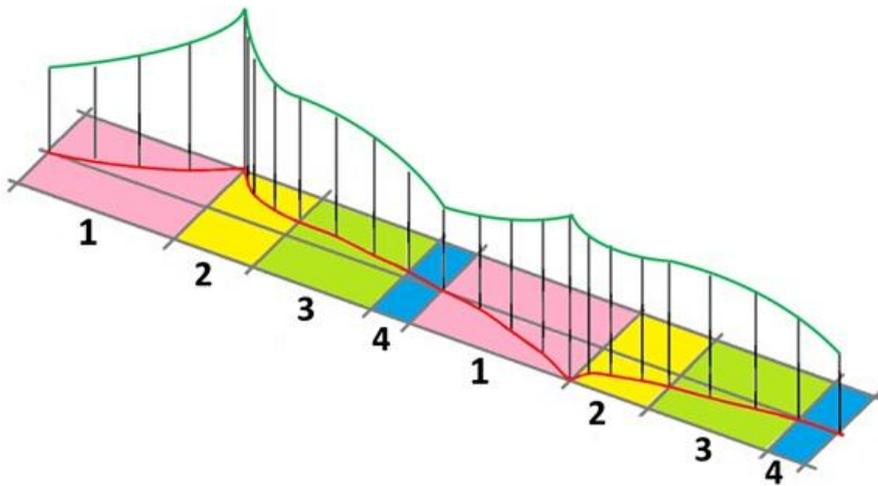


Рисунок 15 – Пространственная траектория оптимального перемещения общего центра масс антропоморфной шагающей платформы (цифрами обозначены периоды шага)

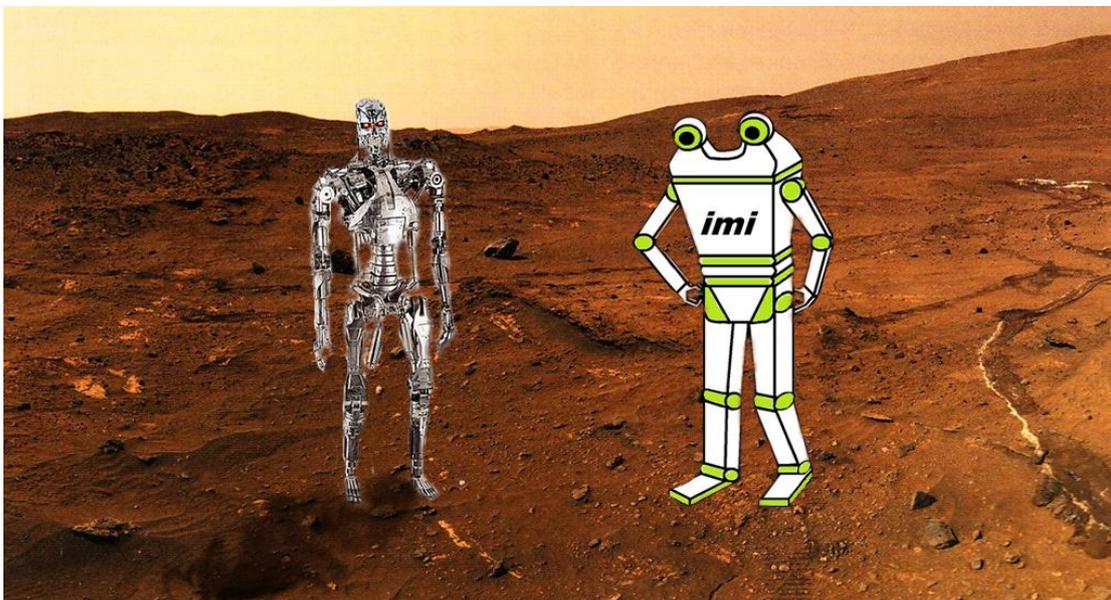


Рисунок 16 – Общий вид нашего робота на поверхности Марса (справа); как сравнение вид зловещего робота «терминатора» (слева)