

МБОУ «СОШ №7 г. Пензы»

XXVI научно-практическая конференция школьников «Я исследую мир»

Секция «Математика»

От бионических моделей движения к роботизированным платформам

**Выполнил
Горбачев Илья, 9 А класс
Руководитель
Лемина Ирина Валентиновна
Учитель математики**

Пенза 2021

Оглавление

Введение	3
1. Биомеханика и робототехника.....	4
1.1. Механика движения в природе	4
1.2. Основные типы платформ в робототехнике	9
2. Сравнительный анализ шагающих платформ и разработка роботизированной платформы-антропода	10
2.1. Сравнительный анализ шагающих роботизированных платформ	10
2.2. Кинематика движения робота-антропода и создание управляемой модели	12
Заключение	15
Список использованных источников:.....	16
Приложения	

Введение

Применение в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы – это бионика. Бионический подход заключается в изучении и использовании опыта живой природы при создании технических систем. Известно, что живые организмы качественнее решают задачи распознавания сложных объектов в реальном времени, чем технические системы обработки сенсорной информации; а тела животных имеют существенно лучшие характеристики массы и габаритов, чем современные приводы. Многие животные отлично адаптированы к среде обитания. Они плавают, бегают, совершают прыжки, удерживаются на различных поверхностях, умеют летать. Изучение строения животных и бактерий становится той областью, в которой создатели роботов черпают новые идеи. Также один из наиболее впечатляющих разделов робототехники — это создание анималистических роботов и андроидов. Многие устройства, включая предназначенные для выполнения узкоспециализированных задач, сохраняют сходство с человеком и имеют антропоморфные черты.

Основное преимущество бионического подхода состоит в заимствовании у природы готовых к использованию схем и идей. Разработчики могут отказаться от длительных испытаний способов передвижения устройств и их взаимодействия с окружающей средой — работающий прототип всегда перед глазами. Тем не менее, бионика имеет определенные ограничения, поскольку не все природные решения оказываются оптимальными по сравнению с современными достижениями инженерной мысли.

Актуальность исследования: В современном мире используется большое количество различных роботизированных платформ в самых различных целях, однако большинство из них традиционно являются колёсными или гусеничными, что обусловлено простотой управления. Это значит, что все они имеют схожие недостатки. В тоже время, природа в ходе эволюции разработала совершенные системы передвижения, изучив которые возможно улучшить характеристики создаваемых платформ.

Цель работы: рассмотреть механизмы движения различных бионических моделей, выявить их ограничения и преимущества. Разработать роботизированную «платформу-конечность» антропода.

Задачи исследования:

1. Рассмотреть механизмы движения бионических моделей гексапода, квадропода и антропода.
2. Выявить их ограничения и преимущества для различных областей применения.
3. Определить самую эффективную модель для замены человека в экстремальных условиях.
4. Рассчитать кинематику движения роботизированной платформы антропода.
5. Построить роботизированную платформу-конечность антропода.

Объект исследования: движение конечностей живых организмов и их роботизированных аналогов.

Предмет исследования: кинематика движения двуногой роботизированной платформы.

Методы исследования:

теоретические – анализ, сравнение, обобщение, моделирование;

эмпирические: анализ литературы, наблюдение, тестирование образца.

Теперь уже мало у кого есть сомнения, что рано или поздно роботы, безусловно, займут

свое место рядом с человеком. Этому способствует несколько объективных факторов, среди которых можно отметить три основных:

- Повышение качества жизни людей в условиях стремительного старения населения.
- Замена (помощь) человеку в условиях боевых действий, ЧС и т. п.
- Необходимость постоянного повышения производительности труда в условиях растущей конкуренции.

С начала развития робототехники, появился интерес к области их применения, требующий от роботизированной системы повышенной мобильности в условиях реального мира. Сюда относится выполнение задач, требующих передвижения по пересечённой местности, завалам, внутри зданий, сооружениям, узким шахтам и т.п.

Мы рассмотрим способы передвижения животных и их аналогов – роботизированных платформ, имитирующих природную механику движения, и исследуем кинематику движения двухногого шагающего робота.

1. Биомеханика и робототехника

Биомеханика — раздел естественных наук, изучающий на основе моделей и методов механики механические свойства живых тканей, отдельных органов, или организма в целом, а также происходящие в них механические явления.

Биомеханика как раздел биофизики возникла на стыке физико-математических и биологических областей знания. Кроме того, биомеханика обслуживает такие области действия как разработка роботов (бионика), инженерная биомеханика, медицинская биомеханика.

1.1. Механика движения в природе

Конечности млекопитающих формировались сходными образами, т. к. они имеют общих предков. Они имеют схожий скелет и строение мышц, разница в распределении длин сегментов скелета и прилагаемых мышечных усилиях. Строение лап насекомых, существенно отличается и будет рассмотрено отдельно.

Строение конечностей напоминает пружину, суставы у млекопитающих при ходьбе выпрямляются только в крайне-верхней точке толчка, в остальное время они частично согнуты. Несколько сочленений в суставах обеспечивают достаточную упругость конструкции необходимую для гашения ударного воздействия при беге, прыжках и ходьбе даже в том случае, если один из суставов в этот момент целиком выпрямлен, что является актуальным при достаточно большом весе собственного тела.

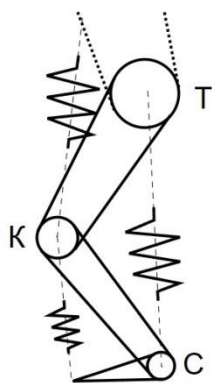


Рис. 1 Нога прямоходящего млекопитающего

Антропод

Механика движения для антропоида и четырехногих млекопитающих схожа и заключается в использовании стопы как рычага для первоначального толчка в голеностопном суставе, с последующим продолжением данного движения за счет распрямления коленного и тазобедренных суставов, а также распрямления пальцев стопы. В случае бега или прыжка распрямление происходит очень быстро, придавая телу необходимый импульс.

Основное назначение пальцев стопы в поддержании

равновесия в покое, а также гашении ударной нагрузки в момент приземления при беге либо прыжке. Для упрощения рассматриваемых механизмов движения, работу пальцев стопы мы опускаем.

Нога прямоходящего млекопитающего (см. рис. 1) имеет достаточную опору, что обусловлено наличием ярко-выраженной стопы. Опора осуществляется на всю поверхность стопы, что в тоже время накладывает ограничения на длину стопы.

Короткая стопа делает тело менее устойчивым, сокращая суммарную площадь опоры, над которой должен быть расположен центр тяжести для обеспечения равновесия. Кроме того сила первоначального толчка относительно не велика, т. к. короткая стопа дает слабый рычаг. Последующее распрямление коленного и тазобедренного суставов имеют маленькую величину проекции вектора скорости на горизонтальную плоскость и направленно в основном вверх, что обусловлено разнонаправленными суставами.

Длинная стопа обеспечивает хорошую опору в статическом состоянии и хороший рычаг для придания первоначального импульса движения. При этом она мешается при перемещении, ограничивая возможность маневра, и накладывает ограничения на стиль движения — резкие прыжки, либо вялое переступание на одном месте, что хорошо видно на примере кенгуру (см. рис. 2 и 3).

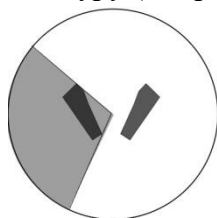


Рис. 2 Мертвая зона для перемещения ноги с короткой стопой

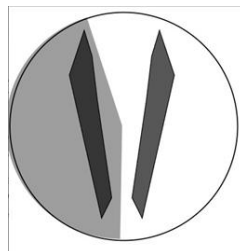


Рис.3 Мертвая зона для перемещения ноги с длинной стопой

Разнонаправленное распрямление суставов прямоходящего млекопитающего обеспечивает возможность удерживать центр тяжести над площадью опоры ограниченной стопами, но при этом накладывает ограничение на основное направление усилия распрямления суставов — вверх, что в свою очередь влияет на скорость перемещения.

Алгоритм движения вперед в режиме ходьбы сводится к следующей последовательности:

1. перенос веса на опорную ногу
2. подъем переносимой ноги
3. перемещение ноги в направлении движения
4. постановка ноги на грунт
5. перенос массы на обе ноги
6. смена ролей ног и возврат к пункту 1.

При этом не стоит забывать о постоянном контроле положения тела и балансировании центром тяжести для избегания падения, а также работе стоп и таза как механизмов

смещения центра тяжести. Все эти движения должны быть увязаны в одну систему с движением вперед и не препятствовать ей.

Квадропад

Передние и задние ноги у четырехногого млекопитающих имеют различное строение.

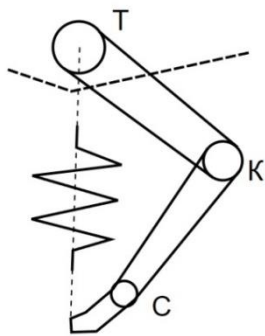


Рис.4 Передняя нога четырехногого млекопитающего

Передняя нога четырехногого млекопитающего (см. рис. 4) имеет малую площадь опоры. Это обусловлено тем, что трех, а тем более четырех точек (по количеству лап) достаточно для задания плоскости. Геометрическая разнесенность ног в пространстве обеспечивает практически постоянное нахождение центра тяжести над площадью опоры, что существенно облегчает поддержание равновесия. Одинаковое направление распрямления суставов передних ног позволяет развивать гораздо большие скорости, чем в случае с двуногим прямо-ходящим. За счет того, что горизонтальная составляющая вектора прикладываемого усилия много больше, но в тоже время, это накладывает ограничение на подвижность — гораздо труднее сделать шаг назад.

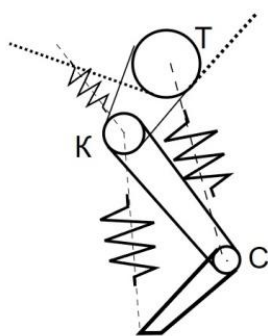


Рис.5 Задняя нога четырехногого млекопитающего

Строение задних ног (см. рис.5) напоминает строение ног прямоходящего млекопитающего, но в отличие от него опирается не на всю стопу а только на пальцы, и как правило имеет более длинную стопу, что позволяет использовать ее как более эффективный рычаг, придавая большую скорость.

Задние конечности менее приспособлены к прыжку вверх, и более к прыжку вперед, чем у прямоходящих, за счет более короткого бедра и более длинной стопы, что, как и в случае с передними ногами, дает большую горизонтальную составляющую вектора силы.

Горизонтальное расположение тела также влияет на распределение прилагаемого усилия по направлению вперед, т. к. усилие от задних ног прилагается к задней части туловища существенно сзади центра тяжести, то и распределение усилия будет направленно вперед и вверх.

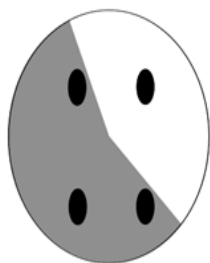


Рис.6 Мертвая зона шага четырехногого млекопитающего

Кроме того, за большую устойчивость и скорость приходится жертвовать маневренностью — свобода перемещения ноги при единичном шаге гораздо меньше, а значит нужно больше шагов для разворота (см. рис.6). Конечно, часть этих проблем в природе решается за счет других механизмов, например за счет подвижности позвоночника, но целиком данное ограничение не снимается. Изменение направления бега возможно только большими радиусами, что обусловлено как достаточно большой собственной инерцией, так и ограничениями перемещения конечностей.

При движении можно выделить следующие основные алгоритмы.

Движение вперед шагом осуществляется, как правило, попарным шагом диагонально расположенных конечностей, для чего:

1. опорные для данного шага конечности распрямляются максимально назад и вниз, в то время как переносимые конечности подбираются под корпус и переносятся вперед.

Причем немаловажно, что высота подъема конечностей не должна быть слишком большой, что обеспечивает принятие веса на данную конечность при заваливании.

2. При прохождении точки равновесия передняя переносимая конечность немного ускоряется, что вызывает легкое заваливание тела вперед и вбок к данной конечности и она принимает на себя вес. После чего задняя переносимая конечность так-же касается поверхности.

3. В этот момент происходит смена ролей пар конечностей. Первой отрывается от поверхности передняя конечность, за ней, с небольшим запаздыванием толчком отрывается задняя конечность, что придает импульс движения вперед и не дает на данном этапе завалиться назад.

4. Переходим к пункту 1 настоящего алгоритма.

Гексопод

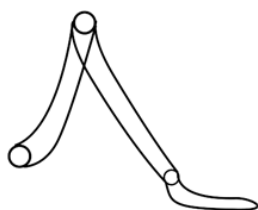


Рис. 7 Нога насекомого

В природе гексоподы представлены насекомыми.

Так — как насекомые во взрослом состоянии и личинки тех же насекомых могут иметь кардинально разное строение, будем рассматривать строение конечностей и особенности передвижения взрослых особей.

Лапы расположены по три справа и слева от тела симметрично относительно строительной оси.

Также как и с млекопитающими, у насекомых можно выделить несколько основных схем движения не связанных с полётом - при полёте используются крылья, которые, по сути, также представляют собой специализированные конечности, хотя они и не учитываются при подсчёте лап. Строение лапы насекомого отчасти напоминает строение ноги млекопитающего (см. фигуру 7). Так же можно выделить плечо (бедро), локоть (голень) и кисть или стопу, которая может быть представлена как одним так большим количеством сегментов. Расположение лап преимущественно в вертикальной плоскости.

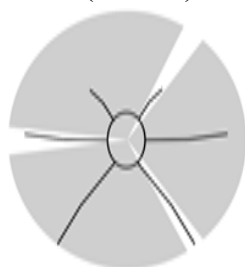


Рис. 8 Свобода перемещения ног водомерки

1. Паукоподобное строение лап (как пример - водомерки) предполагает распределение малого веса насекомого на большую площадь опоры за счет длины ног, многократно превышающей размеры тела насекомого и покрытия окончания лап множеством волосков, распределяющих и без того небольшую нагрузку на еще большую площадь опоры. Передние лапы, как правило, несколько короче остальных, но также участвуют в ходьбе. Лапы расположены вертикально с максимально высоким положением колена. Такое строение конечностей позволяет перемещаться по воде, используя силу поверхностного натяжения жидкости. За такую проходимость водомерки платят силой своих лап. От мощной мускулатуры пришлось отказаться для облегчения конструкции. Перемещаются, поочередно перемещая лапы с отрывом от поверхности. В каждый момент времени перемещается одна лапа — остальные стоят на поверхности. Центр тяжести насекомого перемещается путём сгибания остальных пяти лап таким образом, чтобы находиться максимально близко к геометрическому центру площади опоры, что позволяет распределить нагрузку равномерно на все лапы. Обладают наименьшей нагрузкой на опорную поверхность, при этом лапы имеют максимальную подвижность относительно друг друга. Данные насекомые обладают большой скоростью и маневренностью, но только на абсолютно ровной поверхности. Ноги при

движении не пересекаются. В виду малого собственного веса и хрупкости конструкции лап практически не обладают способностью к переносу дополнительного груза.

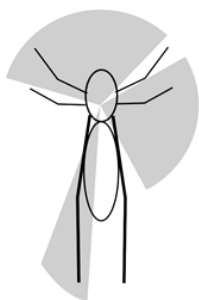


Рис.9 Свобода перемещения ног кузнечика

2. Кузнечики (а также саранча и иные прыгающие насекомые)

Данный тип строения опорно двигательного аппарата насекомых предполагает наличие прыгательных ног, роль которых выполняют задние конечности. Имея строение сходное со строением ног других типов насекомых, эти ноги имеют гораздо более большие относительно туловища размеры и мощную мускулатуру конечностей, что позволяет совершать прыжок на приличное расстояние, многократно превышающее собственные размеры. Для мягкого приземления при этом, как правило, используются крылья. Еще одной особенностью данных насекомых является расположение прыгательных конечностей:

для обеспечения максимально сильного прыжка они расположены вертикально, параллельно друг другу и направлены назад. Передние конечности так же расположены вертикально, но гораздо менее акцентированы на вертикальное направление, что позволяет при необходимости разворачивать их близко к горизонтальной плоскости. Также стоит отметить, что прыжковые лапы у данного типа насекомых являются самым прочным элементом из конструкции, что обусловлено огромными усилиями, которые прилагаются при прыжке. Кроме прыжков могут передвигаться относительно неспешно, перебирая лапами. Изменение направления движения на земле занимает достаточно большое время по отношению к остальным насекомым, т. к. разворот задних лап является для данного типа насекомых тяжелой задачей в виду их большого веса и длины относительно тела. Нагрузка в момент прыжка на поверхность во много раз превышает собственный вес насекомого.

3. Жуки (а также, муравьи, и др.) имеют равномерно развитые и достаточно подвижные ноги, редко превышающие длину тела насекомого,

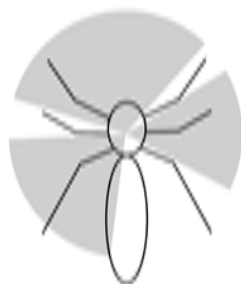


Рисунок 10 Свобода перемещения ног жука

крепятся к грудному отделу панциря насекомого. Задние ноги, как правило, чуть более развитые чем остальные, что необходимо для поддержания веса брюшка, которое, как правило, много больше остального тела. Расположение ног преимущественно вертикальное, хотя в отдельных случаях, при перемещении, они могут разворачиваться в горизонтальную плоскость. Ноги являются достаточно подвижными. При движении могут перемещаться как по одной, так и произвольно, но таким образом, чтобы обеспечивать надежную опору на поверхность — в каждый момент времени на поверхности стоит не менее 3-х ног. Как правило, за один раз перемещается 1 пара ног. Передние ноги также могут использоваться в качестве рук — при этом тело опирается на две задние пары ног.

Ноги при движении не пересекаются. Обладает средней нагрузкой на опорную поверхность, распределяющей вес тела на 6 лап в состоянии покоя и минимум на 4 лапы в движении. Ноги свободно перемещаются как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, позволяя преодолевать препятствия сопоставимые, а в ряде случаев и превышающие собственный рост. Легко меняет направление движения.

Таким образом, из анализа способов перемещения насекомых мы видим, что наиболее проходящим является жукоподобная конструкция, т. к. кузнечик хотя и обладает возможностью высоко и далеко прыгать, но требует систему приземления (крылья), а также

связан с высокими перегрузками в момент прыжка, а водомерка слишком хрупкая и не может работать на пересеченной местности.

1.2. Основные типы платформ в робототехнике

Существует множество схем движения, но мы решили остановиться именно на природных. Они существовали на Земле задолго до появления человека и показали свою эффективность за миллионы лет эволюции.

Прикладная наука о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы – это бионика. Одним из важнейших направлений в бионике является поиск оптимальных схем движения.¹

Основные условия для движущихся объектов: свойства и рельефа поверхности, действие внешних сил, скоростные показатели. За основу могут быть взяты самые разные платформы:

- Колесные и гусеничные роботы
- Шагающие роботы
- Гибридные (колеса и конечности)
- Специализированные (летающие, ползающие, плавающие)

Рассмотрим подробнее два наиболее распространенных вида роботов:

Первая группа - колесные и гусеничные роботы.

Первый вид использует в качестве средства перемещения колесо. Данный способ позволяет достигать очень хороших скоростных показателей и легкое изменение траектории движения на ровных поверхностях. Недостатком колесной конструкции является сложность или невозможность преодоления препятствий с резким перепадом высоты, пробуксовка вследствие недостаточного сцепления колес с поверхностью или провал колеса при перепаде высот. Гусеничные конструкции не так легко изменяют траекторию при движении, но получают возможность поворота на месте. Также гусеницы решают некоторые проблемы колесной конструкции – провал колеса при небольшом, но резком перепаде высот поверхности. Тем не менее, если перепад высот резкий (угол наклона более 45°) и высота преграды превышает около трети диаметра колеса, то преодолеть преграду будет затруднительно. Особенностью средств перемещения, построенных на колесной базе, является наличие трека (колеи), на протяжении которого робот оказывает давление на поверхность.

Вторая группа - шагающие роботы.

Их отличительной особенностью является то, что при проектировании конструкции используется биологический подход. Конструкция и алгоритм ходьбы строится на основе материалов наблюдений за живым существом.

Под шагающим механизмом понимается механизм, оставляющий в процессе передвижения прерывный след. Основная задача шагающего робота – это передвижение по поверхностям со сложным рельефом, значит, этот робот при своем передвижении приспосабливается к изменяющейся форме поверхности и представляет собой систему, которая может приспосабливаться к изменениям внутренних и внешних условий.

¹ Спиркин, А. Н. Бионические методы управления роботизированным механизмом / А. Н. Спиркин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 84–91.

Различие вариантов конструкций обусловлено разнообразием используемых примеров из живой природы, но при этом можно выделить общие черты, и как следствие преимущества и недостатки.

Таким образом, исходя из оценки возможностей роботов двух видов понятно, что шагающие машины лучше приспособлены для преодоления препятствий и движения по неровному покрытию. Движение по относительно ровной поверхности не является технически сложной задачей. Движение по неровной, с заранее неизвестным рельефом поверхности требует разработки алгоритмов передвижения и конструктивных приспособлений.

Хотя колесные транспортные средства в настоящее время явно преобладают, известно, что при ходьбе по неподготовленной поверхности существенные преимущества имеют шагающие системы передвижения. Шагающий аппарат при движении использует для опоры лишь некоторые точки на поверхности в отличие от колесных и гусеничных машин, имеющих непрерывную колею. Кроме того, шагающий аппарат существенно меньше повреждает почвенный покров, что может оказаться важным для некоторых районов. Однако преимущества шагающего аппарата определяют его высокую сложность, ведь он требует сложной компоновки, разработки высокоэффективных приводов, специальной организации стоп, рассеивающих энергию удара и т.д.

2. Сравнительный анализ шагающих платформ и разработка роботизированной платформы-антропода

2.1. Сравнительный анализ шагающих роботизированных платформ

Проведем сравнительный анализ шагающих платформ.

Для наземных систем чаще всего используются три вида схем: антропод, квадропод и гексопод.

1. Антропод - человекоподобная платформа, использующая опорно-двигательный аппарат, состоящий из 2-х конечностей.
2. Квадропод (рободог) - платформа, использующая опорно-двигательный аппарат, состоящий из 4-х конечностей.
3. Гексопод - платформа, использующая опорно-двигательный аппарат, состоящий из 6-х конечностей.

Рассмотрим эти платформы с таких позиций как: схема движения, скорость, манёвренность, проходимость, энергопотребление, допустимость пересечённости рельефа, строение опоры, стоимость создания.

1. Анализ платформ по схеме движения

Любая из платформ требует контроля положения центра тяжести в режиме передвижения шагом, так, чтобы он постоянно находился над многоугольником описанным конечностями, стоящими в данный момент на поверхности, а для антропоидной платформы точно над стопой единственной опорной конечности. Момент инерции для неспешного перемещения шагом будет не столь велик, чтобы оказывать серьезное воздействие на устойчивость платформы, но в режиме бега момент инерции оказывает на порядок большее воздействие, и уже должен учитываться при движении. Наиболее устойчивыми по схеме движения будут платформы гексоподы, т.к. они обладают достаточным количеством точек опоры, для

обеспечения постоянного контакта с поверхностью 3-х или более ног, без особого ущерба как для скорости движения, так и для маневренности. Квадроподы также могут использовать схему с постоянным контактом 3-мя конечностями, но это сильно замедлит движение. Для квадроподов также как и для антропоподов, применяются схемы движения с динамической устойчивостью, такие как схема с ожидаемым заваливанием на переносимую конечность для квадроподов, либо схемы, основанные на компенсации момента инерции (обратный маятник). Для режима бега этих платформ всегда будет применяться схема динамической устойчивости учитывающая инерцию, по сути, во многом повторяя упрощенный вариант бега антропопода, где отсутствует необходимость бокового смещения центра тяжести при опоре на правую или левую ногу.²

2. Анализ платформ по скорости

Скорость платформ-антропоподов сильно ограничена алгоритмом обеспечения динамической устойчивости, т.к. потеря устойчивости и стабильности, может привести к падению или перевороту платформы.

Платформы-гексоподы не имеют недостатка в устойчивости, однако их скорость ограничена двумя факторами: небольшими шагами, которые обусловлены строением конструкции и плотным расположением конечностей относительно друг друга, что хорошо видно из анализа мертвых зон перемещения конечностей и разнонаправленной ориентацией разворота колен конечностей. Их конечности смотрят в разные стороны, и проекция вектора усилия разгибания конечности на ось движения будет много меньше. Такая конструкция позволяет быстро менять направление движения, но существенно снижает полезное действие разгибания конечности.

Самую большую скорость могут развивать платформы квадроподы. Их строение позволяет наиболее устойчиво двигаться в выбранном направлении с большой скоростью, т.к. направление усилия разгибания конечности у них максимально приближенно к строительной оси тела робота, а следовательно, и нормальному направлению движения. В тоже время, за счет того, что передние конечности у них разнесены несколько шире, чем ширина стопы антропоидного робота с той же высотой центра тяжести, то вероятность бокового заваливания при быстром движении существенно ниже и проявляется только на моментах изменения направления движения робота.

3. Анализ платформ по маневренности

Антроподу для поворота требуется провести больше действий, связанных с обеспечением собственной устойчивости, чем квадроподу и гексоподу. Конструкция квадропода позволяет ему маневрировать легче, чем антропоиду, т.к. для этого ему необходимо совершить меньше действий. Лучшую маневренность могут показать гексоподы, т.к. они могут свободно двигаться в любом направлении. Ни одна классическая платформа не имеет такую свободу движения платформы в целом в любом направлении как гексапод. Но в местах адаптированных людьми «под себя» выигрывают антроподы, при условии разработки адекватного алгоритма движения.

4. Анализ проходимости

Классические платформы имеют сравнительно небольшую проходимость и уступают по этому параметру всем природным платформам.

² Ковальчук А. К., Кулаков Д. Б., Семёнов С. Е. Управление движением двуногого шагающего робота по программной траектории //Машиностроение и компьютерные технологии. – 2011. – №. 5.

Проходимость антропоида обуславливается положением его «коленного сустава» и динамической устойчивостью. Чем выше расположение «колена», и чем выше стабильность платформы в движении, тем больше проходимость платформы. Антропоиды могут преодолевать объекты, не превышающие по высоте их «коленный сустав».

Квадропод имеет проходимость, зависящую от конструкции его конечностей (от угла поворота всей конечности). Большинство квадроподов может подниматься на объекты, не превышающие по высоте их корпус.

Самую большую проходимость имеют гексаподы. При определённом виде конструкции (гибкого тела робота и больших конечностях) они могут подниматься на объекты, превосходящие роботов по размеру.

5. Анализ допустимой пересечённости местности

Для робота-антропоида пересечённость местности должна быть минимальной. Препятствия не должны превышать по высоте его «колена», а по длине не больше его конечности.

Квадроподы не требуют очень ровных поверхностей, однако в рельефе не должно быть барьеров, которые будут выше корпуса платформы.

Гексапод может передвигаться почти по любым поверхностям. При наличии гибкой конструкции робот преодолевать препятствия, превосходящие его корпус по длине и высоте.

6. Анализ стоимости изготовления

Самой дорогой в производстве платформой будет антропоид, т.к. для её создания требуется больше всего моторов на одну конечность, а также специализированная система стабилизации в корпусе, состоящая из дополнительных приводов и гироскопических датчиков. Следующим по цене роботом будет гексапод, его цена будет зависеть от количества сервоприводов в одной конечности (от 3 до 5). Самым дешёвым в производстве будет квадропод. Итоговые результаты анализа шагающих платформ представлены в таблицах.³

Таким образом, проведя многосторонний анализ, мы не можем выделить лучшую платформу, т.к. требуемые параметры платформ будут диктоваться целевой средой применения. В природных системах наиболее устойчивой является шестиногая модель, наиболее быстрой – четырехногая, а наиболее маневренной – двухногая модель. Антропоид, имея ряд недостатков связанных со сложностью поддержания устойчивости и управления передвижением, является востребованным с точки зрения схожести своей конструкции с человеком, что позволяет ему функционировать в среде, приспособленной для людей. Он является самой эффективной моделью для замены человека в экстремальных условиях, как сверхсильный и выносливый помощник, а также для разработки бионических имплантов конечностей.

Интуитивно понятно, что сложность расчетов устойчивости робота при движении будет напрямую зависеть от числа конечностей, хотя также интуитивно понятно, что большее число конечностей дает более устойчивую схему движения. Исходя из этой предпосылки, выполним расчет устойчивости двуногого робота. Найдем закон, описывающий устойчивое положение робота, исходя из взаимного расположения частей робота (конечностей и центра массы робота).

2.2. Кинематика движения робота-антропоида и создание управляемой модели

³ См. Приложение 1

Кинематика робота – это аналитическая функция времени, описывающая относительное движение робота в выбранной системе координат. Физическая модель робота преобразуется в математическую модель в заданной системе координат. Движение робота в пространстве - функция от времени. Она определяется относительным положением звеньев робота и углами между ними независимо от сил и моментов, возникающих в результате этих движений. Звенье робота - это непрерывная часть, расположенная между двумя суставами. Для упрощения расчетов, все звенья робота, расположенные выше тазобедренных суставов мы будем считать единым звеном.

Для расчета алгоритма движения робота, мы связываем его тело с системой координат, как правило, с центром массы робота, либо с модулем гироскопов и акселерометров, а нормальное направление движения вперед, принимается за ось X.

Можно получить выражения для координат каждого звена, используя геометрические характеристики звеньев и обобщенную координату θ , т.е. угол между осью звена и вертикалью. Этот метод моделирования не только интуитивно понятен, но и значительно сокращает объем расчетов. В результате для планирования походки в этой модели, через обобщенные углы θ каждого сустава как функции времени t , можно получить углы поворота звеньев в каждом суставе.

Для моделирования прямой кинематики двуногого робота упрощаем модель до семи звеньев (см. рис.11). Движение рук мы не рассматриваем.

Введем глобальную систему координат OXYZ. Начало системы координат находится в центре опорных стоп робота в начале его движения, направление оси Z противоположно направлению силы тяжести, а ось X перпендикулярна оси Z, лежит в плоскости симметрии робота и направлена в сторону его движения вперед.

Цель решения задачи прямой кинематики состоит в описании положения тазобедренных и голеностопных суставов двуногого робота в системе координат через геометрические размеры звеньев l_i ($i=1,2,3,4$) и обобщенные координаты θ_i ($i=1,2,\dots,6$) каждого звена.

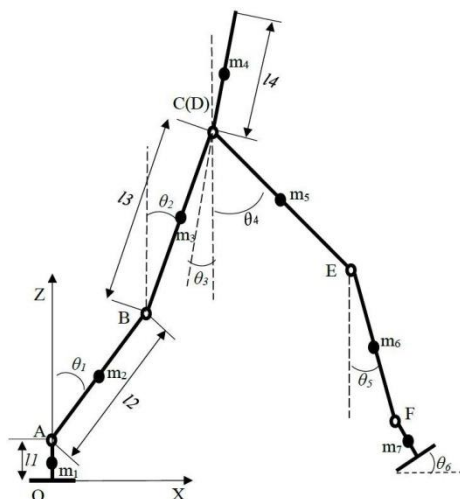


Рис. 11 Семизвенная модель робота

Значения координат каждого сустава в декартовой системе координат:

$$\begin{cases} X_F = X_l = 0 \\ Z_F = Z_l - l_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_A = X_A + l_2 \sin \theta_1 \\ Z_b = Z_A + l_2 \cos \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_C = X_D = X_h = X_A + l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 \\ Z_C = Z_D = Z_h = Z_A + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_E = X_A + l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_4 \\ Z_e = Z_A + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_F = X_r = X_A + l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_4 + l_2 \sin \theta_5 \\ Z_f = Z_r = Z_A + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_4 - l_2 \cos \theta_5 \end{cases}$$

Координаты центра масс каждого звена:

$$\begin{cases} x_{c1} = 0 \\ z_{c1} = l_1/2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{c2} = d_1 \sin \theta_1 \\ z_{c2} = l_1 + d_1 \cos \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{c3} = l_2 \sin \theta_1 + d_2 \sin \theta_2 \\ z_{c3} = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + d_2 \cos \theta_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{c4} = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + d_3 \sin \theta_3 \\ z_{c4} = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 + d_3 \cos \theta_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{c5} = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + d_2 \sin \theta_4 \\ z_{c5} = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 - d_2 \cos \theta_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{c6} = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_4 - d_1 \sin \theta_5 \\ z_{c6} = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_4 - d_1 \cos \theta_5 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{c7} = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_4 - l_2 \sin \theta_5 - l_1 \sin \theta_6/2 \\ z_{c7} = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_4 - l_2 \cos \theta_5 - l_1 \cos \theta_6/2 \end{cases}$$

Координаты центра масс двуногого робота:

$$\begin{cases} c g_x = \frac{m_1 x_{c1} + m_2 x_{c2} + m_3 x_{c3} + m_4 x_{c4} + m_5 x_{c5} + m_6 x_{c6} + m_7 x_{c7}}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7} \\ c g_z = \frac{m_1 z_{c1} + m_2 z_{c2} + m_3 z_{c3} + m_4 z_{c4} + m_5 z_{c5} + m_6 z_{c6} + m_7 z_{c7}}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7} \end{cases}$$

где m_i масса каждого из звеньев, а x и z координаты его центра масс.

Таким образом, мы вывели базовые зависимости, отвечающие за устойчивость шагающих роботизированных платформ, и привели формулы, которые позволяют производить динамическое планирование перемещения робота с сохранением устойчивости, исходя из индивидуальных параметров платформы, таких как масса составных звеньев робота и длины этих звеньев.

Конструирование ноги антропоида мы проводили на платформе Arduino Uno, а программу управления движением (скетч) создали в приложении Arduino IDE.⁴

⁴ См. Приложение 2

Заключение

Мы рассмотрели три бионические модели движения: антропоид, квадроид и гексапод. Каждая из этих моделей имеет свою специфику и оптимальный диапазон работ. Так, бионическая модель движения гексапод подходит для работы при сильном ветре, когда центр тяжести нельзя выносить высоко, хорошо перемещается при пересеченном рельефе и болотистой местности, а также по наклонной поверхности. Квадроиды быстро и устойчиво перемещаются на открытых пространствах. Антропоиды могут имитировать движения человека и заменять его работу в экстремальных условиях. Однако у каждой исследуемой модели имеются свои ограничения.

В данной работе была разработана упрощенная многозвенная модель двуногого антропоморфного робота, предназначенная для решения задач прямой кинематики с использованием обобщенных координат. Мы вывели базовые зависимости, отвечающие за устойчивость шагающих роботизированных платформ. В пункте 2.2 приведены формулы, позволяющие производить динамическое планирование перемещения робота с сохранением устойчивости, исходя из индивидуальных параметров платформы, таких как масса составных звеньев робота и длины этих звеньев.

Далее, мы разработали роботизированную платформу на основе бионической конечности антропоида. Подобные платформы можно использовать в различных направлениях – от создания сверхсильных и выносливых антропоидных роботов до разработки бионических имплантов (например, биологический имплант - нога).

Двуногие шагающие роботизированные платформы могут применяться в различных ситуациях:

1. Использование в роботах, применяемых для замены человека в труднодоступных местах и опасных условиях;
2. В экзоскелетах, использующихся для помощи людям, утратившим функции самостоятельной ходьбы;
3. В экзоскелетах, используемых в экстремальных условиях для увеличения физических возможностей человека;
4. В развлекательных аттракционах.

В настоящее время исследования человекоподобных роботов проводятся во многих странах мира. Люди рассматриваются как бионические прототипы роботов, ведь роль двуногой ходьбы в эволюции человека очень важна. Антропоморфные роботы имеют форму и кинематику близкую к человеку, что позволяет использовать их в среде человеческой деятельности. Для того, чтобы расширить сферу применения таких роботов, необходимо добиться стабильной ходьбы двуногих роботов по сложной местности, в частности по наклонным и подвижным поверхностям. Хотя исследования роботов-антропоидов ведутся давно, применение их в человеческой жизни все еще очень ограничено из-за низкой приспособляемости робота к сложной среде человеческой деятельности, поэтому совершенствование подобных платформ неизбежно и необходимо для улучшения характеристик.

В дальнейшем мы планируем продолжить наши исследования двуногих роботизированных платформ и изучить алгоритмы их движения (алгоритмы с заранее сконфигурированными параметрами и адаптивные алгоритмы).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Афанасьев О.А., Гендель В.С., Зимин А.В. Шагающие машины Теория Механизмов и Машин. 2005. №1. Том 3
2. Буданов В.М. Алгоритмы планирования движений шестиногого шагающего аппарата, 2005г.
3. Ван Ц., Деваев В. М. Метод управления ходьбой малого антропоморфного робота по подвижной поверхности. // «Вестник КНИТУ-КАИ». 2020г. № 3.
4. Желонкина, О. С. Построение параметризации походки робота-гексапода / О. С. Желонкина, Д. Ю. Злобин. — Текст : непосредственный // Исследования молодых ученых : материалы I Междунар. науч. конф. (г. Казань, июнь 2019 г.). — Казань : Молодой ученый, 2019. — С. 4-7. — URL: <https://moluch.ru/conf/stud/archive/339/15162/>.
5. Ковальчук А. К. Основы теории исполнительных механизмов шагающих роботов. – 2010.
6. Ковальчук А. К., Кулаков Д. Б., Семёнов С. Е. Управление движением двуногого шагающего робота по программной траектории //Машиностроение и компьютерные технологии. – 2011. – №. 5.
7. Ковальчук А. К., Кулаков Д. Б., Семенов С. Е. Блочнo-матричные уравнения движения исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой //Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2008. –№. 12.
8. Лазарев М. С., Львов А. Ю., Фадеев А. Ю. Перспективы применения антропоморфных роботов в образовательном процессе //XVIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых исследователей образования. – 2019. – С. 465.
9. Макаров И. М., Топчеев Ю. И. Робототехника: История и перспективы. — М.: Наука; Изд-во МАИ, 2003. — 349 с.
10. Охоцимский Д. Е. и др. Управление интегральным локомоционным роботом //Известия АН СССР, Технич. кибернетика. – 1974. – №. 6. – С. 56-64.
11. Охоцимский Д. Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. – 1984.
12. Охоцимский Д. Е., Платонов А. Н. Алгоритмы управления шагающим аппаратом, способным преодолеть препятствия //Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1973. – №. 5. – С. 3.
13. Павлюк Н. А., Ронжин А. Л. Конструктивные решения нижних конечностей для антропоморфного робота Антарес //Экстремальная робототехника. – 2016. –Т. 1. – №. 1. – С. 422-427.
14. Робот - конструктор hexapod robot kit, dfrobot //URL: <http://www.electronshik.ru/card/robot-konstruktor-hexapod-robot-kit-114992>
15. Спиркин, А. Н. Бионические методы управления роботизированным механизмом / А. Н. Спиркин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 84–91.
16. Формальский А. М. и др. Управление двуногими роботами. – Российский фонд фундаментальных исследований, 1996. – №. 96-01-01443.
17. Формальский А. М. Перемещение антропоморфных механизмов. –Formalskii Alexander, 1982 - с.149

Приложение 1

Сравнительный анализ шагающих роботизированных платформ

Таблица 1

Сравнение шагающих робоплатформ между собой

	схема	скорость	маневренность	проходимость	Пересечённость местности	строение	цена
Антропод	3	2	3	3	3		3
Квадропод	2	1	2	2	2		1
Гексопод	1	3	1	1	1		2

Таблица 2

Сравнение шагающих роботов с традиционными (колесными и гусеничными)

В сравнении с традиционными платформами	схема	скорость	маневренность	проходимость	Пересечённость местности	строение	цена
Антропод	-	-	+	+-	+-	-	-
Квадропод	+	+	+	+	+	+-	+-
Гексопод	+	-	+	+	+	-	+-

Программа управления робоногой в приложении Arduino IDE

```

#include <Servo.h>

/** \сдффы */
class Feet {
public:
    enum FeetPosition {LeftFeet, RightFeet};

    /** \brief Конструктор класса ноги
     * \param pos позиция ноги (правая/левая)
     * \param hip_step номер вывода ШИМ шага в бедре
     * \param hip_deviation номер вывода ШИМ бокового отклонения бедра
     * \param hip_turn номер вывода ШИМ поворота бедра (право-лево)
     * \param knee номер вывода ШИМ шага в колене
     * \param foot_step номер вывода ШИМ продольного отклонения стопы
     (носок-пятка)
     * \param foot_roll номер вывода ШИМ поперечного крена стопы */
    Feet (FeetPosition pos, int hip_step, int hip_deviation, int
hip_turn, int knee, int foot_step, int foot_roll);

    /** \brief Задать поворот бедра
     * \param degr поворот бедра (считается от нормального положения
наружу относительно корпуса) */
    void hip_turn(int degr);

    /** \brief Текущий разворот бедра */
    int hip_turn();

    /** \brief Задать отклониене бедра наружу / вовнутрь
     * \param degr угол отклонения бедра - положительный угол
соответствует отклонению наружу */
    void hip_deviation(int degr);

    /** \brief Текущий угол отклонения бедра */
    int hip_deviation();

    /** \brief Задать угол шага в бедре
     * \param degr угол шага в градусах - подъем бедра соответствует
положительному значению */
    void hip_step(int degr);

    /** \brief текущий угол подема бедра */
    int hip_step();

    /** \brief Задать угол шага в колене
     * \param degr угол шага в градусах - сгибание колена соответствует
положительному значению */
    void knee_step(int degr);

    /** \brief Текущий угол шага в колене */
    int knee_step();

    /** \brief Задать угол шага стопы
     * \param degr угол шага стопы в градусах, положительные значения
соответствуют вытянутому носку, отрицательные - носок задран вверх*/
    void foot_step(int degr);

    /** \brief Текущий угол шага стопы */
    int foot_step();

    /** \brief Задать угол крена стопы */
    void foot_roll(int degr);
    int foot_roll();

private:
    Servo servo_hip_step;
    Servo servo_hip_deviation;
    Servo servo_hip_turn;

```

```

Servo servo_knee;
Servo servo_foot_step;
Servo servo_foot_roll;
FeetPosition position;
};

class Control {
public:
    Control(int hip_step, int hip_deviation, int hip_turn, int knee,
int foot_step, int foot_roll);
    void setFeetPosition();
private:
    int m_hip_step;
    int m_hip_deviation;
    int m_hip_turn;
    int m_knee;
    int m_foot_step;
    int m_foot_roll;
};

Feet* left_feet = NULL;
Control* ctrl = NULL;

Feet::Feet(FeetPosition pos,int hip_step, int hip_deviation, int
hip_turn, int knee, int foot_step, int foot_roll) {
    position = pos;
    // Задаем соединения с сервоприводами ноги
    servo_hip_step.attach(hip_step, map(-30, -90, 90, 544, 2400),
map(120, -90, 90, 544, 2400));
    servo_hip_deviation.attach(hip_deviation, map(-30, -90, 90, 544,
2400), map(90, -90, 90, 544, 2400));
    servo_hip_turn.attach(hip_turn, map(-30, -90, 90, 544, 2400), map(90,
-90, 90, 544, 2400));
    servo_knee.attach(knee, 544, map(120, -90, 90, 544, 2400));
    servo_foot_step.attach(foot_step, map(-30, -90, 90, 544, 2400),
map(60, -90, 90, 544, 2400));
    servo_foot_roll.attach(foot_roll, map(-30, -90, 90, 544, 2400),
map(30, -90, 90, 544, 2400));
    // Выпрямляем ногу в нормальное состояние
    this->hip_turn(0);
    this->hip_deviation(0);
    this->hip_step(0);
    this->knee_step(0);
    this->foot_step(0);
    this->foot_roll(0);
}

void Feet::hip_turn(int degr) {
    servo_hip_turn.write(degr + 90);
}

int Feet::hip_turn() {
    return servo_hip_turn.read() - 90;
}

void Feet::hip_deviation(int degr) {
    servo_hip_deviation.write(degr + 90);
}

int Feet::hip_deviation() {
    return servo_hip_deviation.read() - 90;
}

void Feet::hip_step(int degr) {
    servo_hip_step.write(degr + 90);
}

int Feet::hip_step() {
    return servo_hip_step.read() - 90;
}

```

```

void Feet::knee_step(int degr) {
    servo_knee.write(degr);
}

int Feet::knee_step() {
    servo_knee.read();
}

void Feet::foot_step(int degr) {
    servo_foot_step.write(degr + 90);
}

int Feet::foot_step() {
    return servo_foot_step.read() - 90;
}

void Feet::foot_roll(int degr) {
    servo_foot_roll.write(degr + 84);
    Serial.print(" FootRoll:");
    Serial.print(degr + 84);
}

int Feet::foot_roll() {
    return servo_foot_roll.read() - 84;
}

Control::Control(int hip_step, int hip_deviation, int hip_turn, int
knee, int foot_step, int foot_roll) {
    m_hip_deviation = hip_deviation;
    m_hip_step = hip_step;
    m_hip_turn = hip_turn;
    m_knee = knee;
    m_foot_step = foot_step;
    m_foot_roll = foot_roll;
}

void Control::setFeetPosition() {
    left_feet->hip_deviation(map(analogRead(m_hip_deviation), 0, 1023,
-30, 90));
    left_feet->hip_turn(map(analogRead(m_hip_turn), 0, 1023, -30, 90));
    left_feet->hip_step(map(analogRead(m_hip_step), 0, 1023, -30, 120));
    left_feet->knee_step(map(analogRead(m_knee), 0, 1023, 0, 90));
    left_feet->foot_step(map(analogRead(m_foot_step), 0, 1023, -30, 90));
    left_feet->foot_roll(map(analogRead(m_foot_roll), 0, 1023, -30, 30));
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial);

    left_feet = new Feet(Feet::LeftFeet, 2, 3, 4, 5, 6, 7);

    //Control(int hip_step, int hip_deviation, int hip_turn, int knee,
int foot_step, int foot_roll);
    ctrl = new Control(A0, A1, A2, A3, A4, A5);

    // Даем время развернуться всем приводам
    delay(1000);
}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    delay(150);
    ctrl->setFeetPosition();
    Serial.println();
}

```