

УДК 621.865

Разработка шестиногого шагающего робота

*Рудых А. А., студент
кафедра «Компьютерные системы автоматизации производства»
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Сартисон А.В., студент
кафедра «Компьютерные системы автоматизации производства»
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Чесноков И.К., студент
кафедра «Компьютерные системы автоматизации производства»
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Воротников С.А., к.т.н.
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
vorotn@bmstu.ru*

1. Введение

В настоящее время существует острая необходимость в автоматических транспортных системах, способных работать в условиях пересеченной местности и местах, опасных для человека. Это важно, в частности, для отбора образцов и анализа почвы на болотах, проведения исследований в радиационно зараженных областях, изучения вулканов, кратеров и т.д. В данной статье акцент сделан на решении задач, возникающих в спелеологии и при разведке завалов.

Существует несколько роботов, способных выполнять подобные задачи. Примером является колесный американский робот *Groundhog*, предназначенный для исследования и составления карт подземных структур [1]. Также, известны шагающие роботы *Dante* и *Dante II*, созданные для исследования вулканов [2].

2. Постановка задачи

Существующие конструкции не лишены недостатков. Так, колесные схемы имеют ограниченную проходимость, не способны передвигаться по распределенным опорам,

малоэффективны при движении по поверхностям со случайными неровностями и не способны менять высоту или наклон платформы. Машины серии *Dante* обладают слишком большими размерами и весом, что делает их непригодными для исследования завалов и пещер.

Аппарат, лишенный перечисленных недостатков, должен отвечать следующим требованиям:

- передвигаться по пересеченной местности в любом произвольном направлении;
- преодолевать препятствия;
- передвигаться по поверхностям с необходимостью выбора точек опоры;
- сохранять работоспособность после опрокидывания;
- собирать данные об окружающей среде;
- работать в режимах ручного и автономного управления;
- размещать дополнительное оборудование;
- обладать малым весом.

На основе перечисленных выше требований в качестве конструкции было предложено использовать шагающую платформу с малыми габаритами.

Основной характеристикой шагающих платформ является количество опорных конечностей. На данный момент наиболее широко используются платформы с 2-мя, 4-мя и 6-ю ногами (гексаподы) [3]. Аппаратам с двумя и четырьмя ногами требуется динамическая балансировка центра тяжести, в то время как шесть ног позволяют обеспечивать статическую устойчивость, не заботясь об этом. Это упрощает алгоритмы управления, увеличивает надежность и снижает требования к вычислительным мощностям.

Также, важным параметром является число степеней свободы на каждую конечность. Для выполнения шага нога должна иметь не менее двух степеней подвижности. Однако, для обеспечения наклонов корпуса и поворотов необходимо как минимум три степени свободы на каждую ногу. Дальнейшее увеличение подвижности ног приведет к росту энергопотребления и увеличению сложности решения обратной кинематической задачи, что потребует больших вычислительных мощностей.

3. Разработка кинематической модели

Одной из первых задач, возникающих при разработке робота, является составление

кинематической схемы механизма. Исходя из постановки задачи, в проекте было решено использовать платформу-гексапод с тремя степенями свободы на каждую конечность. Для выполнения операций с объектами внешней среды было предложено использовать манипулятор с 2-мя степенями свободы. Ограниченная подвижность манипулятора в конструкции компенсируется высокой маневренностью платформы-гексапода. Предложенное решение показано на рис. 1.

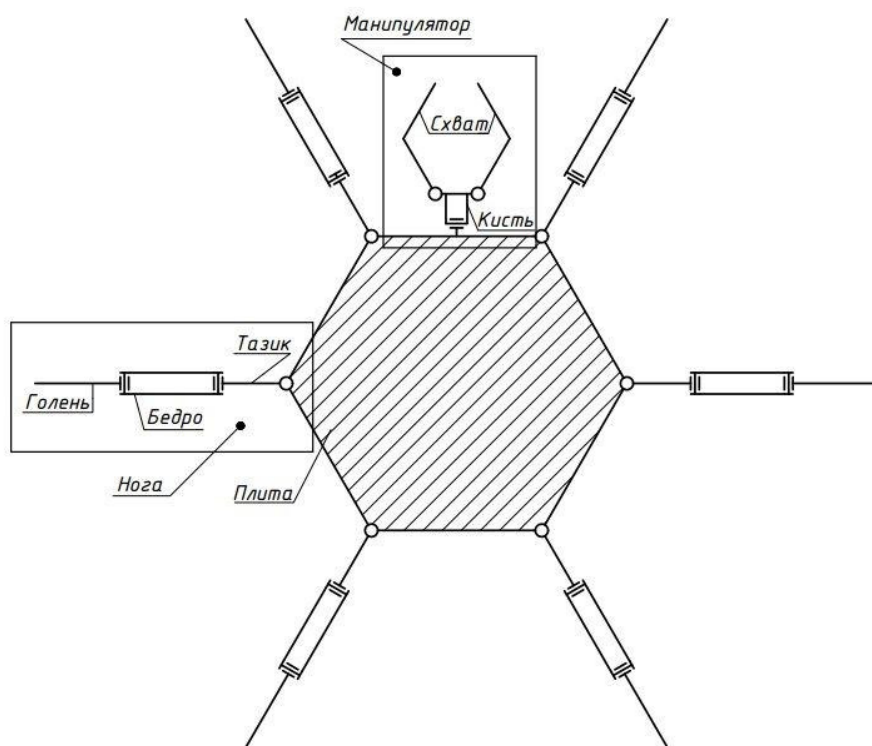


Рис. 1. Предложенная кинематическая схема робота

Нога представляет собой четырехзвенный рычажный механизм с разомкнутой кинематической цепью. Сочленения представлены вращательными парами, оси которых лежат в разных плоскостях: две обеспечивают перемещение в вертикальной плоскости, одна - в горизонтальной. Это позволяет добиться объемной рабочей области.

Для исследования движения конечной точки ноги в пространстве используем метод преобразования координат с матричной формой записи [4]. При этом методе выбирают число систем координат, равное числу элементов звеньев, образующих кинематические пары. Неподвижную систему координат свяжем с базой, а с каждой кинематической парой свяжем подвижную систему координат согласно принципу Денавита-Хартенберга. В результате

решения получим конкретный вид рабочей области, центральное сечение которой представлено на рис. 2.

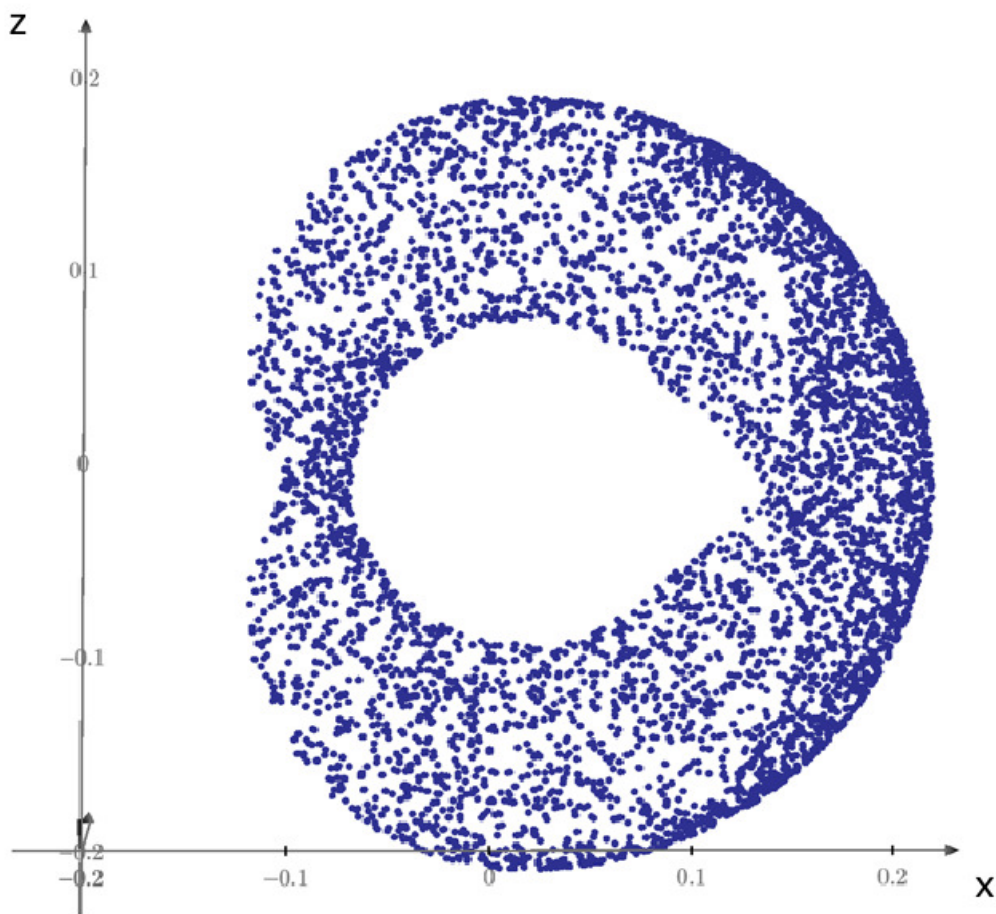


Рис. 2. Центральное сечение рабочей области ноги

Рабочая область имеет симметричный вид, что свидетельствует о возможности функционирования робота после опрокидывания.

На рис. 3 показан один из простых алгоритмов ходьбы гексапода. Черными кружками показаны ноги, поднятые в воздух. Белыми – ноги, находящиеся на земле. На рисунке 3а робот находится в начальном положении. Далее, ноги 2, 4, 6 поднимаются, продвигаются вперед и опускаются (б, в, г). На рис. 3д поднимаются ноги 1, 3, 5. После этого тело гексапода продвигается вперед, и поднятые ноги опускаются (е, ж). Таким образом, робот продвигается вперед.

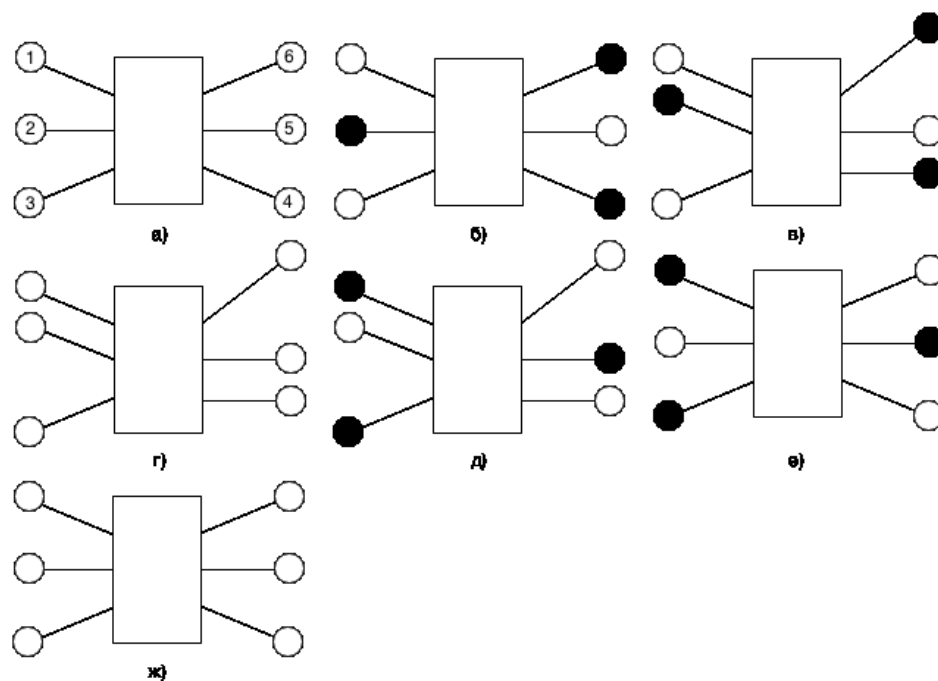


Рис. 3. Схема простого варианта ходьбы «тройками»

4. Разработка конструкции

Исходя из требования сохранения работоспособности после опрокидывания, а также для наиболее полного использования рабочей области ноги, платформа гексапода должна быть симметричной относительно горизонтальной плоскости.

В качестве двигателей в конструкции гексапода используются сервоприводы, обеспечивающие широкий диапазон мощностей и скоростей работы при достаточно простом способе управления.

Конструкция ног включает в себя 3 звена, условные обозначения которых взяты из энтомологии: тазик, бедро, голень. Данная компоновка конечностей и симметричность платформы гексапода дают возможность выполнять наклоны и повороты корпуса (крен, тангаж и рыскание), что позволяет позиционировать корпус и манипулятор точно и без лишних маневров. Симметричное расположение ног относительно верхней и нижней плит дают роботу возможность функционировать после опрокидывания, а и их конструкция позволяет наиболее полно использовать возможности сервоприводов. Длины звеньев были подобраны таким образом, чтобы обеспечить наибольший рабочий угол сервоприводов и минимизировать длину плеч механизма.

В проекте был проведен силовой расчет конструкции с целью выбора модели сервопривода. В расчете были приняты следующие допущения:

1. скорости и ускорения звеньев малы;
2. в процессе ходьбы робот всегда имеет три точки опоры;
3. все звенья абсолютно жесткие;
4. опорные ноги в каждый момент времени одинаково ориентированы и имеют одинаковое относительное расположение звеньев одной ноги.

В результате расчета было определено, что при ходьбе «тройками» во всех анализируемых положениях конечностей момент на сервоприводе не превышает 1,5 Нм. График, иллюстрирующий зависимость момента наиболее нагруженного сервопривода от углов между звеньями, представлен на рис 4.

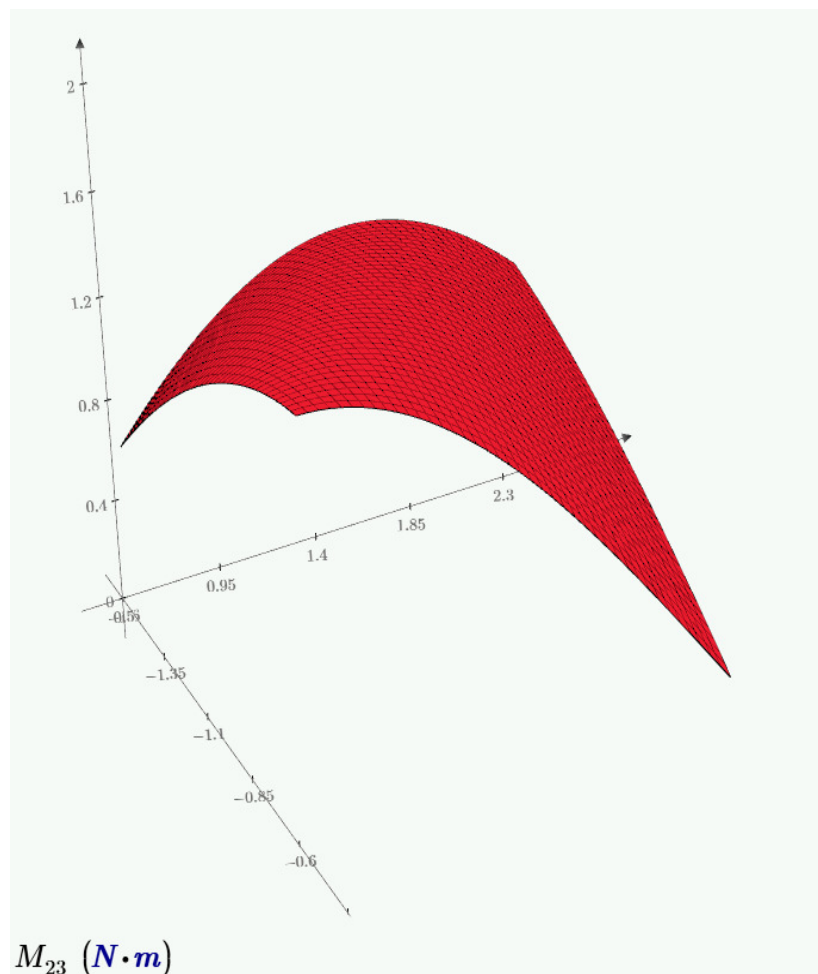


Рис. 4. Зависимость момента самого нагруженного сервопривода от обобщенных координат

Манипулятор должен быть спроектирован таким образом, чтобы его работа не препятствовала выполнению основных функций ног, но позволяла при этом захватывать и переносить малогабаритные грузы. Выбранная конструкция имеет достаточно короткую кисть, что позволяет работать с более тяжелым грузом.

В ходе кинематического расчета манипулятора были получены параметры рабочей области, а также соотношения, позволяющие определить скорость и ускорение любой точки, принадлежащей его звеньям, угловые скорости и ускорения звеньев. В ходе кинесто-статического расчета по принципу Д'Аламбера было установлено, что манипулятор способен работать с грузами до 0,5 кг.

5. Разработка системы управления

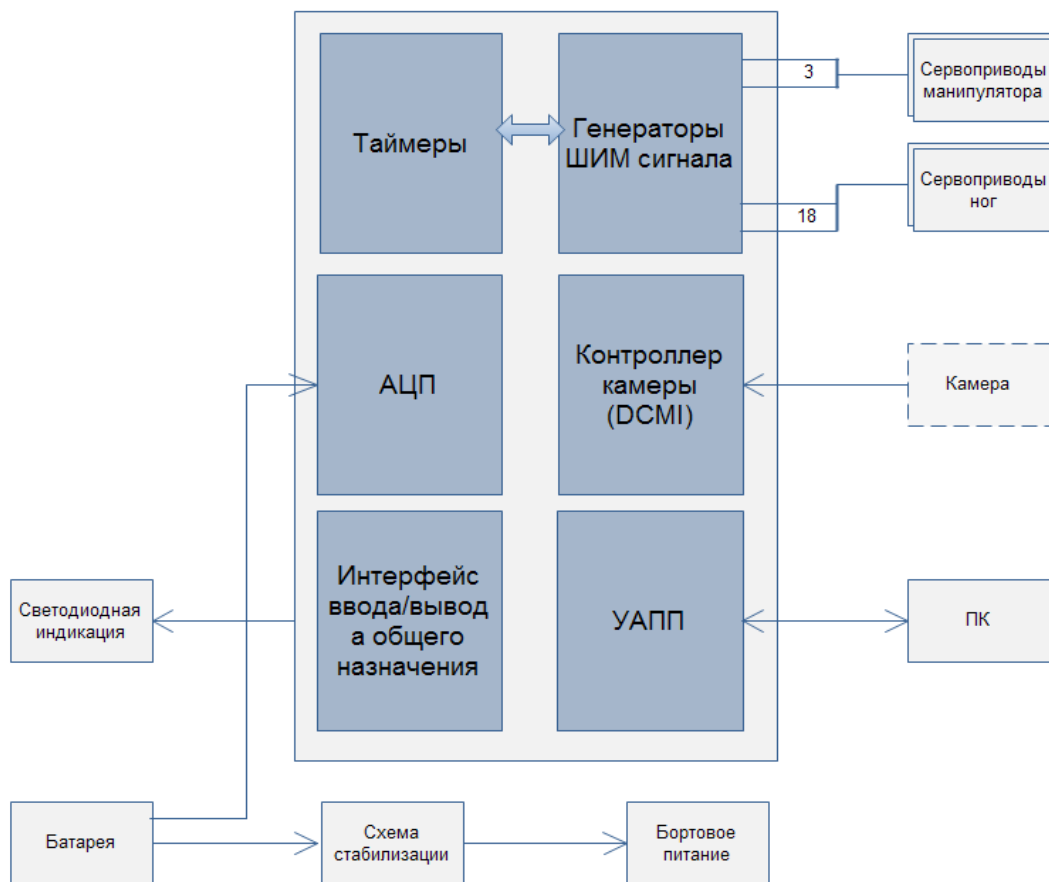


Рис. 4. Структурная схема аппаратного обеспечения

Важным этапом разработки является выбор комплекса аппаратно-программных средств робота-гексапода. Предложенная структурная схема показана на рис. 4. Для

уменьшения стоимости, размеров и потребления энергии было решено ограничиться одним вычислительным модулем на стороне робота.

Для реализации алгоритмов управления роботом необходимо постоянно проводить решение обратной кинематической задачи для каждой ноги и схвата робота, управлять сервоприводами и синхронизировать их движение. Следовательно, аппаратная часть комплекса должна обладать достаточной вычислительной мощностью. Учитывая, что при решении обратной кинематической задачи большая часть операций будет проводиться с числами с плавающей точкой, в системе управления было необходимо использовать микропроцессор с *FPU (floating point unit)*, а также обеспечить достаточный объем постоянной и оперативной памяти.

Кроме того, при выборе микропроцессора необходимо было учесть еще несколько обстоятельств. Во-первых, в конструкцию робота-гексапода входит 21 сервопривод, которыми необходимо управлять отдельно с помощью схем широтно-импульсной модуляции. Во-вторых, для реализации функции синхронизация ног, а также для выполнения ряда других служебных функций требуется предусмотреть несколько таймеров. В-третьих, необходим универсальный асинхронный приемопередатчик для обеспечения связи с управляющим компьютером верхнего уровня (см. рис. 4). В-четвертых, следует предусмотреть аналого-цифровой преобразователь и несколько каналов цифровых вводов и выводов. Наконец, система управления должна работать в достаточно широком диапазоне входных напряжений (5В...7,5 В).

Всем этим требованиям удовлетворяет микроконтроллер *STM32F407* производства *ST-microelectronics*. Для облегчения процесса разработки была выбрана отладочная плата *STM32F4-Discovery*, включающая в себя данный микроконтроллер, стабилизатор питания, пользовательские кнопки и светодиоды, а также удобную разводку выводов ножек и акселерометр. Большим плюсом является подробная документация, рассматривающая как физические, так и логические особенности микроконтроллера, и наличие большого количества исходных кодов, примеров и библиотек [5].

Для решения задачи управления роботом, было необходимо разработать соответствующее программное обеспечение. В проекте оно реализовано в виде двух компонент: встроенное программное обеспечение робота и графический интерфейс оператора.

Первая компонента выполняется непосредственно на микроконтроллере и предназначена для выполнения следующих задач:

1. быстрого обмена данными с управляющим устройством;
2. управления периферийными устройствами робота;
3. управления сервоприводами;
4. проведения необходимых расчетов для перемещения элементов конструкции.

Поскольку под выбранный контроллер существуют компиляторы языков *C* и *C++*, для разработки было решено использовать второй, так как он поддерживает парадигму объектно-ориентированного программирования.

Вторая компонента предназначена для исполнения на компьютере верхнего уровня и должна обеспечивать удобное управление роботом, а также снабжать оператора данными о текущем состоянии гексапода.

Для разработки графического интерфейса оператора был выбран язык *Java*, так как он следует концепции объектно-ориентированного программирования, имеет большое количество как встроенных, так и сторонних библиотек, значительно упрощающих некоторые аспекты разработки. Кроме того, у команды имеется некоторый опыт разработки приложений на нём.

Обмен данными между встроенным программным обеспечением робота и графическим интерфейсом оператора производится по каналу связи, состоящему из двух универсальных асинхронных приемопередатчиков и линии передач с использованием открытого коммуникационного протокола *MODBUS*. Графический интерфейс оператора предоставляет информацию о текущем состоянии робота и органов управления. В настоящее время проводится отладка графического интерфейса и пульта управления гексаподом.

6. Заключение

Проведенные испытания макета показали, что робот-гексапод данной конструкции способен перемещаться в условиях пересеченной местности, а также манипулировать объектами. Вес робота с навесным оборудованием составил приблизительно 2 кг, вес переносимого груза – до 1,5 кг, вес груза, поднимаемого манипулятором – до 0,5 кг.

В дальнейшем предполагается расширить и усложнить алгоритмы автоматического управления роботом-гексаподом, а также предполагается включение телевизионной камеры для реализации визуального мониторинга окружающей среды.

На рис. 5 представлена фотография макета робота-гексапода.

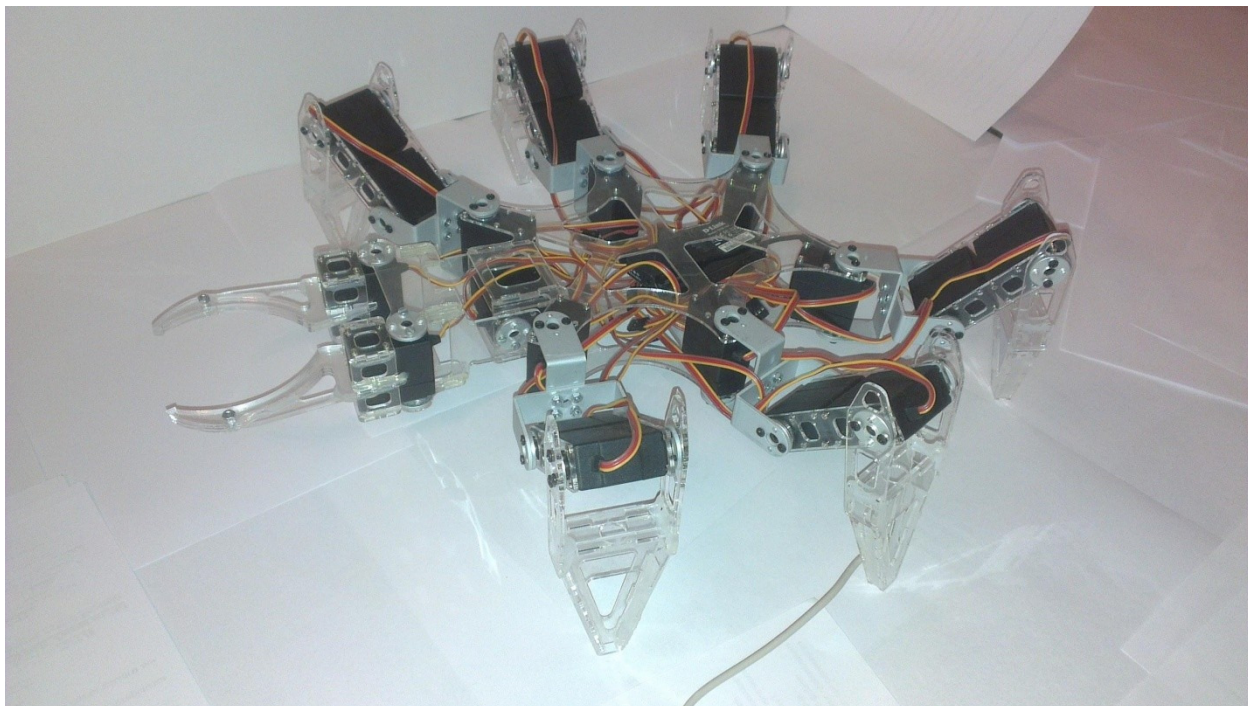


Рис. 5. Фотография макета робота

Список литературы

1. Thayer S. Robotics Institute: 3D Mine Mapping. Available at: https://www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?project_id=509&menu_id=261, accessed 29.03.2014.
2. Bares J., Whittaker W.L. Robotics Institute: Dante II. Available at: http://www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?project_id=163&menu_id=261, accessed 29.03.2014.
3. Конюх В.Л. Основы робототехники. Ростов н/Д: Феникс (Высшее образование), 2008. 281 с.
4. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 400 с.
5. STM32F4 Series – STMicroelectronics. Available at: <http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1577>, accessed 29.03.2014.

6. Фролов К.В., Попов С.А., Мусатов А.К. Теория механизмов и машин: Учебник для втузов / Под ред. К.В. Фролова. М.: Высшая школа, 1987. 496 с.