

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЧЕЛОВЕКОПОДОБНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ROS

Р.Р. Хусаинов, А.С. Климчик (Университет Иннополис, Россия, 420500,
Иннополис, ул. Университетская 1)
E-mail: r.khusainov@innopolis.ru

Е.А. Магид, А.Г. Сагитов (Казанский (Приволжский) федеральный уни-
верситет, 420008, Казань, ул. Кремлевская 18)

HUMANOID MOTION CONTROL BASED ON ROS OPERATING SYSTEM

R. Khusainov, A. Klimchik (Innopolis university, 420500, Innopolis, Univer-
sitetskaya str., 1)

E. Magid, A. Sagitov (Kazan Federal University, 420008, Kazan,
Kremlevskaya str. 18)

Keywords: humanoid, locomotion, ROS.

Введение. В следующие десятилетия двуногие шагающие роботы (ДШР) станут значительной частью нашей повседневной жизни. В настоящее время, некоторые модели роботов уже демонстрируют впечатляющие способности к быстрому передвижению, избеганию столкновений и адаптации к выполнению определенных операций в созданной под человека окружающей среде. Например, открывание дверей, подъем и спуск по лестницам, захват манипуляторами предметов со стола, открывание бутылок, наливание воды в стакан и многое другое – уже доступно современным продвинутым роботам. Хотя осуществление быстрой ходьбы такими роботами и значительно улучшилось в последние годы благодаря разработке различных методов движения, походка ДШР все еще остается недостаточно стабильной и энергетически эффективной по сравнению с походкой человека [1], [2], [3]. Причины этого кроются в кинематических и динамических различиях между человеком и антропоморфным роботом: прежде всего, это разные типы скелетов, с разными количествами степеней свободы. Кроме того, роботы имеют различные ограничения на относительные положения, а также скорости и ускорения суставов. Вдобавок, роботы имеют отличные от человека кинематические характеристики, например, распределение веса по частям тела и положение центра масс. Таким образом, преодоление этих ограничений при создании ДШР с динамически и статически стабильной, энергоэффективной и человекоподобной походкой остается одной из важнейших мировых задач в исследованиях антропоморфных роботов [4]. Дополнительной сложностью при решении данной задачи является необходимость переработки существующих алго-

ритмов под каждую конкретную модель ДШР с учетом имеющихся у ДШР степеней свободы, механических ограничений конструкторских решений и используемых приводов, количества, свойств и расположения датчиков, и других особенностей каждого ДШР.

Одной из насущных робототехнических задач для ДШР является разработка решений для динамически стабильной ходьбы ДШР. Целью данной работы являются исследование и разработка программного комплекса системы управления (ПКСУ) для человекоподобной ходьбы нового российского полноразмерного двуногого шагающего робота (ДШР) серии AR-600 на основе контроля статического и динамического равновесия с использованием операционной системы для роботов ROS [5].

На первом этапе алгоритмы управления были отработаны на виртуальной модели. С этой целью CAD модель робота AR-601M была интегрирована в виртуальную среду симулятора Gazebo, в которых производилось исследование и тестирование движений робота. Была осуществлена программная реализация ПКСУ с двумя алгоритмами управления ходьбой: (1) с применением модели перевернутого маятника VHIPM (virtual height inverted pendulum model – модель виртуального маятника с инвертированной высотой); и (2) управления движением робота с помощью контроллера опережающего регулирования (Preview Control). После тестирования в виртуальной среде программный комплекс был применен для управления движением реального робота. Разработанный ПКСУ, контролирующей робота посредством робототехнической среды ROS, использует модули приема и передачи данных по каналам связи робота от сенсоров к устройствам обработки и управления, с последующей выдачей команд сервоприводам ДШР. Точная калибровка моделей ДШР позволила улучшить совпадение желаемой и получаемой траекторий ходьбы робота при работе ПКСУ с разработанными алгоритмами контроля движения ДШР.

Дальнейшая структура статьи организована следующим образом: в следующем разделе дается описание робота AR-601M, далее описывается виртуальная модель робота. Затем рассматриваются алгоритмы управления ходьбой ДШР с помощью: (1) модели перевернутого маятника VHIPM; и (2) управления движением робота с помощью контроллера опережающего регулирования (Preview Control). В последнем разделе приведены выводы.

Описание робота.

Полномасштабный антропоморфный AR-601M (рис. 1) производится российской компанией ПАО «Андроидная робототехника» [6] и является одной из моделей популярной в России линейки ДШР AR-600 [7],[8],[9]. Робот AR-601M построен на базе силового каркаса из легких сплавов с элементами силового электропривода и по многим своим техническим характеристикам превосходит зарубежные аналоги: например, по количеству степеней свободы и оснащенности манипуляторов. При росте 145 см, AR-

601M весит 65 кг, и имеет 41 степень свободы, из которых по 6 приходится на каждую ногу. Каждая степень свободы AR-601M приводится в движение с помощью электродвигателя. Манипуляторы робота позволяют оперировать с предметами бытового обихода, основываясь на внутренних системах навигации и технического зрения. Антропоморфный робот включает в себя широкий набор сенсорных устройств (бортовых датчиков) для восприятия окружающей среды и датчиков внутреннего состояния робота (эффекторов и актуаторов), связанных с исполнительными механизмами. Набор датчиков робота включает: систему зрения робота (передняя цветная стереопара камер и монохромная камера заднего вида); два сканирующие ИК-дальномера (Нокуо UTM-30LX); 16 ИК-датчиков расстояния на запястьях и стопах; 1 гироскоп-акселерометр с цифровым масштабированием и фильтром Калмана; 4 двухосевых акселерометра; 12 резистивных датчиков положения; 4 тензометрических силомоментных датчика стоп и запястий (по 1 на каждые стопу и запястье); 30 магнитных энкодеров для контроля состояния приводов робота; микрофон и динамик. Непрерывная работа AR-601M без подзарядки составляет до 2-х часов и напрямую коррелирует с интенсивностью выполняемых задач и их сложностью.

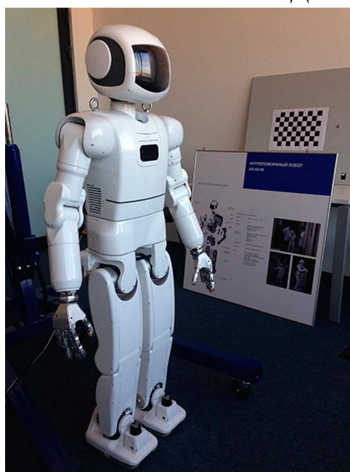


Рис. 1. Робот AR-601M

Модель робота AR-601M в Gazebo

Основной задачей при создании модели робота в среде ROS/Gazebo является создание URDF (Universal Robot Description File) и STL (stereolithography) файлов, представляющих из себя точное описание трехмерных моделей частей робота. Используя инструмент «SolidWorks to URDF Exporter», мы сгенерировали URDF и STL файлы на основе модели в SolidWorks. При этом нулевым углам в Gazebo соответствуют положения в суставах, которые были заданы при создании модели в SolidWorks. Поэтому, перед экспортом модели из SolidWorks, мы откалибровали углы в ногах, сделав их полностью выгнутыми, параллельными фронтальной и сагитальной плоскостям, и со стопами, параллельными горизонтальной плос-

кости. Руки играют существенно меньшую роль в моделировании походки, и они строго зафиксированы (неподвижны) в текущих алгоритмах ходьбы. Поэтому начальное положение рук произвольно. На рис. 2 показана созданная нами модель робота в Gazebo.

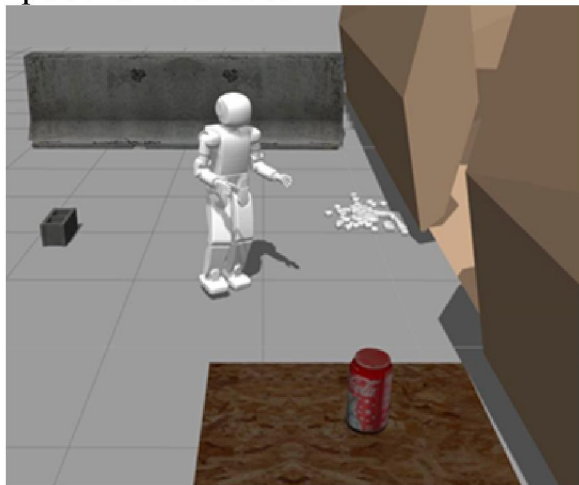


Рис. 2. Модель робота AR-601M в Gazebo

URDF является файлом формата XML. Расположение тела (`<origin>`), а также mesh-файл, являются результатом работы инструмента «SolidWorks to URDF Exporter». Параметры типа `<inertial>` (инерционные) - такие как масса (`mass value`) и инерция (`inertia`) были взяты для каждой части робота из таблицы инерционных параметров робота от производителя. Положение сустава и направление оси вращения формируется из CAD модели. Также заметим, что для сустава определены ограничения по углу (от -0.3 рад до 0.3 рад), моменту сил (80 Н*м) и угловой скорости (1 рад/сек), что соответствует параметрам из технической документации робота.

Управление виртуальной моделью в симуляторе Gazebo происходит с помощью пакета ROS Control и плагина для Gazebo. На рис. 3 показана схема взаимодействия между симулятором и модулем управления в ROS. На текущий момент управление приводами модели робота осуществлялось по углу: также, как и в реальном роботе. То есть на вход контроллера подается желаемый угол поворота, и контроллер рассчитывает согласно ПИД-коэффициентам необходимый момент сил, который передается в Gazebo. Происходит это с частотой 250 Hz , что также соответствует реальному роботу.

Для анализа движения робота в виртуальной среде использовалась информация по углам в суставах (`joint state`), положению частей робота относительно лабораторной системы отчета и системы отчета робота (`link state`), а также были дописаны плагины для получения информации по силе взаимодействия стопы робота с поверхностью.

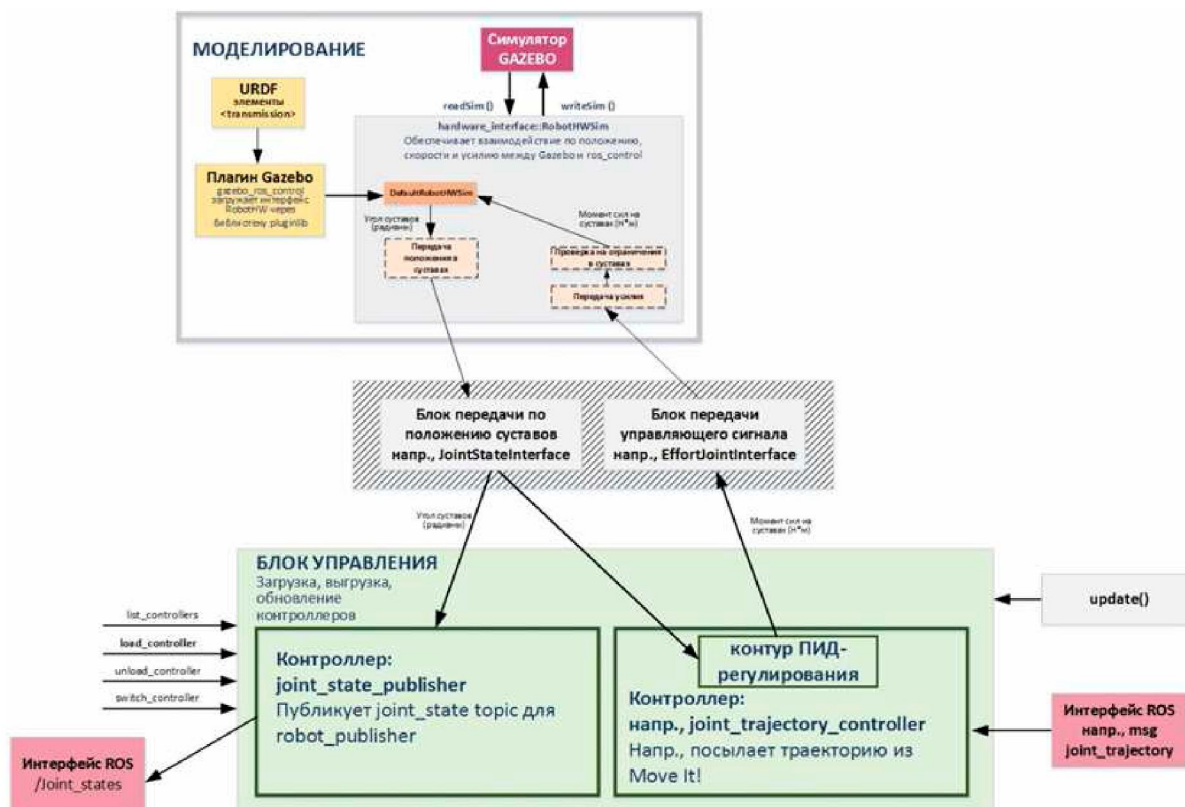


Рис. 3. Схема взаимодействия симулятора и модуля управления в ROS

Алгоритмы управления.

На первом этапе для анализа устойчивости походки модели робота был использован аналитический подход через расчет точки нулевого момента (ТНМ). Зная требуемые значения координат ТНМ для каждого момента времени, решалась система дифференциальных уравнений для координат центра масс модели робота. Таким образом мы получили аналитические оптимальные траектории движения робота [10]. Алгоритм управления строился на обеспечении движения робота по заранее рассчитанным оптимальным траекториям. Так как основную часть времени походки занимает фаза опоры на одну ногу, то сначала решалась задача расчета ТНМ модели робота и расчета оптимального движения при шаге, где одна (опорная) нога находится в неподвижном состоянии, а другая нога переносится сзади вперед. Если положить желаемые координаты ТНМ нулевыми, то мы добьемся максимальной устойчивости шага, так как ТНМ в этом случае будет лежать в центре опорной ноги. В работе [11] авторы показали, что уравнения движения центра масс могут записаны в виде

$$\ddot{x} - \frac{g}{\alpha z_{CoM}} x_{CoM} = 0, \quad \ddot{y} - \frac{g}{\beta z_{CoM}} y_{CoM} = 0 \quad (1)$$

где коэффициенты α, β находятся экспериментальным путем для снижения ошибки ТНМ. Тогда функции координат центра торса от времени, яв-

ляющиеся решением дифференциальных уравнений второго порядка, запишутся как

$$x(t) = C_1 e^{-w_1 t} + C_2 e^{w_1 t}, y(t) = C_3 e^{-w_2 t} + C_4 e^{w_2 t} \quad (2)$$

где $w_1 = \sqrt{\frac{g}{\alpha z}}$, $w_2 = \sqrt{\frac{g}{\beta z}}$. Коэффициенты C_1, C_2, C_3, C_4 находятся из начальных и конечных условий для координат.

Другим способом нахождения траектории движения торса, отличным от аналитических функций, является использование контроллера. Использование контроллера означает использование обратной связи. В нашей модели для виртуального робота в качестве сигнала обратной связи брались значения координат ТНМ. В случае реального робота это могут быть показания с силомоментных датчиков на стопах, которые по сути являются аналогом значений ТНМ. Использование контроллера с обратной связью позволяет роботу адаптироваться к текущей ситуации и рассчитывать необходимую траекторию движения.

В работе [12] приведен подход, использующий будущие значения желаемой координаты ТНМ (Preview Control). Траекторию робота во фронтальной плоскости получаем, используя этот подход.

Уравнение для координаты ТНМ в случае модели ИРМ (inverted pendulum model – модель инвертированного маятника) представлено ниже:

$$P = x - \frac{z_c}{g} \ddot{x} \quad (3)$$

где z_c – высота центра масс, g – ускорение свободного падения и X – координата центра масс.

Запишем уравнения для контроллера в дискретном временном пространстве в виде:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ p(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (4)$$

где k – дискретное время, $x(k)$ – значение вектора состояния (координата, скорость, ускорение центра масс), $u(k)$ – управляющий вектор, $p(k)$ – значение координаты ТНМ. A, B, C, D – коэффициенты, полученные из уравнения (4) и разложения вектора состояния x в ряд Тейлора для нахождения его значения в следующий момент времени [13]. В роли управляющего вектора $u(k)$ используется третья производная координаты x .

Согласно работе [13] управляющий сигнал u при использовании будущие значения желаемой координаты ТНМ выглядит следующим образом:

$$u(k) = -G_I \sum_{i=0}^k e(i) - G_x x(k) - \sum_{l=1}^{N_I} G_d(l) p_d(k+l) \quad (5)$$

где $e(i)$ – ошибка между рассчитанной и желаемой координатой ТНМ, p_d – желаемая координата ТНМ. G_I , G_X , $G_d(l)$ – коэффициенты пропорциональности. Первый член выражает интегральную ошибку между рассчитанной и желаемой координатой ТНМ. Второй член пропорционален текущему состоянию вектора x . Третий член учитывает будущие значения желаемой координаты ТНМ, в котором суммирование ведется по N_1 будущим значениям. Преимуществом такого подхода по сравнению с использованием траекторий, рассчитанных заранее перед каждым шагом, является учет отклонений робота от заданной траектории и автоматическая корректировка движения.

Заключение.

В работе представлены разработанные нами математические модели системы управления движением робота в среде Gazebo с учетом физических характеристик робота AR-601M. Проведено моделирование системы управления робота в среде Gazebo. Разработаны алгоритмы получения и обработки информации с датчиков робота. Разработаны алгоритмы расчета управляющих воздействий и управления исполнительными механизмами робота. Все вышеуказанные разработки проведены для полноразмерной робототехнической платформы AR-601M. Результаты экспериментов показывают, что робот успешно обрабатывает команды высокого уровня по перемещению. Также показаны результаты стабилизации робота при внешнем воздействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Katić D, Vukobratović M. Survey of Intelligent Control Techniques for Humanoid Robots. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2003;37(2):117-41.
2. Vukobratović M, Borovac B. Zero-moment point — thirty five years of its life. *International Journal of Humanoid Robotics*. 2004;01(01):157-73.
3. Wright J, Jordanov I. Intelligent Approaches in Locomotion - A Review. *J Intell Robot Syst*. 2014;80(2):255-77.
4. Яцун С Ф, Савин С И, Яцун А С, Карлов А Е. Оптимизация времени вертикализации экзоскелета по критерию энергоэффективности. Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сборник научных статей по материалам XII международной научно-технической конференции, 2016.
5. Robot Operating System, <http://www.ros.org/>
6. Андроидная Техника, <http://npo-at.com/>
7. Ложкин П В, Толстель О В. Создание программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего динамическое равновесие и движение РТК AR-600. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта, серия: физико-математические и технические науки, т.4, 2013.

8. Горобцов А С, Андреев А Е, Тарасов П С, Скориков А В. Автономная система управления шагаем двуногого робота. XII Всероссийская научно-практическая конференция "Перспективные системы и задачи управления": Труды конференции, 2017.

9. Сиразетдинов Р Т, Деваев В М, Камалов А Р, Кацевман Е М. Программный комплекс моделирования и виртуализации антропоморфного робота AR-601 на основе систем ROS и Gazebo. Седьмая всероссийская научно-практическая конференция "Имитационное моделирование, теория и практика": Труды конференции, т. 2, 2015.

10. Khusainov R, Klimchik A, Magid E, editors. Swing leg trajectory optimization for a humanoid robot locomotion. Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2016 13th International Conference on; 2016.

11. Ha T, Choi C-H. An effective trajectory generation method for bipedal walking. Robotics and Autonomous Systems. 2007;55(10):795-810.

12. Khusainov R, Shimchik I, Afanasyev I, Magid E, editors. Toward a human-like locomotion: Modelling dynamically stable locomotion of an anthropomorphic robot in Simulink environment. Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2015 12th International Conference on; 2015 21-23 July 2015.

13. Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, Fujiwara K, Harada K, Yokoi K, et al., editors. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. Robotics and Automation, 2003 Proceedings ICRA '03 IEEE International Conference on; 2003 14-19 Sept. 2003.