

Р.Р. Хусаинов, м.н.с., аспирант, r.khusainov@innopolis.ru
И.А. Шимчик, научный сотрудник, i.shimchik@innopolis.ru
И.М. Афанасьев, к.т.н., доцент, i.afanasyev@innopolis.ru
Е.А. Магид, д.т.н., профессор, e.magid@innopolis.ru
Университет Иннополис, г. Иннополис, Россия

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИПЕДАЛЬНОГО РОБОТА В MATLAB/SIMULINK, ОСНОВАННАЯ НА МЕТОДЕ БАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ ХОДЬБЫ

Аннотация. Статья описывает математическое моделирование системы управления (СУ) и симуляцию прямохождения робота AR601-M с использованием данной СУ. Моделирование и симуляции были осуществлены в среде MATLAB/Simulink с использованием пакета SimMechanics. Созданный алгоритм СУ прямохождения основан на методе базовых компонент ходьбы. Был проведен анализ походки робота, оценена скорость движения и максимальные моменты сил на осях.

Ключевые слова: антропоморфный робот, двуногий шагающий робот, прямохождение, математическое моделирование, AR601-M, Matlab, Simulink

MATLAB/SIMULINK MODEL OF BIPED ROBOT LOCOMOTION CONTROL SYSTEM BASED ON WALKING PRIMITIVES APPROACH

Ramil Khusainov, research assistant, PhD student, i.danilov@innopolis.ru
Ilya Shimchik, research associate, i.afanasyev@innopolis.ru
Ilya Afanasyev, PhD, assistant professor, i.afanasyev@innopolis.ru
Evgeni Magid, PhD, professor, e.magid@innopolis.ru
Innopolis University, Innopolis, Russia

Abstract. The paper presents mathematical modelling of the control system (CS) and bipedal locomotion simulation of AR601-M robot using this CS. Modelling and simulation were carried out in MATLAB/Simulink environment with SimMechanics package. The suggested bipedal locomotion algorithm is based on the walking primitives approach. We analyzed robot gait and estimated speed and maximum torques on the axles.

Keywords: humanoid robot, bipedal locomotion, modelling, AR601-M, Matlab, Simulink

Введение

Моделирование является важнейшим инструментом в исследовательской области робототехники, который способствует созданию передовых проектов, позволяет проверять новые алгоритмы управления и исследовать различные решения для сложных задач. Значительным преимуществом моделирования является отсутствие необходимости конструирования и модификации реального робота. Условия эксперимента и модель робота создает сам исследователь.

За последнее время создано большое количество программных решений для моделирования многомодульных динамических систем. Некоторые из них специализируются на моделировании роботов, например, Gazebo [1] и V-Rep [2]. Однако эти программы требуют хороших навыков программирования. Такое программное решение как MATLAB/SimMechanics [3] экономит время и ресурсы при моделировании систем управления механическими объектами. В нем используются стандартная Ньютоновская динамика и имитируются поступательные и вращательные движения в трех измерениях. Решая систему дифференциальных уравнений для текущего состояния системы, MATLAB находит следующее состояние системы.

Моделирование робота AR-601M и контакта ноги с поверхностью

В нашей работе мы использовали SimMechanics для симуляции двуногого шагающего робота. Для того, чтобы сконструировать и запустить модель робота, необходимо выполнить следующие шаги:

1. Определить геометрию составных частей робота и их инерционные характеристики.
2. Осуществить моделирование силы реакции опоры.
3. Задать входные сигналы для позиций суставов в каждый момент времени.
4. Осуществить моделирование с использованием алгоритмов решения обыкновенных дифференциальных уравнений.
5. Осуществить наглядное изображение модели.

Моделирование двуногого шагающего робота (ДШР) начинается с определения геометрии робота, количества сочленений и их характеристик. Наша модель робота состоит из 12 частей, которые связаны вращающимися сочленениями в коленях, лодыжках, бедрах и фиксированными (не вращающимися) суставами в шее, локтях и плечах. Туловище и стопы имеют форму

параллелепипеда, голова – форму шара, остальные части тела имеют форму цилиндра; параметры модели ДШР AR-601М приведены в табл. 1. В глобальной неподвижной системе координат туловище имеет 3 степени свободы в сагиттальной плоскости: одна степень вращения и две поступательные степени в вертикальном и горизонтальном направлении. Рис. 2 демонстрирует общий вид модели.

Таблица 1. Моделирование: Параметры частей тела

Параметры туловища		Параметры головы	
a, метры	0,3	R, метры	0,01
b, метры	0,2	L, метры	0,3
c, метры	0,5	Масса, кг	0,75
Масса, кг	30	Параметры стоп	
Параметры голени и бедра		Ширина, метры	0,1
R, метры	0,05	Длина, метры	0,3
h, метры	0,4	Высота, метры	0,05
Масса, кг	3,14	Масса, кг	1,5

Таблица 2. Моделирование: Параметры взаимодействия стопы с землей

$k_n(N/m)$	1e5	$b_t(N*s/m)$	1e7
$b_n(N*s/m)$	1e7	μ	0,5

Определение контакта ноги с поверхностью является важной задачей в моделировании робота. Когда стопа касается поверхности, возникает вертикальная и касательная силы. Существует несколько подходов для расчета этих сил [4, 5]. В нашей работе взаимодействие стопы и поверхности моделируется с помощью линейной системы с затуханием. Уравнение (1) представляет вертикальную силу, где y – координата концевой точки ноги ($y = 0$ соответствует поверхности, по которой перемещается робот), k_n и b_n – постоянная упругости и коэффициент затухания соответственно.

$$F_n = -k_n y - b_n \dot{y}, \quad (1)$$

Вертикальная сила применяется при $y < 0$ для того, чтобы избежать прилипания ноги, второе слагаемое становится нулевым при $y > 0$. Уравнение (2) задает касательную силу, где b_t – коэффициент касательного затухания.

$$F_t = -b_t \dot{x}, \quad (2)$$

Касательная сила также применяется только при $y \leq 0$. Коэффициенты поверхности k_n , b_n , b_t должны быть достаточно большими (см. табл. 2). Это приводит к малому проникновению стопы в землю (k_n) и быстрому затуханию скорости контакта (b_n , b_t). Уравнение (2) хорошо работает при приземлении ноги, в то время как при поднятии ноги возникает так называемый «эффект прилипания»: мы не можем обеспечить точное вертикальное движение

ние, и при этом присутствует горизонтальная составляющая скорости, что приводит к большой касательной силе. Чтобы избежать этого эффекта, абсолютное значение касательной силы должно быть ограничено μF_n , где μ – коэффициент трения. F_n имеет достаточно большое значение при приземлении ноги, то есть касательная сила будет достаточно большой, чтобы предотвратить скольжение робота. Поскольку робот движется в сагиттальной плоскости, в направлении оси Z контактных сил нет. Параметры модели поверхности, по которой передвигается робот, приведены в табл. (2).

Моделирование передвижения робота

Для моделирования динамически стабильного передвижения мы использовали метод базовых компонентов ходьбы [6]: движение робота состоит из последовательности базовых компонент ходьбы, начальным и конечным условием для каждого компонента является нулевые значения скорости и ускорения каждого из сочленений робота. Схема движения ноги, например, для шага, начинающегося с левой ноги, может быть поделена на четыре этапа: (1) поднятие левой ноги; (2) приведение в движение тела робота, которое представлено в виде модели перевернутого маятника до тех пор, пока левая нога не коснется земли; (3) перемещение правой ноги вперед для того, чтобы углы в коленном и тазобедренном суставах были равны нулю; (4) затухание движения с помощью прикладывания момента сил в лодыжках. Далее эти этапы повторяются, начиная шаг с правой ноги. Входные сигналы для положения коленных и бедренных суставов правой ноги приведены на рис. 1.

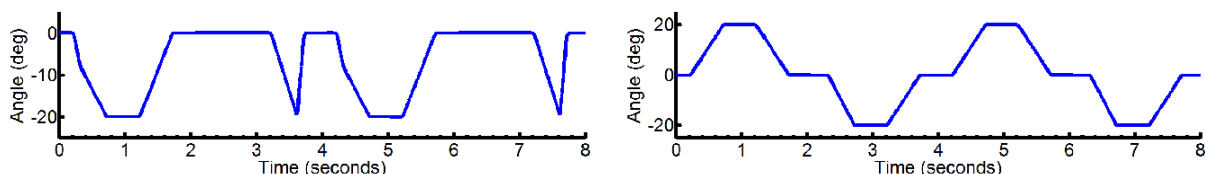


Рис. 1. Входные значения углов для правого колена (слева) и бедра (справа)

Движение робота вперед в конце шага компенсируется с помощью прикладывания момента сил в лодыжках, при том что углы в тазобедренных и коленных суставах равны нулю. Значение момента силы вычисляется согласно уравнению (3), где φ – угол голеностопного сустава, $c = 10$ – жесткость, $d = 4$ – коэффициент затухания. Уравнение (3) – это стандартное представление затухающих колебаний. Поскольку колебания не могут затухать моментально, время Δt необходимо до начала нового движения другой ногой.

$$T = -c - d\dot{\varphi} . \quad (3)$$

Для решения описанных выше дифференциальных уравнений использовался решатель “ODE 23t” из пакета Simulink. На рис. 2 показана последовательность движений робота при выполнении одного шага.

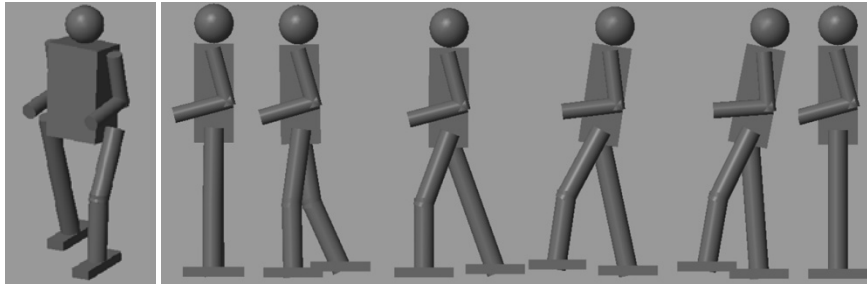


Рис. 2. Модель робота в Simulink и шаг робота. Робот движется справа налево

Плавность походки и ее устойчивость говорит о правильном выборе параметров симуляции, корректно составленной модели робота и верно реализованном алгоритме локомоции робота. Данный алгоритм локомоции позволяет роботу передвигаться со скоростью 0,3-0,4м/с, график скорости робота показан на рис. 3.

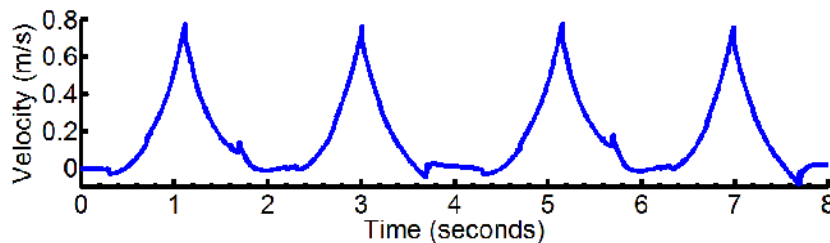


Рис. 3. Поступательная скорость торса робота

В начале каждого шага скорость тела равна нулю. Значения крутящих моментов, подаваемых на тазобедренный и коленный суставы правой ноги показаны на рис. 4.

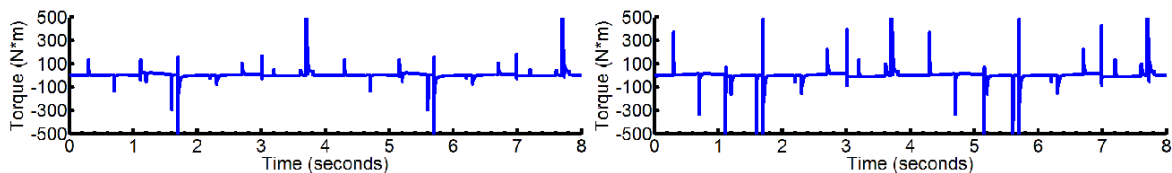


Рис. 4. Момент сил в правом коленном (слева) и тазобедренном суставе (справа)

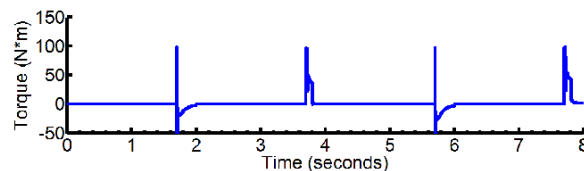


Рис. 5. Момент сил в правой стопе

Симуляция показывает, что максимальный крутящий момент, достигаемый в двигателях, равен примерно 500 Н·м в тазобедренном суставе и 300 Н·м в коленном суставе. В то же время видны скачки значений крутящего момента, вызванные скачками силы реакции опоры. Значение крутящего момента в стопе приведено на рис. 5. Как и ожидалось, крутящий момент по-

дается в последней фазе движения ноги робота, для того чтобы компенсировать поступательное движение робота вперед. В данной симуляции длительность одного шага равна 2 секундам и между шагами есть пауза в 0,5 секунды, необходимая для полной остановки робота.

Заключение

Статья описывает математическое моделирование системы управления (СУ) и симуляцию прямохождения робота AR601-М с использованием данной СУ. Моделирование и симуляции были осуществлены в среде MATLAB/Simulink с использованием пакета SimMechanics. Созданный алгоритм СУ прямохождения основан на методе базовых компонент ходьбы. Был проведен анализ походки робота, оценена скорость движения и максимальные моменты сил на осях. Плавность походки и ее устойчивость говорят о правильном выборе параметров моделирования и симуляции прямохождения, корректно составленной модели робота и верно реализованном алгоритме передвижения робота. Представленная модель является отправной точкой для последующего улучшения как модели симуляции, так и алгоритмов прямохождения и подходов управления роботом.

Исследование было поддержано Министерством образования и науки Российской Федерации по федеральной целевой программе "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" (Соглашение 14.609.21.0004, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI60914X0004), а также индустриальным партнером проекта ПАО НПО «Андроидная Техника».

Список литературы

1. Официальный сайт Gazebo [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.gazebosim.org/>.
2. Официальный сайт V-REP [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.coppeliarobotics.com/>.
3. Официальный сайт Matlab/Simmechanics [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.mathworks.com/products/simmechanics/>.
4. Goldsmith W. Impact: the theory and physical behavior of colliding solids. Courier Dover Publications, 2001.
5. Hunt K.H., Crossley F.R.E., Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact. ASME J. of Applied Mechanics, 42(2), 1975. – pp. 440–445.
6. Denk J., Schmidt G., Synthesis of walking primitive databases for biped robots in 3-D environments. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 2003, Vol. 1. – pp. 1343–1349.