

УДК 004.896

Р.Р. Хусаинов, научный сотрудник

А.А. Климчик, начальник лаборатории интеллектуальных робототехнических систем, PhD

Е.А. Магид, профессор, PhD

АНО ВО "Университет Иннополис", г. Иннополис, Россия,

ИТИС, Казанский Федеральный Университет, г. Казань, Россия

r.khusainov@innopolis.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Введение

В настоящее время для мировой науки разработка двуногих шагающих роботов (ДШР) становится передовым научно-техническим направлением, в котором проводятся масштабные исследования, соревнования и публикуется огромное количество работ. Одним из толчков к ускорению работ по исследованию человекоподобных роботов явились недавние радиационные аварии на атомных станциях Фукусимы (в марте 2011 г.), вызванные сильнейшим в истории Японии землетрясением и последовавшего за ними цунами, когда стало понятно, что мировой общественности остро необходимы роботы, способные передвигаться, функционировать и выполнять определенную работу в рассчитанной, в первую очередь, на человека среде. Помимо роботов, функционирующих в условиях неблагоприятной окружающей среде, в ближайшие десятилетия мы увидим широкое распространение социальных, образовательных роботов, а также роботов-помощников в различных домашних делах. Антропоморфные домашние роботы-помощники должны взаимодействовать с человеком, что накладывает определенные требования на робота, в том числе требования к обеспечению безопасности и модели социального поведения, включая визуальное восприятие робота человеком. Однако, для выполнения вышеперечисленных задач роботу также необходимы навыки передвижения внутри помещений, умение пользоваться существующей инфраструктурой и управлять изначально спроектированными для человека устройствами. Для того, чтобы обеспечить необходимую многофункциональность и гибкость, робот должен иметь структуру тела и механику, максимально приближенную к человеческой. Именно ДШР наиболее близко соответствует таким требованиям и имеет возможность работать и перемещаться в обычных для человека условиях: перешагивать препятствия, передвигаться по пересеченной местности, подниматься по лестницам, открывать двери, нажимать на ручки, рычаги, кнопки, и т.п. Подобные действия не могут быть в полной мере осуществлены колесными или гусеничными роботами. Поэтому ДШР являются практически единственным универсальным типом робототехнических систем, одинаково хорошо способных выполнять многочисленные и абсолютно разнородные задачи, и стабильное динамическое перемещение ДШР при высокой энергоэффективности становятся их критически важными свойствами.

Кинематическая и динамическая модель робота

На рис. 1 представлен робот AR601M и его кинематическая структура. Робот имеет суммарно 41 активную степень свободы: по 6 на каждую ногу, по 7 на каждую руку, одна степень на вращение туловища, 4 степени в голове и 10 степеней на пальцы рук. Общий вес робота 65 кг. Основной упор в работе по стабильной походке делался на работу с ногами робота. Более подробное описание робота приведено в [1].

На первом этапе было предложено решение задачи обратной кинематики для ног робота. Задача требует нахождения шести углов в суставах для каждой из ног при заданных положениях и ориентациях стопы и туловища робота. Доказано, что если три последовательные оси манипулятора пересекаются в одной точке, то существует аналитическое решение задачи обратной кинематики. В нашей схеме (рис. 1) мы видим, что это условие выполняется

для тазобедренных суставов. Задавая матрицу преобразования из глобальной системы координат в систему координат туловища как T_t и матрицу преобразования из глобальной системы координат в систему координат стопы как T_f , можно записать матрицу преобразования из системы координат стопы в систему координат туловища как $T_{ft} = T_t T_f^{-1}$. С другой стороны $T_{ft} = T_1(\theta_1)T_2(\theta_2)T_3(\theta_3)T_4(\theta_4)T_5(\theta_5)T_6(\theta_6)$, где $\theta_1 \dots \theta_6$ углы в суставах начиная со стопы. Так как последние три угла в бедренном суставе никак не влияют на позицию центра бедренного сустава (точка пересечения трех осей вращения), то используя координаты этой точки находятся три первых угла $\theta_1, \theta_2, \theta_3$. Далее эти углы подставляются в матрицу T_{ft} и сравниваются матрицы вращения для нахождения оставшихся углов. Суммарно такое решение выдает 8 возможных конфигураций ноги, анализируя которые, выбирается нужное. Таким образом для данной кинематической структуры робота возможно найти точное аналитическое решение, что заметно облегчает дальнейшие расчеты.

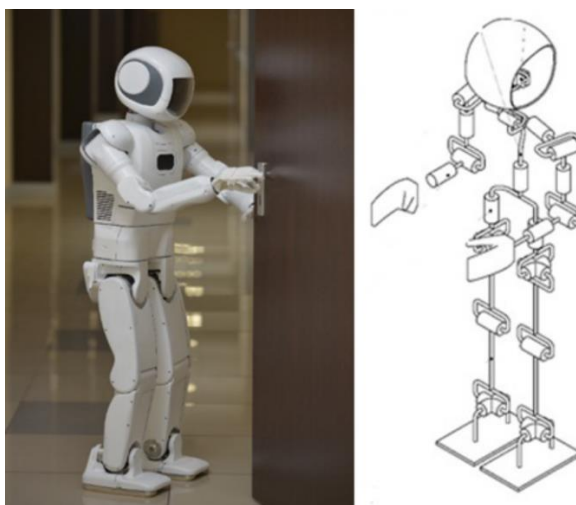


Рис. 1. Робот AR601M и его кинематическая схема

При решении задач оптимизации параметров шага с точки зрения энергоэффективности и стабильности решались уравнения динамики отдельно в сагиттальной и фронтальной плоскостях. При этом нами был использован итеративный метод Ньютона-Эйлера.

Устойчивость походки робота

В целом можно выделить два вида стабильности походки робота: статическая и динамическая. Статическая стабильность обеспечивается путем сохранения проекции центра тяжести робота в площади опоры. Однако такой подход работает лишь при малых скоростях, где можно пренебречь динамическими эффектами движения. Если же рассматривать критерии динамической стабильности для двуногого шагающего робота, то наиболее проверенным и широко используемым критерием является точка нулевого момента (ТНМ) [2]. ТНМ определяется как точка, в которой все приложенные силы и моменты со стороны поверхности контакта могут быть сведены к общей силе (рис. 2). Другими словами, это способ определяет специальную точку, где горизонтальные моменты сил реакции опоры равны нулю. Для того, чтобы поддержать баланс ДШР, его ТНМ должна лежать в пределах заданной области устойчивости. Этот подход играет роль критерия при анализе устойчивости движения двуногого робота и может рассматриваться как динамический аналог критерия центра масс для статического анализа устойчивости.

Таким образом для достижения динамически устойчивого движения робота необходимо задать такое движение робота, что положение точки ТНМ будет находиться в полигоне контакта.

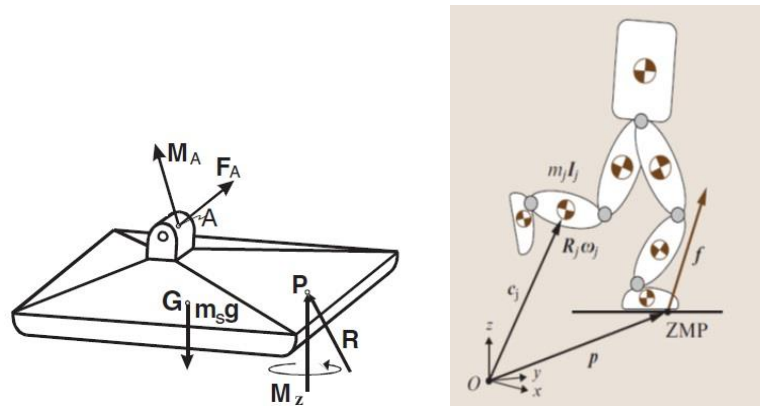


Рис. 2. Определение точки нулевого момента, как критерия устойчивости

В общем случае (см. рис. 2) координаты ТНМ могут быть выражены через общий импульс и момент импульса следующим образом [3]:

$$p_x = \frac{Mgx + p_z \dot{P}_x - \dot{L}_y}{Mg + P_z}, p_y = \frac{Mgy + p_z \dot{P}_y - \dot{L}_x}{Mg + P_z} \quad (1)$$

где M - полная масса робота, (x, y, z) - координаты центра масс робота, P - полный импульс движения, L - полный момент импульса движения робота. Однако чаще всего достаточно использовать упрощенную физическую модель робота. В нашей работе используется модель перевернутого физического маятника, в которой координаты ТНМ находятся из уравнений движения центра масс робота как:

$$p_x = x_{CoM} - \frac{z_{CoM}}{g} \ddot{x}_{CoM}, p_y = y_{CoM} - \frac{z_{CoM}}{g} \ddot{y}_{CoM} \quad (2)$$

Рассмотрим алгоритмы, обеспечивающие устойчивое движения робота по вышеописанным критериям.

Алгоритм управления движением робота

Структура алгоритма представлена на рисунке 3. Входом в алгоритм являются параметрически заданная кривая движения, максимальная длина шага, максимальный угол поворота за шаг, начальное расстояние между стопами, время шага и отношение времени опоры на две ноги ко времени шага. Далее алгоритм планировки положения стоп определяет координаты центров положений стоп вдоль заданной кривой исходя из входных параметров. После определения нужных положений опорной стопы, рассчитываются желаемы траектории ТНМ а также траектории перемещаемой ноги. Траектория перемещаемой ноги задается циклоидой, что обеспечивает нулевые начальные и конечные скорости. Траектории движения туловища робота задается линейно-квадратичным контроллером с прогнозированием. Для этого запишем уравнения (2) в виде уравнений динамической системы:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (3)$$

$$p_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & z_{CoM}/g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix}$$

Далее дискретизируем систему

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) \\ p(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (4)$$

где A , B , C – матрицы, найденные из (3), k – дискретное время, $\mathbf{x} = (x, \dot{x}, \ddot{x})$ – вектор состояния, u – производная ускорения по времени и p – координата ТНМ. В работе [4] показано, что оптимальный управляющий сигнал u задается как:

$$u(k) = -G_i \sum_{i=0}^k e(k) - G_x x(k) - \sum_{j=1}^N G_p(j) p_{ref}(k+j) \quad (5)$$

где G_i , G_x и $G_p(j)$ являются коэффициентами, которые рассчитываются по теории оптимального управления систем, $e(k)$ – это ошибка ТНМ между желаемым значением и померенным значением. Таким образом, контроллер с прогнозированием состоит из трех слагаемых: интеграл погрешности ТНМ, обратная связь по вектору состояния \mathbf{x} и действие предварительного прогнозирования, которое учитывает будущие значения желаемой позиции ТНМ. После определения траекторий движения туловища в работе был реализован способ перемещения центра масс во фронтальной и сагиттальной плоскостях с учетом ограничений на углы в суставах бедра и стопы робота. А именно, были предложены зависимости наклона туловища от величины отклонения координаты центра масс от нулевой позиции.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления движением робота

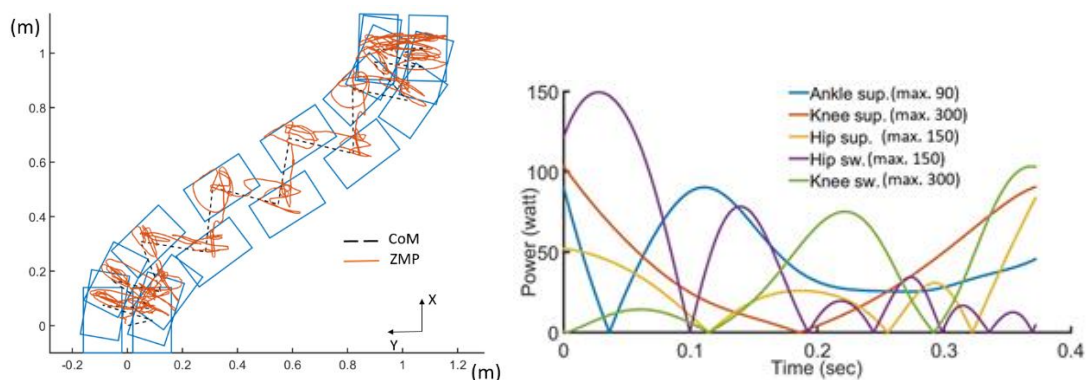


Рис. 4. Траектории центра масс и ТНМ при движении робота по кривой (слева), значения мощности в приводах ног при шаге (справа).

Таким образом предложенный алгоритм рассчитывает позицию и ориентацию перемещаемой ноги и туловища в каждый момент времени, полностью задавая движение. Используя предложенный в первой главе способ расчёта задачи обратной кинематики можно определить желаемые углы поворота на каждый из 12 суставов ног, тем самым реализуя

устойчивое перемещение робота. На основе вышеописанного алгоритма был разработан программный комплекс системы управления (ПКСУ) с использованием операционной системы для роботов ROS. 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. 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. На рис. 4 представлены траектории центра масс робота и ТНМ при устойчивом движении робота по кривой. Синими прямоугольниками обозначены положения стоп робота. Видно, что во время ходьбы координаты ТНМ не выходят за пределы площади стопы.

Оптимизация параметров походки

Решение задачи обратной динамики с помощью метода Ньютона-Эйлера было использовано для нахождения оптимальных параметров шага, таких как высота движения центра масс, длина и время шага, доля фазы опоры на обе ноги в шаге. В качестве целевой функции оптимизации служила скорость движения робота, в качестве ограничений служили максимальная мощность приводов и критерий динамической стабильности робота в виде координат ТНМ. Максимальная теоретическая скорость движения 0.69 м/с была достигнута для длины шага 0.34 м, времени шага 0.5 с, высоты движения центра масс 0.45 м и фазы опоры на обе ноги 25%. На рис. 4 справа показаны значения выделяемой мощности на приводах ноги робота. Видно, что критические значения мощности достигаются в приводе опорной стопы, а также в бедре передвигаемой ноги.

Заключение

В работе представлены разработанные алгоритмы системы управления движением антропоморфного робота AR-601M. Разработаны алгоритмы получения и обработки информации с датчиков робота. Разработаны алгоритмы расчета управляющих воздействий и управления исполнительными механизмами робота. Результаты экспериментов показывают, что робот успешно отрабатывает команды высокого уровня по перемещению. В будущем планируется интеграция системы локализации и картографирования робота с разработанными алгоритмами ходьбы.

Список литературы

1. 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.
2. Katić D, Vukobratović M. Survey of Intelligent Control Techniques for Humanoid Robots. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2003;37(2):117-41.
3. Ha T, Choi C-H. An effective trajectory generation method for bi-pedal walking. Robotics and Autonomous Systems. 2007;55(10):795-810.
4. 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.