

Р. Р. Хусаинов, науч. сотр. Центра развития робототехники, r.khusainov@innopolis.ru,

А. А. Климчик, руководитель Центра развития робототехники, PhD,
АНО ВО "Университет Иннополис", г. Иннополис, Россия,

Е. А. Магид, и. о. зав. кафедры интеллектуальной робототехники Высшей школы ИТИС, профессор, PhD,
Высшая Школа ИТИС, Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Метод управления движением двуногого шагающего робота по произвольной траектории

Статья описывает разработку метода управления передвижением двуногого шагающего робота по произвольной траектории на основе линейно-квадратичного регулятора с прогнозированием, использующего линейный фильтр Калмана для оценки состояния робота. Критерием устойчивости движения в работе выбрана точка нулевого момента. Проведены эксперименты на виртуальной модели робота AR601, подтверждающие эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: двуногий шагающий робот, устойчивость, точка нулевого момента, линейные дискретные системы, ROS, Gazebo, AR601

В настоящее время для мировой науки разработка двуногих шагающих роботов (ДШР) становится передовым научно-техническим направлением, в рамках которого проводятся масштабные исследования, соревнования и публикуется огромное число научных работ. Человекоподобные роботы вызывают огромный интерес благодаря своим способностям передвигаться, функционировать и выполнять работу в рассчитанной на человека среде. В ближайшие десятилетия мы увидим широкое распространение роботов, функционирующих в условиях неблагоприятной окружающей среды, социальных и образовательных роботов, а также роботов-помощников в различных домашних делах. Для выполнения вышеперечисленных задач роботу необходимы навыки передвижения внутри помещений, умение пользоваться существующей инфраструктурой и управлять изначально спроектированными для человека устройствами. Стабильное динамическое перемещение ДШР при высокой энергоэффективности становится их критически важным свойством.

За прошедшие десятилетия были исследованы теоретические основы устойчивого передвижения двуногих роботов [1–5], однако походка ДШР все еще остается недостаточно стабильной и энергетически эффективной по сравне-

нию с походкой человека [6]. Дополнительной сложностью при решении задачи управления ДШР является необходимость переработки существующих алгоритмов под каждую конкретную модель ДШР с учетом имеющихся у ДШР степеней свободы, механических ограничений, типа используемых приводов, числа, свойств и расположения датчиков и других особенностей ДШР. Целью данной работы является разработка метода управления движением нового российского полноразмерного двуногого шагающего робота серии AR601 на основе контроля динамического равновесия. Выделим свойства антропоморфной платформы AR601, влияющие на разработку метода управления роботом:

1. Управление приводами робота осуществляется по позиции с помощью PI регулятора. Это означает, что для точного следования по траектории необходимо работать в "жестком" режиме (с высокими коэффициентами P), что влияет на поведение робота при взаимодействии с твердой поверхностью. Иными словами, в данном роботе нет возможности напрямую регулировать момент в приводах, что позволило бы использовать адаптивные алгоритмы с более "мягким" контактом.

2. Кинематические особенности робота, такие как плоская стопа, отсутствие независимых

степеней свободы управления наклоном туловища, ограниченность углов поворота в суставе.

3. Недостаточная жесткость голеностопного сустава робота ввиду наличия силомоментного датчика в стопе и возникающие по этой причине колебания робота в фазе опоры на одну ногу.

4. Возможность измерения сил и моментов взаимодействия робота с поверхностью, ускорений и ориентации туловища робота.

Дальнейшая структура статьи организована следующим образом: в следующем разделе дается краткое описание робота AR601 и приводится его кинематическая модель, далее рассматривается используемый в работе критерий устойчивости движения робота, затем обсуждается предлагаемый алгоритм управления ходьбой ДШР, далее приводятся экспериментальные результаты работы алгоритма. В последнем разделе сформулированы выводы.

Описание робота AR601 и его кинематическая модель

Полномасштабный антропоморфный робот AR601 производится российской компанией ПАО "Андроидная техника" [7] и является одной из моделей популярной в России линейки ДШР AR600 [8–10]. На рис. 1 представлен робот AR601 и его кинематическая структура. Робот имеет суммарно 41 активную степень свободы: по шесть на каждую ногу, по семь на каждую руку, одна степень на вращение туловища, четыре степени на шею и 10 степеней на пальцы рук. Каждая степень свободы AR601 приво-

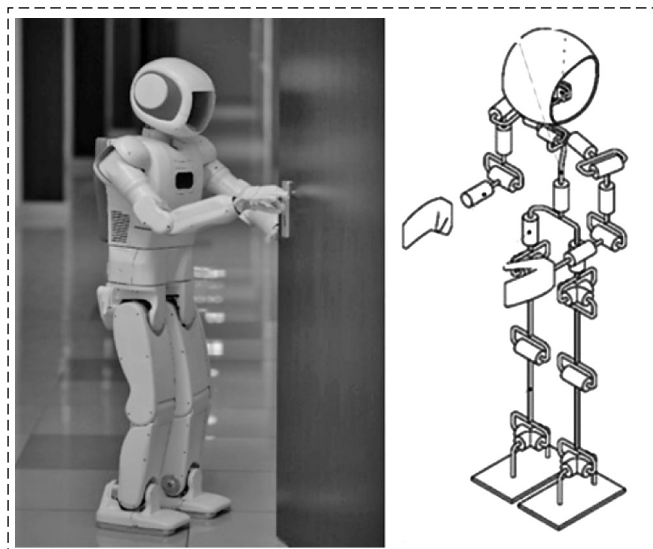


Рис. 1. Робот AR601-M и его кинематическая схема

дится в движение с помощью электродвигателя. Общая масса робота 65 кг. Более подробное описание робота приведено в работе [11].

Следует упомянуть роль движения рук в процессе движения ДШР. Существуют примеры работ [12], где авторы использовали движение манипуляторов в процессе ходьбы. Однако, на наш взгляд, это усложняет систему управления роботом, при этом не давая кардинальных изменений устойчивости походки. Поэтому в нашей работе упор сделан на работу с педикуляторами робота, а верхняя часть робота считается одним звеном. На первом этапе было предложено решение обратной задачи 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 обратной задачи кинематики [13]. 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 $T_{ft} = T_t T_f^{-1}$. Вместе с тем $T_{ft} = T_1(\theta_1)T_2(\theta_2)T_3(\theta_3)T_4(\theta_4)T_5(\theta_5)T_6(\theta_6)$, где $\theta_1 \dots \theta_6$ — углы в суставах начиная с голеностопного сустава. Так как последние три угла в бедренном суставе никак не влияют на позицию центра бедренного сустава (точки пересечения трех осей вращения), то, используя координаты этой точки, можно найти 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 получаем восемь возможных конфигураций ноги, анализируя которые, выбираем нужное решение. Таким образом, для данной кинематической структуры робота можно найти точное аналитическое решение, что заметно облегчает дальнейшие расчеты.

Прямая задача кинематики в системе управления движением робота формулируется следующим образом: зная позицию и ориентацию системы отсчета, связанной со стопой робота в глобальной системе отсчета, длины звеньев и углы в суставах ноги, нужно най-

ти положение и ориентацию системы отсчета, связанной с туловищем робота. Задача сводится к перемножению матриц трансформации $T_t = T_f T_1(\theta_1) T_2(\theta_2) T_3(\theta_3) T_4(\theta_4) T_5(\theta_5) T_6(\theta_6)$ и извлечению положения и ориентации туловища из матрицы T_t .

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 широко используемым критерием является точка нулевого момента (ТНМ) [14]. ТНМ определяется как точка, в которой все приложенные силы и моменты со стороны поверхности контакта могут быть сведены к общей силе (рис. 2). Этот 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.

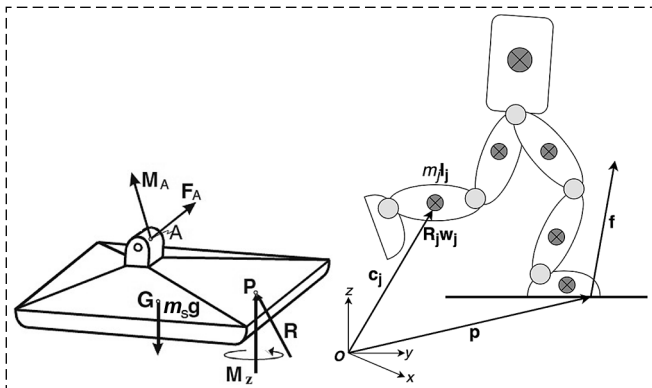


Рис. 2. Определение точки нулевого момента как критерия устойчивости [15]

На рис. 2 слева показаны силы, действующие на опорную стопу робота: суммарная сила F_A и момент M_A , действующие со стороны робота, суммарная сила R и вертикальный момент M_z , действующие со стороны опорной поверхности, сила тяжести $m_s g$. Справа показана внешняя сила f , приложенная в ТНМ p , и j -е звено робота с массой m_j , моментом инерции I_j , угловой скоростью w_j и матрицей вращения R_j .

В общем случае (рис. 2) координаты ТНМ могут быть выражены через общий импульс и момент импульса следующим образом [15]:

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

где $p = (p_x, p_y)$ — вектор координат ТНМ; M — полная масса робота; (x, y, z) — координаты центра масс робота; $P = \sum m_j \dot{c}_j$ — полный импульс движения; $L = \sum [c_j (m_j \dot{c}_j) + R_j I_j R_j^T w_j]$ — полный момент импульса движения робота; g — ускорение свободного падения. Однако чаще всего достаточно использовать упрощенную физическую модель робота. В нашей работе используется модель перевернутого физического маятника [16], в которой координаты ТНМ находятся из уравнений движения центра масс робота:

$$p_x = x_{CoM} - \frac{z_{CoM}}{g} \ddot{x}_{CoM};$$

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

где $(x_{CoM}, y_{CoM}, z_{CoM})$ — координаты центра масс робота. Рассмотрим алгоритмы, обеспечивающие устойчивое движение робота по вышеописанным критериям.

Алгоритм управления движением робота

Структура алгоритма, предложенного в работе, представлена на рис. 3. Входными параметрами алгоритма являются параметрически заданная произвольная кривая движения $(X(t), Y(t))$, максимальная длина шага L_{max} , максимальный угол поворота за шаг θ_{max} , начальное расстояние между стопами D , время шага T и отношение времени опоры на две ноги ко времени шага (т. е. время опоры на одну ногу) γ , высота движения центра масс робота H . Далее алгоритм планировки положения стоп опре-

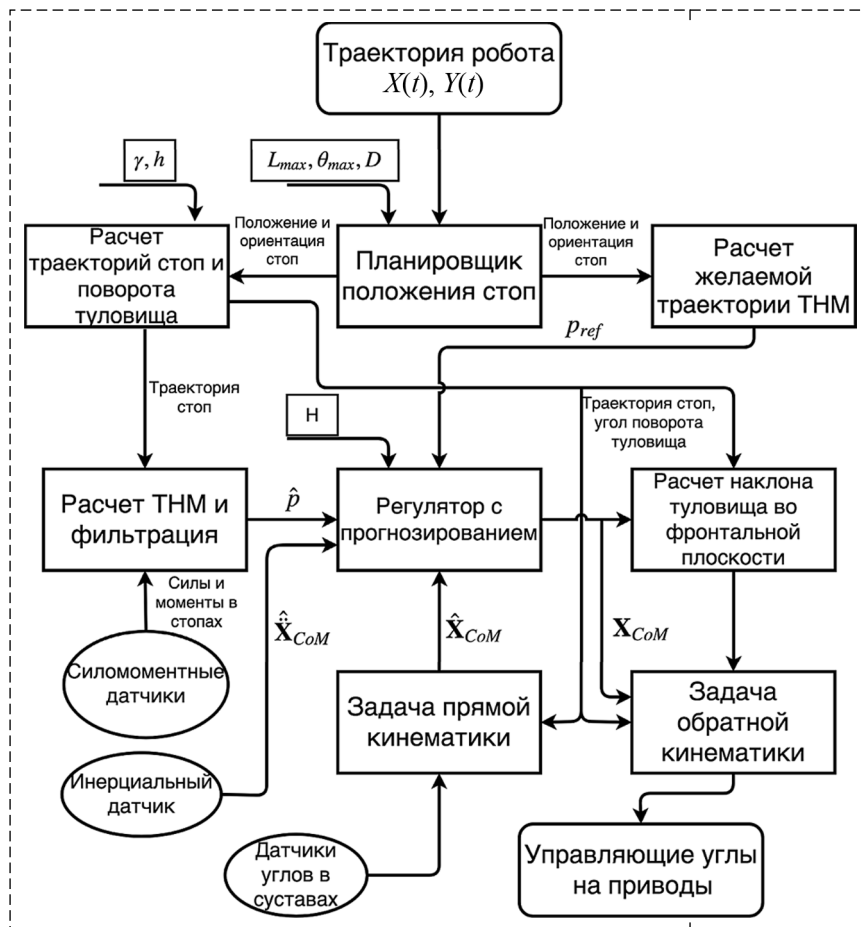


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления движением робота

деляет координаты центров положений стоп вдоль заданной кривой исходя из входных параметров. После определения нужных положений опорной стопы рассчитываются желаемые траектории ТНМ, а также траектории перемещаемой ноги. Траектория перемещаемой ноги задается циклоидой, что обеспечивает нулевые начальные и конечные скорости [17]. Траектория движения туловища робота задается линейно-квадратичным контроллером с прогнозированием [18]. Опишем работу контроллера для движения по оси x (для движения по оси y результаты аналогичны). Для этого запишем уравнения (2) для координаты x в виде уравнений динамической системы:

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

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

Уравнение для координаты y запишется аналогично. Далее дискретизируем систему (3):

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k); \quad (4)$$

$$p_x(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k),$$

где \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} — матрица и векторы, найденные из уравнения (3); k — дискретное время; $\mathbf{x} = (x, \dot{x}, \ddot{x})$ — вектор состояния; u — производная ускорения по времени; p_x — координата ТНМ. В работе [19] показано, что оптимальный управляющий сигнал u задается уравнением

$$u(k) = -G_i \sum_{m=0}^k e(m) - \mathbf{G}_x \mathbf{x}(k) - \sum_{j=1}^N G_p(j) p_{ref}(k+j), \quad (5)$$

где G_i , \mathbf{G}_x и $G_p(j)$ являются коэффициентами, которые рассчитываются из критериев оптимального управления системы, $e(k)$ — это ошибка ТНМ между

желаемым значением и измеренным значением, p_{ref} — желаемые значения координат ТНМ. 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 на N шагов вперед. Для оценки вектора состояния \mathbf{x} используем линейный фильтр Калмана [20], на вход которого подаются управляющий вектор \mathbf{u} , положение и ускорение центра масс. Положение центра масс рассчитывается из данных угловых датчиков в суставах педипуляторов решением прямой задачи кинематики. Значения ускорения центра масс рассчитываются из данных инерциального датчика робота.

Траектория движения центра масс рассчитывается в два этапа. На первом этапе идет оценка вектора состояния робота с использованием теории линейного фильтра Калмана. Запишем шаг экстраполяции вектора состояния системы $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ по оценке вектора состояния

$\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ и примененному вектору управления u_{k-1} с шага $(k-1)$ на шаг k :

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}u_{k-1}, \quad (6)$$

где u_{k-1} — управляющий вектор, рассчитанный регулятором на предыдущем шаге. Также запишем ковариационную матрицу для экстраполированного вектора состояния:

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_k\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}, \quad (7)$$

где \mathbf{A} , \mathbf{B} определены в уравнениях (4); \mathbf{Q} — ковариационная матрица, описывающая случайный характер эволюции динамической системы (4). Отклонение полученного на шаге k наблюдения от наблюдения, ожидаемого при проведенной экстраполяции, имеет вид

$$\hat{\mathbf{y}}_k = \begin{bmatrix} x_{CoM}^{enc} \\ \ddot{x}_{CoM}^{imu} \end{bmatrix} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-; \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где \mathbf{H} — матрица наблюдений, x_{CoM}^{enc} , \ddot{x}_{CoM}^{imu} — положение и ускорение центра масс, измеренные соответственно с помощью показаний с энкодеров и расчета прямой задачи кинематики и показаний акселерометра. Ковариационная матрица для вектора отклонения имеет вид

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}\mathbf{P}_k^-\mathbf{H}^T + \mathbf{R}, \quad (9)$$

где \mathbf{R} — ковариационная матрица ошибки измерений. Оптимальная по Калману [20] матрица коэффициентов усиления:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^-\mathbf{H}^T\mathbf{S}_k^{-1}. \quad (10)$$

Тогда оценка вектора состояния системы равна

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k\hat{\mathbf{y}}_k \quad (11)$$

и ковариационная матрица оценки вектора состояния системы

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H})\mathbf{P}_k^-, \quad (12)$$

где \mathbf{I} — единичная матрица. При определении матрицы \mathbf{Q} случайные ошибки элементов вектора состояния считаются некоррелированными, т. е. $\mathbf{Q} = \text{diag}(\sigma_x^2, \sigma_{vx}^2, \sigma_{ax}^2)$. Матрица \mathbf{R} задается через среднеквадратичные ошибки измерений положения и ускорения центра масс как $\text{diag}(\sigma_{xCoM}^2, \sigma_{\ddot{x}CoM}^2)$. На втором этапе по оценен-

ному вектору состояния $\hat{\mathbf{x}}$ и фильтрованному значению ТНМ \mathbf{p}^f , рассчитанному с помощью силомоментных датчиков на стопах робота, найдем управляющий вектор, и по нему рассчитаем вектор состояния в следующий момент времени:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) &= -G_i \sum_{i=0}^k \mathbf{e}(k) - \mathbf{G}_x \hat{\mathbf{x}}(k) - \sum_{j=1}^N G_p(j) \mathbf{p}_{ref}(k+j); \\ \mathbf{e}(k) &= \mathbf{p}^f(k) - \mathbf{p}^{ref}(k); \\ \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k). \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом рассчитываются положения центра масс в каждый следующий момент времени $k+1$. Для полного определения положения туловища необходимы шесть координат. Регулятор рассчитывает координаты центра масс робота (x, y, z). Вращение туловища вокруг оси Z задается положением стоп. Далее, исходя из допущения, что туловище робота вертикально в сагиттальной плоскости [17], остается найти наклон туловища во фронтальной плоскости.

На рис. 4 представлено два случая, когда робот, стоя на двух ногах, отклоняется вправо на значение Δy . В первом случае (слева) туловище остается в вертикальном положении. При этом в осях, показанных на рис. 4 слева стрелками, могут достигаться границы угла поворота сустава робота. В этом случае центр масс не смо-

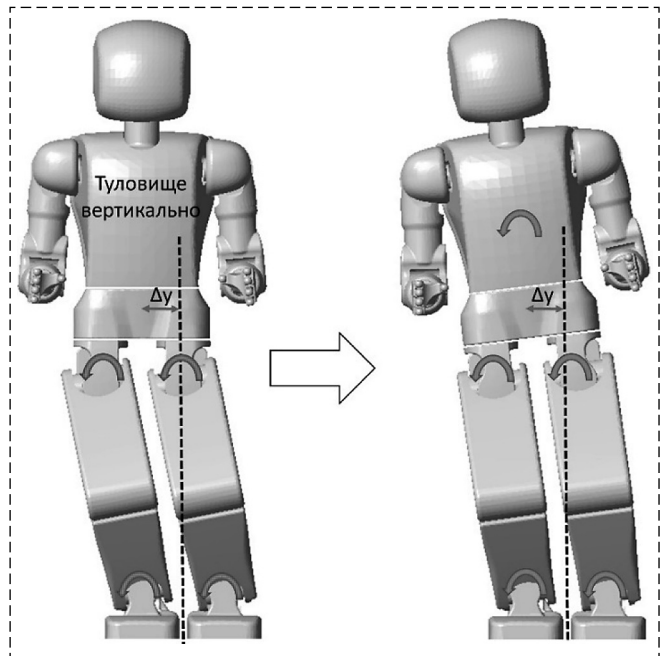


Рис. 4. Смещение робота в сторону с сохранением вертикальности и поворотом туловища

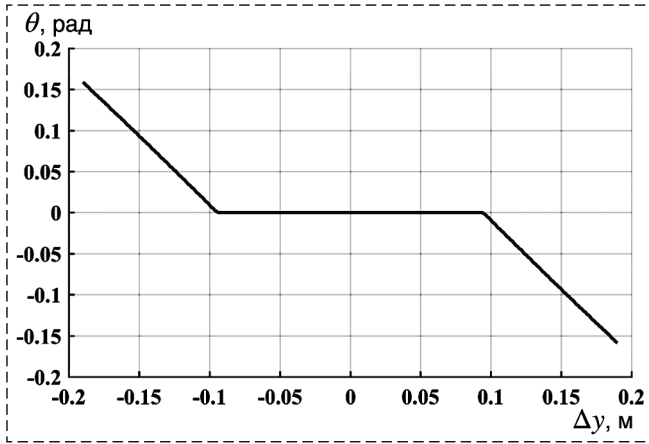


Рис. 5. Зависимость угла поворота туловища от смещения робота по оси y

жет отклониться на необходимое значение, что может повлиять на эффективность алгоритма управления. Следовательно, при отклонении робота необходимо вращать туловище на некоторый угол, как показано на рис. 4 справа.

Для того чтобы найти угол поворота туловища, были проведены следующие расчеты. Для данного значения Δy с помощью обратной задачи кинематики был найден интервал всех возможных наклонов туловища, при которых углы в суставах не выходят за границы. Оптимальным углом наклона считался наименьший по модулю угол для обеспечения максимальной вертикальности туловища. На рис. 5 представлена рассчитанная зависимость угла отклонения от величины Δy , которую можно аппроксимировать симметричной кусочно-линейной функцией вида

$$\begin{aligned} \theta &= 0 \text{ при } \Delta y \geq -0,093 \text{ и } \Delta y \leq 0,093; \\ \theta &= -1,64(\Delta y + 0,093) \text{ при } \Delta y < -0,093; \\ \theta &= -1,64(\Delta y - 0,093) \text{ при } \Delta y > 0,093. \end{aligned} \quad (14)$$

При движении робота по криволинейной траектории за отклонение Δy берется расстояние центра масс от серединной линии между стопами. Таким образом, на выходе блока имеем угол поворота туловища во фронтальной плоскости движения робота.

Предложенный алгоритм рассчитывает позицию и ориентацию перемещаемой ноги и туловища в каждый момент времени, полностью задавая движение. Используя предложенный ранее способ расчета обратной задачи кинематики, можно определить желаемые углы поворота для каждого из 12 суставов ног, тем самым реализуя устойчивое перемещение робота.

На основе вышеописанного алгоритма был разработан программный комплекс системы управления с использованием робототехнической операционной системы ROS [21]. Алгоритмы управления были отработаны на виртуальной модели робота. С этой целью CAD модель робота AR601 была интегрирована в виртуальную среду симулятора Gazebo, в которой проводилось исследование и тестирование движений робота (рис. 6).

Максимальная скорость движения в симуляторе достигалась при времени шага 1 с и длине шага 0,15 м [11]. На рис. 7 показаны временные зависимости координаты центра масс, желаемого и измеренного значения ТНМ для сагиттальной и фронтальной плоскостей. Коэффициенты регулирования равнялись $Q_e = 1$, $R = 10^{-6}$, $Q_x = \text{diag}(0, 0, 1)$. Из графиков видно, что значения измеренных ТНМ в сагиттальной плоскости лежат внутри площади опорной стопы. Однако во фронтальной плоскости ТНМ на небольших интервалах по времени выходит за площадь опорной стопы, что говорит о слабой устойчивости робота в этом направлении при движении на максимальной скорости.

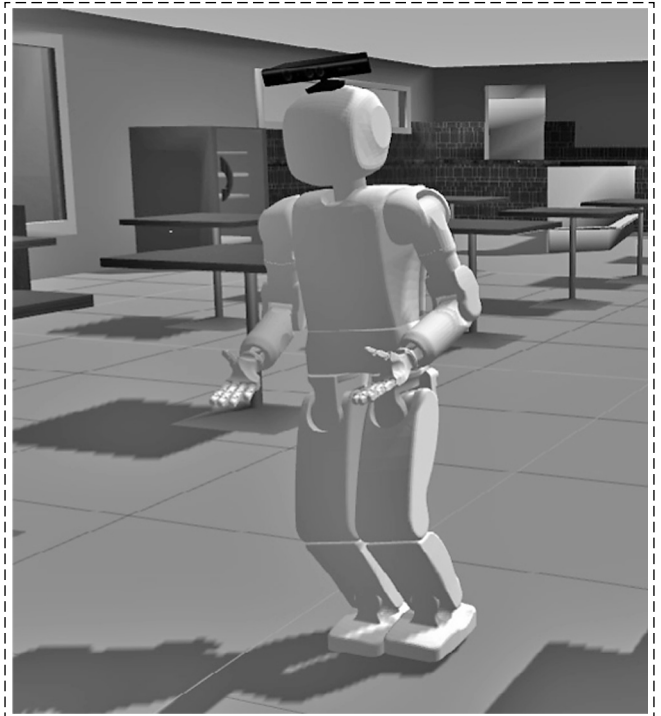


Рис. 6. Модель робота AR601 в Gazebo

С использованием алгоритма генерации положения стоп для движения по кривым траекториям были проведены эксперименты по движению робота вдоль окружности радиуса 0,5 м. Максимальная длина шага при этом равнялась 10 см, максимальный угол поворота за шаг составлял 10° . На рис. 8 приведены положения стоп и траектория измеренного ТНМ.

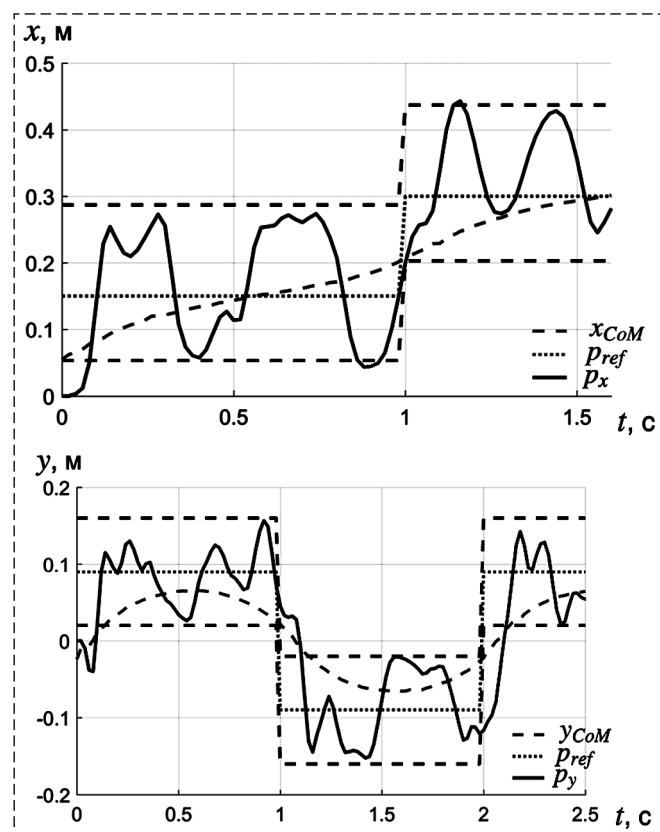


Рис. 7. Временные зависимости желаемых и измеренных значений ТНМ и положения центра масс по оси x (сверху) и y (снизу). Штриховыми прямоугольниками обозначены границы стоп

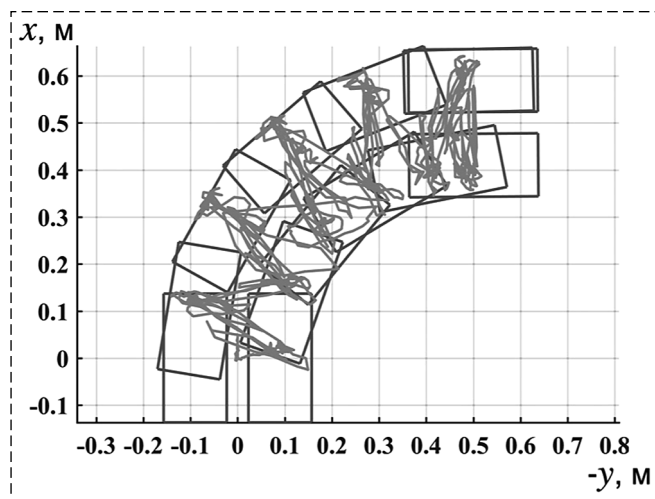


Рис. 8. Траектории центра масс и ТНМ при движении робота по кривой

Заключение

В работе представлен метод управления движением антропоморфного робота по произвольной траектории с использованием линейно-квадратичного регулятора с прогнозированием и линейного фильтра Калмана для оценки состояния робота. Проведены эксперименты на виртуальной модели робота в среде динамического моделирования Gazebo. Максимальная скорость движения по прямой равнялась 15 см/с. Показана применимость метода для движения по криволинейным траекториям. Результаты экспериментов показывают, что робот успешно обрабатывает команды высокого уровня по перемещению. В будущем планируется интеграция системы локализации и картографирования робота с разработанными алгоритмами ходьбы.

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 14.606.21.0007, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI60617X0007), а также индустриальным партнером проекта ПАО НПО "Андроидная Техника".

Список литературы

1. На Т., Choi C.-H. An effective trajectory generation method for bipedal walking // *Robotics and Autonomous Systems*. 2007. Vol. 55, N. 10. P. 795–810.
2. Kim J.-Y., Kim Y.-S. Human-like gait generation for biped android robot using motion capture and zmp measurement system // *International Journal of Humanoid Robotics*. 2010. Vol. 07, N. 04. P. 511–534.
3. Strom J., Slavov G., Chown E. Omnidirectional Walking Using ZMP and Preview Control for the NAO Humanoid Robot // *RoboCup 2009: Robot Soccer World Cup XIII* / Baltes J. и др. Springer Berlin Heidelberg, 2010. P. 378–389.
4. Piperakis S., Orfanoudakis E., Lagoudakis M. G. Predictive control for dynamic locomotion of real humanoid robots // *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2014. P. 4036–4043.
5. Vukobratović M., Borovac B. Zero-moment point — thirty five years of its life // *International Journal of Humanoid Robotics*. 2004. Vol. 01, N. 01. P. 157–173.
6. Kajita S., Hirukawa H., Harada K., Yokoi K. Introduction to humanoid robotics. Springer, 2014.
7. Андроидная техника. URL: <https://npo-at.com/> (дата обращения: 08.12.2017)
8. Сиразетдинов Р. Т., Деваев В. М., Камалов А. Р., Кацевман Е. М. Программный комплекс моделирования и виртуализации антропоморфного робота AR601 на основе систем ROS и Gazebo // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция "Имитационное моделирование, теория и практика: труды конференции. 2015. Т. 2. С. 328–331.

9. Горобцов А., Андреев А., Тарасов П., Скориков А., Карпов С. Синтез устойчивых квазистатических режимов шагания антропоморфного робота // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 6 (185).
10. 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. 2013. № 4.
11. Khusainov R., Afanasyev I., Sabirova L., Magid E. Bipedal robot locomotion modelling with virtual height inverted pendulum and preview control approaches in Simulink environment // Journal of robotics networking and artificial life. 2016. Vol. 3, N. 3. P. 182–187.
12. Hubicki C. M., Hereid A., Grey M. X., Thomaz A. L., Ames A. D. Work those arms: Toward dynamic and stable humanoid walking that optimizes full-body motion // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2016. P. 1552–1559.
13. Peiper D. L. The kinematics of manipulators under computer control. 1968, DTIC Document.
14. Vukobratović M., Stepanenko J. On the stability of anthropomorphic systems // Mathematical biosciences. 1972. Vol. 15, N. 1–2. P. 1–37.
15. Siciliano B., Khatib O. Springer handbook of robotics. Springer, 2016.
16. Albert A., Gerth W. Analytic Path Planning Algorithms for Bipedal Robots without a Trunk // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2003. Vol. 36, N. 2. P. 109–127.
17. Khusainov R., Afanasyev I., Magid E. Anthropomorphic robot modelling with virtual height inverted pendulum approach in Simulink: step length and robot height influence on walking stability // Int. Conf. on Artificial Life and Robotics. 2016.
18. Kajita S., Kanehiro F., Kaneko K., Fujiwara K., Harada K., Yokoi K., Hirukawa H. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point // Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on. 2003. Vol. 2. P. 1620–1626.
19. Katayama T., Ohki T., Inoue T., Kato T. Design of an optimal controller for a discrete-time system subject to previewable demand // International Journal of Control. 1985. Vol. 41, N. 3. P. 677–699.
20. Grewal M. S. Kalman filtering // International Encyclopedia of Statistical Science. Springer Berlin Heidelberg, 2011. P. 705–708.
21. ROS. URL: <http://www.ros.org/> (дата обращения: 08.12.2017).

A Method for Bipedal Robot Locomotion Control along an Arbitrary Trajectory

R. R. Khusainov, r.khusainov@innopolis.ru, A. S. Klimchik, a.klimchik@innopolis.ru,
Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation

E. A. Magid, evgeni.magid@gmail.com,
Higher Institute of Information Technology & Information Systems
Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

Corresponding author: Khusainov Ruslan R., Researcher,
Innopolis University, Innopolis, 420500, Russia,
e-mail: r.khusainov@innopolis.ru

Accepted on December 19, 2017

This paper presents an algorithm for stable bipedal walking control along an arbitrary curve. The algorithm starts with a foot planner, which takes a parametrically defined desired path as an input and calculates feet positions and orientations at each step. Zero moment point (ZMP) concept is used for robot stability control. The dynamics of the robot is modeled as a running cart on a table. Given the reference ZMP trajectory, ZMP tracking servo controller based on preview control theory is used to calculate robot's center of mass (CoM) trajectory. The preview controller is made of three terms: the integral error of ZMP, the state feedback proportional to a current state vector and the preview action which takes into account future values of the desired ZMP position. We propose robot's state estimator based on linear Kalman filter with measured CoM acceleration and position as system inputs. Swing foot trajectories are calculated using trigonometric functions, since they are simple and can provide zero velocities at contact moments. We put some additional constraints on a system by assuming that there is no forward-backward inclination of the robot trunk and swing foot is always parallel to the ground. To avoid kinematic limits in hip and ankle roll joints we calculate a minimal angle to rotate robot trunk in frontal plane. After position and orientation of robot trunk and swing foot are found we apply inverse kinematics solution for robot legs to get robot joint angles. Finally, joint angles are sent to robot actuators.

Software package based on ROS operating system was developed for AR601 robot. Verification tests were executed with robot model in Gazebo simulator. The robot successfully completed series of experiments confirming modelling results.

Keywords: bipedal robot, stability, zero moment point, linear discrete systems, ROS, Gazebo, AR601

For citation:

Khusainov R. R., Klimchik A. S., Magid E. A. A Method for Bipedal Robot Locomotion Control along an Arbitrary Trajectory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no 1, pp. 633–641.

DOI: 10.17587/mau.19.633-641

References

1. Ha T., Choi C.-H. An effective trajectory generation method for bipedal walking, *Robotics and Autonomous Systems*, 2007, vol. 55, no. 10, pp. 795–810.
2. Kim J.-Y., Kim Y.-S. Human-like gait generation for biped android robot using motion capture and zmp measurement system,

International Journal of Humanoid Robotics, 2010, vol. 07, no. 04, pp. 511—534.

3. **Strom J., Slavov G., Chown E.** Omnidirectional Walking Using ZMP and Preview Control for the NAO Humanoid Robot, RoboCup 2009: Robot Soccer World Cup XIII / Baltes J. i dr. Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 378—389.

4. **Piperakis S., Orfanoudakis E., Lagoudakis M. G.** Predictive control for dynamic locomotion of real humanoid robots, 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014, pp. 4036—4043.

5. **Vukobratović M., Borovac B.** Zero-moment point — thirty five years of its life, International Journal of Humanoid Robotics, 2004, vol. 01, no. 01, pp. 157—173.

6. **Kajita S., Hirukawa H., Harada K., Yokoi K.** Introduction to humanoid robotics. Springer, 2014.

7. **Androidnaya tekhnika**, available at: <https://npo-at.com/>.

8. **Sirazetdinov R. T., Devaev V. M., Kamalov A. R., Kacemman E. M.** Programmy kompleks modelirovaniya i virtualizatsii antropomorfno robotov AR601 na osnove sistem ros i gazebo (Software package for modeling and virtualization of the anthropomorphic robot AR601 based on ROS and Gazebo systems), *Sed'maya vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Imitacionnoe modelirovanie, teoriya i praktika: trudy konferencii*, vol. 2, pp. 328—331 (in Russian).

9. **Gorobcov A., Andreev A., Tarasov P., Skorikov A., Karcov S.** Sintez ustojchivyykh kvazistaticheskikh rezhimov shaganiya antropomorfno robotov (Synthesis of stable quasi-static modes of walking of anthropomorphic robot), *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 6 (185) (in Russian).

10. **Lozhkin P. V., Tolstel' O. V.** Sozдание programmno-apparatnogo kompleksa, obespechivayushchego dinamicheskoe ravновесие i dvizhenie RTK AR-600 (Creation of a hardware-software complex providing dynamic balance and motion of the AR-600 RTK), *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*, 2013, no. 4 (in Russian).

11. **Khusainov R., Afanasyev I., Sabirova L., Magid E.** Bipedal robot locomotion modelling with virtual height inverted pendulum and preview control approaches in Simulink environment, *Journal of robotics networking and artificial life*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 182—187.

12. **Hubicki C. M., Hereid A., Grey M. X., Thomaz A. L., Ames A. D.** Work those arms: Toward dynamic and stable humanoid walking that optimizes full-body motion, *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016, pp. 1552—1559.

13. **Peiper D. L.** The kinematics of manipulators under computer control. 1968, DTIC Document.

14. **Vukobratović M., Stepanenko J.** On the stability of anthropomorphic systems, *Mathematical Biosciences*, 1972, vol. 15, no. 1—2, pp. 1—37.

15. **Siciliano B., Khatib O.** Springer handbook of robotics. Springer, 2016.

16. **Albert A., Gerth W.** Analytic Path Planning Algorithms for Bipedal Robots without a Trunk, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2003, vol. 36, no. 2, pp. 109—127.

17. **Khusainov R., Afanasyev I., Magid E.** Anthropomorphic robot modelling with virtual height inverted pendulum approach in Simulink: step length and robot height influence on walking stability, *Int. Conf. on Artificial Life and Robotics*, 2016.

18. **Kajita S., Kanehiro F., Kaneko K., Fujiwara K., Harada K., Yokoi K., Hirukawa H.** Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point, *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on*, vol. 2, 2003, pp. 1620—1626.

19. **Katayama T., Ohki T., Inoue T., Kato T.** Design of an optimal controller for a discrete-time system subject to previewable demand, *International Journal of Control*, 1985, vol. 41, no. 3, pp. 677—699.

20. **Grewal M. S.** Kalman filtering, *International Encyclopedia of Statistical Science*, Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 705—708.

21. **ROS**, available at: <http://www.ros.org/>.



17—19 июня 2019 года в Москве состоится

XIII Всероссийское совещание по проблемам управления,

посвященное 80-летию Института проблем управления
имени В. А. Трапезникова РАН

Сопредседатели программного комитета:

академик РАН Е. А. Микрин и член-корреспондент РАН Д. А. Новиков

Направления работы Совещания:

- ❖ Теория систем управления
- ❖ Управление подвижными объектами и навигация
- ❖ Интеллектуальные системы в управлении
- ❖ Управление в промышленности и логистике
- ❖ Управление системами междисциплинарной природы
- ❖ Средства измерения, вычислений и контроля в управлении
- ❖ Системный анализ и принятие решений в задачах управления
- ❖ Информационные технологии в управлении
- ❖ Проблемы образования в области управления: современное содержание и технологии обучения

Подробную информацию о Совещании смотрите на сайте

<http://vspu2019.ipu.ru>