DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-09

СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ДВУНОГИХ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Е. В. Страшнов[а], И. Н. Мироненко[б]

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

[а] ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0937-4052, ✍ strashnov_evg@mail.ru

[б] mironenko_in@mail.ru

Аннотация: рассматривается задача разработки методов и подходов для стабилизации движения двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. Актуальность данной задачи заключается в том, что тестирование и отработку алгоритмов управления роботом целесообразно проводить в виртуальной среде на виртуальной модели. Это позволит в дальнейшем уменьшить риск поломки реальных роботов и сформировать правильное экспертное мнение об их применимости для выполнения важных работ. Предлагаемые решения рассматриваемой задачи основаны на построении регулятора с обратной связью по показаниям виртуальных датчиков. В разработанном регуляторе обеспечение устойчивости движения робота реализуется с применением критерия точки нулевого момента и модели обратного маятника. При этом синтез управления двуногим шагающим роботом осуществляется с использованием скользящего режима. Такой подход не требует громоздких вычислений, решения нелинейных алгебраических уравнений и сложных матричных операций при реализации регулятора. Апробация предлагаемых в статье методов и подходов проводилась в системе виртуального окружения на примере выполнения роботом тушения пожара. Результаты апробации показали адекватность и эффективность предлагаемых решений для обеспечения равновесия двуногого шагающего робота в процессе его движения.

Ключевые слова: двуногий шагающий робот, стабилизация, точка нулевого момента, обратная связь, скользящий режим, система виртуального окружения.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00371.

Для цитирования: Страшнов Е. В., Мироненко И. Н. Стабилизация движения двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):75–83. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-09.

MOTION STABILIZATION OF BIPEDAL WALKING ROBOTS IN VIRTUAL ENVIRONMENT SYSTEMS

E. V. Strashnov[a], I. N. Mironenko[b]

Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation

[a] ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0937-4052, ✍ strashnov_evg@mail.ru

[b] mironenko_in@mail.ru

Abstract: the study is intended to develop methods and approaches for motion stabilization of bipedal walking robots in virtual environment systems. A virtual environment with virtual models is best suited for testing and refining robot control algorithms. This reduces the risk of the actual robot's breakdown and facilitates making expert opinions on the robot's applicability for critical operations. The proposed solutions use a controller with feedback from virtual sensors. The controller keeps the robot's motion stable using the zero moment point criterion, and the inverted pendulum model. The sliding mode control is used. This approach does not require extensive calculations, solving nonlinear algebraic equations, or complex matrix operations by the controller. The proposed approach was proven with a virtual environment for a fire-extinguishing robot. The simulation ensures the balance of a bipedal walking robot as it moves.

Keywords: bipedal walking robot, stabilization, zero moment point, feedback, sliding mode, virtual environment.

Acknowledgements: this study is supported by RFBR, project No. 20-07-00371.

Cite this article: Strashnov E. V., Mironenko I. N. Motion Stabilization of Bipedal Walking Robots in Virtual Environment Systems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):75–83. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-09.

Введение

В последние годы в связи с развитием робототехники повышенный интерес представляют человекоподобные (антропоморфные) двуногие шагающие роботы (ДШР) [1, 2]. Это связано с тем, что такие роботы перемещаются посредством ходьбы и адаптированы для выполнения работ в условиях, предназначенных для деятельности человека. В отличие от колесных и гусеничных роботов, ДШР обладают возможностью функционировать внутри помещений и зданий, перешагивать препятствия, подниматься по лестнице, открывать двери и т. п. В связи с этим ДШР могут быть применены в медицине, образовании, торговле, быту, где необходимо выполнять несложные рутинные и повторяющиеся работы. Также отдельным направлением является экстремальная робототехника [3], которая рассматривает набор задач, где непосредственное участие человека невозможно или опасно для его здоровья. Предполагается, что в будущем ДШР сможет заменить человека при ликвидации последствий техногенных аварий и катастроф, тушении пожаров, строительстве лунной базы и т.д. Для успешного выполнения рассмотренных работ ДШР должен обладать навыками перемещения внутри рабочего пространства без падения. Поэтому разработка систем управления движением робота с сохранением равновесия является важной и актуальной задачей.

Развитие компьютерных технологий и вычислительных средств привело к тому, что системы виртуального окружения и виртуальной реальности активно применяются во многих областях науки и техники, включая робототехнику. Идея заключается в том, что в системах виртуального окружения реальные объекты заменяются на их виртуальные аналоги с реализацией компьютерного моделирования этих объектов в виртуальной среде. Апробация системы управления в таких системах позволит в дальнейшем уменьшить риск поломки реальных роботов и сформировать правильное экспертное мнение об использовании ДШР для выполнения целевых работ.

Задаче разработки систем управления движением ДШР посвящено множество публикаций [4–12]. Одним из распространенных подходов для реализации устойчивости перемещения робота является критерий точки нулевого момента (ТНМ) [13]. Его идея состоит в том, что для обеспечения движения ДШР без падения необходимо и достаточно, чтобы ТНМ, в которой скомпенсированы горизонтальные моменты, находилась внутри опорной площадки. Методы и алгоритмы управления движением ДШР, которые базируются на концепции ТНМ, включают генерацию шаблона ходьбы робота и стабилизацию. Первая часть относится к построению желаемых траекторий движения центра масс и ног робота [5–7]. В свою очередь, задача стабилизации заключается в коррекции шаблона ходьбы для обеспечения равновесия робота. Для решения этой задачи широкое распространение получил линейно-квадратичный регулятор с прогнозированием [4, 8, 9], в котором используются будущие значения ТНМ шаблона ходьбы. Недостатком такого подхода является необходимость решения нелинейных алгебраических уравнений и оптимизации параметров ходьбы при построении регулятора. В работе [10] был предложен регулятор на основе показаний датчика сил и модели линейного обратного маятника с запаздыванием значений ТНМ. При этом для эффективной реализации регулятора коэффициенты обратной связи выбираются путем назначения полюсов передаточной функции замкнутой системы [11]. Альтернативный подход рассмотрен в [12] на примере построения регулятора второго порядка с применением скользящего режима. Несмотря на обилие различных решений, разработке методов и подходов управления ДШР в системах виртуального окружения не уделено должного внимания.

В настоящей работе рассматриваются методы и подходы для стабилизации ДШР в системах виртуального окружения. Предлагаемые решения основаны на синтезе регулятора с применением модели обратного маятника, описывающей зависимость координат ТНМ и координат центра масс робота. В разработанном регуляторе стабилизация осуществляется на основе релейного управления с обратной связью по показаниям виртуальных датчиков и коррекцией заданного шаблона ходьбы. Апробация предложенных в статье решений была проведена в программном комплексе виртуального окружения VirSim [14] на примере управления движением виртуальной модели ДШР.

Постановка задачи

Антропоморфный, или двуногий шагающий робот представляет собой механическое устройство, которое по своему строению подобно человеку. Виртуальная модель такого робота показана на рис. 1. В этом роботе манипуляторы (руки) служат для захвата и переноса объектов, а педипуляторы (ноги) — для его перемещения. Исполнительными устройствами ДШР являются электрические приводы, которые установлены в сочленениях робота. Также робот оснащен датчиками для измерения координат (положений и ориентаций) его составных частей, сил и моментов в стопах и углов поворотов в шарнирах. Задача управления движением ДШР заключается в обеспечении его перемещения с сохранением равновесия. При этом предполагается, что робот может взаимодействовать с объектами (выполнять захват и их перенос), а его движение происходит по ровной поверхности.

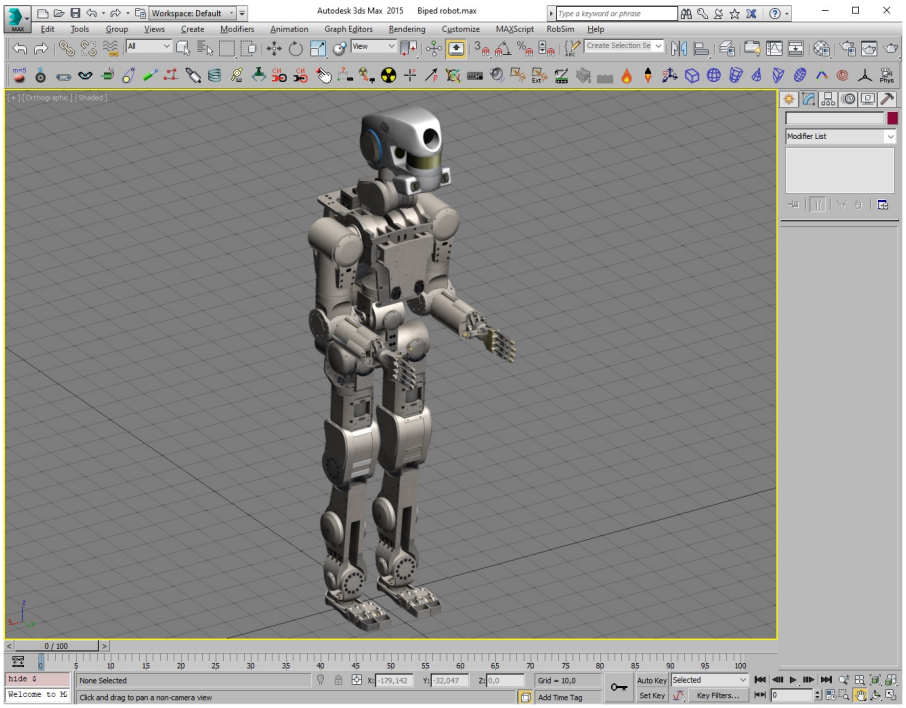


Рис. 1. *Виртуальная модель ДШР в системе компьютерного моделирования 3ds Max*

Предлагаемая система управления движением ДШР имеет структуру, которая показана на рис. 2. Управление роботом базируется на концепции критерия ТНМ для обеспечения его равновесия. Для этого реализуется вычисление координат ТНМ по показаниям датчиков в зависимости от типа контакта ног с поверхностью (одноопорная или двухопорная фаза). Так как полученные значения являются неточными, то для их фильтрации используются фильтры Баттерворта второго порядка [15]. Генерация шаблона ходьбы в рассматриваемой системе управления осуществляется в офлайн-режиме и включает расчет эталонных траекторий движения центра масс робота, его стоп и координат ТНМ. В свою очередь регулятор использует значения ТНМ в качестве входов, а на выходе формирует новые эталонные значения координат центра масс робота таким образом, чтобы равновесие робота сохранялось. Далее решается задача инверсной кинематики методом Левенберга–Марквардта [16] для вычисления целевых углов поворотов в шарнирах робота. Затем с помощью ПД-регуляторов осуществляется расчет напряжений, подаваемых на электроприводы робота, с обратной связью по показаниям датчиков углов в шарнирах.

Методы и подходы для генерации шаблона ходьбы ДШР, инверсной кинематики и синтеза ПД-регуляторов приведены в работах [17, 18]. Здесь же мы подробно рассмотрим метод вычисления ТНМ и реализацию синтеза регулятора для стабилизации робота.

Вычисление точки нулевого момента

В системе виртуального окружения вычисление координат ТНМ осуществляется посредством силомоментных датчиков, которые находятся в стопах ДШР. Рассмотрим расчет ТНМ для левой стопы робота (см. рис. 3). При контакте левой стопы с поверхностью на выходе датчиков формируется сила

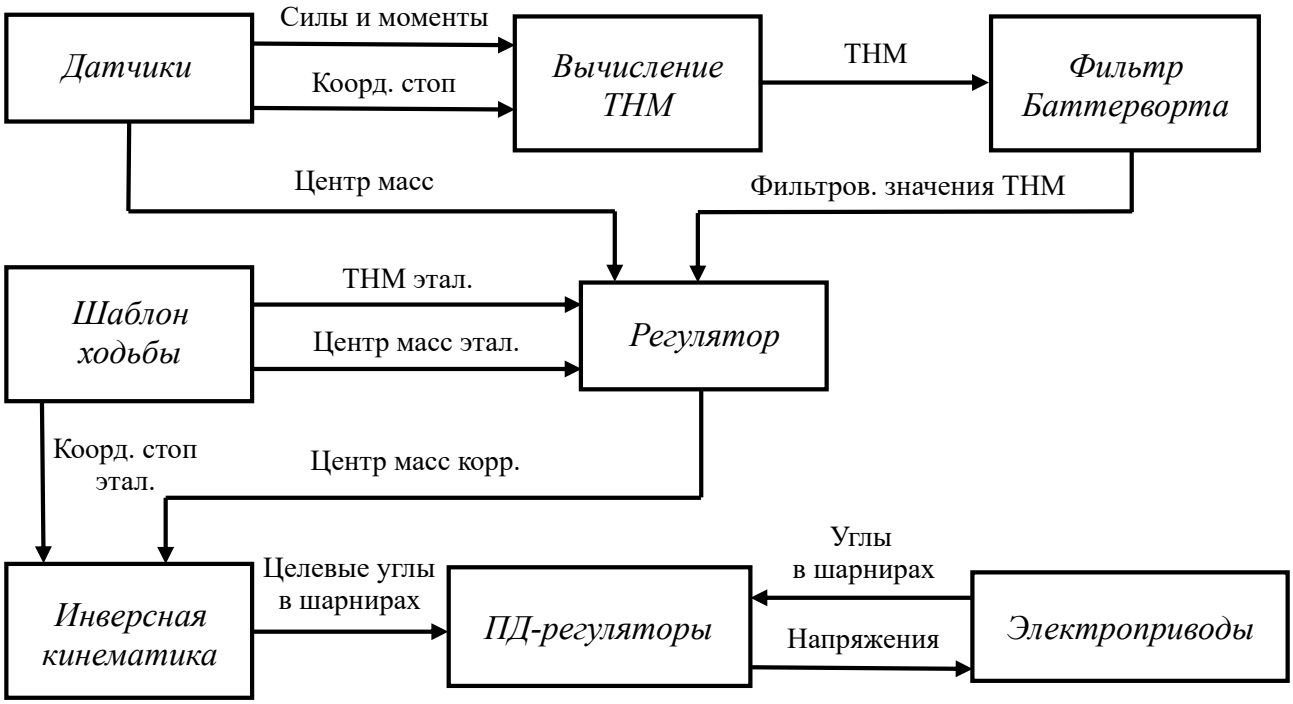


Рис. 2. *Структура системы управления ДШР*

$\mathbf{F}^L$ и момент $\boldsymbol{\tau}^L$. Пусть для определенности локальная система координат (ЛСК) $O_L x_L y_L z_L$ находится в центре поверхности стопы робота. Тогда согласно определению горизонтальные моменты в ТНМ равны нулю:

$$\tau_{ZMP,x} = -F_z^L p_{Ly}^{loc} + \tau_x^L = 0; \qquad \tau_{ZMP,y} = F_z^L p_{Lx}^{loc} + \tau_y^L = 0,$$

где $\left(p_{Lx}^{loc}, p_{Ly}^{loc}\right)$ — координаты ТНМ в ЛСК левой стопы, F_z^L — вертикальная компонента силы, τ_x^L и τ_y^L — горизонтальные моменты.

Отсюда верно, что координаты ТНМ для левой стопы вычисляются как

$$p_{Lx}^{loc} = -\tau_y^L / F_z^L; \qquad p_{Ly}^{loc} = \tau_x^L / F_z^L. \tag{1}$$

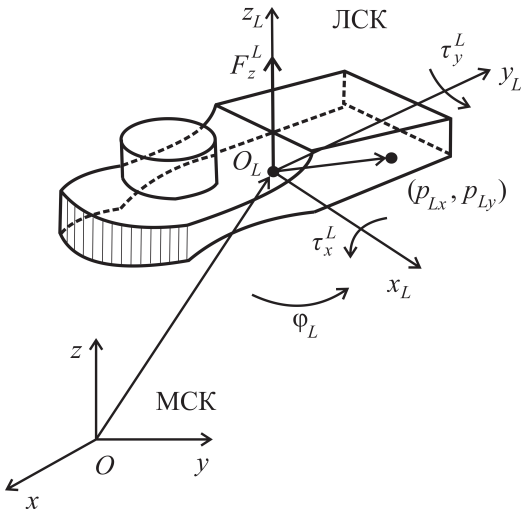


Рис. 3. *Левая стопа робота*

Так как координаты ТНМ должны находиться внутри опорной поверхности стопы, требуется обеспечить неравенства

$$\left|p_{Lx}^{loc}\right| \le S/2; \qquad \left|p_{Ly}^{loc}\right| \le L/2, \tag{2}$$

где S — ширина стопы, L — длина стопы.

В мировой системе координат (МСК) $Oxyz$ координаты (p_{Lx},p_{Ly}) ТНМ с учетом поворота стопы вычисляются следующим образом

$$p_{Lx} = x_L + p_{Lx}^{loc}\cos\phi_L - p_{Ly}^{loc}\sin\phi_L; \qquad p_{Ly} = y_L + p_{Lx}^{loc}\sin\phi_L + p_{Ly}^{loc}\cos\phi_L, \tag{3}$$

где (x_L,y_L) — координаты левой стопы в МСК, ϕ_L — угол поворота левой стопы вокруг оси z.

Соотношения (1) — (3) используются для вычисления ТНМ в фазе опоры ДШР на левую ногу. Аналогичным образом вычисляются координаты (p_{Rx},p_{Ry}) в фазе опоры робота на правую ногу. В случае двухопорной фазы контакта ДШР с поверхностью для вычисления координат ТНМ в МСК используются средневзвешенные значения:

$$p_x = \frac{p_{Lx}F_z^L + p_{Rx}F_z^R}{F_z^L + F_z^R}; \qquad p_y = \frac{p_{Ly}F_z^L + p_{Ry}F_z^R}{F_z^L + F_z^R}, \tag{4}$$

где F_z^R — вертикальная компонента силы для правой стопы.

Вычисленные значения координатp_x и p_y ТНМ подвержены ошибкам моделирования. В связи с этим для фильтрации значений ТНМ в данной работе задействованы фильтры Баттерворта второго порядка, передаточная функция которых задается в следующем виде:

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_c s + \omega_c^2} = \frac{1}{T^2 s^2 + \sqrt{2}Ts + 1},$$

где ω_c — частота среза, $T = 1/\omega_c$ — постоянная времени.

Фильтрованные значения p_x^f и p_y^f ТНМ используются далее для реализации обратной связи регулятора.

Стабилизация двуногого шагающего робота

Математическая модель динамики ДШР, который задается в виде системы шарнирно связанных тел, является сложной. Поэтому для построения управления роботом используются упрощенные модели. В данной работе задействована модель обратного маятника, которая выражает зависимость координат p_x и p_y ТНМ с координатами x и y центра масс робота [19]:

$$p_x = x - \frac{z_c}{g}\ddot{x}; \qquad p_y = y - \frac{z_c}{g}\ddot{y}, \tag{5}$$

где $z_c = const$ — расстояние между центром масс робота и поверхностью, g — ускорение свободного падения.

Рассмотрим построение регулятора на основе стабилизации движения ДШР вдоль оси x (фронтальная плоскость движения робота). Для этого введем управляющую переменную $u = \frac{d}{dt}\ddot{x}$ — производная от ускорения (рывок). Тогда с учетом первого соотношения из (5) движение ДШР описывается динамической системой

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u; \tag{6}$$

$$p_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -k \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \tag{7}$$

где $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = \ddot{x}$, $k = z_c/g$ — константа.

Задача стабилизации заключается в том, что требуется обеспечить движение ДШР по траекториям, которые формируются на этапе генерации шаблона ходьбы: $x_1^d = x^d(t)$, $x_2^d = \dot{x}^d(t)$, $x_3^d = \ddot{x}^d(t)$, $p_x^d = p_x^d(t)$. При этом эталонное значение ТНМ удовлетворяет уравнению (7): $p_x^d = x_1^d - kx_3^d$. Введем

невязки $e_1 = x_1 - x_1^d$, $e_2 = x_2 - x_2^d$, $e_3 = p_x - p_x^d$ и продифференцируем их, согласно уравнениям (6) и (7). Тогда получим соотношения:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2\,; \\ \dot{e}_2 &= (e_1 - e_3)/k\,; \\ \dot{e}_3 &= e_2 - k(u - \dot{x}_3^d)\,. \end{aligned}$$

При использовании замен $w_1 = e_1$, $w_2 = e_2$ и $w_3 = \dot{e}_2$ эти уравнения приводятся к канонической форме:

$$\begin{aligned} \dot{w}_1 &= w_2\,; \\ \dot{w}_2 &= w_3\,; \\ \dot{w}_3 &= u - \dot{x}_3^d\,. \end{aligned} \tag{8}$$

Применим теорию скользящего режима управления [20] для динамической системы (8). Для этого рассмотрим переменную $\sigma(\mathbf{w}) = k_1 w_1 + k_2 w_2 + w_3$, где $\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3)^{\mathrm{T}}$, $k_1 > 0$ и $k_2 > 0$. В рамках теории управления нелинейных систем задача сводится к тому, что требуется обеспечить $\sigma(\mathbf{w}) = 0$. После дифференцирования σ по времени t получим выражение

$$\dot{\sigma} = k_1 w_2 + k_2 w_3 + u - \dot{x}_3^d. \tag{9}$$

Рассмотрим положительно определенную функцию Ляпунова $V(\sigma) = \sigma^2/2$ и ее производную $\dot{V} = \sigma\dot{\sigma}$. Сформируем управление в следующем виде

$$u = -k_1 w_2 - k_2 w_3 - M sgn\sigma, \qquad M > 0 \tag{10}$$

и подставим его в $\dot{V}$ с учетом (9). Тогда согласно теории функции Ляпунова будет выполнено неравенство

$$\dot{V} = -\sigma(M sgn\sigma + \dot{x}_3^d) \le -\alpha V^{1/2}, \qquad \alpha > 0,$$

которое означает, что $\sigma \to 0$ за конечное время $t_r \le 2V^{1/2}(0)/\alpha$ при выборе коэффициента $M = \rho + \alpha/\sqrt{2}$, где выполнено $\left|\dot{x}_3^d\right| \le \rho$ для ограниченной функции $\dot{x}_3^d(t)$.

Закон управления вида (10) представляет собой нелинейное реле с обратной связью по показаниям ТНМ, координатам центра масс и скоростям робота. Интегрируя уравнения (6) для полученного управления, получим новое значение координаты $x_{corr}^d(t)$ шаблона ходьбы. Стабилизация ДШР вдоль оси y (сагиттальная плоскость движения робота) осуществляется аналогичным образом.

Результаты моделирования

Предложенные в статье решения для стабилизации ДШР были реализованы в программном комплексе виртуального окружения VirSim, разработанном в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Этот программный комплекс включает в себя подсистемы управления, динамики и визуализации. В подсистеме управления осуществляется расчет управляющих сигналов для исполнительных устройств согласно функциональной схеме. Такая схема описывает логику управления виртуальными объектами и состоит из набора связанных блоков, куда входят блоки управляющих команд, датчиков, инверсной кинематики, фильтров и исполнительных устройств. Значения рассчитанных сигналов передаются в подсистему динамики, в которой реализуется вычисление новых координат виртуальных объектов на основе их математических моделей. Эти координаты затем передаются в подсистему визуализации, которая осуществляет рендеринг виртуальной сцены в масштабе реального времени с учетом светотеневой обстановки и моделирования визуальных эффектов. При этом обратная связь в рассматриваемом комплексе реализуется путем расчета в подсистеме динамики показаний виртуальных датчиков с их передачей в подсистему управления.

Апробация предложенных в статье методов и подходов проводилась на примере моделирования движения ДШР по ровной поверхности и решения задачи тушения огня. Для этого была создана виртуальная сцена помещения, содержащая набор виртуальных объектов (бочки, поддоны, шины и т. п.). Управление роботом в системе виртуального окружения было реализовано в супервизорном режиме [21]. Суть такого подхода состоит в том, что человек тем или иным образом задает команду (голосом, жестом или другим способом), а робот автоматически выполняет набор действий согласно заранее подготовленной программе. Движение ДШР по поверхности реализовано посредством модуля генерации шаблона ходьбы и включает перемещение робота вперед, его повороты и остановку. Для

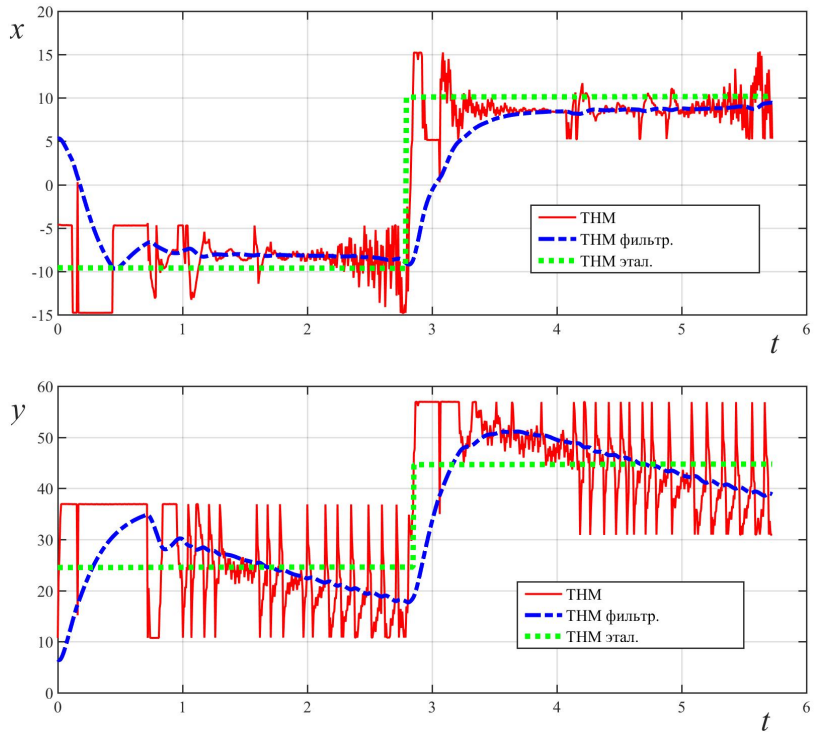


Рис. 4. *Графики зависимостей координат ТНМ*

моделирования были выбраны следующие параметры: $S = 10.3$ см, $L = 27.6$ см, $T = 0.1$ с, $z_c = 95$ см, $g = 9.81$ м/с^2, $M = 10000$, $k_1 = k_2 = 1$. На рис. 4 приводятся графики зависимостей текущих, фильтрованных и эталонных координат ТНМ вдоль осей x и y (в см) при выполнении роботом двух шагов вперед. Моделирование проводилось на примере решения задачи тушения огня, которая включает в себя захват роботом огнетушителя, движение робота по направлению к горящему объекту и операцию тушения огня (см. рис. 5). Результаты моделирования показали адекватность и эффективность предложенных в статье решений для стабилизации ДШР с учетом изменения его массы и движения составных частей.



Рис. 5. *Тушение огня с помощью виртуальной модели ДШР*

Заключение

В данной работе предложены методы и подходы для стабилизации движения двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. Построенный релейный регулятор с обратной связью по показаниям виртуальных датчиков обеспечивает устойчивость робота в процессе его движения с учетом изменения динамических параметров. Полученные в работе результаты могут быть использованы для решения различных практических задач в системах виртуального окружения, имитационно-тренажерных комплексах, образовательных приложениях, анимации и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Saeedvand S., Jafari M., Aghdasi H. S., Baltes J. A Comprehensive Survey on Humanoid Robot Development. *The Knowledge Engineering Review*. 2019;34:1–18. DOI: 10.1017/S0269888919000158.
2. Mikolajczyk T. and others. Recent Advances in Bipedal Walking Robots: Review of Gait, Drive, Sensors and Control Systems. *Sensors.* 2022;22(12):1–31. DOI: 10.3390/s22124440.
3. Юревич Е. И. *Основы робототехники:* учеб. пособие, 4-е изд., перераб. и доп. СПб: БХВ-Петербург; 2017. 304 с.
4. Kajita S., Hirukawa H., Harada K., Yokoi K. *Introduction to Humanoid Robotics*. ser. Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer Berlin Heidelberg; 2014. Vol. 101.
5. Taesin Ha, Chong-Ho Choi. An Effective Trajectory Generation Method for Bipedal Walking. *Robotics and Autonomous Systems*. 2007;55:795–810. DOI: 10.1016/j.robot.2007.06.001.
6. Al-Shuka Hayder F. N., Allmendinger F., Corves B. and Wen-Hong Zhu. Modeling, Stability and Walking Pattern Generators of Biped Robots: a Review. *Robotica*. 2014;32:907–934. DOI: 10.1017/S0263574713001124.
7. Kajita S. and others. Biped Walking Pattern Generation Based on Spatially Quantized Dynamics. *IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics*. Birmingham, UK. 2017;599–605. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8246933.
8. Хусаинов Р. Р., Климчик А. А., Магид Е. А. Метод управления движением двуногого шагающего робота по произвольной траектории. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018;19(10):633–641. DOI: 10.17587/mau.19.633-641.
9. Nishiwaki K., Kagami S. Strategies for Adjusting the ZMP Reference Trajectory for Maintaining Balance in Humanoid Walking. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation.* 2010;4230–4236. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5510002.
10. Kajita S., Morisawa M., Miura K., Nakaoka S., Harada K., Kaneko K., Kanehiro F., Yokoi K. Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking. *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. October 18-22, 2010, Taipei, Taiwan. 4489–4496. DOI: 10.1109/IROS.2010.5651082.
11. Sugihara T. Standing Stabilizability and Stepping Maneuver in Planar Bipedalism Based on the Best COM-ZMP Regulator. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009;1966–1971. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152284.
12. Campos-Macias L., Carbajal-Espinosa O., Lokianov A., Bayro-Corrochano E. Stabilization Method for Dynamic Gait in Bipedal Walking Robots. *IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. Cancun, Mexico. 2016;1276–1281. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2016.7803434.
13. Vukobratovic M. Zero-Moment Point — Thirty-Five Years of Its Life. *International Journal of Humanoid Robotics*. 2004;1:157–173. DOI: 10.1142/S0219843604000083.
14. Михайлюк М. В., Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Страшнов Е. В., Крючков Б. И., Усов В. М. Система виртуального окружения Virsim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов. *Пилотируемые полеты в космос*. 2020;37(4):72–95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
15. Сорокин Г. А. Фильтры нижних частот. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника».* 2015;15(1):100–107.
16. Sugihara T. Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics Based on Levenberg-Marquardt Method with Robust Damping. *9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots.* Paris, France. 2009;555–560. DOI: 10.1109/ICHR.2009.5379515.
17. Страшнов Е. В. Инверсная кинематика для управления движением двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. *Труды НИИСИ РАН*. 2021;11(3):41–47. DOI:

10.25682/NIISI.2021.3.0009.

18. Страшнов Е. В., Финагин Л. А. Моделирование полуавтоматического режима управления движением двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2022;3(17):57–67. DOI: 10.30987/2658-6436-2022-3-57-67.
19. 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. *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation.* 2003;1620–1626. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241826.
20. Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. *Sliding Mode Control and Observation*. Birkhauser; 2013.
21. Михайлюк М. В., Омельченко Д. В., Страшнов Е. В. Командный и супервизорный режимы управления виртуальными роботами. *Вестник кибернетики*. 2016;4:67–72.