

УДК 681.51

СПОСОБЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ДВУНОГИХ РОБОТОВ В ПОЛОЖЕНИИ СТОЯ НА ПОДВИЖНОЙ ОПОРЕ

Д.Н. Базылев^а, А.А. Пыркин^а, А.А. Маргун^а, К.А. Зименко^а, А.С. Кремлев^а, Д.Д. Ибраев^а,
 М. Чех^б

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^б Университет Западной Богемии, 306 14, Пльзень, Чехия

Адрес для переписки: bazylevd@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 17.07.14, принята к печати 03.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-418-425

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Базылев Д.Н., Пыркин А.А., Маргун А.А., Зименко К.А., Кремлев А.С., Ибраев Д.Д., Чех М. Способы стабилизации двуногих роботов в положении стоя на подвижной опоре // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 418–425.

Аннотация

Предмет исследования. Рассматривается задача стабилизации двуногих шагающих роботов на поверхности, угол наклона и угловая скорость которой изменяется произвольно в ограниченном диапазоне.

Методы. Предлагаются два способа стабилизации двуногих роботов. В первом способе требуется построение кинематической и динамической моделей робота. Динамические уравнения получены с помощью метода Эйлера–Лагранжа. Алгоритм управления основан на методе инверсной динамики, при котором исходная нелинейная динамическая модель линеаризуется обратной связью. Во втором способе стабилизации используется только кинематическая модель робота. Для данного подхода разработан гибридный регулятор. При низких угловых скоростях подвижной опоры стабилизация робота выполняется ПД-регулятором по ошибке углов отклонения вала сервоприводов. При относительно высоких угловых скоростях опоры в управлении дополнительно используются измерения гироскопа, установленного в торсе робота. В качестве цели управления для двух подходов было выбрано условие поддержания центра масс робота над центром опоры для обеспечения устойчивого положения.

Основные результаты. Работоспособность и эффективность предложенных способов стабилизации двуногих роботов на подвижной поверхности продемонстрированы на примерах численного моделирования. Оба способа обеспечивают устойчивость балансирующих роботов при изменении угла наклона и угловой скорости подвижной поверхности в диапазонах $\varphi \in (-50^\circ; 50^\circ)$ и $\omega \in (-40^\circ/\text{с}; 40^\circ/\text{с})$ соответственно. Проведен сравнительный анализ данных подходов при одинаковых требованиях к показателям качества переходных процессов: время переходного процесса $t_n < 0,2$ с и перерегулирование $\sigma = 0\%$. Определены условия, при которых каждый из способов управления будет более эффективным при реализации на практике.

Практическая значимость. Разработанные способы управления могут быть использованы для стабилизации подобных роботов, а также служить основой при построении регуляторов для более сложных моделей шагающих механизмов, имеющих большее число степеней свободы и осуществляющих ходьбу по подвижной опоре.

Ключевые слова

шагающий робот, подвижная опора, стабилизация, система управления.

Благодарности

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01). Работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031).

APPROACHES FOR STABILIZING OF BIPED ROBOTS IN A STANDING POSITION ON MOVABLE SUPPORT

D.N. Bazylev^а, A.A. Pyrkin^а, A.A. Margun^а, K.A. Zimenko^а, A.S. Kremlev^а, D.D. Ibraev^а, M. Cech^б

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^б University of West Bohemia, Pilsen, 306 14, Czech Republic

Corresponding author: bazylevd@mail.ru

Article info

Received 17.07.14, accepted 03.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-418-425

Article in Russian

For citation: Bazylev D.N., Pyrkin A.A., Margun A.A., Zimenko K.A., Kremlev A.S., Ibraev D.D., Cech M. Approaches for stabilizing of biped robots in a standing position on movable support. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 3, pp. 418–425.

Abstract

Subject of research. The problem of stabilization for biped walking robots on the surface is considered. The angle and angular velocity of the movable surface varies randomly in a limited range.

Methods. Two approaches of stabilization of biped robots are proposed. The first approach requires the construction of kinematic and dynamic models of the robot. Dynamic equations were obtained using the Euler-Lagrange method. The control algorithm is based on the method of inverse dynamics, in which the original nonlinear dynamic model is linearized by a feedback. The second stabilization algorithm uses only the kinematic model of the robot. A hybrid controller is developed for this approach. In the case of low angular velocities of the movable support the robot stabilization is performed by PD controller on the basis of the angle error of deflection of the servo shaft. In the case of relatively high angular velocities of the support the controller also uses the gyroscope readings mounted in the robot torso. Maintenance of the robot's gravity center over the center of bearing area for providing a stable position was chosen as a goal of control in both approaches.

Main results. Efficiency and effectiveness of the proposed approaches for stabilization of biped robots on the moving surface are demonstrated by the numerical simulation. Both methods provide stability of the balancing robots on changing the angle of inclination and angular velocity of the moving surface in the ranges $\phi \in (-50^\circ; 50^\circ)$ and $\omega \in (-40^\circ/\text{sec}; 40^\circ/\text{sec})$, respectively. Comparative analysis of these approaches under identical requirements for quality indicators of transients is also provided: transient time $t_n < 0.2 \text{ sec}$ and overshoot $\sigma = 0\%$. The conditions under which each of the control methods will be more effective in practice are identified.

Practical significance. The developed control approaches are usable to stabilize similar robots, as well as to serve as a basis for the construction of regulators for more complex models of walking mechanisms that have a greater number of degrees of freedom and walk on a movable support.

Keywords

walking robot, movable support, stabilization, control system.

Acknowledgements

This work was partially financially supported by the Government of the Russian Federation, Grant 074-U01. The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project 14.Z50.31.0031).

Введение

Преимущества использования шагающих роботов в различных сферах деятельности человека очевидны. Однако по определенным причинам шагающие роботы пока не получили широкого распространения в реальной жизни. К таким причинам можно отнести сложности, связанные с созданием математических моделей роботов и разработкой эффективных систем управления ими.

Движение двуногих роботов изучается свыше сорока лет. Большое количество статей посвящено простым моделям, таким как «циркульный робот». Устойчивое движение таких моделей изучается как для управляемых [1–4], так и для пассивных роботов, шагающих вниз по склону [4–7].

В работах [6, 8, 9] предлагается новый подход, позволяющий отыскать устойчивые предельные циклы ходьбы, без рассмотрения полной системы дифференциальных уравнений системы, а также без аппроксимации динамических уравнений. При анализе используется независимое от времени представление возможного периодического решения через виртуальное голономное ограничение (голономную связь).

В работе [5] рассматривается поведение на наклонной поверхности плоского циркульного робота, имеющего два звена и две степени свободы, исследуется устойчивое пассивное движение робота. В [2, 5] используется принцип пассивации, позволяющий затрачивать намного меньше энергии на перемещение. Авторы работы [3] исследуют устойчивую ходьбу на горизонтальной поверхности плоского трехзвенного робота, имеющего три степени свободы. В настоящей работе рассматривается похожая модель, имеющая три звена и три степени свободы. Основное отличие данной работы от подобных заключается в том, что в настоящей работе исследуется задача планирования и стабилизации двуногих роботов, балансирующих на наклонной поверхности, угол которой изменяется произвольным образом в заданном диапазоне угловых координат и скоростей.

Научный интерес к задаче стабилизации движений двуногих роботов значительно возрос в последнее время. В первую очередь это связано с достаточным уровнем развития аппаратных и программных средств, что позволяет реализовывать на практике разработанные в теории алгоритмы. Экспериментальная проверка может проводиться на различных робототехнических наборах [10–12]. Настоящая работа является развитием алгоритмов управления двуногими роботами и планирования траекторий их движений, предложенных в предыдущих работах [13, 14].

В данной работе для двух отдельных моделей двуногих роботов предлагается два различных алгоритма решения задачи их стабилизации в положении стоя на подвижной опоре. Для каждой модели робота кратко приводится математическое описание, цель и закон управления. Также представлены результаты компьютерного моделирования виртуального двуногого робота и результаты экспериментов для реального робота. В конце работы подводятся краткие итоги и указываются направления будущих исследований.

Представленные в работе алгоритмы стабилизации разработаны вы следующих предположениях: стопы роботов не отрываются от наклонной поверхности; при скольжении по ней ускорение роботов мало; подвижная наклонная поверхность не имеет линейного ускорения; возможные типы ее движения – вращение и перемещение с постоянной скоростью.

Модели стабилизации

Способ стабилизации двуногого робота с использованием динамических уравнений. В первом из двух алгоритмов управления балансирующей на наклонной поверхности двуногий робот рассматривается в виде динамической системы.

Общий вид двуногого робота представлен на рис. 1, а. Данный робот может быть представлен в виде упрощенной, так называемой «циркульной» модели, изображенной на рис. 1, б. Подобная упрощенная схема позволяет описывать двуногих роботов, балансирующих наклоном торса как вперед и назад, так и влево и вправо. Упрощенная модель является плоским шагающим механизмом и имеет три звена с массами m_1 , m_2 и m_3 . Каждое звено представлено в виде прямого тонкого стержня длиной $2l_i$ и управляется моментом силы u_i , прикладываемым в точке соединения звеньев. Величина S_x – проекция линии опоры робота на горизонтальную ось и зависит от угла наклона φ поверхности и положения ног робота.

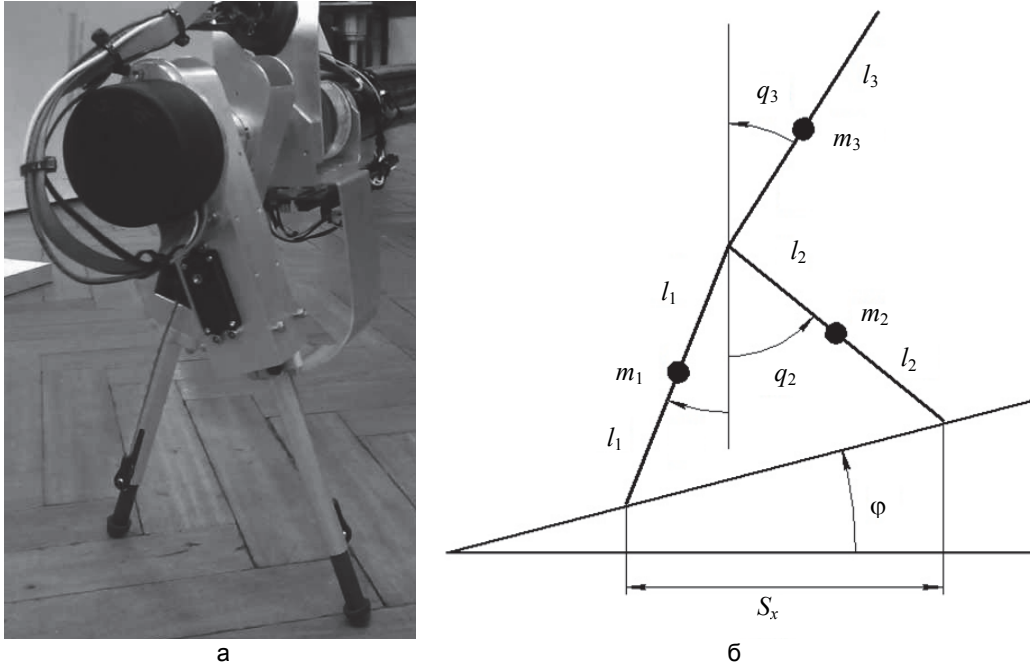


Рис. 1. Общий вид (а) и упрощенная модель (б) циркульного двуногого робота

Для получения уравнений динамики, описывающих поведение робота, использовался тензорный способ. Обобщенные координаты были выбраны в виде углов отклонения каждого звена от вертикали q_1 , q_2 и q_3 . Матричное представление динамических уравнений имеет вид

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{u}, \quad (1)$$

где $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ – матрица инерции; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – матрица центробежных, кориолисовых и потенциальных сил, $\mathbf{q} = (q_1 \quad q_2 \quad q_3)^T$ – вектор обобщенных координат, $\mathbf{u} = (u_1 \quad u_2 \quad u_3)^T$ – вектор управления,

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = -0,5 \begin{pmatrix} A_{12} + A_{13} & A_{11} + A_{13} & A_{11} + A_{12} \\ A_{22} & A_{21} & A_{21} + A_{22} \\ A_{33} & A_{31} + A_{33} & A_{31} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = -0,5 \begin{pmatrix} B_2 + B_3 \\ B_1 + B_3 \\ B_1 + B_2 \end{pmatrix}.$$

Для упрощения расчетов примем параметры робота равными $m_i = 1$ кг, $l_i = 1$ м, $I_i = \frac{4ml^2}{3} = \frac{4}{3}$; получаем следующие значения коэффициентов матриц $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ и $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$:

$$B_1 = -4q_1^2 \sin q_1 \cos q_1 - 2q_2^2 \sin q_2 \cos q_1 - 2q_3^2 \sin(q_3 - q_1) - 4g \sin q_1,$$

$$B_2 = -4q_1^2 \sin q_1 \cos q_1 - 2g \sin q_2, \quad B_3 = -4q_1^2 \sin(q_3 - q_1) - 2g \sin q_3,$$

$$\mathbf{A}_{ij} = \begin{pmatrix} 6\frac{1}{3} + 4\cos^2 q_1 & 2\cos q_1 \cos q_2 & 2\cos(q_3 - q_1) \\ 2\cos q_1 \cos q_2 & 2\frac{1}{3} & 0 \\ 2\cos(q_3 - q_1) & 0 & 2\frac{1}{3} \end{pmatrix}.$$

Известно, что тело, находящееся на горизонтальной плоскости, начинает падать, когда проекция положения его центра масс выходит за площадь опоры. Очевидно, что запас устойчивости робота зависит от положения его центра масс относительно центра проекции опоры S_x и внешних сил со стороны подвижной поверхности. Будем считать, что наклонная поверхность не имеет линейного ускорения. Тогда цель управления роботом – поддержание координат центра масс над центром линии опоры S_x :

$$x_c \rightarrow \frac{1}{2} S_x, \quad (2)$$

где $x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3}{m_1 + m_2 + m_3}$ – центр масс робота по оси x . Из (2) получаем желаемые траектории q_1^* , q_2^* , q_3^* :

$$q_1 \rightarrow q_1^* = \alpha/2 - \varphi, \quad q_2 \rightarrow q_2^* = \alpha/2 + \varphi, \quad q_3 \rightarrow q_3^* = \arcsin(0,5 \sin \varphi),$$

где $\alpha = q_1 + q_2 = \text{const}$. При синтезе регулятора воспользуемся методом инверсной динамики [15], при котором строятся два регулятора для объекта управления: внутренний и внешний. Внешний регулятор представляет собой нелинейное управление:

$$\mathbf{u} = \mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{a}_q + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \quad (3)$$

где $\mathbf{a}_q = (a_{q_1} \ a_{q_2} \ a_{q_3})^T$ – новое виртуальное управление. Подставляя (3) в (1), получаем линеаризованную систему при условии невырожденности матрицы $\mathbf{M}(\mathbf{q})$:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{a}_q. \quad (4)$$

При выборе внутреннего регулятора в виде

$$\mathbf{a}_q = -\mathbf{K}_p \mathbf{q} - \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{r}, \quad (5)$$

в котором \mathbf{r} – новое управление, и подстановке (5) в (4) получим

$$\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_p \mathbf{q} = \mathbf{r},$$

где $\mathbf{K}_p = (K_{p1} \ K_{p2} \ K_{p3})$ и $\mathbf{K}_d = (K_{d1} \ K_{d2} \ K_{d3})$ – коэффициенты внешнего по отношению к линеаризованной системе (4) пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора.

Связывая \mathbf{r} с желаемыми траекториями в форме

$$\mathbf{r} = \ddot{\mathbf{q}}^* + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{q}}^* + \mathbf{K}_p \mathbf{q}^*,$$

получаем модель ошибки в виде

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} = \mathbf{0}.$$

Таким образом, внутренний регулятор со входом \mathbf{r} и выходом \mathbf{a}_q представляет собой ПД-регулятор.

Способ стабилизации двуногого робота с использованием кинематических уравнений. Второй подход стабилизации двуногого робота на подвижной поверхности основан на использовании только лишь кинематических уравнений. Динамика системы учитывается косвенным образом – при синтезе регулятора используются измерения гироскопа и датчиков углового положения серводвигателей робота.

Второй шагающий двуногий робот, общий вид которого представлен на рис. 2, а, был собран из робототехнического набора Bioid. Для построения кинематической модели была построена упрощенная модель данного робота, приведенная на рис. 2, б. На данном рисунке приведено схематичное изображение робота с одной стороны (вид сбоку), поэтому изображена только одна нога и торс робота. Параметры второй конечности робота такие же, как и у первой. Модель состоит из четырех звеньев и трех вращательных сочленений. Углы q_1, q_2, q_3 могут быть измерены энкодерами серводвигателей, управление которыми может осуществляться с помощью встроенного регулятора прямым заданием желаемых траекторий. Массы звеньев обозначены m_1, m_2, m_3 и M . Вращение звеньев происходит только в сочленениях робота, обозначенных точками O_1, O_2 и O_3 . Все остальные соединения считаются жесткими. Таким образом, данная модель имеет 4 степени свободы. В соответствии с обозначениями на рис. 2, б, были измерены следующие параметры модели робота: $m_1 = 165,1$ г, $m_2 = 77,5$ г, $m_3 = 29,2$ г, $M = 323,3$ г, $L = 100,4$ мм, $l_1 = 53,9$ мм, $l_2 = 40,2$ мм, $l_3 = 66,1$ мм, $l_4 = 8,9$ мм, $l_5 = 34,8$ мм, $l_6 = 40,2$ мм, $l_7 = 42,5$ мм, $a = 10,1$, $\alpha = \text{const} = 37,3^\circ$.

Цель управления для этого робота – та же, что и для виртуальной модели, т.е. поддержание координат центра масс над центром линии опоры S_x :

$$x_c \rightarrow \frac{1}{2} S_x = \frac{1}{2} L \cos \varphi, \quad (6)$$

где $x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + M x_4}{m_1 + m_2 + m_3 + M}$ – центр масс двуногого робота по оси x .

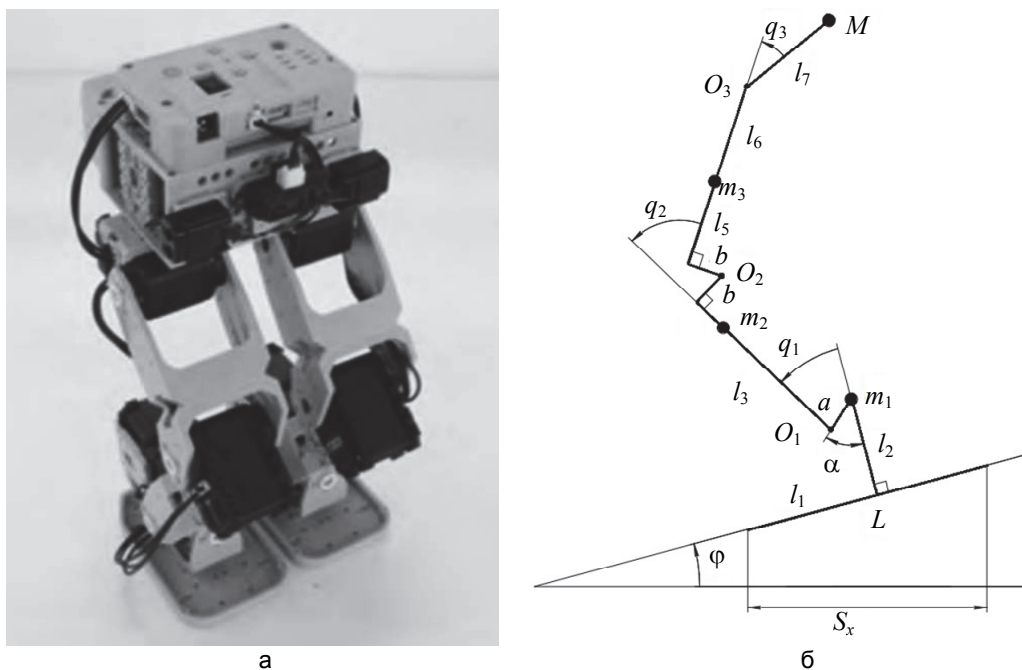


Рис. 2. Общий вид (а) и упрощенная модель (б) двуногого робота Bioloid

Координаты масс звеньев робота:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= l_1 \cos \varphi - l_2 \sin \varphi, \\
 x_2 &= x_1 - a \sin(\alpha - \varphi) - l_3 \sin(q_1 + \varphi), \\
 x_3 &= x_2 - l_4 \sin(q_1 + \varphi) + b \cos(q_1 + \varphi) - b \cos(q_2 - q_1 - \varphi) + l_5 \sin(q_2 - q_1 - \varphi), \\
 x_4 &= x_3 + l_6 \sin(q_2 - q_1 - \varphi) + l_7 \sin(q_3 + q_2 - q_1 - \varphi).
 \end{aligned} \tag{7}$$

Определим желаемые траектории робота. Если учесть, что угол наклона поверхности φ измерим, то x_1 также является известным. Тогда, комбинируя уравнения (6) и (7), получаем уравнение, которое содержит три неизвестных величины q_1^*, q_2^*, q_3^* . Следовательно, имеем бесконечное число подходящих траекторий q_1^*, q_2^*, q_3^* , поэтому, чтобы получить определенные траектории, необходимо дополнить уравнение (6) некоторыми связями между желаемыми траекториями робота. Для сужения поиска желаемых траекторий робота q^* были добавлены следующие два уравнения связей:

$$q_3 + q_2 - q_1 - \varphi = 0, \tag{8}$$

$$q_2 - kq_1 = 0, k < 1. \tag{9}$$

Уравнение (8) обеспечивает горизонтальное положение торса робота вне зависимости от угла наклона поверхности. Связь (9) делает движения робота более человекоподобными и говорит о том, что угловые перемещения в стопе должны быть большими по сравнению с перемещениями в колене.

При синтезе управляющих воздействий были использованы измерения гироскопа и встроенных в сервоприводы робота датчиков положения ротора. Данные измерения позволяют косвенным образом определить угол наклона φ поверхности. Так как гироскоп обладает дрейфом нуля, то его измерения $\dot{\theta}$ целесообразно использовать при относительно больших угловых скоростях подвижной опоры $\dot{\varphi}$. Для управления на малых $\dot{\varphi}$ был выбран ПД-регулятор по ошибке углов отклонения вала двигателей:

$$\mathbf{u}_L = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}, \tag{10}$$

где $\mathbf{K}_p = (K_{p1} \ K_{p2} \ K_{p3})$, $\mathbf{K}_d = (K_{d1} \ K_{d2} \ K_{d3})$ – пропорциональные и дифференциальные составляющие регулятора соответственно; $\mathbf{u}_L = (u_{L1} \ u_{L2} \ u_{L3})^T$ – вектор управляющих сигналов; $\mathbf{e} = (e_1 \ e_2 \ e_3)^T$ – вектор ошибок углов отклонения звеньев, $\mathbf{e} = \mathbf{q}^* - \mathbf{q}$; $\dot{\mathbf{e}}$ – вектор производных ошибок углов отклонения звеньев.

На больших скоростях $\dot{\varphi}$ к регулятору (10) добавлялись показания гироскопа:

$$\mathbf{u}_H = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_g \int \dot{\theta} dt,$$

где $\mathbf{K}_g = (K_{g1} \ K_{g2} \ K_{g3})^T$ – масштабирующие коэффициенты.

Результаты исследования и сравнение моделей

В разделе представлены результаты численного моделирования двух предложенных способов стабилизации двуногих роботов. Для объективного сравнения обеих систем управления были заданы одинаковые требования к показателям качества: время переходного процесса $t_n < 0,2$ с и перерегуливание $\sigma = 0\%$. Коэффициенты пропорциональной и дифференциальной составляющих ПД-регулятора выбирались исходя из метода стандартных переходных характеристик. Для обеспечения нулевого перерегуливания в качестве характеристического полинома эталонной модели использовался полином Ньютона второго порядка. Исходя из условия $t_n < 0,2$ с, для каждой системы были получены $K_{di} = 40$, $K_{pi} = 400$, $i = \overline{1,3}$.

Начальные угловые положения звеньев роботов $\mathbf{q}(0) = (q_1(0) \ q_2(0) \ q_3(0))^T$ выбирались в соответствии с желаемыми траекториями: $\mathbf{q}(0) = (30^\circ \ 30^\circ \ 0^\circ)^T$ для первой модели и $\mathbf{q}(0) = (45,62^\circ \ 27,37^\circ \ 18,25^\circ)^T$.

На рис. 3, а, б, показаны графики изменения угла наклона и угловой скорости подвижной поверхности. Промежуток времени $t \in (0; 10)$ с соответствует высоким угловым скоростям наклонной поверхности, а на участке $t \in (10; 30)$ с происходит медленное изменение ее углового положения.

Моделирование способа стабилизации, учитывающего динамику робота, изображено на рис. 4. Рис. 4, а, иллюстрирует траектории $\mathbf{q}(t) = (q_1(t), q_2(t), q_3(t))^T$ циркульного робота, а на рис. 3, б, изображены графики ошибок $\mathbf{e}(t) = (e_1(t), e_2(t), e_3(t))^T$.

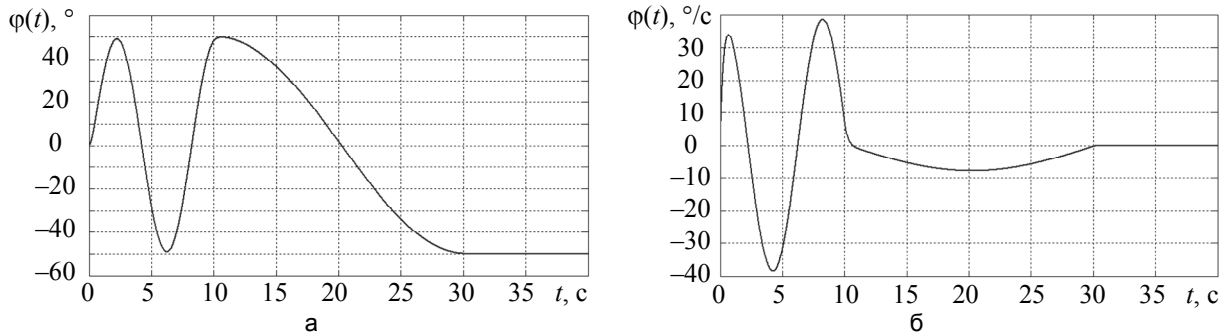


Рис. 3. Графики углового положения (а) и скорости (б) наклонной поверхности

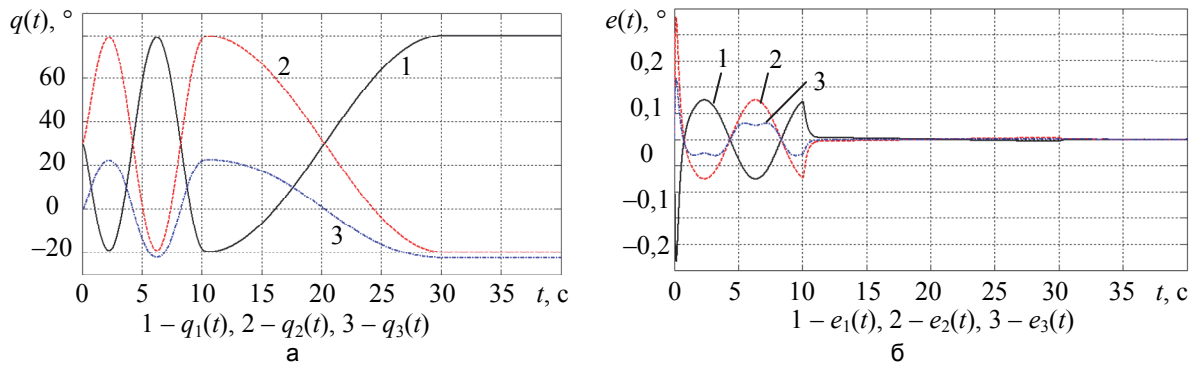


Рис. 4. Графики траекторий (а) и ошибок (б) циркульного робота

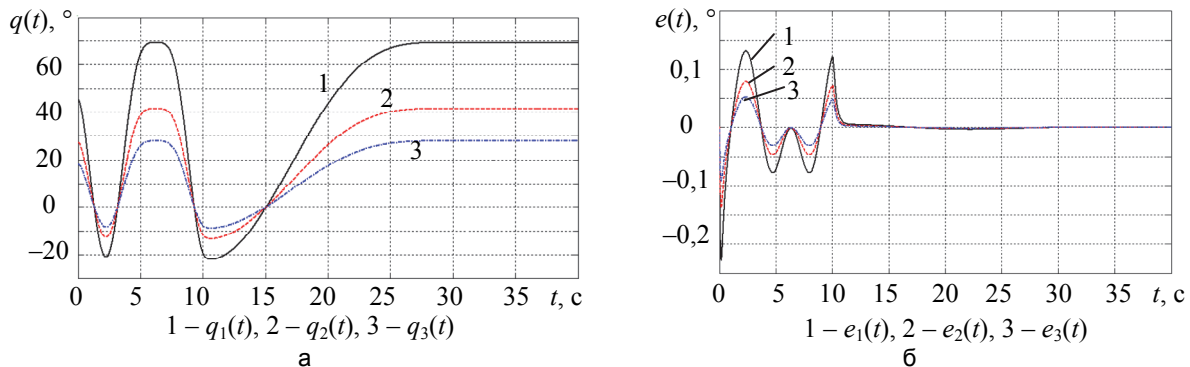


Рис. 5. Графики траекторий (а) и ошибок (б) робота Bioloid

На рис. 5 аналогичным образом представлены переходные процессы в системе управления, основанной на способе стабилизации с использованием кинематических уравнений и измерений датчиков.

Как следует из графиков моделирования, при больших угловых скоростях подвижной поверхности обе системы управления демонстрируют достаточно высокую скорость сходимости текущих траекторий к желаемым и низкие величины ошибок. При медленном перемещении наклонной поверхности ошибки в каждой системе управления близки к нулю. Поскольку ошибки углов отклонения звеньев для каждого робота лежат приблизительно в одинаковом малом диапазоне $e_i(t) \in (-0,25^\circ; 0,25^\circ)$, $i = \overline{1,3}$, то запасы устойчивости обеих систем определяются положением центра масс робота относительно проекции площади его опоры. В свою очередь, центр масс каждой модели и проекция площади опоры зависят от параметров робота и углового положения наклонной поверхности. При заданных параметрах и начальных положениях первая модель имеет больший запас устойчивости, чем второй робот.

При реализации на практике каждый из предложенных способов стабилизации будет обладать своими особенностями. Так, для первого способа стабилизации, использующего линеаризацию обратной связью, требуется точное измерение вектора состояний робота. Все параметры математической модели также должны быть известными. В противном случае при линеаризации в уравнении (4) появятся дополнительные слагаемые $\Delta M(\Delta q) \Delta \ddot{q}$ и $\Delta C(\Delta q, \Delta \dot{q})$, которые могут привести систему в неустойчивое состояние. Поскольку расчет параметров в нелинейном регуляторе (3) должен производиться в режиме реального времени, то первый способ требует более высоких вычислительных мощностей, чем второй.

Для второго подхода также необходимо точное измерение вектора состояния робота. Преимущество второго способа по сравнению с первым заключается в том, что он не требует построения динамических уравнений системы и не все параметры модели могут быть известны (например, моменты инерции звеньев). Тем не менее, помимо датчиков положения двигателей, необходимо дополнительно использовать внешние высокоточные сенсоры (гироскоп, акселерометр).

Таким образом, первый подход будет более эффективным при условии, что все параметры двуногого робота точно известны, вектор состояния робота измеряется с высокой точностью, а электронно-вычислительное устройство, осуществляющее синтез управляющих воздействий, характеризуется высокой производительностью. Использование второго способа стабилизации более привлекательно в том случае, если не все параметры модели известны или вычислительных мощностей недостаточно для линеаризации сложной динамической системы робота с помощью обратной связи, а также есть возможность оснастить двуногой робот высокоточными датчиками.

Заключение

В работе предлагается два способа стабилизации двуногих шагающих робота в положении стоя на нестационарной поверхности. В первом алгоритме управления используется как кинематическая, так и динамическая модель робота. Данный подход основан на методе инверсной динамики, при котором исходная нелинейная динамическая модель линеаризуется обратной связью. Вторым способом стабилизации базируется на использовании кинематической модели робота. Для данного подхода разработан гибридный регулятор. При малых угловых скоростях подвижной поверхности управление происходит ПД-регулятором. На высоких угловых скоростях при управлении дополнительно используются измерения гироскопа, установленного в торсе робота. В ходе сравнительного анализа были выявлены условия, при которых каждый из предложенных способов стабилизации при реализации на практике будет эффективнее.

Полученные результаты могут быть использованы для стабилизации подобных роботов, осуществляющих перешагивания во время балансирования на подвижной поверхности или шагающих по ней. Направления дальнейших исследований заключаются в экспериментальной апробации разработанных алгоритмов стабилизации, а также в повышении числа звеньев и степеней свободы робота.

References

1. Berkemeier M.D., Fearing R.S. Control of a two-link robot to achieve sliding and hopping gaits. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. Nice, France, 1992, vol. 1, pp. 286–291.
2. Collins S., Ruina A., Tedrake R., Wisse M. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, 2005, vol. 307, no. 5712, pp. 1082–1085. doi: 10.1126/science.1107799
3. Grizzle W., Abba G., Plestan F. Asymptotically stable walking for biped robots: analysis via systems with impulse effects. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, vol. 46, no. 1, pp. 51–64. doi: 10.1109/9.898695
4. Westervelt E.R., Grizzle J.W., Chevallereau C., Choi J.H., Morris B. *Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion*. Boca Raton-London-New York, CRC Press, 2007, 528 p.
5. Goswami A., Espiau B., Keramane A. Limit cycles in a passive compass gait biped and passivity-mimicking control laws. *Autonomous Robots*, 1997, vol. 4, no. 3, pp. 273–286.
6. Freidovich L.B., Mettin U., Shiriaev A.S., Spong M.W. A passive 2-DOF walker: hunting for gaits using

- virtual holonomic constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, vol. 25, no. 5, pp. 1202–1208. doi: 10.1109/TRO.2009.2028757
7. McGeer T. Passive dynamic walking. *International Journal of Robotics Research*, 1990, vol. 9, no. 2, pp. 62–82.
 8. Shiriaev A., Perram J.W., Canudas-de-Wit C. Constructive tool for orbital stabilization of underactuated non-linear systems: virtual constraints approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, vol. 50, no. 8, pp. 1164–1176. doi: 10.1109/TAC.2005.852568
 9. Shiriaev A., Robertsson A., Perram J., Sandberg A. Periodic motion planning for virtually constrained mechanical system. *Proc. 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, CDC-ECC'05*. Seville, Spain, 2006, vol. 2005, pp. 4035–4040. doi: 10.1109/CDC.2005.1582793
 10. Eaton M. Evolutionary humanoid robotics: past, present and future. *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, vol. 4850 LNAI, pp. 42–52.
 11. Thai C.N., Paulishen M. Using robotis bioloid systems for instructional robotics. *Proc. IEEE Southeast Conference 2011*. Nashville, USA, 2011, pp. 300–306. doi: 10.1109/SECON.2011.5752954
 12. Rokbani N., Zaidi A., Alimi A.M. Prototyping a biped robot using an educational robotics kit. *Proc. Int. Conf. on Education and e-Learning Innovations, ICEELI 2012*. Sousse, Tunisia, 2012, art. 6360682. doi: 10.1109/ICEELI.2012.6360682
 13. Bazylev D., Pyrkun A. Stabilization of biped robot standing on nonstationary plane. *Proc. 18th IEEE Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2013*. Miedzyzdroje, Poland, 2013, pp. 459–463.
 14. Bazylev D., Kremlev A., Margun A., Zimenko K. Control system of biped robot balancing on board. *Proc. 19th Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2014*. Miedzyzdroje, Poland, 2014, pp. 794–799. doi: 10.1109/MMAR.2014.6957457
 15. Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M. *Robot Modeling and Control*. NY, Wiley, 2005, 496 p.

Базылев Дмитрий Николаевич	–	студент, лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, bazylevd@mail.ru
Пыркин Антон Александрович	–	кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, a.pyrkin@gmail.com
Маргун Алексей Анатольевич	–	студент, лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, alexeimargun@gmail.ru
Зименко Константин Александрович	–	студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kostyazimenko@gmail.com
Кремлев Артем Сергеевич	–	кандидат технических наук, зам. декана, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kremlev_artem@mail.ru
Ибраев Денис Дамирович	–	студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ibray1522@gmail.com
Чех Мартин	–	кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет Западной Богемии, 306 14, Пльзень, Чехия, cechyn@gmail.com
Dmitry N. Bazylev	–	student, laboratory assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, bazylevd@mail.ru
Anton A. Pyrkin	–	PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a.pyrkin@gmail.com
Alexei A. Margun	–	student, laboratory assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, alexeimargun@gmail.ru
Konstantin A. Zimenko	–	student, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kostyazimenko@gmail.com
Artem S. Kremlev	–	PhD, Deputy Dean, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kremlev_artem@mail.ru
Denis D. Ibraev	–	student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ibray1522@gmail.com
Martin Cech	–	PhD, researcher, University of West Bohemia, Pilsen, 306 14, Czech Republic, cechyn@gmail.com