

А. С. Горобцов^{1, 2}, Е. Н. Рыжов¹, П. С. Тарасов¹

**УПРАВЛЕНИЕ ЛОКОМОЦИЕЙ РОБОТА-АНДРОИДА МЕТОДОМ
ОБОБЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ
В НЕВЫРОЖДЕННОМ СЛУЧАЕ**

¹ Волгоградский государственный технический университет

² ИМАШ РАН

vm@vstu.ru

Рассмотрен синтез управления движением робота-андроида методом обобщенной задачи динамического уравнивания для невырожденного случая матрицы связей математической модели – стояния на одной ноге. Анализируются динамические характеристики получаемого управляемого движения для различных законов изменения реакций в опоре.

Ключевые слова: управление, нелинейные системы, шагающие роботы, обратная задача, устойчивость движения.

A. S. Gorobtsov, E. N. Ryzhov, P. S. Tarasov

**THE CONTROL MOTION OF THE BIPPED ROBOTS BY GENERAL
BALANCE METHOD FOR NONSINGULAR CASE**

¹ Volgograd State Technical University

² IMASH RAS

The synthesis of motion control of an android robot by the method of generalized dynamic balancing problem for the non-degenerate case of a matrix of connections of a mathematical model – standing on one leg is considered. The dynamic characteristics of the resulting controlled motion are analyzed for various laws of reaction variation in the support.

Keywords: control, nonlinear systems, walking robots.

Введение

Нахождение программных реакций в приводах роботов многоногих шагающих роботов, в частности, роботов-андроидов, является акту-

альной задачей, поскольку управление с учетом программных сил и моментов в приводах предпочтительней, чем управление по отклонению. В существующих работах [1] для нахождения

программных реакций используется дополнительная математическая модель, наряду с моделью для определения кинематических параметров движения. Применение двух моделей нельзя признать эффективным, поскольку получаемые от таких моделей результаты не полностью согласованы. В настоящей работе для нахождения кинематических и силовых параметров программного движения используется метод обобщенной задачи динамического уравнивания [2, 3], дающий теоретически точное значение всех параметров управления для заданного закона реакций в опорах робота.

Математическая модель робота-андроида

Обобщенная задача динамического уравнивания [2, 3] служит для нахождения программных значений кинематических и динамических параметров движения механической системы одновременно с численным интегрированием уравнений математической модели системы. При численном интегрировании уравнений динамики на каждом шаге интегрирования решается система линейных алгебраических уравнений

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{D}^T \\ \mathbf{D} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}$ – вектор координат всей системы размерностью n ; $\mathbf{M}$ – матрица инерции; $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$ – вектор позиционных, диссипативных и внешних сил; $\mathbf{D}$ – матрица коэффициентов уравнений связей размерностью $k \times n$ ($k \leq n$); $\mathbf{p}$ – вектор множителей Лагранжа размерностью k ; $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$ – вектор правых частей второй производной уравнений связей.

Решение системы линейных алгебраических уравнений (1), при соответствующих обозначениях, записывается в форме

$$\begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}. \quad (2)$$

Обобщенная задача динамического уравнивания заключается в следующем. Пусть в векторе реакций связей $\mathbf{p}$ имеется подмножество реакций $\mathbf{p}_1$ с номерами из множества K_1 , количеством k_1 , значения которых должны принимать заданные величины, описываемые некоторыми функциями $\varphi_i(t), i = 1, 2, \dots, k_1$. Предположим также, что в векторе реакций связей $\mathbf{p}$ имеется подмножество реакций $\mathbf{p}_2$ с номерами из множества K_2 , количеством k_2 , которые могут варьироваться за счет изменения значений

функций управления $h_{2j}(t), j = 1, 2, \dots, k_2$. В [2, 3] показывается, что при численном интегрировании (1) на каждом шаге интегрирования функции управления находятся из системы линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{h}_2(t) = \boldsymbol{\varphi}(t) - \mathbf{p}_{10}, \quad (3)$$

где $\mathbf{A}_1^{-1}$ – соответствующая множеству K_1 подматрица $\mathbf{A}^{-1}$ – состоит из строк $\mathbf{A}^{-1}$, номера которых принадлежат K_1 ; $\mathbf{p}_{10} = \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{b}$.

Решение (1) с учетом (3) дает одновременно кинематические параметры программного движения и управляющие реакции в приводах. Указанное решение можно считать решением прямой задачи – моделированием управляемого движения, поскольку оно не является решением обратной задачи, а программное движение задается не кинематическими параметрами, а реакциями в опорах. Основная трудность в использовании (1)–(3), как и во всех других методах нахождения программного движения роботов [4] – вырожденность матрицы $\mathbf{A}$ в общем случае. В настоящей работе рассматривается задача равновесия робота-андроида в положении стояния на одной ноге, что соответствует невырожденному случаю матрицы $\mathbf{A}$ и позволяет непосредственно использовать уравнения (1)–(3) без дополнения методами регуляризации. Расчетная схема и начальное положение робота показаны на рис. 1, на котором маркерами пружин отмечены приводы системы управления.

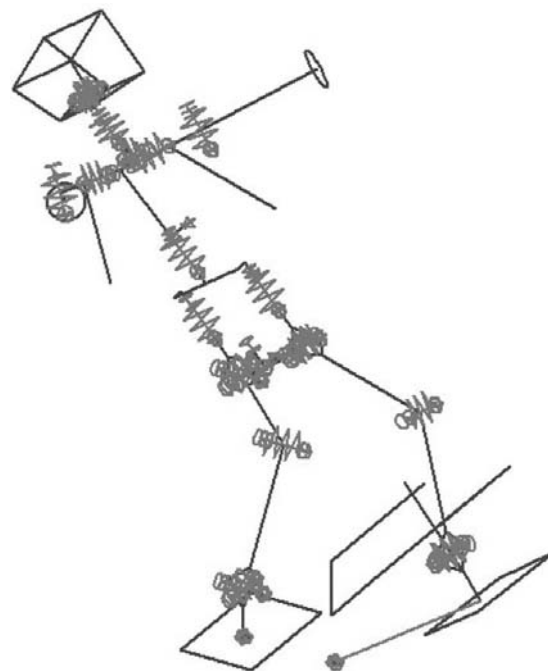


Рис. 1. Расчетная схема и начальное положение робота-андроида

Равновесие робота-андроида при изменении реакций в опоре

Исследовалось пространственное движение робота-андроида в положении стояния на одной ноге, при изменении компонент реакций связей в опорной ноге робота. Реакции в опоре содержали шесть компонент – три силы и три момента. Уравнения (1)–(3) реализованы в системе моделирования ФРУНД [5]. Простейший слу-

чай управления – изменение момента реакции в опоре относительно оси x – продольной оси робота и реализация такого изменения за счет поворота правой ноги в относительно продольной оси бедренного сустава. В этом случае $k_1=k_2=1$. Программный момент реакции изменялся симметрично на величину отклонения 10 Н*м от статического значения за 9 с (рис. 2). Кинограмма движения робота показана на рис. 3.

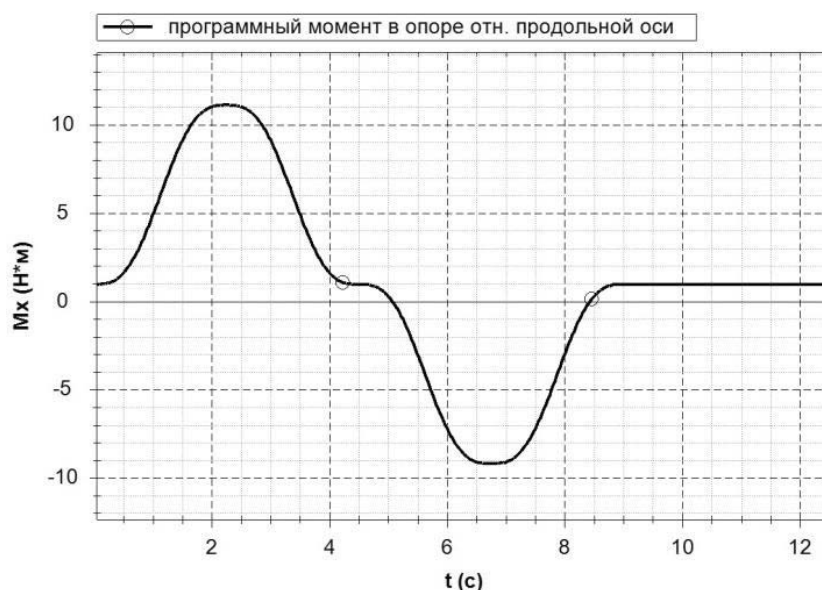


Рис. 2. Программный момент реакции в опоре относительно продольной оси робота

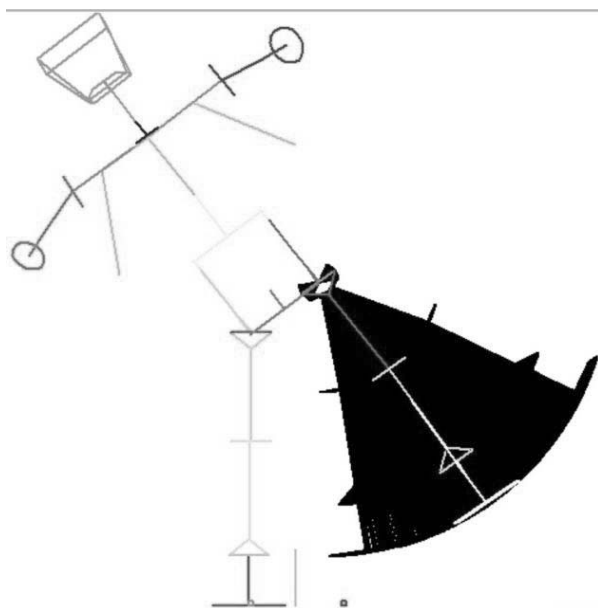


Рис. 3. Кинограмма управляемого движения робота при изменении момента в реакции по заданному закону

Расчеты показали, что движение ноги для отработки заданного программного момента содержит периодическую составляющую, которая определяется инерционным моментом движения ноги. При уменьшении периода программного момента с 9 до 4 с периодическая составляющая резко возрастает, поскольку увеличивается соответствующий инерционный момент (рис. 4).

После возвращения момента реакции к начальному значению колебательное движение ноги робота продолжается (рис. 4). При уменьшении периода изменения программного момента до 4 с амплитуда периодической составляющей резко возрастает (рис. 4). Такая периодическая составляющая может гаситься внешним демпфированием или корректировкой закона управления моментом реакции с учетом сил демпфирования.



Рис. 4. Вертикальное перемещение правой стопы при различных законах изменения программного момента относительно оси x

Как уже отмечалось, рассматриваемый метод позволяет находить управляющие моменты в произвольном количестве приводов. Например, если в рассмотрение ввести еще и приводы рук относительно оси y , то движение робота будет иметь вид, показанный на рис. 5. В этом случае $k_1=3$; $k_2=1$; матрица A_1 будет прямоугольной, и для получения однозначного решения можно ввести дополнительные уравнения с произвольными коэффициентами. Представ-

ленные на рис. 5 результаты получены для дополнительных уравнений вида $h_{21}=h_{22}$ и $h_{21}=h_{23}$. Варьированием коэффициентов дополнительных уравнений можно изменять параметры получаемого движения робота. Такой вариационный подход в настоящее время принято называть машинным обучением. Таким образом, синтез управления с использованием (1)–(3) сводится к задаче машинного обучения при $k_1 > k_2$.



Рис. 5. Кинограмма управляемого движения робота при изменении момента реакции M_x по заданному закону с дополнительным управлением приводами рук

Управление движением робота заданием только одной компоненты вектора реакций связью выражается в достаточно простом движении всего робота. Можно усложнить программное движение робота, задав, например, силе реакции в опорной ноге в поперечном направлении постоянное значение. В этом случае, при рассмотренном законе реакции M_x (рис. 2), робот дол-

жен выполнить угловой поворот на некоторый угол относительно продольной оси и остановиться, поскольку суммарный внешний момент, действующий на робота, не изменился. На рис. 6 показана кинограмма такого движения, полученная для управления приводами левой стопы и бедра относительно продольной оси $k_1=k_2=2$. Амплитуда момента $5,5 \text{ Н*м}$, период 3 с.

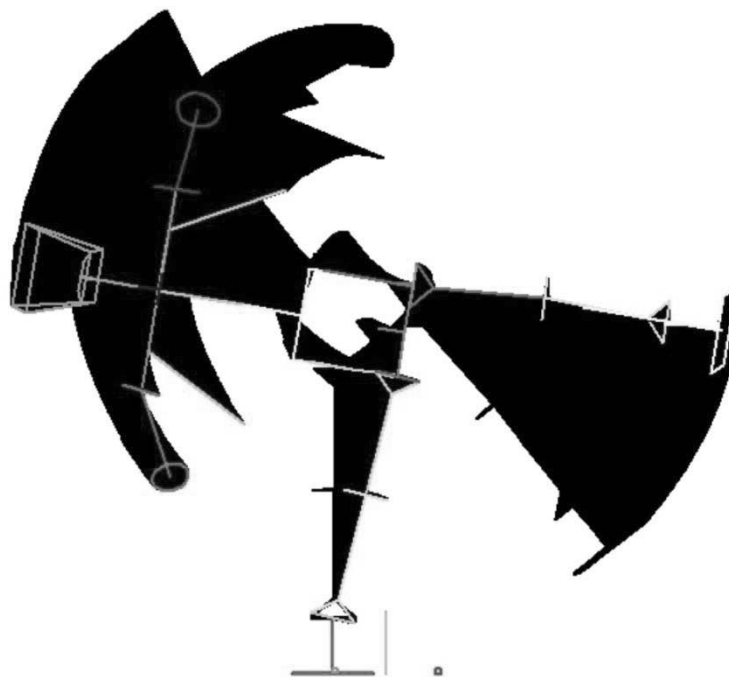


Рис. 6. Кинограмма управляемого движения робота для двух программных реакций в опоре M_x, R_y и управлении двумя приводами левой ноги

Такое вращательное движение робота можно получить и при управлении несколькими приводами, т. е. при $k_1 > k_2$. В расчетном исследовании получен поворот робота при $k_1=5$. Движение с управлением по силам, как известно из теории автоматического управления, неустойчиво, что проявляется на математической модели – модель не достигает состояния покоя в конечный момент времени, и в дальнейшем скорость только нарастает. Исследование устойчивости управления в рассматриваемом подходе в данной работе не рассматривается.

Заключение

Применение метода обобщенной задачи динамического уравнивания позволяет получать программные величины управляющих сил и моментов в приводах для заданных законов изменения внешних сил, действующих на пространственную механическую систему (в частности, робот-андроид). Это дает возможность

планирования кинематических параметров движения робота по кинематическим параметрам движения его центра масс, на которые оказывают влияние только внешние силы. Метод не требует в явном виде задания движения тел робота и применим для произвольного количества задающих реакций и приводов, при условии невырожденности матрицы математической модели. Метод обладает значительным потенциалом для получения оптимальных решений в случае избыточных приводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Optimization-based full body control for the darpa robotics challenge / S. Feng, E. Whitman, X. Xinjilefu, C. Atkeson // Journal Of Field Robotics. – 2015. – Vol. 32. – Pp. 293–312.
2. Gorobtsov, A. Optimal Greedy Control in Reinforcement Learning / A. Gorobtsov, O. Sychev, Yu. Orlova, E. Smirnov, O. Grigoreva, A. Bochkin, M. Andreeva // Sensors. – 2022. – P. 14.

3. Горобцов, А. С. Обобщенная задача динамического уравнивания и перспективные направления ее применения / А. С. Горобцов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – С. 14–24.

4. Особенности решения уравнений метода обратной задачи для синтеза устойчивого управляемого движе-

ния шагающих роботов / А. С. Горобцов, А. Е. Андреев, А. Е. Марков, А. А. Скориков, П. С. Тарасов // Информатика и автоматизация. – 2019. – № 18. – С. 85–122.

5. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей / А. С. Горобцов, С. К. Карцов, А. Е. Плетнев, Ю. А. Поляков. – М. : Машиностроение, 2011. – 462 с.