

УДК 621.865

doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-16-27

Исследование влияния компонентов задачи оптимального управления на ее частоту для четырехногого шагающего робота^{*}

Р.Р. Хусаинов¹, А.А. Линюшин¹, Л.Ю. Ворочаева², С.И. Савин¹

¹ Университет Иннополис

² Юго-Западный государственный университет

Studying the impact of the optimal control problem components on its frequency for a quadruple walking robot

R.R. Khusainov¹, A.A. Linyushin¹, L.Yu. Vorochaeva², S.I. Savin¹

¹ Innopolis University

² Southwest State University

Существует большое количество классов шагающих роботов, различающихся числом конечностей, принципами и режимами движения и управления, причем каждый из них имеет свои достоинства и недостатки в зависимости от решаемых задач. Рассмотрен четырехногий шагающий робот, перемещающийся по пересеченной местности, преимуществом которого перед двуногими системами является большая устойчивость, а перед шести- и восьминогими — более простое управление, обусловленное меньшим числом конечностей, и возможность использования животных в качестве прототипов. Одна из важных и окончательно нерешенных задач — разработка подходов к управлению четырехногим шагающим роботом, а также определение влияния вычислительной сложности отдельных элементов системы управления на общую частоту ее работы. Система управления таким роботом представлена в виде трех модулей: обратной кинематики, предиктивного управления и вычисления параметров модели. Каждый модуль требует решения определенных задач. Проведено исследование распределения временных затрат между модулями системы управления при выполнении одной итерации. Определены средние значения временных затрат и их среднеквадратических отклонений для двух режимов движения робота: стояния и шагания. В результате численных экспериментов установлено, что среднеквадратические отклонения не зависят от режима движения устройства, что свидетельствует о независимости вычислительной нагрузки, создаваемой системой управления, от режима движения робота.

Ключевые слова: четырехногий шагающий робот, система управления, обратная кинематика, предиктивное управление, частота системы управления, среднеквадратическое отклонение

There exist a large number of classes of the walking robots differing in the number of limbs, principles and modes of motion and control. Each class of robots has its own advantages and disadvantages depending on the tasks to be solved. A quadruple walking robot is con-

^{*} Исследование осуществлено при финансовой поддержке Российского научного фонда и кабинета министров Республики Татарстан в рамках научного проекта № 22-21-20108.

sidered capable of moving over the rough terrain. Its advantages over the biped systems include higher stability, and over the six- and eight-legged systems - simpler control due to the smaller number of limbs, and the possibility of using animals as the prototypes. One of the important and not completely solved problems is development of approaches to control a quadruple walking robot, as well as establishing the influence of computational complexity of the control system separate elements on its overall operation frequency. Such robot control system is represented in the form of three modules: inverse kinematics, predictive control and model parameters calculation. Each module requires solving a certain problem. A study was conducted on the time distribution between the control system modules in a single iteration. Average time distribution values and their standard deviations were determined for the two robot motion modes: standing and walking. Results of the numerical experiments established that the standard deviations were not depending on the device motion mode, which indicated independence of the computational load created by the control system on the robot motion mode.

Keywords: quadruple walking robot, control system, inverse kinematics, predictive control, control system frequency, standard deviation

Существует большое количество разработок, связанных с движением различных по конструкции и числу конечностей шагающих роботов и с вопросами их управления для достижения поставленной задачи перемещения [1, 2].

Рассмотрим подходы к управлению четырехногими шагающими роботами. Такие устройства по сравнению с антропоморфными роботами более устойчивы при перемещении по пересеченной местности. В то же время они имеют меньшее число конечностей, чем шести- и восьминогие конструкции, что делает управление ими более простым. Кроме того, наличие четырех конечностей позволяет использовать различных животных в качестве прототипов роботов.

Одной из нерешенных проблем для шагающих роботов остается организация работы системы управления (САУ) на высокой частоте. Текущие подходы связаны с разделением САУ на уровни, отказом от полной модели робота, переходом от нелинейного предиктивного управления (ПУ) к выпуклому [3, 4], замещением ПУ управлением с обратной связью [5, 6] и др. При этом влияние отдельных компонентов САУ на частоту ее работы в различных режимах движения остается не изученным.

Цель работы — исследование вычислительной нагрузки, создаваемой различными компонентами САУ квадрупеда, при использовании структуры системы управления, предложенной в работе [3].

Обзор методов управления четырехногими шагающими роботами. Рассмотрим более подробно некоторые работы современных исследова-

телей для формирования представления о существующих подходах, методах, алгоритмах и стратегиях управления четырехногими шагающими роботами, решенных в этой сфере задачах и актуальных проблемах, еще детально не изученных.

В работе [7] описаны подходы к автоматическому генерированию походок реконфигурируемых роботов на основе самообучения. В результате моделирования «осторожной походки» четырехногой шагающей платформы установлено, что не все варианты такой походки являются равнозначными с точки зрения поддержания устойчивости. Одна последовательность движения конечностей может приводить к опрокидыванию устройства, а другая — позволять сохранять устойчивость. Самообучение дает возможность автоматически формировать сценарии устойчивой походки.

Статья [8] посвящена исследованиям движения четырехногого шагающего робота, использующего показания гироскопа и акселерометра, по которым вычисляются углы крена и тангажа. Задачей САУ является коррекция углового положения робота для достижения минимизации колебаний корпуса и возможности опрокидывания.

В результате экспериментов установлено, что при движении четырехногой платформы по ровной поверхности система коррекции углового положения не критична с точки зрения обеспечения стабилизации устройства, а во время ступенчатых подъема и спуска благодаря этой системе корпус устройства совершает меньшие отклонения, что предотвращает его опрокидывание.

Два типа походок четырехногого шагающего робота: статически устойчивая (условия равновесия устройства выполняются во всех фазах движения) и динамически устойчивая (присутствуют опорные фазы неустойчивого равновесия на двух педипуляторах), рассмотрены в работе [9]. Для исследования этих походок разработана компьютерная модель робота, включающая в себя математическую модель динамики системы твердых тел, модель приводов, а также модель системы управления, состоящую из блоков управления роботом и приводами.

Система стабилизации четырехногого шагающего робота, передвигающегося по поверхности со сложным рельефом, предложена в статье [10]. Эта система отслеживает отклонения устройства от положения равновесия и генерирует управляющие воздействия на приводы, обеспечивающие стабилизацию робота. В статье проведен сравнительный анализ нейросетевого, нечеткого и пропорционально-интегрально-дифференциального регуляторов, в результате которого установлено, что предпочтительным с точки зрения характеристик переходного процесса является первый из них.

Другой вид системы управления четырехногим шагающим роботом — обучаемая система управления — описан в работе [11]. Предложенная система управления состоит из обучающей части, базирующейся на математических методах обратной кинематики (ОК), и интеллектуальной, построенной с использованием динамического ДСМ-метода. Обучаемая система управления показала эффективность при статически и динамически устойчивых походках робота. Также она обладает высоким быстродействием, что позволяет управлять устройством в режиме реального времени.

Адаптивное поведение четырехногого шагающего робота рассмотрено в публикации [12], где разработана виртуальная модель устройства, включающая в себя подмодели прямой и обратной кинематики и динамическую подмодель. Для компенсации неопределенностей при взаимодействии робота с внешней средой предложена интеллектуальная система управления, работающая в режиме обучения с подкреплением. В результате экспериментов установлено, что робот формирует стратегию движения даже при отсутствии априорно заданного алгоритма шагания.

В работе [13] предложена гибридная стратегия управления походкой четырехногого шага-

ющего робота, включающая в себя управление на базе виртуальной модели устройства и управление на основе модели перевернутого маятника с пружинной нагрузкой.

Подход к генерированию управляющих воздействий для приводов шагающих роботов, исключающий решение задачи ОК, описан в статье [14]. Он позволяет упростить алгоритмы формирования управляющих воздействий, повысить быстродействие САУ и обеспечить адаптацию алгоритмов управления к меняющимся внешним воздействиям путем изменения ограничений, накладываемых на обобщенные координаты. Недостатком такого подхода являются резкие изменения управляющих воздействий при смене стадий шага, что приводит к ударным режимам.

В работе [15] приведены методы проектирования высокоскоростного энергоэффективного робота-гепарда, способного перемещаться по пересеченной местности, выполнен энергетический анализ механизма бедра его ноги.

В целом вопросы влияния вычислительной сложности отдельных элементов САУ на общую частоту ее работы остаются не изученными, особенно для новых структур САУ квадрупедами. Рассмотрим эту проблему подробнее.

Принцип работы системы управления. В качестве объекта исследования выбран четырехногий робот UnitreeA1 (рис. 1).

Робот имеет четыре ноги 1–4 и корпус 5. Каждая нога состоит из трех звеньев, два из которых — 6 и 7 — образуют бедро, а 8 является голенью. Бедро каждой ноги соединено с корпусом посредством активного цилиндрического шарнира (привода) 9, благодаря которому нога поворачивается относительно корпуса во фронтальной плоскости. Звенья бедра, а также бедра и голени связаны между собой активными цилиндрическими шарнирами 10 и 11, обеспечивающими повороты звеньев в сагиттальной плоскости.

Массогабаритные параметры робота следующие: длина звеньев бедра и голени — 0,2 м; расстояние между шарнирами бедра передних и задних ног — 0,361 м, правых и левых ног — 0,094 м; высота шарниров бедра в начальном положении — 0,3 м; масса каждой из ног — 1,6 кг; масса робота — 12,8 кг.

Система управления роботом включает в себя три уровня: ПУ на основе упрощенной мо-

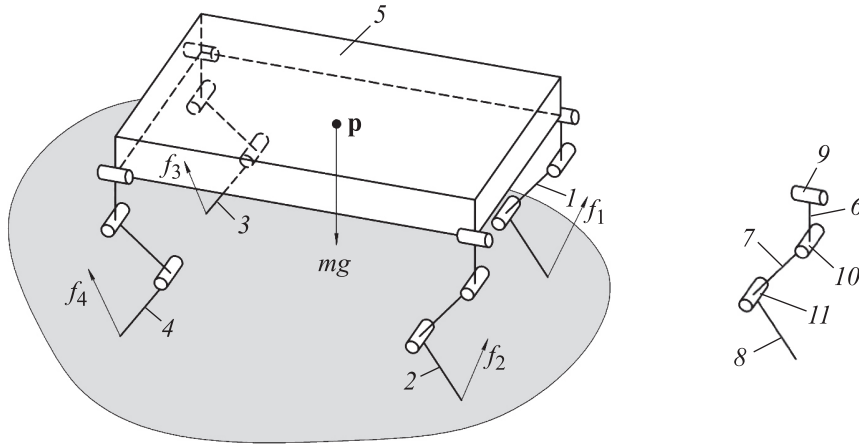


Рис. 1. Схема четырехногого робота UnitreeA1

дели, приоритезацию задач и низкоуровневое управление на базе полной модели.

ПУ основано на дискретизации следующей упрощенной модели:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{p} \\ \boldsymbol{\omega} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{R}_z & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{p} \\ \boldsymbol{\omega} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{J}_{in}^{-1}[\mathbf{r}_1] \times & \mathbf{J}_{in}^{-1}[\mathbf{r}_2] \times & \mathbf{J}_{in}^{-1}[\mathbf{r}_3] \times & \mathbf{J}_{in}^{-1}[\mathbf{r}_4] \times \\ \mathbf{I}_{3 \times 3}/m & \mathbf{I}_{3 \times 3}/m & \mathbf{I}_{3 \times 3}/m & \mathbf{I}_{3 \times 3}/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \\ \mathbf{f}_3 \\ \mathbf{f}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{g} \end{bmatrix},$$

где $\boldsymbol{\theta}$ — вектор, определяющий ориентацию тела робота; \mathbf{p} — вектор положения тела робота; $\boldsymbol{\omega}$ — вектор угловой скорости; $\mathbf{0}_{3 \times 3}$ — нулевая матрица размера 3×3 ; \mathbf{R}_z — матрица поворота вокруг вертикальной оси, описывающая ориентацию робота; \mathbf{J}_{in} — матрица инерции робота; \mathbf{r}_i — вектор положения i -й стопы робота, $i = 1 \dots 4$; \mathbf{I} — единичная матрица размера 3×3 ; m — масса робота; \mathbf{f}_i — вектор реакции опорной поверхности, действующей на i -ю ногу; \mathbf{g} — вектор силы тяжести.

При получении упрощенной модели приняты два допущения в уравнениях движения твердого тела (корпуса робота): отсутствует влияние кососимметричных составляющих динамики (относительной угловой скорости тела); углы крена и тангажа корпуса робота — неизменно нулевые. Влияние динамики ног робота на динамику всей системы не учитывалось, что применимо при реализации ПУ, если масса ног робота значительно меньше, чем у тела. Подробнее метод описан в работе [16].

Перед роботом поставлены три задачи. Первая задача — выставить положение \mathbf{x}_1^{des} , скорость перемещения $\dot{\mathbf{x}}_1^{des}$ и ускорение $\ddot{\mathbf{x}}_1^{des}$ стоп. Если нога опорная, то задаются нулевые скорость перемещения и ускорение. Вторая задача — выставить положение, скорость перемещения и ускорение корпуса. Третья задача — выставить ориентацию, угловую скорость и ускорение тела.

С помощью значений положения и скорости перемещения в каждой задаче рассчитывают желаемые углы и угловые скорости каждого привода. Вычисления проводят с учетом приоритезации и якобианов каждой из задач [17]. Далее указанные векторы преобразуют в команды $\ddot{\mathbf{x}}_i^{cmd}$ следующим образом:

$$\ddot{\mathbf{x}}_i^{cmd} = \ddot{\mathbf{x}}_i^{des} + \mathbf{K}_p (\mathbf{x}_i^{des} - \mathbf{x}_i) + \mathbf{K}_d (\dot{\mathbf{x}}_i^{des} - \dot{\mathbf{x}}_i),$$

где \mathbf{x}_i — текущее значение векторов i -й задачи; \mathbf{K}_p , \mathbf{K}_d — матрицы пропорционально-дифференциального регулятора.

Отметим, что предложенный набор задач не зависит от типа реализуемой походки робота и может быть применен к широкому классу его походок, описываемых отдельными траекториями движения ног и тела.

Приоритизация задач позволяет найти вектор обобщенных ускорений $\ddot{\mathbf{q}}$ итеративным способом:

$$\ddot{\mathbf{q}}_i^{cmd} = \mathbf{J}_i^{\#} (-\mathbf{J}_i \ddot{\mathbf{q}});$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_i^{cmd} = \ddot{\mathbf{q}}_{i-1}^{cmd} + (\mathbf{J}_i \mathbf{N}_i)^{\#} (\ddot{\mathbf{x}}_i^{cmd} - \dot{\mathbf{J}}_i \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{J}_i \ddot{\mathbf{q}}_{i-1}^{cmd}),$$

где \mathbf{J}_i — якобиан i -й задачи; $(\cdot)^{\#}$ — взвешенное псевдообращение; \mathbf{N}_i — проектор в пересечении нуль-пространств якобианов всех задач, вплоть до i -й.

Взвешенное псевдообращение

$$\mathbf{J}^\# = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1},$$

где \mathbf{H} — обобщенная матрица инерции [3].

Квадратичную программу, решающую задачу о моментах приводов, запишем как

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{a}, \mathbf{f}}{\text{minimize}} && \mathbf{a}^T \mathbf{Q}_a \mathbf{a} + \mathbf{f}^T \mathbf{Q}_f \mathbf{f}; \\ & \text{subject to} && \begin{cases} \mathbf{S}(\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}) = \mathbf{S}\mathbf{J}_1^T \boldsymbol{\lambda}; \\ \ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{q}}^{cmd} + \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ 0 \end{bmatrix}; \\ \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{f}^{MPC} + \mathbf{f}; \\ \mathbf{W}\boldsymbol{\lambda} \geq 0, \end{cases} \end{aligned}$$

где \mathbf{a} — вектор корректировки обобщенных ускорений; \mathbf{Q}_a , \mathbf{Q}_f — матрицы весов целевой функции; \mathbf{S} — матрица выбора первых шести координат (координат, описывающих положение и ориентацию тела робота); \mathbf{c} — аффинный компонент уравнений динамики; $\boldsymbol{\lambda}$ — вектор реакций связей; \mathbf{W} — матрица, задающая аппроксимацию конуса трения; \mathbf{f}^{MPC} — вектор желаемых реакций опорной поверхности, найденных с использованием выражения (1).

Структура системы управления. Структурная схема системы управления роботом UnitreeA1 приведена на рис. 2. Здесь показаны модуль управления высокого уровня, включающий в себя графический интерфейс пользователя (ГИП), планер (планировщик движения высокого уровня), пульт управления, модуль выбора походок, планировщик низкого уровня, обеспечивающий планирование шагов, движения ног в процессе шага и тела, модуль машинного зрения и построения модели поверхности, модуль наблюдателя состояния и лидар.

Основными элементами САУ являются: решатель задач ОК с приоритизацией (включающей в себя первую–третью задачи), модуль вычисления параметров модели (model evaluation) для текущей конфигурации, а также модуль решения выпуклой задачи ПУ. Каждый из этих модулей выполняется единожды на каждой итерации САУ, но число задач решателя ОК зависит от движения робота (их меньше при стоянии на месте, чем при ходьбе).

Проведение численных экспериментов. При моделировании изучали влияние каждого из модулей системы управления роботом на время выполнения одной итерации САУ (величины, обратно пропорциональной частоте работы САУ). Для этого проводили серию численных экспериментов.

В рамках одного эксперимента робот выполнял заданное движение — стоял на месте или шагал вперед — в течение 10 с. Стояние на месте осуществлялось при заданных положениях ног на поверхности и желаемом положении корпуса. Пиктограммы, иллюстрирующие один шаг робота при движении вперед, показаны на рис. 3.

Параметры моделируемого шага следующие: высота центра масс корпуса — 0,29 м; высота поднятия ног — 0,1 м; тип походки — попеременное диагональное поднятие ног; период шага (сумма фаз опоры и переноса каждой из ног) — 0,5 с; отношение продолжительности фаз опоры и переноса ног — 0,6. Начальное положение робота при шагании вперед соответствует его конфигурации при стоянии на месте: высота центра масс корпуса — 0,29 м; точки контакта ног робота расположены непосредственно под шарнирами, соединяющими бедра с корпусом.

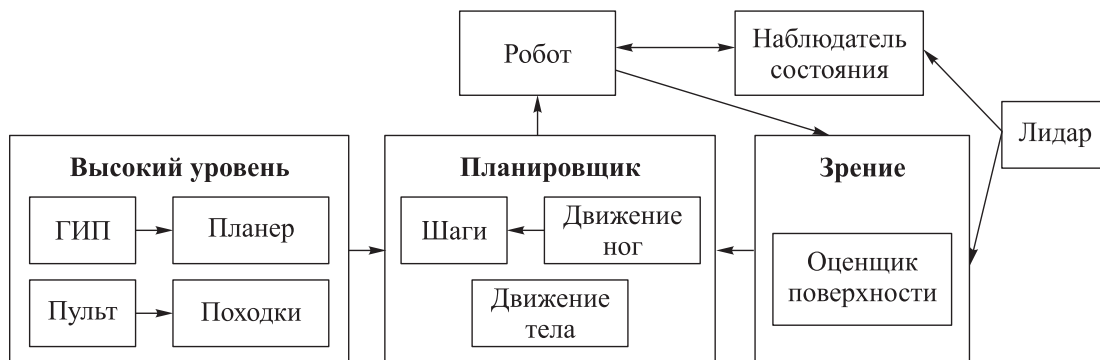


Рис. 2. Структурная схема системы управления роботом UnitreeA1

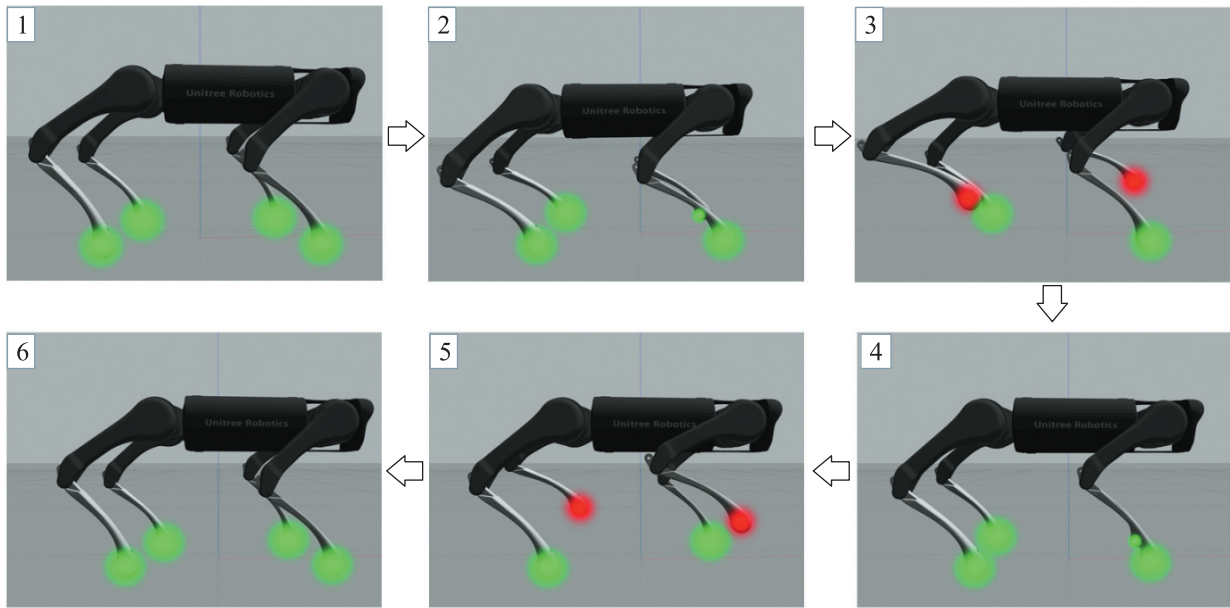


Рис. 3. Пиктограммы одного шага робота при движении вперед:

1 — начальное положение шага; 2 — начало отрыва первой и четвертой ног; 3 — отрыв первой и четвертой ног; 4 — начало отрыва второй и третьей ног; 5 — отрыв второй и третьей ног; 6 — конечное положение (красным цветом показаны ноги, отрывающиеся от поверхности)

При моделировании стояния робота на месте контролируемые системой управления параметрами являются координаты его центра масс, которые должны быть неизменными. При реализации шага САУ должна обеспечивать перемещение центра масс корпуса вперед с постоянной заданной скоростью.

Работоспособность САУ подтверждают приведенные на рис. 4 законы изменения координат и проекций скоростей перемещения центра масс робота (ось x показывает его движение в

сагиттальной плоскости, ось y — во фронтальной, ось z — вертикальные перемещения).

Как видно из рис. 4, *а*, перемещение робота происходит только вперед, причем график $x(t)$ представляет собой наклонную прямую, т. е. он движется с постоянной скоростью, две другие координаты остаются неизменными во время шага.

Проекции скоростей перемещения центра масс робота (рис. 4, *б*) имеют колебательный характер. Причем средние скорости движения

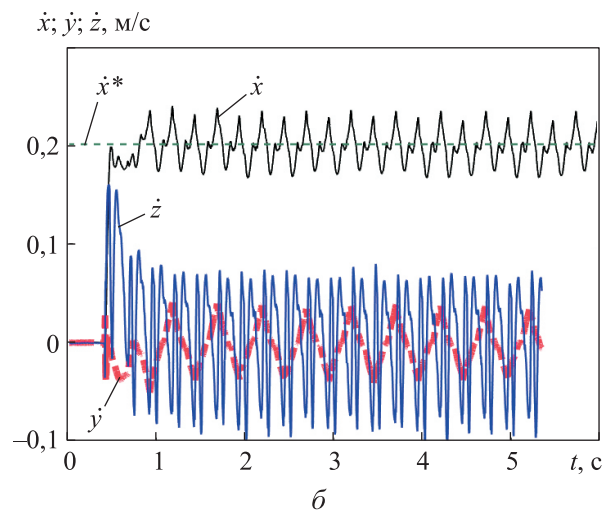
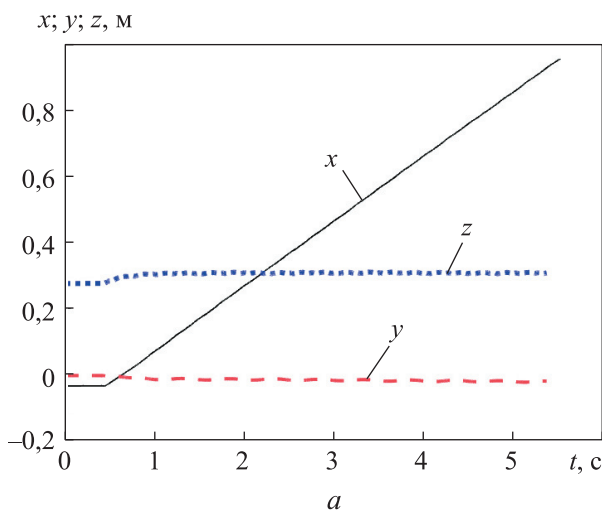


Рис. 4. Зависимости координат x, y, z и проекций скоростей перемещения $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ центра масс робота от времени t при выполнении шага вперед

вдоль осей y и z равны нулю, а вдоль оси x среднее значение скорости $\dot{x}^*(t) = 0,2$ м/с (штриховая линия) соответствует желаемой скорости. Видно, что переход из начального состояния в установившееся движение занимает около 1 с, а предельные отклонения скоростей, связанные с ударной природой движения, находятся в пределах 15 % желаемой величины и не нарушают работоспособность алгоритмов в целом, падения робота не происходит.

Для каждого из двух режимов движения (стояния и шагания вперед) вычисляли время, затраченное каждым блоком САУ на каждой итерации. Проводили пять экспериментов для указанных движений устройства, определяя среднее значение времени, затраченного каждым модулем.

Для модуля ОК отдельно записывали значения времени, затраченного на решение каждой задачи кинематики. Кроме средних значений находили среднеквадратическое отклонение (СКО). Эксперименты проводили на персональном компьютере с операционной системой Ubuntu 20.04, 4-ядерным процессором i5-8300H (с тактовой частотой 3,55 ГГц).

Режим стояния на месте. Значения времени работы САУ в режиме стояния робота на месте после проведения одного и пяти экспе-

риментов приведены в табл. 1, где СЗ — среднее значение.

Анализ результатов экспериментов показал, что модули ОК и ПУ требуют приблизительно одинаковое время, значительно превышающее затраты на вычисление параметров модели. Если принять последнее время за единицу, то для одного эксперимента соотношение между временем работы модулей (ОК:ПУ:вычисления параметров модели) будет следующим: 2,60:2,64:1.

Сходная ситуация и со СКО: модули ОК и ПУ демонстрируют одинаковое СКО, тогда как для модуля вычисления параметров модели эта величина намного меньше. Аналогичное соотношение имеет вид 2,07:1,93:1.

Следует отметить, что подзадачи модуля ОК существенно различаются по временным затратам. Расположение задач по мере уменьшения времени их выполнения следующее: первая — другие — третья — вторая. Другие задачи, к которым относится и перестановка ног, помимо больших временных затрат характеризуются высоким СКО. Это связано с тем, что они возникают, когда робот теряет контакт в процессе стояния, что является нерегулярным событием.

Модуль ПУ тратит время в первую очередь на взвешенное псевдообращение, затем на дру-

Таблица 1

Значения времени работы САУ в режиме стояния робота на месте

Модуль	Задачи	Время, мс	
		СЗ	СКО
Модуль ОК	Первая	0,072/0,071	0,016/0,015
	Вторая	0,012/0,012	0,003/0,003
	Третья	0,014/0,014	0,004/0,004
	Другие	0,032/0,032	0,024/0,024
Всего		0,131/0,130	0,027/0,029
Модуль ПУ	Взвешенное псевдообращение	0,060/0,061	0,013/0,013
	Квадратичная программа	0,024/0,024	0,006/0,006
	Инициализация ограничений в виде равенств	0,004/0,004	0,001/0,001
	Инициализация ограничений в виде неравенств	0,002/0,002	0/0
	Другие	0,040/0,041	0,023/0,027
Всего		0,130/0,132	0,027/0,031
Вычисление параметров модели		0,051/0,050	0,014/0,014
Полное время, затрачиваемое на одну итерацию		0,311/0,313	0,041/0,045
<i>Примечание.</i> В числителе дроби указаны значения после проведения пяти экспериментов, в знаменателе — после одного.			

гие задачи и лишь после этого происходит решение квадратичной задачи. Наименьший объем ресурсов затрачивается на ее составление — инициализацию ограничений.

К другим задачам модуля ПУ относится построение траектории ноги в процессе шага. Эта задача возникает и при стоянии на месте, так как робот иногда переставляет ноги, чтобы избежать падения. При этом СКО других задач примерно в 2 раза больше, чем для взвешенного псевдообращения.

Заметим, что число экспериментов лишь незначительно влияет на результат моделирования, поэтому для режима шагания приведены численные данные только одного эксперимента.

Режим шагания. Значения времени работы САУ в режиме шагания приведены в табл. 2, где СЗ — среднее значение.

Для режима шагания робота движения можно установить следующее: наибольшее время работы САУ затрачивается на выполнение задач ОК, а наименьшее — на вычисление параметров модели. Соотношение временных затрат между модулями можно представить следующим образом: 2,26:1,81:1. В этом заключается различие между двумя рассматриваемыми режимами движения робота. При этом соотношение между СКО трех модулей 2,00:1,93:1 соответствует таковому для режима стояния.

Распределения временных затрат на решение задач ОК для режимов шагания и стояния робота также различаются. Последовательность задач в порядке уменьшения времени следующая: другие — первая — третья — вторая.

В режиме шагания робота наибольшее время приходится на решение других задач. Это обусловлено тем, что нерегулярных событий при шагании робота значительно больше, чем при стоянии. При этом СКО первой и других задач (связанных с переносом ног) — наибольшие в модуле ОК и практически одинаковые по значениям.

Аналогичная закономерность по распределению временных затрат наблюдается и для модуля ПУ: времена выполнения взвешенного псевдообращения и других задач, связанных с переносом ног, меняются местами. Это также объясняется возникновением большего числа задач, связанных с переносом ног, в процессе шагания. Наименьшее время, как и в режиме стояния, расходуется на инициализацию ограничений. Распределение СКО по задачам модуля ПУ практически не меняется по сравнению таковым в режиме стояния.

Самым значимым результатом сравнения временных затрат на работу САУ в двух режимах движения робота оказалось то, что время, затрачиваемое САУ на одну итерацию, немного

Таблица 2

Значения времени работы САУ в режиме шагания робота

Модуль	Задачи	Время, мс	
		СЗ	СКО
Модуль ОК	Первая	0,041	0,020
	Вторая	0,012	0,003
	Третья	0,014	0,004
	Другие	0,061	0,019
Всего		0,129	0,028
Модуль ПУ	Взвешенное псевдообращение	0,038	0,013
	Квадратичная программа	0,018	0,008
	Инициализация ограничений в виде равенств	0,004	0,001
	Инициализация ограничений в виде неравенств	0,001	0
	Другие	0,042	0,022
Всего		0,103	0,027
Вычисление параметров модели		0,057	0,014
Полное время, затрачиваемое на одну итерацию		0,289	0,041

меньше в режиме шагания, а СКО практически не зависит от режима работы устройства. Это позволяет рассматривать два режима движения робота, не делая между ними различия при определении вычислительной нагрузки, создаваемой САУ.

Выводы

1. Проведено исследование двух режимов движения четырехногого шагающего робота — стояния и шагания — с точки зрения времени, затрачиваемого САУ на каждую итерацию, а также возникающего при этом СКО. Приведена структурная схема системы управления роботом, выделены три ее модуля: ОК, ПУ и вычисления параметров модели. Даны математические модели каждого из них.

2. Анализ результатов численного эксперимента выявил следующее:

- время одной итерации в режиме шагания немного меньше, чем в режиме стояния;
- СКО за одну итерацию не зависит от режима движения устройства;
- наименьшее время независимо от режима движения приходится на работу модуля вычисления параметров модели;
- в режиме стояния временные затраты на выполнение задач ОК и ПУ примерно одинако-

вые, а в режиме шагания задачи ОК требуют на 20 % больше времени, чем ПУ;

- распределение СКО по модулям САУ крайне несущественно зависит от режима движения робота;

- распределение временных затрат на выполнение задач модуля ОК зависит от режима движения робота:

- в режиме стояния время на выполнение первой задачи (определение положения, скорости перемещения и ускорения стоп робота) больше, чем на другие задачи, обусловленные нерегулярными событиями;

- в режиме шагания наибольшее время тратится на другие задачи, что обусловлено значительным числом нерегулярных событий;

- распределение временных затрат на выполнение задач модуля ПУ аналогичным образом зависит от режима движения робота, но вместо первой задачи выступает взвешенное псевдообращение;

- режим движения не оказывает влияния на СКО при работе модуля ОК за исключением решения первой задачи: его значение в режиме шагания немного больше, чем в режиме стояния; при этом независимо от режима наибольшие СКО наблюдаются при выполнении других задач.

Литература

- [1] Katayama S., Ohtsuka T. Whole-body model predictive control with rigid contacts via online switching time optimization. *IEEE IROS*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981790>
- [2] Bledt G., Wensing P.M., Ingersoll S. et al. Contact model fusion for event-based locomotion in unstructured terrains. *IEEE ICRA*, 2018, pp. 4399–4406, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460904>
- [3] Kim D., Di Carlo J., Katz B. et al. Highly dynamic quadruped locomotion via whole-body impulse control and model predictive control. *arXiv*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.06586>
- [4] Ding Y., Pandala A., Li C., Shin Y.H., Park H.W. Representation-free model predictive control for dynamic motions in quadrupeds. *IEEE Trans. Robot.*, 2021, vol. 37, no. 4, pp. 1154–1171, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2020.3046415>
- [5] Mason S., Rotella N., Schaal S. et al. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints. *IEEE-RAS Humanoids*, 2016, pp. 63–68, doi: <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2016.7803255>
- [6] Savin S., Balakhnov O., Khusainov R. et al. State observer for linear systems with explicit constraints: orthogonal decomposition method. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 18, art. 6312, doi: <https://doi.org/10.3390/s21186312>
- [7] Манько С.В., Шестаков Е.И. Автоматический синтез сценариев походки реконфигурируемых мехатронно-модульных роботов в модификации шагающей платформы. *Russian Technological Journal*, 2018, т. 6, № 4, с. 26–41, doi: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-26-41>

- [8] Васильянов Г.С., Лавров А.А. Разработка и исследование алгоритмов адаптивного управления четырехногими роботизированными платформами. *Экстремальная робототехника*, 2015, т. 1, № 1, с. 323–332.
- [9] Варлашин В.В., Иванов А.А., Рогов А.В. и др. Моделирование походок шагающего робота на плоскости. *Экстремальная робототехника*, 2016, т. 1, № 1, с. 149–153.
- [10] Тетерятников А.Г., Рыбаков А.В., Выборнов Н.А. и др. Моделирование системы стабилизации четырехногого шагающего робота. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2020, т. 8, № 3, с. 189–197, doi: <https://doi.org/10.31776/RTSJ.8304>
- [11] Добрынин Д.А. Моделирование обучаемой системы управления шагающего робота. *Шестой Всерос. науч.-практ. семинар Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта*. Москва, РАИИ, 2021, с. 109–111.
- [12] Данилов В.А., Диане С.А.К. Моделирование адаптивного поведения многозвенных шагающих роботов. *Шестой Всерос. науч.-практ. семинар Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта*. Москва, РАИИ, 2021, с. 132–134.
- [13] Цзун С. Исследование стратегий управления для четвероногих шагающих роботов. *StudNet*, 2021, т. 4, № 7, с. 557–572. URL: https://stud.net.ru/wp-content/uploads/2021/07/%D0%92%D1%8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA-7_2021-1.pdf
- [14] Каргинов Л.А. Синтез управляющих воздействий для приводов исполнительных механизмов шагающих роботов без решения обратной задачи кинематики. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 4, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-692>
- [15] Борисов И.И., Колюбин С.А. Энергетический анализ биоинспирированного механизма ноги галопирующего робота-гепарда. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2019, т. 19, № 6, с. 1106–1114, doi: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-6-1106-1114>
- [16] Di Carlo J., Wensing P.M., Katz B. et al. Dynamic locomotion in the mit cheetah 3 through convex model-predictive control. *IEEE/RSJ IROS*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594448>
- [17] Baerlocher P., Boulic R. Task-priority formulations for the kinematic control of highly redundant articulated structures. *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications*, 1998, vol. 1, pp. 323–329, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.1998.724639>

References

- [1] Katayama S., Ohtsuka T. Whole-body model predictive control with rigid contacts via online switching time optimization. *IEEE IROS*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981790>
- [2] Bledt G., Wensing P.M., Ingersoll S. et al. Contact model fusion for event-based locomotion in unstructured terrains. *IEEE ICRA*, 2018, pp. 4399–4406, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460904>
- [3] Kim D., Di Carlo J., Katz B. et al. Highly dynamic quadruped locomotion via whole-body impulse control and model predictive control. *arXiv*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.06586>
- [4] Ding Y., Pandala A., Li C., Shin Y.H., Park H.W. Representation-free model predictive control for dynamic motions in quadrupeds. *IEEE Trans. Robot.*, 2021, vol. 37, no. 4, pp. 1154–1171, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2020.3046415>
- [5] Mason S., Rotella N., Schaal S. et al. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints. *IEEE-RAS Humanoids*, 2016, pp. 63–68, doi: <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2016.7803255>
- [6] Savin S., Balakhnov O., Khusainov R. et al. State observer for linear systems with explicit constraints: orthogonal decomposition method. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 18, art. 6312, doi: <https://doi.org/10.3390/s21186312>
- [7] Manko S.V., Shestakov E.I. Automatic synthesis of gait scenarios for reconfigurable mechatronic modular robots in the modification of the walking platform. *Russian Technological*

- Journal*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 26–41, doi: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-26-41> (in Russ.).
- [8] Vasilyanov G.S., Lavrov A.A. Development and research of algorithms of adaptive management of the quadruped robotized platforms. *Ekstremalnaya robototekhnika* [Extreme Robotics], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 323–332. (In Russ.).
- [9] Varlashin V.V., Ivanov A.A., Rogov A.V. et al. Modeling the gaits of a walking robot on a plane. *Ekstremalnaya robototekhnika* [Extreme Robotics], 2016, vol. 1, no. 1, pp. 149–153. (In Russ.).
- [10] Teteryatnikov A.G., Rybakov A.V., Vybornov N.A. et al. Simulation of a four-legged walking robot stabilization system. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2020, vol. 8, no. 3, pp. 189–197, doi: <https://doi.org/10.31776/RTCJ.8304> (in Russ.).
- [11] Dobrynin D.A. [Modelling of learning control system of a walking robot]. *Shestoy Vseros. nauch.-prakt. seminar Bepilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta* [6th Russ. Int. Sci.-Pract. Seminar Unmanned Vehicles with Artificial Intelligence Elements]. Moscow, RAI Publ., 2021, pp. 109–111. (In Russ.).
- [12] Danilov V.A., Diane S.A.K. [Modelling of adaptive behaviour of multilink walking robots]. *Shestoy Vseros. nauch.-prakt. seminar Bepilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta* [6th Russ. Int. Sci.-Pract. Seminar Unmanned Vehicles with Artificial Intelligence Elements]. Moscow, RAI Publ., 2021, pp. 132–134. (In Russ.).
- [13] Tszun S. Research on control strategies for four-legged walking robots. *StudNet*, 2021, vol. 4, no. 7, pp. 557–572. URL: https://stud.net.ru/wp-content/uploads/2021/07/%D0%92%D1%8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA-7_2021-1.pdf (in Russ.).
- [14] Karginov L.A. The synthesis of control actions to drive the actuators of walking robots without solving the inverse kinematics task. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 4, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-692> (in Russ.).
- [15] Borisov I.I., Kolyubin S.A. Energy-based analysis of bioinspired mechanism for cheetah robot leg. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1106–1114, doi: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-6-1106-1114> (in Russ.).
- [16] Di Carlo J., Wensing P.M., Katz B. et al. Dynamic locomotion in the mit cheetah 3 through convex model-predictive control. *IEEE/RSJ IROS*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594448>
- [17] Baerlocher P., Boulic R. Task-priority formulations for the kinematic control of highly redundant articulated structures. *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications*, 1998, vol. 1, pp. 323–329, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.1998.724639>

Статья поступила в редакцию 13.03.2023

Информация об авторах

ХУСАИНОВ Рамиль Расимович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мехатроники, управления и прототипирования. Университет Иннополис (420500, Иннополис, Российская Федерация, ул. Университетская, д. 1, e-mail: r.khusainov@innopolis.ru).

ЛИНЮШИН Андрей Александрович — лаборант лаборатории мехатроники, управления и прототипирования. Университет Иннополис (420500, Иннополис, Российская Федерация, ул. Университетская, д. 1, e-mail: a.linyushin@innopolis.university).

Information about the authors

KHUSAINOV Ramil Rasimovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Mechatronics, Control and Prototyping, Innopolis University (420500, Innopolis, Russian Federation, Universitetskaya St., Bldg. 1, e-mail: r.khusainov@innopolis.ru).

LINYUSHIN Andrey Alexandrovich — Laboratory Assistant, Laboratory of Mechatronics, Control and Prototyping, Innopolis University (420500, Innopolis, Russian Federation, Universitetskaya St., Bldg. 1, e-mail: a.linyushin@innopolis.university).

ВОРОЧАЕВА Людмила Юрьевна — кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники. Юго-Западный государственный университет (305040, Курск, Российская Федерация, ул. 50 лет Октября, д. 94, e-mail: mila180888@yandex.ru).

VOROCHEVA Lyudmila Yurievna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics. Southwest State University (305040, Kursk, Russian Federation, 50 let Oktyabrya, Bldg. 94, e-mail: mila180888@yandex.ru).

САВИН Сергей Игоревич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мехатроники, управления и прототипирования. Университет Иннополис (420500, Иннополис, Российская Федерация, ул. Университетская, д. 1, e-mail: s.savin@innopolis.ru).

SAVIN Sergei Igorevich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Mechatronics, Control and Prototyping. Innopolis University (420500, Innopolis, Russian Federation, Universitetskaya St., Bldg. 1, e-mail: s.savin@innopolis.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хусаинов Р.Р., Линюшин А.А., Ворочаева Л.Ю., Савин С.И. Исследование влияния компонентов задачи оптимального управления на ее частоту для четырехногого шагающего робота. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 10, с. 16–27, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-16-27

Please cite this article in English as:

Khusainov R.R., Linyushin A.A., Vorochaeva L.Yu., Savin S.I. Studying the impact of the optimal control problem components on its frequency for a quadruple walking robot. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 10, pp. 16–27, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-16-27



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

«Математика»

Авторы: Е.А. Власова, Т.В. Облакова

Рассмотрены основные разделы школьного курса математики. Приведен необходимый справочный теоретический материал, достаточно полно изложены основные методы решения задач разного уровня сложности. Большинство представленных задач предлагалось на физико-математических олимпиадах, проводимых МГТУ им. Н.Э. Баумана. Большое внимание уделено освоению таких тем, как «Решение задач с параметром» и «Решение стереометрических задач». Для проверки усвоения материала по каждой теме предложены контрольные работы и приведены ответы на них.

Для учащихся старших классов средних школ, гимназий, лицеев, слушателей подготовительных курсов, выпускников средних специальных учебных заведений, а также лиц, самостоятельно изучающих математику и готовящихся к вступительным испытаниям в технические вузы (в частности, по результатам ЕГЭ и физико-математических олимпиад).

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>