

УДК 621.01, 621.837.3

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-832-839

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МЕХАНИЗМА НОГИ ГАЛОПИРУЮЩЕГО РОБОТА

И.И. Борисов, Д.С. Монич, С.А. Колюбин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: borisovii@itmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 12.04.19, принята к печати 24.07.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Борисов И.И., Монич Д.С., Колюбин С.А. Разработка метода геометрического синтеза и параметрической оптимизации механизма ноги галопирующего робота // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 832–839. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-832-839

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты геометрического синтеза кинематических схем механизмов бедра и всей ноги робота-гепарда, способного прыгать на месте и бегать с разной скоростью. В статье обоснована топология механизмов, даны описание принципа работы, характеристики и отличительные качества, заключающиеся в управляемой реконфигурации механизмов для изменения траектории точки контакта с полом, а также в использовании гибких элементов и звеньев переменной длины для обеспечения энергоэффективной локомоции. **Метод.** Структурная схема всей ноги робота-гепарда получена путем присоединения четырех подвижных звеньев к механизму бедра, имитируя большую и малую берцовые кости, плюсну и портняжную мышцу. Полученная структура декомпозирована на три составляющих механизма: «минитаур», двукоромысловый четырехзвенный лямбда механизм и коромысло-ползунный механизм. Методом крайних дискретных положений синтезированы кинематические схемы механизмов, в результате чего была получена кинематическая схема всей ноги с промежуточными положениями. Приведено описание алгоритма параметрической оптимизации и приведена целевая функция механизма бедра с помощью математического моделирования. **Основные результаты.** Получена кинематическая схема всей ноги робота-гепарда в первом приближении без учета динамики движения робота, расположения гибких элементов и их резонанса, необходимого для автоколебательного режима работы робота в целях достижения энергоэффективного перемещения. Приведены результаты моделирования динамики робота по синтезированной схеме. Получено стабильное поведение как при прыжке на месте, так и при беге. **Практическая значимость.** Исследование проведено в рамках разработки энергоэффективного четырехногого галопирующего робота-гепарда, осуществляющего рекуперацию энергии с помощью гибких элементов. Синтезированная кинематическая схема может быть использована для подробных анализов динамики, кинетостатики, рекуперации и определения потерь энергии при ударе о поверхность пола, а также конструирования и прототипирования опытного образца устройства.

Ключевые слова

шагающие роботы, синтез механизмов, энергоэффективность, четырехногие роботы, оптимизация механизмов

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Университета ИТМО (проект № 418233). Авторы выражают особую благодарность Стефано Страмиджиоли за оказанную помощь в данной работе.

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-832-839

GEOMETRICAL SYNTHESIS METHOD AND PARAMETRIC OPTIMIZATION OF GALLOPING ROBOT LEG MECHANISM

I.I. Borisov, D.S. Monich, S.A. Kolyubin

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
 Corresponding author: borisovii@itmo.ru

Article info

Received 12.04.19, accepted 24.07.19
 Article in Russian

For citation: Borisov I.I., Monich D.S., Kolyubin S.A. Geometrical synthesis method and parametric optimization of galloping robot leg mechanism. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 832–839 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-832-839

Abstract

Subject of Research. The paper presents geometrical synthesis results of kinematic schemes for a femur and a whole leg mechanisms of a cheetah robot, which is able to jump in place and run at various speed. We substantiate the topology of mechanisms, describe their operation principles, characteristics and distinctive features, involving the controlled reconfiguration of mechanisms for changing the trajectory of the ground-contact point, and the use of flexible elements and links with variable length to ensure energy-efficient locomotion. **Method.** A structure scheme of the whole cheetah robot leg was obtained by attaching four movable links to the femur mechanism, imitating large and small tibial bones, metatarsus and sartorius muscle. The obtained structure was decomposed into three mechanism components: a “minitaur”, two-rocker four-bar lambda mechanism and a rocker-slider mechanism. The kinematic schemes of the above-mentioned mechanisms were synthesized by the method of extreme discrete positions with the result that the kinematic scheme of the whole leg with intermediate positions was obtained. The parametric optimization algorithm was described and the minitaur objective function was given using mathematical programming. **Main Results.** The kinematic scheme of the whole cheetah robot leg is obtained in the first approximation without taking into account the robot dynamics, location of flexible elements and their resonance necessary for the resonance behavior in order to achieve energy-efficient movement. Modeling results of the robot dynamics according to the synthesized scheme are given. Stable behavior is obtained both while jumping in place and running. **Practical Relevance.** The study is carried out for the development of an energy-efficient four-legged galloping cheetah robot performing energy recovery with the help of flexible elements. The synthesized kinematic scheme is applicable for detailed analyzes of dynamics, kinetostatics, energy recovery and losses upon impact with the ground surface, and for the robot prototype design.

Keywords

legged running robots, mechanism synthesis, energy-efficient, four-legged robots, mechanism optimization

Acknowledgements

This work is supported by ITMO University grant (project No. 418233). The authors express special gratitude to Stefano Stramigioli for assistance in this study.

Введение

Данная статья посвящена разработке энергоэффективного галопирующего робота-гепарда. На сегодняшний день существует немало шагающих и бегающих роботов, обладающих высокими показателями мобильности и устойчивости. Тем не менее вопрос энергоэффективности и совершенства двигательного аппарата остается открытым. До сих пор не удалось создать робота, который мог бы конкурировать с человеком или животными одновременно по скорости, устойчивости и эффективности расходования энергии на перемещение.

Современным направлением развития бегающих роботов является создание роботов, способных перемещаться быстро и энергоэффективно благодаря специальной конструкции, оснащенной гибкими элементами, а также учету сил инерции. В работах [1, 2] приведены принципы построения четырехногого энергоэффективного локомоционного робота на примере робота-гепарда Массачусетского технологического университета MIT, которые заключаются в рекуперации энергии в электронной системе, минимизации трения в трансмиссии, минимизации инерции ноги. Самым распространенным методом подсчета энергоэффективности является измерение коэффициента затрат на перемещение (КЗП, cost of transport), равного отношению потребляемой мощности к произведению веса робота на его скорость [3]. КЗП большинства известных роботов, таких как ASIMO [4] и Boston Dynamics BigDog [5], значительно выше аналогичных коэффициентов для человека или животных соответствующих размеров и массы. Чем ниже КЗП, тем выше энергоэффективность. Распространены два основных способа повышения эффективности бегающих роботов: во-первых, разработка роботов, осуществляющих пассивную динамическую локомоцию, и, во-вторых, использование гибких элементов в конструкции, способных осуществлять накопление и рекуперацию кинетической или потенциальной энергии [6]. Энергоэффективность пассивных шагающих роботов, осуществляющих динамическую локомоцию, была доказана в [7, 8]: КЗП составил рекордные 0,19 единиц, что может быть сравнено с аналогичным показателем у животных. Однако подобные пассивные шагающие роботы способны перемещаться только по абсолютно ровной и наклонной плоскости. В [9, 10] были использованы актуаторы с гибкими элементами для рекуперации энергии пружин. Работы [11–13] посвящены разработке роботов, галопирование которых осуществляется с помощью резонанса гибких элементов.

В рамках данной статьи рассматриваются синтез и параметрическая оптимизация полного механизма ноги галопирующего робота-гепарда, способного прыгать на месте и бегать с разной скоростью.

Описание механизма

Была поставлена задача синтезировать кинематическую схему реконфигурируемого механизма с возможностью изменения траектории движения ноги робота, способного стабильно прыгать на месте и бегать с разной скоростью. Были приняты предположения, что для достижения стабильной работы при прыжке на месте центр масс должен располагаться точно над точкой контакта с полом, а переход в режим бега должен осуществляться отклонением центра масс от точки контакта. К конструкции ноги были предъявлены следующие требования:

- робот должен быть способен прыгать на месте и бегать с разной скоростью;
- механизм должен обеспечивать мягкое отталкивание ноги от поверхности пола при постоянной скорости входного звена;
- в полете механизм ноги должен втягиваться в корпус ноги как можно сильнее для минимизации сил инерции вращения, что необходимо для экономии энергии;
- робот должен приводиться в движение постоянно вращающимся основным двигателем, угол соударения с полом должен быть регулируемым дополнительным двигателем.

Обеспечить необходимое движение можно с помощью различных механизмов. Плоские рычажные механизмы, звенья которых образуют вращательные и поступательные кинематические пары, способны воспроизвести с заданной степенью точности практически любую траекторию. Было проведено исследование по сравнению трех плоских рычажных механизмов: лямбда механизма Чебышева, кулисного механизма и механизма «минитаур». Лучшим вариантом механизма для бедра был признан последний вариант, представляющий собой два зеркальных последовательно соединенных кривошипно-ползунных механизма [13]. Рассмотрим его работу подробно.

Конструкция бедра галопирующего робота-гепарда на основе кривошипно-ползунного механизма

Механизм «минитаур» («minitaur»), представляющий собой два кривошипно-ползунных механизма, соединенных последовательно, был использован впервые при разработке робота Ghost Robotics Minitaur [14]. Главное преимущество данного механизма заключается в том, что при синхронном зеркальном вращении кривошипов точка контакта с полом B перемещается строго вертикально, вследствие чего устройство способно прыгать на месте; если же внести угловую разницу между кривошипами, то в траектории появится горизонтальная составляющая, из-за чего робот перейдет в состояние бега, причем изменение фазы между кривошипами приводит только к изменению траектории по ширине, а высота траектории остается постоянной. Механизм «минитаур» является простым и состоит из четырех подвижных звеньев, которые могут обеспечить плавный ход движения точки B (рис. 1, а). Кинематические пары O_1 и O_3 соединяют кривошипы AO_1 и $A'O_3$ (1) со стойкой (5); шатуны AB и $A'B$ (2) соединяются в точке крепления гибкого элемента B ; кулиса (3) с кулисным камнем (4), который крепится с помощью вращательной кинематической пары к стойке E , необходимы в качестве направляющей для пружины. На рис. 1, б изображена схема механизма со всевозможными траекториями выходной точки B .

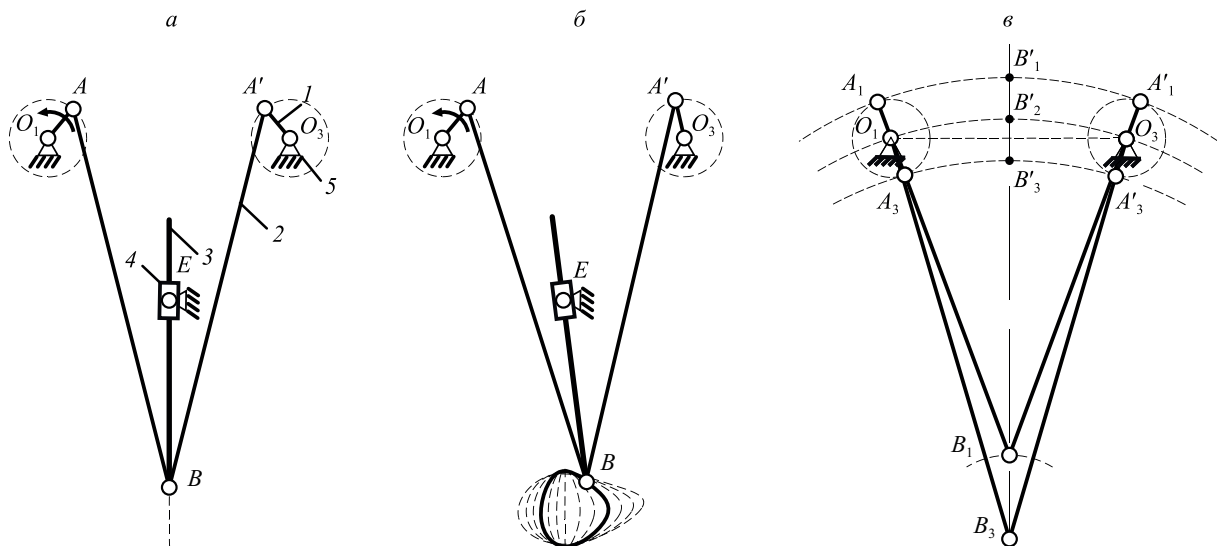


Рис. 1. «Минитаур» с синхронным вращением кривошипов AO_1 и $A'O_3$ (а); «минитаур» при вращении кривошипов с фазой между кривошипами (б), геометрический синтез «минитаура» (в)

Недостатком механизма является необходимость в использовании двух синхронных двигателей, приводящих в движения кривошипы, либо в установке редуктора, передающего движение на оба кривошипа. Люфт и отсутствие синхронности во вращении кривошипов может привести к отклонению от перемещения по вертикальной прямой. Несмотря на отличие от кинематики ноги реального гепарда благодаря своей простоте и функциональным возможностям, данный механизм идеально подходит для использования в качестве бедра роботизированной конечности, давая возможность менять скорость перемещения (плавный переход от ходьбы к бегу путем изменения угла между кривошипами), а также совершать толчковое движение, приводящее к высоким прыжкам.

Вышесказанное подводит к следующему этапу работы — синтезу полного механизма ноги галолирующего робота-гепарда. Опираясь на строение скелета, необходимо добавить звенья, имитирующие большую и малую берцовые кости, а также кости плюсны.

Синтез механизма ноги галолирующего робота-гепарда

Под синтезом кинематической схемы механизма с низшими парами подразумевается определение геометрических размеров звеньев и расположение опор в пространстве проектируемого механизма по выбранной структурной схеме и заданной кинематической характеристике, при которых совершалось бы требуемое движение [15]. Задачи синтеза решаются приближенными или точными методами. Точные методы обычно применяют к малозвенным механизмам с простой структурой. Для механизмов со сложной структурой, как у механизма всей ноги (рис. 2), предпочитают использовать приближенные методы кинематического синтеза, например, метод синтеза по трем положениям.

Проведем синтез кинематической схемы по нескольким заданным дискретным положениям. Для решения задачи геометрического синтеза разобьем механизм ноги гепарда на механизм «минитаур», двукоромысловый четырехзвенный лямбда механизм, в котором коромысла имитируют берцовые кости, и коромысло-ползунный механизм, исполняющий роль коленного сустава. Далее приведен подробный алгоритм синтеза механизма.

1. Начнем синтез механизма полной ноги с построения механизма бедра по крайним положениям точки B (рис. 1, а). Для осуществления прыжка точка B должна совершать перемещение по вертикальной прямой из крайнего нижнего положения B_3 в крайнее верхнее положение B_1 и обратно (рис. 1, в). Соответственно точка A_1 обозначает положение кинематической пары A при нахождении кинематической пары B в точке B_1 , аналогично A_3 — положение пары A при нахождении B в точке B_3 . Расстояние B_1B_3 является входным параметром синтеза и изначально задается. Из точек B_1 и B_3 строим окружности заданного радиуса AB , получаем окружности (B_1, A_1B_1) и (B_3, A_3B_3) . Строим прямую через точки B_1 и B_3 . Пересечение окружностей (B_1, A_1B_1) и (B_3, A_3B_3) и прямой B_1B_3 даст B'_1 и B'_3 соответственно. Строим окружность $(B_3, B_3B'_2)$, где B'_2 является серединой отрезка $B'_1B'_3$. Строим две новые окружности, касательные к прорисованным ранее окружностям, чьи центры находятся на окружности $(B_3, B_3B'_2)$. Центры только что построенных окружностей дадут положение стоек O_1 и O_3 , их пересечение с окружностями (B_1, A_1B_1) и (B_3, A_3B_3) даст положение точек A_1, A'_1 и A_3, A'_3 соответственно. Построенная часть механизма, носящая название «минитаур», является бедром ноги и состоит из двух последовательно соединенных зеркальных кривошипно-ползунных механизмов.

2. Перейдем к построению двукоромыслового четырехзвенного механизма $BHNM$. Коромысло BM должно имитировать большую берцовую кость, HN — малую берцовую кость, шатун NFM — плюсну, F — точка контакта с полом. В исследуемом механизме ноги гепарда выходным звеном является плюсна. Перемещение выходной точки F по вертикальной прямой линии возможно только в случае параллельности и равенства противостоящих сторон четырехзвенника, т. е. если $BHNM$ будет параллелограммом (рис. 2, а). Стойка четырехзвенного механизма H является кинематической парой, расположенной на кулисе BE (рис. 2). Положение точки H_1 соответствует крайнему верхнему положению, H_3 — крайнему нижнему положению, расстояние BH для простоты построения выбрано равным рабочему ходу B_1B_3 . В случае, когда $BHNM$ является параллелограммом, точка F будет смещена от центра тяжести, который должен быть на линии B_1B_3 . Одним из требований, предъявляемых к ноге, является расположение точки контакта с полом под центром масс, по этой причине разворачиваем звено $N_3M_3F_3$ относительно M_3 так, чтобы точка контакта с полом F_3 в крайнем нижнем положении располагалась на прямой B_1B_3 (рис. 2, б). Звено большой берцовой кости BM должно быть несколько меньше MF так, чтобы в крайнем верхнем положении нога примыкала к корпусу как можно больше для минимизации инерции, а при приземлении, наоборот, максимально раскрывалась. Строим окружности (F_1, FM) , (B_1, BM) , пересечение которых даст положение точки M_1 . Сочленение N_3 должно быть немного приближено к M_3 так, чтобы отрезок M_3N_3 в нижнем положении был равен соответствующему отрезку M_1N_1 в верхнем положении; аналогично H_3N_3 должен быть равен H_1N_1 (рис. 2, б).

3. Следующим шагом построим коромысло-ползунный механизм $BCDO_2$, исполняющий роль коленного сустава (рис. 2, в). Зададим длину второй части звена большой берцовой кости BC . Строим окружности (B_1, BC) и (B_3, BC) . Пересечение построенных окружностей с прямыми B_1M_1 и B_3M_3 даст положение точек C_1 и C_3 соответственно. Строим дугу через точки C_1 и C_3 . Центр дуги даст положение стойки D , которая может быть присоединена к корпусу через DO_2 , при этом DO_2 жестко связано с кулисным камнем, скользящим на кулисе B_1E . Таким образом, был проведен синтез коромысло-ползунного механизма $BCDO_2$ (рис. 2, в).

4. Теперь можно построить промежуточное положение точки контакта с полом F_2 между двумя крайними F_1 и F_3 . Для этого строим точку C_2 на дуге (D, DC) . Пересечение окружности (C_2, BC) с B_1B_3 даст положение точки B_2 . Пересечение окружностей (B_2, BM) и (H_2, HN) даст ориентировочное положение N_2 , которое можно откорректировать так, чтобы N_2 находилось на окружности (M_2, MN) . После построения четырехзвенника $B_2M_2N_2H_2$, продлив MF , можно получить положение точки F_2 .

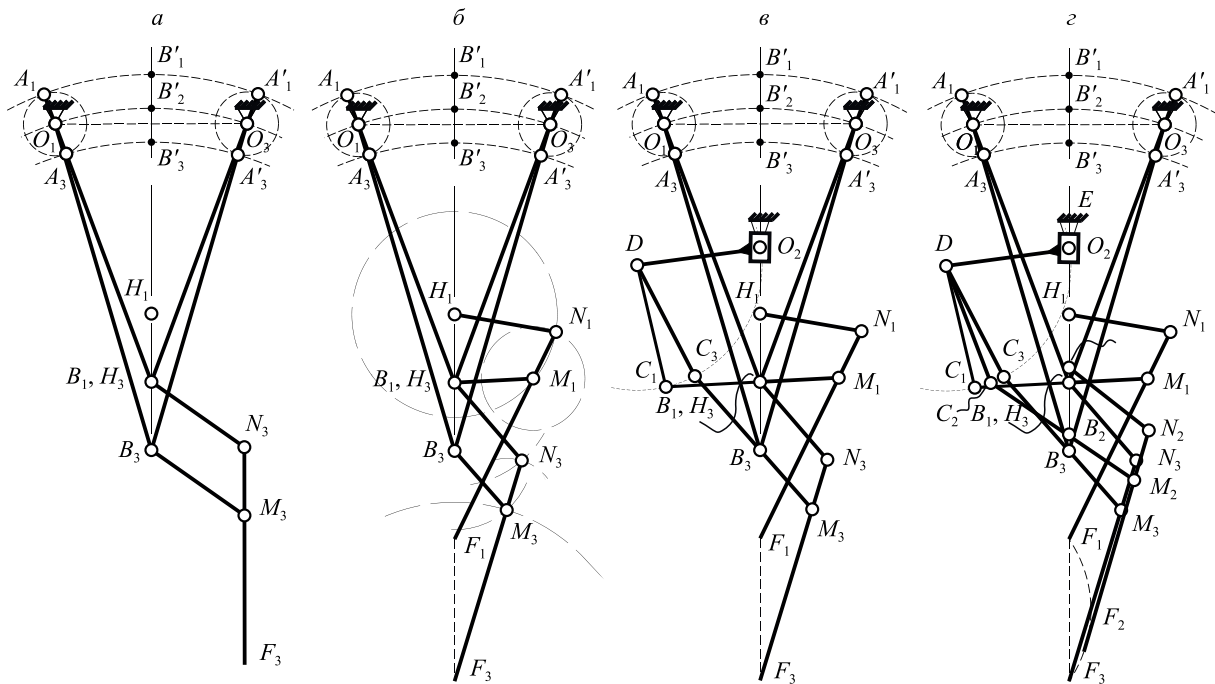


Рис. 2. Синтез полного механизма ноги робота-гепарда: а — синтез двукоромыслового четырехзвенного механизма $BHNFМ$ при параллельности звеньев BM и HN , BH и NM ; б — синтез двукоромыслового четырехзвенного механизма $BHNFМ$ при перемещении точки F по линии BB' центра масс механизма; в — синтез коромысло-ползунного механизма $BCDO_2$; г — построение промежуточного положения точки F

Как видно из построения (рис. 2), F_2 находится не на прямой B_1B_3 (рис. 2). Если построить больше промежуточных положений, то увидим, что траектория выходной точки представляет собой дугу с крайними точками, расположенными на одной вертикальной прямой.

Процедура параметрической оптимизации механизма

Описанный выше метод синтеза применим для приближенного синтеза, но имеет ряд недостатков, а именно, полученное решение не является единственным оптимальным, заданная траектория наверняка обеспечивается только в трех построенных точках, а также нет возможности учитывать дополнительные ограничения, накладываемые на работу механизма.

Далее мы рассмотрим процедуру оптимизации кинематических параметров механизма бедра с помощью математического программирования. В качестве целевого параметра примем условие близости реальной и желаемой траекторий, описываемых точкой контакта с полом на всем диапазоне вращения кривошипов. Приведем пример оптимизации параметров конструкции бедра, изображенной на рис. 1.

1. Выберем оптимизируемые параметры. Для нашего примера таковыми являются угол поворота второго кривошипа $\alpha + \beta$ и длина коромысла AB .

2. Поиск оптимальных значений параметров должен приводить к перемещению точки B вдоль желаемой траектории. Текущая траектория должна минимально отклоняться от желаемой. Рассчитать эти отклонения можно аппроксимируя траекторию множеством точек, взятых с определенным шагом, посчитав расстояния между соответствующими точками желаемой и текущей траекторий. Однако при увеличении числа точек процедура становится более вычислительно затратной. Поэтому в качестве целевой функции предлагается использовать следующую выпуклую функцию, учитывающую одновременно квадраты разниц между площадями описываемых областей, и длины желаемой и текущей траекторий:

$$f(R, T) = (S_R - S_T)^2 + (B_R - B_T)^2,$$

где S_R и S_T — площади областей, описываемых желаемой и рассчитанной траекториями, описываемыми точкой B , соответственно, а B_R и B_T — их длины соответственно.

При этом стартовая траектория точки B рассчитывается решением прямой задачи кинематики для начальных параметров модели, а желаемая траектория задается напрямую массивом точек или функцией, рассчитываемой с определенным шагом дискретизации. На рис. 3, а изображены примеры начальной и желаемой траекторий точки B , а также траектории, перебираемые в результате работы программы.

Для упрощения вычисления площадей и длин траекторий они могут быть аппроксимированы плоскими выпуклыми или вогнутыми многоугольниками, при этом они должны быть параметризованы как функции оптимизируемых параметров.

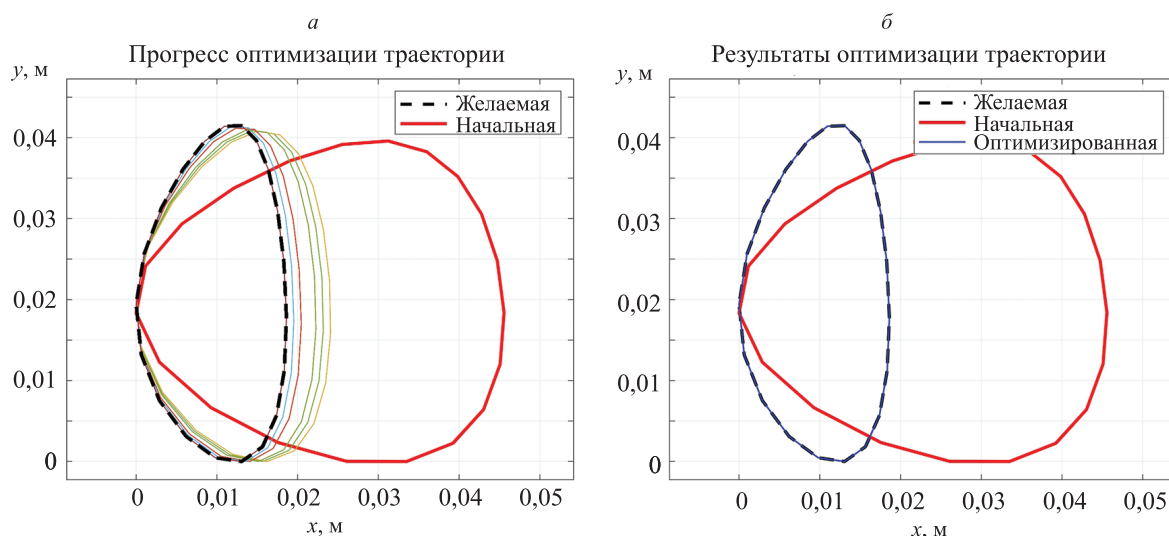


Рис. 3. Перебор траекторий (а), результаты оптимизации (б)

3. Зададим оптимизационные ограничения в виде уравнений и неравенств. Для нашего примера они устанавливают соотношения между фиксированным расстоянием d между стойками O_1 и O_3 и длинами a кривошипов O_1A и O_3A' , а также оптимизируемой длиной коромысла b так, чтобы избежать пересечений между звеньями при приведении механизма в движение.

4. Зададим начальные значения для оптимизируемых и фиксированных параметров. Для рассматриваемого механизма фиксированными являются: угол поворота левого кривошипа $\alpha = 0^\circ$, расстояние между точками O_1O_3 $d = 12,5$ см и длина обоих кривошипов $a = 2$ см. В качестве начальных значений примем угол поворота второго кривошипа $\alpha + \beta = 30^\circ$ и длину коромысла $b = 25$ см.

5. Для решения поставленной задачи условной оптимизации будем использовать метод прямого поиска, осуществляющий минимизацию целевой функции, используя поиск по шаблону. Для программной реализации данного метода мы будем использовать функцию «*patternsearch*» библиотеки Global Optimization Toolbox для MATLAB.

6. На заключительном этапе оптимизации проводится валидация полученных результатов. На рис. 3, а изображен процесс подбора параметров механизма, при котором расчетная траектория стремится к желаемой, на рис. 3, б изображен результат оптимизации. Полу жирная красная линия обозначает начальную траекторию, пунктирная черная — желаемую, тонкая синяя — оптимизированную траекторию. При финальном проходе программы значение целевой функции было равным $2,8 \cdot 10^{-12}$. Начальные значения угла β и длины кривошипа b составляло 30° и 25 см соответственно, а их оптимизированные значения — 15° и 20 см соответственно.

Обсуждение

Отметим, что ранее при синтезе все звенья рассматривались абсолютно твердыми, в то время как в системе должны быть рекуперирующие энергию гибкие элементы для обеспечения энергоэффективного автоколебательного режима работы. Установка гибких элементов приведет к корректировкам траекторий перемещений звеньев, в том числе характера перемещения выходной точки F .

При синтезе полного механизма ноги к механизму бедра было добавлено четыре звена: DC , MBC , HN , FMN . На место одного или нескольких звеньев может быть установлен гибкий элемент для обеспечения автоколебательного характера движения и рекуперации энергии.

Например, если установить пружину на место звена DC при соударении ноги с землей пружина, вытягиваясь, будет накапливать потенциальную энергию при падении робота, а после выплескивать ее в кинетическую энергию робота. Синтезированная конструкция была промоделирована в MATLAB Simscape Multibody. Путем настройки коэффициента жесткости пружины и скорости вращения кривошипов было получено стабильное прыгающее состояние на месте (рис. 4).

На рис. 5, а изображена траектория точки F при подвешенном состоянии ноги, т. е. нет моделирования удара о пол. На рис. 5, б изображена траектория точки F при моделировании контакта с полом. Фиолетовая пунктирная линия соответствует стадии полета до удара, сплошная красная — удару и толчку, штрихпунктирная синяя соответствует стадии полета после удара. Как видно из результатов моделирования, синтезированный механизм способен осуществлять требуемое движение.

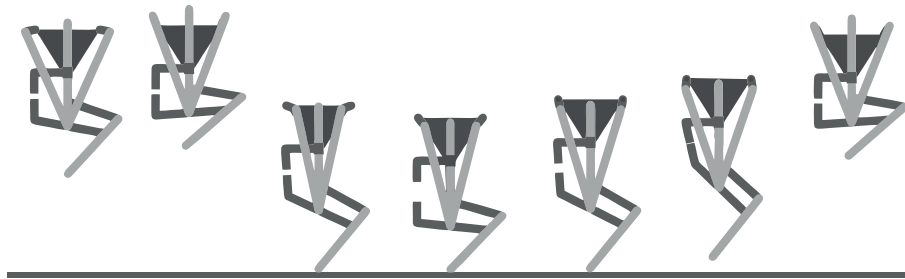


Рис. 4. Моделирование прыжка на месте полной ноги робота-гепарда

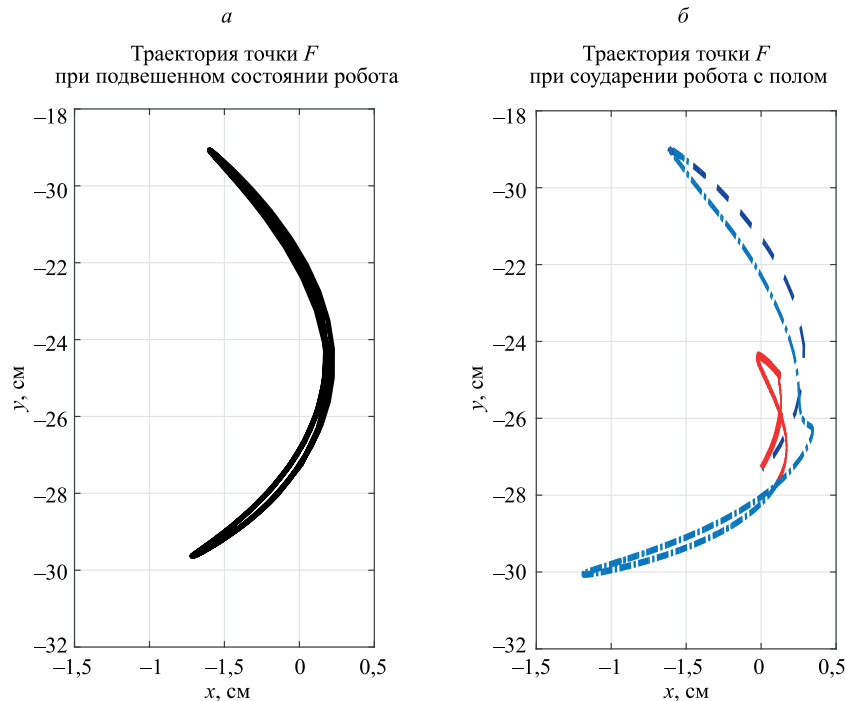


Рис. 5. Траектория перемещения точки F без моделирования контакта с полом (а) и с моделированием удара о пол (б)

Заключение

Проведенный динамический анализ с исследованием расположения гибких элементов, их влияния на скорость и на коэффициент затрат энергии на перемещение требует более подробного описания и будет раскрыт в будущих публикациях. Цель проекта — создать энергоэффективного четырехного галопирующего робота-гепарда, принцип движения которого использует рекуперацию энергии при контакте с землей, что позволяет снизить энергопотребление для обеспечения большего запаса хода. Проведенная в настоящей статье работа по синтезу всего механизма ноги робота необходима для проведения динамического и энергетического анализов механизма ноги, проектирования всей конструкции и реализации прототипа ноги робота-гепарда, которая должна осуществлять имитирующие движения бега и прыжка.

Литература

1. Seok S., Wang A., Chuah M.Y., Hyun D.J., Lee J., Otten D.M., Lang J.H., Kim S. Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT cheetah robot // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015. V. 20. N 3. P. 1117–1129. doi: 10.1109/TMECH.2014.2339013
2. Seok S., Wang A., Chuah M.Y., Otten D., Lang J., Kim S. Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot // *Proc. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*. 2013. P. 3307–3312. doi: 10.1109/ICRA.2013.6631038
3. Bhounsule P.A., Cortell J., Ruina A. Design and control of ranger: an energy-efficient, dynamic walking robot // *Adaptive Mobile Robotics — Proc. 15th International Conference on*

References

1. Seok S., Wang A., Chuah M.Y., Hyun D.J., Lee J., Otten D.M., Lang J.H., Kim S. Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT cheetah robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, vol. 20, no. 3, pp. 1117–1129. doi: 10.1109/TMECH.2014.2339013
2. Seok S., Wang A., Chuah M.Y., Otten D., Lang J., Kim S. Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot. *Proc. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, 2013, pp. 3307–3312. doi: 10.1109/ICRA.2013.6631038
3. Bhounsule P.A., Cortell J., Ruina A. Design and control of ranger: an energy-efficient, dynamic walking robot. *Adaptive Mobile Robotics — Proc. 15th International Conference on*

- Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2012. 2012. P. 441–448. doi: 10.1142/9789814415958_0057
4. Sakagami Y., Watanabe R., Aoyama C., Matsunaga S., Higaki N., Fujimura K. The intelligent ASIMO: System overview and integration // Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2002. V. 3. P. 2478–2483. doi: 10.1109/IRDS.2002.1041641
 5. Raibert M., Blankespoor K., Nelson G., Playter R. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot // IFAC Proceedings Volumes. 2008. V. 41. N 2. P. 10822–10825. doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01833
 6. Duindam V., Stramigioli S. Modeling and control for efficient bipedal walking robots: A port-based approach. Springer, 2009. 214 p. (Springer Tracts in Advanced Robotics book series; V. 53). doi: 10.1007/978-3-540-89918-1
 7. Tedrake R., Zhang T.W., Fong M.-F., Seung H.S. Actuating a simple 3D passive dynamic walker // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004, ICRA'04. 2004. V. 5. P. 4656–4661. doi: 10.1109/ROBOT.2004.1302452
 8. McGeer T. Passive bipedal running // Proceedings of the Royal Society of London. B. Biological Sciences. 1990. V. 240. N 1297. P. 107–134. doi: 10.1098/rspb.1990.0030
 9. Hurst J.W., Chestnutt J.E., Rizzi A.A. The actuator with mechanically adjustable series compliance // IEEE Transactions on Robotics. 2010. V. 26. N 4. P. 597–606. doi: 10.1109/TRO.2010.2052398
 10. Hutter M., Gehring C., Bloesch M., Hoepflinger M.A., Remy C.D., Siegwart R. StarLETH: A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion // Adaptive Mobile Robotics – Proc. 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2012. 2012. P. 483–490. doi: https://doi.org/10.1142/9789814415958_0062
 11. Folkertsma G.A. Energy-based and biomimetic robotics. University of Twente, 2017. doi: 10.3990/1.9789036543163
 12. Folkertsma G.A., Kim S., Stramigioli S. Parallel stiffness in a bounding quadruped with flexible spine // Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2012. P. 2210–2215. doi: 10.1109/IROS.2012.6385870
 13. Snippe M. Cheetah robot leg mechanism: analysis, design and cost of transport. University of Twente, 2017.
 14. Kenneally G., De A., Koditschek D.E. Design principles for a family of direct-drive legged robots // IEEE Robotics and Automation Letters. 2016. V. 1. N 2. P. 900–907. doi: 10.1109/LRA.2016.2528294
 15. Тимофеев Г.А., Мусатов А.К., Попов С.А. Теория механизмов и механика машин. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 556 с.
- Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2012*, 2012, pp. 441–448. doi: 10.1142/9789814415958_0057
4. Sakagami Y., Watanabe R., Aoyama C., Matsunaga S., Higaki N., Fujimura K. The intelligent ASIMO: System overview and integration. *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002, vol. 3, pp. 2478–2483. doi: 10.1109/IRDS.2002.1041641
 5. Raibert M., Blankespoor K., Nelson G., Playter R. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, vol. 41, no. 2, pp. 10822–10825. doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01833
 6. Duindam V., Stramigioli S. *Modeling and control for efficient bipedal walking robots: A port-based approach*. Springer, 2009. 214 p. (Springer Tracts in Advanced Robotics book series, vol. 53). doi: 10.1007/978-3-540-89918-1
 7. Tedrake R., Zhang T.W., Fong M.-F., Seung H.S. Actuating a simple 3D passive dynamic walker. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04*, 2004, vol. 5. pp. 4656–4661. doi: 10.1109/ROBOT.2004.1302452
 8. McGeer T. Passive bipedal running. *Proceedings of the Royal Society of London. B. Biological Sciences*, 1990, vol. 240, no. 1297, pp. 107–134. doi: 10.1098/rspb.1990.0030
 9. Hurst J.W., Chestnutt J.E., Rizzi A.A. The actuator with mechanically adjustable series compliance. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, vol. 26, no. 4, pp. 597–606. doi: 10.1109/TRO.2010.2052398
 10. Hutter M., Gehring C., Bloesch M., Hoepflinger M.A., Remy C.D., Siegwart R. StarLETH: A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion. *Adaptive Mobile Robotics – Proc. 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2012*, 2012, pp. 483–490. doi: https://doi.org/10.1142/9789814415958_0062
 11. Folkertsma G.A. *Energy-based and biomimetic robotics*. University of Twente, 2017. doi: 10.3990/1.9789036543163
 12. Folkertsma G.A., Kim S., Stramigioli S. Parallel stiffness in a bounding quadruped with flexible spine. *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, pp. 2210–2215. doi: 10.1109/IROS.2012.6385870
 13. Snippe M. *Cheetah robot leg mechanism: analysis, design and cost of transport*. University of Twente, 2017.
 14. Kenneally G., De A., Koditschek D.E. Design principles for a family of direct-drive legged robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 900–907. doi: 10.1109/LRA.2016.2528294
 15. Timofeev G.A., Musatov A.K., Popov S.A. *Theory of mechanisms and mechanics of machines*. Moscow, Publishing house of MSTU. N.E. Bauman, 2017, 556 p. (in Russian)

Авторы

Борисов Иван Игоревич — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57200417949, ORCID ID: 0000-0003-0168-6609, borisovii@itmo.ru
Мониц Даниил Сергеевич — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57204657372, ORCID ID: 0000-0001-9098-8873, dsmonich@itmo.ru
Колюбин Сергей Алексеевич — доктор технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 35303066700, ORCID ID: 0000-0002-8057-1959, s.kolyubin@itmo.ru

Authors

Ivan I. Borisov — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57200417949, ORCID ID: 0000-0003-0168-6609, borisovii@itmo.ru
Daniil S. Monich — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57204657372, ORCID ID: 0000-0001-9098-8873, dsmonich@itmo.ru
Sergey A. Kolyubin — D. Sc, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 35303066700, ORCID ID: 0000-0002-8057-1959, s.kolyubin@itmo.ru