

УДК 004.94:514.853

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ ТЕЛ

Горобцов А.С., Чигиринская Н.В., Андреева М.И., Смирнов Е.А., Бочкин А.М.
Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, e-mail: vm@vstu.ru

Рассматривается управление шагающим многоногим роботом с различными модификациями движителей. Представлен синтез управления движением в режимах с использованием одноколесного и шагающих движителей. Для синтеза управляемого движения используется метод обратной задачи. Уравнения метода обратной задачи составляются на основе методов динамики связанных систем тел и включают в себя уравнения движения свободных тел и уравнения связей. Выделены три группы уравнений связей – определения походки робота, описания условий устойчивости робота и взаимосвязанного движения выбранных звеньев робота. Уравнения метода обратной задачи в такой постановке содержат вторые производные координат системы в уравнениях связей, описывающих программную траекторию главного вектора реакций связей. Такие уравнения не имеют однозначного решения в общем случае из-за наличия вторых производных множителей Лагранжа. Рассмотрен упрощенный метод решения такой задачи, в котором инерционные составляющие в уравнениях связей отбрасываются, поскольку их влиянием на динамику многоногих роботов можно пренебречь. Предложены уравнения связей, которые задают взаимосвязанное движение выбранных звеньев робота и определяющие однозначное решение задачи на основе приближенных уравнений. Получены программные движения для комбинированного колесно-шагающего движителя, допускающего движение в двух режимах. Для перемещения по ровной поверхности используется одноколесный движитель с подруливанием с помощью выбранных шагающих движителей. Преодоление препятствий и выполнение рабочих функций осуществляется с помощью шагающих движителей.

Ключевые слова: робототехника, шагающие роботы, управление, инсектоморфные роботы, компьютерное моделирование

STUDYING OF CONTROLLED MOVEMENT OF STEPPING ROBOTS BY METHODS OF COMPUTER SIMULATION OF THE DYNAMICS OF RELATED BODY SYSTEMS

Gorobtsov A.S., Chigirinskaya N.V., Andreeva M.I., Smirnov E.A., Bochkin A.M.
Volgograd State Technical University, Volgograd, e-mail: vm@vstu.ru

The control of a walking multi-legged robot with various modifications of propulsors is considered. A synthesis of motion control in modes using unicycle and walking propulsors is presented. For the synthesis of controlled motion, the inverse problem method is used. The equations of the inverse problem method are compiled on the basis of the methods of dynamics of coupled systems of bodies and include the equations of motion of free bodies and the equations of constraints. Three groups of linking equations are distinguished – determining the gait of the robot, describing the stability conditions of the robot and the interconnected movement of the selected links of the robot. The equations of the inverse problem method in this formulation contain the second derivatives of the coordinates of the system in the constraint equations describing the program trajectory of the main coupling reaction vector. Such equations do not have an unambiguous solution in the general case due to the presence of second derivative Lagrange multipliers. A simplified method for solving such a problem is considered, in which the inertial components in the link equations are discarded, since their influence on the dynamics of many-legged robots can be neglected. Relations equations are proposed that specify the interconnected movement of the selected robot links and determine the unique solution to the problem based on approximate equations. Program movements for a combined wheel-walking propulsion, which allows movement in two modes, are obtained. To move on a flat surface, a one-wheeled propeller with a steering wheel using selected walking propulsors is used. Overcoming obstacles and performing work functions is carried out with the help of walking movers.

Keywords: robotics, walking robots, control, insect robots, computer simulation

Шагающие роботы относятся к интенсивно развивающемуся классу роботов. Активно развивающимся направлением являются инсектоморфные роботы, которые обладают повышенной устойчивостью по сравнению с антропоморфными [1–2] или зооморфными роботами [3] за счет большего количества ног. Такие многоногие роботы малых размеров могут быть изготовлены с использованием 3D-принтера [4].

Шагающие роботы обладают высокой способностью по преодолению препятствий, но движение по ровной поверхности

неэффективно из-за высоких энергозатрат, особенно для инсектоморфных роботов. Повышение энергоэффективности и скорости передвижения шагающих роботов является актуальным направлением исследований. Исследователями предлагаются разные пути решения проблемы, например введение новых режимов передвижения робота путем изменения его кинематической схемы. Одним из направлений является совмещение колесного и шагового перемещений, например, у робота-паука компании Festo [5]. В данной работе рассматривается

использование дополнительного одноколесного движителя для увеличения мобильности и энергоэффективности робота при движении по ровной поверхности.

Ставится задача синтеза управления шагающим роботом в двух режимах – режиме движения только на шагающих движителях и режиме движения с помощью одноколесного движителя с балансированием и подруливанием частью шагающих движителей. В результате решения такой задачи получены кинематические параметры программных движений приводов шагающих движителей в указанных двух режимах.

Материалы и методы исследования

Решается обратная задача динамики, с использованием программного комплекса моделирования динамики связанных систем тел ФРУНД (<http://frund.vstu.ru>) [6, 7]. Особенностью данного подхода является точный учет кинематической схемы робота в расчетной схеме, в отличие от общепринятых методов редукции, приводящих к упрощенным уравнениям с 1–2 степенями свободы. Такой подход особенно важен для синтеза программного движения подруливающих движителей в режиме движения с использованием одноколесного движителя.

Синтез управляемого движения

Разработан метод синтеза программного движения шагающих роботов методом обратной задачи. Метод использует точные выражения статических слагаемых уравнений координат точки нулевого момента, определяющей устойчивость походки. Общее уравнение динамики движения робота как пространственной механической системы можно записать в виде

$$\begin{cases} M\ddot{x} = f(x, \dot{x}, t) + u(t) \\ Q_1(x) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь x – вектор координат всей системы размерностью $n \times 6$, где n – число тел системы, M – матрица инерции, $f(x, \dot{x}, t)$ – вектор позиционных, диссипативных и внешних сил, $Q_1(x)$ – вектор уравнений связей размерностью k_1 , описывающих кинематические пары, $u(t)$ – матрица сил (моментов) в приводах, приведенная к координатам тел.

Уравнения (1) принято называть уравнениями прямой задачи. В терминах аналитической механики уравнения (1) описывают систему с голономными связями. Для нахождения управлений $u(t)$ в методе обратной задачи действия управляющих сил заменяются дополнительными уравнениями связей. Уравнения (1) применительно к ша-

гающим роботам в этом случае приобретают вид

$$M\ddot{x} = f(x, \dot{x}, t), \quad (2a)$$

$$Q_1(x) = 0, \quad (2б)$$

$$Q_2(x) = w(t), \quad (2в)$$

$$Q_3(x) = 0, \quad (2г)$$

$$Q_4(x, \ddot{x}, z(t)) = 0, \quad (2д)$$

$$Q_5(x, \ddot{x}, z(t)) < k. \quad (2е)$$

Уравнение (2в) размерностью k_2 задает кинематику движения опорных точек робота и его корпуса. Вектор функция $w(t)$ включает в себя траектории точек ног и корпуса. Уравнение (2г) размерностью k_3 задает вспомогательные связи для исключения избыточных степеней свободы всего робота. Уравнение (2д) размерностью $k_4 \leq 3$ определяет выполнение условий устойчивости. Скалярное неравенство (2е) задает условие отсутствия скольжения в опорных точках робота, которое зависит от коэффициента трения об опорную поверхность k .

Два последних уравнения являются уравнениями для условий устойчивости, и на настоящий момент не разработано методов точного численного решения (2) с учетом связей такого типа, содержащих вторые производные от координат системы. В существующих работах [8–10], как правило, учитывается только уравнение (2д) в упрощенном виде. В настоящей работе из уравнения (2д) исключаются члены со вторыми производными. При численном решении уравнений (1–2) используется общепринятый показатель точности – максимальная погрешность уравнений связей, которая принималась равной 10^{-6} м.

Движение робота по ровной поверхности и по макропрепятствиям с помощью шагающих движителей

В данный момент разработаны теоретические методы и программное обеспечение, позволяющие синтезировать управление движением роботов с произвольным количеством ног – двуногих, шестиногих, многоногих.

Эти роботы могут совершать произвольные движения, например подъем по лестнице (рис. 1). Формирование управления для такого типа движения выполнено за счет соответствующих функций $w(t)$, которые задают пространственное движение стоп и корпуса. Преодоление лестничных пролетов является важной задачей для мобильных роботов, решение которой для роботов с традиционными движителями, например гусеничным, требует значительного увеличения габаритов робота. Использование

шагающих движителей позволяет добиться требуемого функционала роботами относительно небольшого размера.

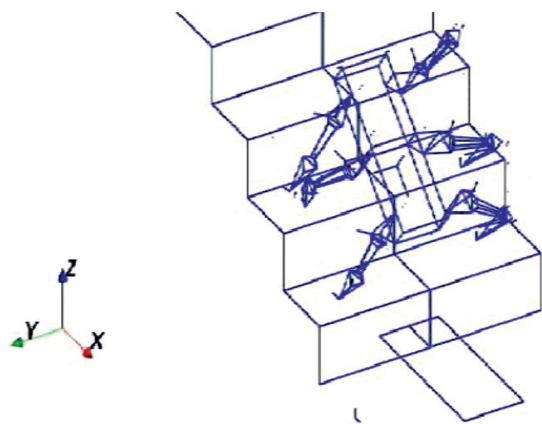


Рис. 1. Преодоление роботом ступеней

Относительные размеры робота, позволяющие выполнять такой вид движения, при высоте ступени 20 см приведены в таблице. Длина робота в таком случае составляет около 60 см, ширина – около 40 см. Суммарная длина ног 40 см. То есть габариты робота будут относительно небольшими.

Размеры робота для преодоления ступеней

Параметр	Значение, см
длина ног	40 (7 + 14 + 19, БЕДРО, ГОЛЕНЬ, СТОПА)
расстояние между ногами продольное	20
расстояние между ногами поперечное	26

Движение робота с помощью одноколесного движителя

Основными недостатками роботов с шагающими движителями являются малая скорость передвижения и низкая энергоэффективность, особенно для шагающих движителей инсектоморфного типа. Указанные

показатели можно значительно улучшить путем введения дополнительного колесного движителя.

По предложенной кинематической схеме была создана математическая модель многоногого робота в программном комплексе ФРУНД, приведенная на рис. 2.

Такая структура позволяет объединить преимущества шагающего робота, такие как высокая профильная проходимость – преодоление ступенек и других единичных препятствий, с достоинствами колесных роботов – высокой скоростью передвижения и высокой энергоэффективностью.

Обладая дополнительным колесным движителем, инсектоморфный робот может быстро преодолевать большие открытые пространства с относительно ровной поверхностью, сохраняя при этом энергию, необходимую для преодоления труднопроходимой местности.

При наличии препятствий или сложном профиле поверхности робот выполняет шаговое перемещение, как обычный инсектоморфный робот. Если надо переместиться по ровной поверхности, то робот поднимает передние ноги, опираясь на колесо, и движется по заданной траектории, подруливая задними ногами (рис. 3). Алгоритм подруливания использует рассогласование между направлением вектора скорости характерной точки робота и касательной к заданной программной траектории. Само подруливание выполняется одной парой ног – рис. 3 и реализуется за счет поперечного смещения концевых точек стоп указанной пары ног пропорционально рассогласованию вектора скорости и касательной к траектории. В расчетах принималось, что на подруливающую пару ног приходилось 20% общего веса робота. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Максимальная погрешность отклонения ц.м. корпуса от программной траектории составляла 0.1 м, что, на наш взгляд, достаточно для транспортного режима перемещения робота.

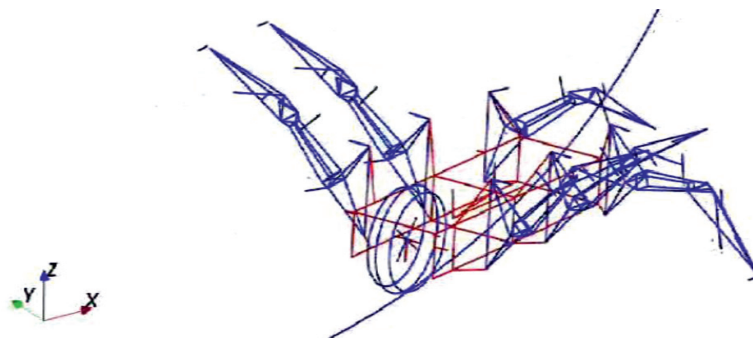


Рис. 2. Модель робота с колесным движителем

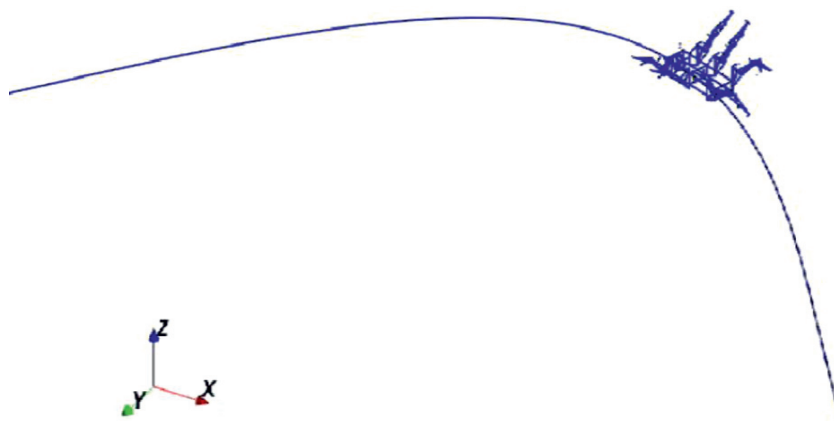


Рис. 3. Подруливание при перемещении по траектории

Рабочие режимы движения робота

Важным достоинством многоногого робота является возможность работы в режиме манипулятора (рис. 4). При работе в данном режиме робот выполняет заданное программное движение определенной точки за счет шагающих движителей.

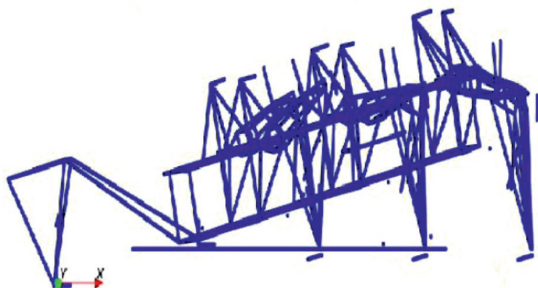


Рис. 4. Многоногий робот с манипулятором

Использование шагающих движителей в режиме манипулятора, с одной стороны, упрощает конструкцию робота как манипулятора, поскольку или не требует введения дополнительных управляемых степеней свободы в конструкцию робота, или допускает добавление ограниченного числа таких степеней свободы. При этом в обоих случаях обеспечивается пространственный характер движения конечного звена манипулятора, в том числе как по поступательным степеням свободы, так и по вращательным. Такой манипулятор по общепринятой классификации относится к 6D манипуляторам. Работа в режиме манипулирования может так же разделяться на два режима.

В первом режиме движение конечной точки осуществляется без перешагивания

шагающих движителей. В этом случае величина рабочей зоны ограничивается размерами звеньев шагающих движителей, так как стопы движителей остаются неподвижными относительно опорных поверхностей. Манипулятор в таком режиме работы обладает повышенной жесткостью, поскольку является по существу параллельным механизмом с шестью параллельными силовыми контурами (для рассматриваемого варианта робота). Наличие шести контуров приводов также увеличивает точность позиционирования, и кроме этого, для достижения заданных силовых характеристик манипулятора требуются приводы меньшей мощности.

Во втором режиме движение конечной точки осуществляется с перешагиванием шагающих движителей. В этом случае величина рабочей зоны в горизонтальной плоскости ничем не ограничивается. В вертикальном направлении рабочая зона может быть увеличена, например, за счет добавления звена с одной степенью свободы относительно корпуса робота.

Добавление режима манипулятора позволяет использовать мобильного робота для выполнения различных задач, предлагаемых шагающим роботам, таких как, например, сбор проб, открытие вентилей, перемещение грузов или разминирование объектов.

Заключение

Малоразмерный шагающий робот с колесным движителем является удобной платформой для создания высокомобильных сервисных роботов различного назначения – осмотр внутренних помещений, сбор проб и т.д. Его преимуществами являются:

- низкая стоимость и простота изготовления механической части;

– высокая унификация аппаратной части системы управления;

– модульность конструкции.

Перспективным направлением исследований является использование малоразмерных шагающих роботов с колесным двигателем для отработки программной части систем управления с элементами искусственного интеллекта в реальных эксплуатационных условиях.

Созданные методы управления локомотивом шагающих роботов могут быть использованы для роботов с различными типами шагающих двигателей. Для роботов большой размерности и грузоподъемности могут применяться двигатели на основе дельтаподобных механизмов.

Список литературы

1. Nelson G., Saunders A., Neville N., Swilling B., Bondaryk J., Billings D., Lee C., Playter R., Raibert M. Petman: A humanoid robot for testing chemical protective clothing. *Journal of the Robotics Society of Japan*. 2012. vol. 30. no. 4. P. 372–377.
2. Kim J.Y., Yang U.J. Mechanical design of powered prosthetic leg and walking pattern generation based on motion capture data. *Advanced Robotics*. 2015. vol. 29. no. 16. P. 1061–1079.
3. Sutyasadi P., Parnichkun M. Gait Tracking Control of Quadruped Robot Using Differential Evolution Based Structure Specified Mixed Sensitivity H_∞ Robust Control. *Journal of Control Science and Engineering*. 2016. 18 p.
4. Егунов В.А., Качалов А.Л., Петросян М.К., Тарасов П.С., Янкина Е.В. Development of the insectoid walking robot with inertial navigation system // *Proceedings of the 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2018)* (February 1–4, 2018, B-CON Plaza, Beppu, Oita, Japan) / Editor-in-Chief Masanori Sugisaka ; International Steering Committee of International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB), ICAROB society (ALife Robotics Corporations Ltd.), IEEE Fukuoka Section (Japan). [Japan], 2018. P. 54 (Mobile Robotics; OS7-2).
5. Festo's New Bionic Robots Include Rolling Spider, Flying Fox [Электронный ресурс]. URL: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/festo-bionic-learning-network-rolling-spider-flying-fox> (date of access: 15.11.2019).
6. Горобцов А.С. Синтез параметров управляемого движения многозвенных механических систем произвольной структуры методом обратной задачи // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2004. № 6. С. 43–50.
7. Горобцов А.С., Андреев А.Е., Тарасов П.С., Скориков А.В., Карцов С.К. Синтез устойчивых квазистатических режимов шагания антропоморфного робота // *Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах*. 2016. № 6 (185). С. 75–76.
8. Kima J.Y., Kimb J.H. Error Analysis and Effective Adjustment of the Walking-Ready Posture for a Biped Humanoid Robot. *Advanced Robotics*. 2010. vol. 24. P. 2137–2169.
9. Carla M.A., Pinto J.A., Machado T. Fractional central pattern generators for bipedal locomotion. *Nonlinear Dynamics*. 2010. vol. 62. no. 1–2. P. 27–37.
10. Di Gironimo G., Pelliccia L., Siciliano B. et al. Biomechanically-based motion control for a digital human. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2012. vol. 6. no. 1. P. 1–13.