УДК 62-526 + 519.711.3

DOI 10.35211/1990-5297-2020-9-244-26-30

*А. С. Горобцов, А. В. Скориков, П. С. Тарасов, О. К. Чесноков***РОБОТ С КОМБИНИРОВАННЫМ КОЛЕСНО-ШАГАЮЩИМ ДВИЖИТЕЛЕМ****Волгоградский государственный технический университет**

vm@vstu.ru, scorpion_energy@mail.ru, tarasradio@mail.ru

Рассмотрено управление роботом с колесно-шагающим движителем для перемещения по ровной поверхности и преодоления препятствий. Выполнение рабочих функций осуществляется с помощью шагающих движителей. Представлены синтез управления движением робота и метод управления направлением движения с одноколесным движителем.

Ключевые слова: робототехника, шагающие роботы, управление, инсектоморфные роботы.

*A. S. Gorobtsov, A. V. Skorikov, P. S. Tarasov, O. K. Chesnokov***ROBOT WITH COMBINED WHEEL-STEPPING MOVER****Volgograd State Technical University**

The control of a robot with a wheel-stepping mover that allows movement in two modes is considered. To move on a flat surface, a single-wheel mover unit is used with steering with the help of selected stepping movers. Overcoming obstacles and performing work operations are carried out with the help of walking movers. The synthesis of robot motion control in walking mode and the method of controlling the direction of motion when driving on a single-wheel mover are presented.

Keywords: robotics, walking robots, control, insectoid robots.

Введение

Шагающие роботы относятся к интенсивно развивающемуся классу роботов. Активно ведутся работы в области создания инсектоморфных роботов, которые обладают повышенной устойчивостью по сравнению с антропоморфными или зооморфными роботами за счет большего количества ног. Такие многоногие роботы малых размеров могут быть изготовлены с использованием 3D-печати [1].

Шагающие роботы обладают высокой способностью по преодолению препятствий, но их движение по ровной поверхности малоэффективно с энергетической точки зрения. 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 от Festo [2].

В работе предлагается решение с использованием дополнительного одноколесного движителя для увеличения мобильности и энергоэффективности робота при движении по ровной поверхности.

Синтез управляемого движения в режиме использования шагающих движителей

Для синтеза программного движения робота в шагающем режиме используется метод обратной задачи. Метод реализован в программе моделирования динамики связанных систем тел ФРУНД (<http://frund.vstu.ru>) [3, 4].

Общее уравнение динамики движения робота как пространственной механической системы можно записать в виде системы:

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

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 дополни-

тельными уравнениями связей. Уравнения (1) применительно к шагающим роботам в этом случае приобретают вид:

$$\begin{cases} M\dot{x} = f(x, \dot{x}, t) \\ Q_1(x) = 0 \\ Q_2(x) = w(t) \\ Q_3(x) = 0 \\ Q_4(x, \dot{x}, z(t)) = 0 \\ Q_5(x, \dot{x}, z(t)) < k \end{cases} \quad (2)$$

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. В качестве условий устойчивости для шагающих роботов обычно принимают

$$z(t) \in \Gamma. \quad (3)$$

Здесь $z(t)$ – вектор функция координат точки приложения главного вектора реакций связей в стопах робота. Такая точка имеет специальное название – точка нулевого момента (ТНМ). Γ – некоторая область на опорной поверхности, нахождение внутри которой считается обеспечивающим устойчивость. Уравнения связей вида (2д) качественно отличаются от уравнений связей (2б)–(2г) – в них входят вторые производные координат системы. Такие уравнения описывают неголономные системы.

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, как правило, учитывается только уравнение (2д) в упрощенном виде. В настоящей работе из уравнения (2д) исключаются члены со вторыми производными. Система (2) в этом случае в форме уравнений Лагранжа первого рода приобретает вид:

$$\begin{cases} M\dot{x} - D_1^T p_1 - D_2^T p_2 - D_3^T p_3 - D_4^T p_4 = f(x, \dot{x}, t) \\ D_1 \dot{x} = h_1(x, \dot{x}) \\ D_2 \dot{x} = \dot{w}(t) \\ D_3 \dot{x} = h_3(x, \dot{x}) \\ D_4 \dot{x} = h_4(\dot{z}(t)) \end{cases} \quad (4)$$

Решение такой задачи будет соответствовать заданному типу движения корпуса робота и параметров шага, которые определяются функцией $w(t)$.

Планировщик походки состоит из двух частей, формирующих траектории точек стоп и траектории координат ТНМ. Типичный вид кинематических параметров траектории стопы показан на рис. 1.

Рис. 1. Программные продольные и вертикальные перемещения стоп робота

Рис. 2. Программная траектория ТНМ робота

Характерная форма траектории ТНМ для случая с полной остановкой перемещения ТНМ в фазах опоры на одну ногу показана на рис. 2. На рис. 2 приведены графики координат ТНМ для двуногой машины; для многоногой машины качественный вид графиков не изменяется.

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

Разработанные теоретические методы и программное обеспечение позволяют синтезировать управление движением шагающих роботов с произвольным количеством ног – двуногих, шестиногих, многоногих.

Особенностью алгоритма формирования походки является возможность задания параметров различных макропрофилей, по которым происходит движение машины. Это позволяет получать управление для движения по различным препятствиям, например, подъем по лестнице (рис. 3).

Преодоление лестничных пролетов является достаточно важной задачей для мобильных роботов, для решения которой необходимы роботы больших размеров, например, гусеничные. Использование шагающих движителей позволяет добиться требуемого функционала роботами относительно небольшого размера.

Рис. 3. Подъем робота по лестнице

Моделированием программного движения робота по лестнице (решение уравнения (3)) найдены рациональные размеры робота, который может подниматься по ступеням высотой 20 см (см. приведенную ниже таблицу). Длина робота в таком случае составляет 60 см, ширина – 40 см. Суммарная длина ног такого робота в распрямленном состоянии 40 см. Нога имеет трехзвенную структуру с длиной звеньев 7, 14 и 19 см, считая от звена, примыкающего к корпусу. Расстояние между шагающими движителями в продольном направлении 20 см. Можно видеть, что робот имеет относительно небольшие габариты.

Размеры робота для преодоления ступеней

Параметр	Значение
Длина ног	40 (7 + 14 + 19)
Расстояние между ногами продольное	20
Расстояние между ногами поперечное	26

Движение робота с помощью одноколесного движителя

При движении робота в колесном режиме изменение направления движения производится с помощью одной из пар движителей, на которые производится частичная опора робота. Остальные движители выводятся из контакта с опорной поверхностью – рис. 4.

В номинальном положении подруливающие движители расположены симметрично относительно продольной оси робота. При рассогласовании направления скорости робота и направления траектории подруливающая пара ног смещается пропорционально в поперечном направлении, что обеспечивает возникновение поворачивающего момента.

По предложенной кинематической схеме была создана математическая модель многоножного робота в программном комплексе ФРУНД (система (1)), приведенная на рис. 4. Расчетами найден коэффициент пропорциональности, обеспечивающий движение робота вдоль заданной траектории произвольного вида с заданной точностью – рис. 5.

Рассматриваемая конструкция 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. Следует также отметить, что одноколесный движитель незначительно усложняет конструкцию робота.

Рис. 4. Модель робота с колесным движителем

Рис. 5. Движение робота в колесном режиме по криволинейной траектории

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

При движении с подруливанием задние ноги выполняют две функции. Во-первых, они служат дополнительной опорой для сохранения

устойчивости. Во-вторых, при вхождении в поворот робот смещает задние ноги вбок, таким образом изменяя направление движения.

Рабочие режимы движения робота

Важным достоинством многоногого робота является возможность работы в режиме манипулятора (рис. 6). При работе в данном режиме робот перемещается на основе шаговых движителей.

Рис. 6. Работа шестиногого робота в режиме манипулятора

Возможность работы в режиме манипулятора позволяет использование мобильного робота для выполнения различных задач (таких как, например, сбор проб, открытие вентилей, перемещение грузов и др.).

Заключение

Малоразмерный шагающий робот с колесным двигателем служит 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 также 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 локомоцией шагающих роботов могут быть использованы для роботов с различными типами шагающих двигателей. Для роботов большого размера

и грузоподъемности могут применяться двигатели на основе дельтаподобных механизмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Development of the insectoid walking robot with inertial navigation system / В. А. Егунов, А. Л. Качалов, М. К. Петросян, П. С. Тарасов, Е. В. Янкина // *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).

2. Festo's New Bionic Robots Include Rolling Spider, Flying Fox [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/festo-bionic-learning-network-rolling-spider-flying-fox> (дата обращения: 20.06.2020).

3. Горобцов, А. С. Синтез параметров управляемого движения многозвенных механических систем произвольной структуры методом обратной задачи / А. С. Горобцов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2004. – № 6. – С. 43–50. – 2 с. обл.

4. Синтез устойчивых квазистатических режимов шагания антропоморфного робота / А. С. Горобцов, А. Е. Андреев, П. С. Тарасов, Ан. В. Скориков, С. К. Карцов // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 6 (185) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 75–76.