УДК629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2021-9-256-69-73

*Л. Д. Смирная, И. П. Вершинина***О ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ШАГАЮЩИХ ДВИЖИТЕЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ*****Волгоградский государственный технический университет**

dtm@vstu.ru

Рассмотрена задача о влиянии выбора кинематической схемы шагающего движителя на точность позиционирования его стопы при одинаковых малых ошибках позиционирования. Установлены зависимости между законами изменения координат стопы шагающего движителя как материальной точки и изменением положения выходных элементов двигателей приводов ортогонального движителя и движителя с параллельной цепью приводов.

Ключевые слова: механизм шагания, позиционирование, точность, управление приводом.

*L. D. Smirnaya, I. P. Vershinina***ON THE ACCURACY OF POSITIONING OF MOBILE
ROBOT'S WALKING PROPULSION DEVICES****Volgograd State Technical University**

The problems of the influence of the choice of the kinematic scheme of the walking mechanism on the positioning accuracy of its foot with the same small positioning errors are considered. The relationships between the laws of changing the coordinates of the foot of the walking mechanism as a material point and the change in the position of the output elements of the motors of the drives of the orthogonal mover and the mover with a parallel chain of drives are established.

Keywords: walking mechanism, positioning, precision, drive control.

Введение

Известно достаточно большое количество мобильных роботов, имеющих шагающие движители. Среди них имеются как объекты находящиеся в стадии изучения, так и действующие опытные образцы [1]. Шагающие роботы отличаются от колесных и гусеничных машин большим разнообразием движителей с различными типами механизмов шагания.

Известны цикловые механизмы шагания [2, 3], механизмы шагания телескопического типа [4], ортогонально-поворотные [5] и роторно-ортогональные [6], инсектоморфные и зооморфные [7, 8], якорно-тросовые для роботов, перемещающихся по дну водоемов [9, 10], вибрационных, без внешних движителей [11, 12] и другие (рис. 1, а–е).

Движители на основе таких механизмов отличаются по многим показателям: сложности конструкции, удобства управления, динамической уравновешенности, энергоэффективности, проходимости и др.

Основным рабочим элементом шагающего движителя является стопа, взаимодействующая с опорной поверхностью и имеющая возможность перемещаться относительно этой поверхности в фазе переноса в новое положение. Это достигается применением механизмов шагания

с приводами двух типов: осуществляющие поступательное перемещение одного звена относительно другого и осуществляющие вращательное движение звеньев относительно общей оси вращения. Звенья механизмов шагания могут составлять последовательную цепь, быть параллельно присоединены к рабочему телу (стопе) или в целом являться механизмами параллельно-последовательной структуры [14]. Примеры кинематических схем таких движителей представлены на рис. 1, а некоторые реальные шагающие роботы – на рис. 2.

Рис. 1, а. Ортогональный движитель с последовательной цепью приводов поступательного перемещения:

1, 2 – приводы; 3 – стопа; 4 – корпус робота;
5 – траектория программного движения

© Смирная Л. Д., Вершинина И. П., 2021.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90131 и при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-48-340018 р_а.

Рис. 1, б. Зооморфный движитель с последовательной цепью приводов вращательного перемещения:
1, 2 – приводы; 3 – стопа; 4 – корпус робота;
5 – траектория программного движения

Рис. 1, в. Телескопический движитель с последовательной цепью приводов вращательного и поступательного движения:
1, 2 – приводы; 3 – стопа; 4 – корпус робота;
5 – траектория программного движения

Рис. 1, г. Движитель с параллельной цепью приводов поступательного движения:
1, 2 – приводы; 3 – стопа; 4 – корпус робота;
5 – траектория программного движения

Рис. 1, д. Движитель с параллельной цепью приводов вращательного и поступательного движения:
1, 2 – приводы; 3 – стопа; 4 – корпус робота;
5 – траектория программного движения

Рис. 1, е. Движитель с параллельной цепью приводов вращательного движения:
1, 2 – приводы; 3 – стопа; 4 – корпус робота; 5 – траектория программного движения

Шагающий робот «Ортоног» (ВолгГТУ, Россия).
Ортогональный движитель
с последовательной цепью приводов
поступательного перемещения

BigDog – четвероногий робот,
(Boston Dynamics, США).
Зооморфный движитель с последовательной
цепью приводов вращательного перемещения

Подводный шагающий аппарат МАК-1 (ВолгГТУ, Россия).
Движитель с параллельной цепью приводов вращательного движения

Рис. 2. Существующие образцы шагающих роботов

Постановка задачи

Каждый из представленных и многих других типов движителей оценивается различными показателями. Среди них одними из главных являются минимум энергозатрат на перемещение движителя относительно корпуса робота, минимальность развиваемых усилий в сочлененных механизмах шагания, габариты, сложность конструкции и системы управления и др. Система управления приводами каждого движителя для реализации роботом требуемого программного режима движения и удовлетворения другим показателям должна обеспечивать достаточную точность позиционирования

его стопы. Однако такое позиционирование зависит не только от системы управления, но и от кинематических схем движителей. Поэтому правомерна постановка задачи о влиянии выбора кинематической схемы движителя на точность позиционирования его стопы при одинаковых малых ошибках позиционирования, обусловленная системами управления приводами.

Метод решения

Метод решения поставленной задачи основывается на выявлении зависимости между законами изменения координат стопы движителя x , y как материальной точки и изменением по-

ложения выходных элементов двигателей приводов U_1 и U_2 .

$$\begin{aligned} x &= \Psi(U_1, U_2) \\ y &= \Theta(U_1, U_2) \end{aligned} \quad (1)$$

Так, для движителей, реализующих поступательное перемещение, $U_j = \Delta l_j$ – удлинение j звена, а для движителей, реализующих вращательное движение, $U_j = \Delta \varphi_j$ – угол поворота j звена.

Тогда, принимая во внимание ошибки δU_j , допускаемые системой управления, в (1) следует учитывать и изменение координат δx , δy

$$\begin{aligned} x + \delta x &= \Psi(U_1 + \delta U_1, U_2 + \delta U_2), \\ y + \delta y &= \Theta(U_1 + \delta U_1, U_2 + \delta U_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Для малых отклонений δx , δy от программного положения из (2) следует система линейных уравнений

$$\begin{cases} \delta x = \frac{\partial \Psi}{\partial U_1} \delta U_1 + \frac{\partial \Psi}{\partial U_2} \delta U_2 \\ \delta y = \frac{\partial \Theta}{\partial U_1} \delta U_1 + \frac{\partial \Theta}{\partial U_2} \delta U_2 \end{cases} \quad (3)$$

Отсюда следует оценка ошибки позиционирования δr :

$$\begin{aligned} \delta r &= \sqrt{(\delta x)^2 + (\delta y)^2} = \\ &= \sqrt{\left[\left(\frac{\partial \Psi}{\partial U_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial U_1} \right)^2 \right] \delta U_1^2 + \left[\left(\frac{\partial \Psi}{\partial U_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial U_2} \right)^2 \right] \delta U_2^2 +} \\ &\quad + 2 \left[\frac{\partial \Psi}{\partial U_1} \frac{\partial \Psi}{\partial U_2} + \frac{\partial \Theta}{\partial U_1} \frac{\partial \Theta}{\partial U_2} \right] \delta U_1 \delta U_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Анализ (4) позволяет сделать вывод, что ошибка в позиционировании стопы движителя зависит от ошибок в управляющих воздействиях δU_j и ошибок, обусловленных непосредственно механизмом шагания, что описывается функциями, являющимися множителями при δU_j . Если используются идентичные приводы (например, оба привода поступательного или вращательного перемещения с одинаковой системой управления), то $\delta U_1 = \delta U_2 = \delta U$ и (4) характеризует непосредственно механизм шагания.

Сравнительные характеристики позиционирования движителей

Ортогональный движитель с последовательной цепью приводов (рис. 1, а):

$$U_1 = l_1, \quad U_2 = l_2, \quad x = l_1, \quad y = l_2. \quad (5)$$

Тогда из (3) следует:

$$\begin{cases} \delta x = \delta l_1, \\ \delta y = \delta l_2, \\ \delta r = \sqrt{\delta l_1^2 + \delta l_2^2}. \end{cases} \quad (6)$$

Движитель с параллельной цепью приводов поступательного движения (рис. 1, з):

$$U_1 = l_1, \quad U_2 = l_2. \quad (7)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \delta l_1, \quad \delta U_2 = \delta l_2, \\ \Psi(l_1 l_2) &= \frac{a^2 + l_1^2 - l_2^2}{2a}, \\ \Theta(l_1 l_2) &= \frac{1}{2a} \sqrt{2a^2 l_2^2 + 2l_1^2 l_2^2 - a^4 - l_1^4 - l_2^4 + 2a^2 l_1^2}, \\ \frac{\partial \Psi}{\partial l_1} &= \frac{l_1}{a}, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial l_2} = -\frac{l_2}{a}, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial l_1} = \frac{l_1(l_2^2 + a^2 - l_1^2)}{2a^2 \Theta(l_1 l_2)}, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial l_2} = \frac{l_2(l_1^2 + a^2 - l_2^2)}{2a^2 \Theta(l_1 l_2)}. \end{aligned} \quad (8)$$

На графиках рис. 3 представлены зависимости максимально возможных ошибок позиционирования для ортогонального движителя (рис. 1, а) в любом возможном положении сто-

пы и движителя с параллельной цепью приводов поступательного движения в двух конкретных положениях. И в одном, и другом случаях рассматриваются идентичные приводы.

Рис. 3. Программное движение (а) и ошибки позиционирования (б) ортогонального движителя и движителя с параллельной цепью приводов:

1, 2 – изменение длин l_1 и l_2 приводов движителя (рис. 1, а); 3, 4 – изменение длин l_1 и l_2 приводов движителя (рис. 1, а); 5 – программное движение опорной точки; 6 – движитель (рис. 1, б); 7 – движитель (рис. 1, б)

Анализ графиков показывает, что ошибка позиционирования действительно зависит от кинематической схемы движителя и от зоны, в которой перемещается стопа механизма шагания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловский, В. Е. О разработках шагающих машин / В. Е. Павловский. – М.: ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2013. – 32 с.
2. Bessonov, A. P. The stabilization of the position of the body of walking machines / A. P. Bessonov, N. V. Umnov // Mechanism and Machine Theory. – 1983. – Vol. 18. – No 4. – P. 261–265. – DOI 10.1016/0094-114X(83)90115-5.
3. Брискин, Е. С. Об управлении походкой шагающей машины «Восьминог» / Е. С. Брискин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 5. – С. 6–10.
4. Бордюг, Б. А. Задачи управления шагающими аппаратами / Б. А. Бордюг, В. Б. Ларин, А. Г. Тимошенко. – Киев : Наук. думка, 1985. – 263 с.
5. Об управлении движением шагающей машины со двояными ортогонально-поворотными движителями / Е. С. Брискин, И. П. Вершинина, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 168. – DOI 10.7868/S0002338814020036.
6. Briskin, E. Development of Rotary Type Movers Discretely Interacting with Supporting Surface and Problems of Control Their Movement / E. Briskin, A. Maloletov, N. Sharonov [et al.] // CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures (см. в книгах). – 2016. – Vol. 569. – P. 351–359. – DOI 10.1007/978-3-319-33714-2_39.
7. Голубев, Ю. Ф. Экстремальные локомоторные возможности инсектоморфных роботов / Ю. Ф. Голубев, В. В. Корянов – М. : ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2018. – 212 с.
8. Timberjack Walking Machine. – Режим доступа : http://www.youtube.com/watch?v=CD2V8GFqk_Y.
9. Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми движителями / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов, В. А. Серов, И. С. Пеньшин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2(19). – С. 39–45.
10. Брискин, Е. С. Об отрыве стопы шагающего движителя мобильного подводного робота от грунта / Е. С. Брискин, Л. Д. Смирная // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – Т. 7. – № 3. – С. 215–223. – DOI 10.31776/RTSJ.7306.
11. Черноусько, Ф. Л. Движение тела по плоскости под влиянием подвижных внутренних масс / Ф. Л. Черноусько // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 470. – № 4. – С. 406–410.
12. Блехман, И. И. Вибрационное перемещение / И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе. – М., 1964.
13. Нагаев, Р. Ф. Периодические режимы вибрационного перемещения / Р. Ф. Нагаев. – М. : Наука, 1978. – 160 с.
14. Ганиев, Р. Ф. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике / Р. Ф. Ганиев, В. А. Глазунов // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 459. – № 4. – С. 428. – DOI 10.7868/S086956521434009X.