УДК 629.365

DOI 10.35211/1990-5297-2021-9-256-12-16

*В. В. Арыканцев, В. В. Чернышев, Н. Г. Шаронов***ВЫБОР ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ОПОРНОГО ЭЛЕМЕНТА
СДВОЕННОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ*****Волгоградский государственный технический университет**

arvstu@mail.ru

В работе описан принцип выбора оптимальных размеров и формы опорного элемента шагающей машины при условии обеспечения максимально возможной площади контакта с опорной поверхностью для передвижения по снегу или грунтам с низкой несущей способностью. Исследование проведено для ортогонального шагающего движителя, но может использоваться и для механизмов шагания других типов.

Ключевые слова: мобильный робот, шагающий движитель, опорный элемент, давление на опорную поверхность.

*V. V. Arykantsev, V. V. Chernyshev, N. G. Sharonov***SELECTION OF SHAPE AND DIMENSIONS OF SUPPORT ELEMENT
OF PAIRED ORTHOGONAL WALKING MOVER****Volgograd State Technical University**

The paper describes the principle of choosing the optimal size and shape of the supporting element of a walking machine, provided that the maximum possible contact area with the supporting surface is provided for moving on snow or soils with a low bearing capacity. The study was carried out for an orthogonal walking propulsion device, but it can also be used for walking mechanisms of other types.

Keywords: mobile robot, walking mover, support element, pressure on the support surface.

Шагающие машины и роботы проектируются для эксплуатации в самых разных условиях. Это могут быть машины для орошаемого земледелия, исследования морского дна, добычи полезных ископаемых и даже для исследования других планет [1–7]. Увеличивающийся интерес к машинам шагающего типа связан с рядом преимуществ, которыми они обладают, по сравнению с машинами, имеющими традиционные движители [8–11]. При выполнении некоторых задач необходимо, чтобы шагающие движители роботов оказывали минимально возможное воздействие на опорную поверхность, например, при движении по снегу или грунтам с низкой несущей способностью, когда не требуются значительные тяговые усилия. В связи с этим возникает необходимость выбора формы и размеров опорных элементов таким образом, чтобы они имели максимально возможную опорную площадь. В качестве объекта исследования взят сдвоенный ортогональный шагающий движитель.

Предварительный выбор формы стопы осуществлялся методом подбора. Самым простым решением могла бы быть форма «лыжи» – стопа прямоугольной формы с точкой крепления шарнира в геометрическом центре. Но то

гда при повороте шагающей машины одна стопа останется в опоре, а вторая, при попытке второй стопы опереться на грунт, может наступить на первую. В этом случае мы получаем отдельные режимы и траектории движения шагающей машины, в которых поворот и изменение траектории движения невозможны из-за попадания опорных стоп друг на друга. Данная проблема и форма стопы изображена на рис. 1; на нем движитель повернулся от начального положения влево, а также выделена зона, в которой опорные элементы наступают друг на друга.

Рис. 1. Ограничение движения стопы лыжеобразной формы

Вторым возможным вариантом была форма «асимметричная лыжа», с точкой крепления шарнира на одном из концов стопы, который

скруглен, и с начальным положением, перпендикулярным осям направляющих. Начальное положение и форма стопы показаны на рис. 2, а.

Рис. 2. Форма стопы «асимметричная лыжа» (а) и схема ее давления на опорную поверхность (б)

Этот вариант не ограничивает маневренность шагающей машины, но возникают другие проблемы. Прежде всего, это существенное увеличение габаритов шагающей машины в поперечных размерах, а также необходимость установки дополнительных двигателей, управляющих положением опорных стоп, что существенно увеличит затраты на изготовление и снизит надежность опорных элементов. Также такая форма стопы имеет асимметрию давления на грунт.

Если у стопы сильно выражена асимметрия, то при передвижении по снегу или по грунту с низкой несущей способностью возможно за-

валивание движителя и, как следствие, всей машины в целом, в результате чего мы получим, что конец стопы, который ближе к точке оказываемого давления, уйдет под грунт или снег, а второй не будет его касаться. Данная ситуация схематически изображена на рис. 2, б.

Еще одним вариантом была форма опорной стопы «дуга» и «полукруг» (рис. 3), но такие формы тоже ограничивают некоторые направления движения шагающей машины, а увеличение площади опоры в случае дуговой стопы не существенно. Также эти формы имеют небольшую асимметрию давления.

Рис. 3. Формы стоп «дуга» (а) и «полукруг» (б)

Далее были отсечены участки, которые явным образом накладывают ограничения на поворот шагающей машины, после чего была получена стопа сложной формы, изображенная на рис. 4, а. Данная форма не накладывала ограничения на режимы поворота шагающей машины явным образом, но все еще сохраняла в себе

проблему асимметричного давления на грунт.

Путем дальнейших преобразований было принято решение взять стопу овальной формы, площадь которой приближена к сложной форме стопы (рис. 4, б). Данная форма не имеет проблемы асимметричного давления на грунт и не накладывает явных ограничений на режимы

поворота шагающей машины. Впоследствии требуется проверить факт отсутствия ограни-

чений на движение шагающей машины и выбрать оптимальные размеры стопы.

Рис. 4. Стопа сложной (а) и овальной формы (б)

Проанализировать возможные положения стоп относительно друг друга при разных углах поворота легче и быстрее всего в программе MS Excel. Сначала нужно построить два эллипса на плоскости. Придется иметь дело с координатными уравнениями, поэтому для проведения анализа лучше задать их в параметрической форме. Тогда эллипс будет удовлетворять системе уравнений:

$$\begin{cases} x = a \cdot \cos \alpha \\ y = b \cdot \sin \alpha, \end{cases}$$

где a – половина ширины эллипса; b – половина длины эллипса; α – значение угла. Для того чтобы свести погрешность расчетов и анализа результатов к минимуму, зададим значение угла от 0 до 360° с шагом 1°. Кроме того, MS Excel считает косинусы и синусы для радиан, поэтому систему уравнений следует записать в форме:

$$\begin{cases} x_1 = a \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) \\ y_1 = b \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right). \end{cases}$$

Эллипс, изображающий вторую овальную стопу, данной системой уравнений построить не получится, потому что она не учитывает поворота стопы вокруг оси, а его центр координат совпадает с центром первого эллипса (в данном случае – с началом координат). Нужное положение второго эллипса можно реализовать,

рассмотрев преобразование переноса начала системы координат в точку $x_{02}y_{02}$ и поворота на угол φ [12]:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot \pi}{180}\right) - y_1 \cdot \sin\left(\frac{\varphi \cdot \pi}{180}\right) + x_{02} \\ y_2 = x_1 \cdot \sin\left(\frac{\varphi \cdot \pi}{180}\right) + y_1 \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot \pi}{180}\right) + y_{02}, \end{cases}$$

где x_1 – координата каждой точки первого эллипса по оси абсцисс; y_1 – координата каждой точки первого эллипса по оси ординат; x_{02} – координата центра второго эллипса по оси абсцисс; y_{02} – координата центра второго эллипса по оси ординат. Последняя система уравнений написана с учетом перевода угла поворота из градусов в радианы. Величины угла поворота и шага движителя, а также ширины и длины стопы вынесем в отдельные ячейки для последующих вариаций данных значений. В результате получено по 360 точек, формирующих два эллипса, изображающих овальные стопы шагающей машины в начальном положении; они показаны на рис. 5, а. На данном изображении ориентировочно задана ширина стопы 340 мм и длина 600 мм. Центр второго эллипса находится в точке (360; 0), потому что существующее расстояние между направляющими опорных элементов 360 мм, а заданный шаг равен нулю. Теперь необходимо знать координаты центра второго эллипса, изображающего переносимую стопу, в зависимости от заданной длины шага движителя и угла поворота (рис. 5, б).

Рис. 5. Эллипсы, изображающие стопы в начальном положении (а) и поворот центра движущегося эллипса (стопы) на угол φ (б)

Здесь, применительно к задаче исследования, L обозначает величину длины шага, которая может изменяться; H – расстояние между направляющими, являющееся постоянным; C – расстояние между центрами стоп, изменяющееся в зависимости от длины шага движителя; φ – угол поворота. Ко всем этим условиям применима следующая система уравнений:

$$\begin{cases} x_{02} = H \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot \pi}{180}\right) - L \cdot \sin\left(\frac{\varphi \cdot \pi}{180}\right) \\ y_{02} = H \cdot \sin\left(\frac{\varphi \cdot \pi}{180}\right) + L \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot \pi}{180}\right) \end{cases}$$

Теперь нужно ввести условие проверки пересечения одного эллипса другим. Воспользуемся канонической формой уравнения эллипса:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Это означает, что если значение выражения с координатами точки удовлетворяет этому условию, то точка лежит на самом эллипсе, центр которого расположен в начале координат. Если значение выражения меньше единицы, то точка лежит внутри эллипса. Необходимо подобрать размеры стопы, когда получаемое значение выражения больше единицы; это будет означать, что точка лежит за пределами первого эллипса, а применительно к нашему исследованию это будет значить, что стопы не накладываются друг на друга, и движение возможно осуществить.

Вычисляем значение вышеуказанного выражения для каждой точки второго эллипса, за-

тем указываем условие на вывод сообщения о наличии или отсутствии пересечений. Движение шагающей машины будет невозможно, если хотя бы одна точка второго эллипса лежит на дуге первого.

Как известно из эмпирических наблюдений, наихудшее положение для нашего анализа стопы шагающей машины будут занимать, когда ось поворота близка к точке опоры движителя. Иными словами, наихудшее положение будет, когда движитель повернется на прямой угол, не меняя опорную стопу. Такое положение для стоп с шириной 340 мм и длиной 600 мм показано на рис. 6, а. Как видно из графиков без дополнительных вычислений, эллипсы пересекаются, а это означает, что стопа с размерами 600×340 мм будет ограничивать режимы поворота шагающей машины, и нам необходимо уменьшить ее размеры.

Учитывая размер области пересечения стоп из предыдущего варианта, выбрана длина стопы 400 мм и ширина 310 мм. Проверка на пересечение в опасном положении этих размеров представлена на рис. 6, б.

Как видно из графиков, эллипсы не пересекаются. Программа тоже не находит пересечений по результатам проверки координат всех точек. Поэтому можно сделать вывод, что стопа с данными размерами может быть использована на реальной шагающей машине. Данный метод можно применить и для подбора размеров стоп шагающих машин с движителями циклового типа.

Рис. 6. Опасное положение стоп с пересечением (а) и стоп с оптимальными размерами (б)

Результаты могут быть использованы для проведения динамического анализа модульных самоорганизующихся приводов шагания, при разработке и проектировании шагающих машин, предназначенных для выполнения задач исследования и добычи ресурсов морского дна, а также орошаемого земледелия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sun, Y. Design of a snake robot based on modular joint / Y. Sun, F. Ni, Y. Zhou, Y. Zhang, Y. Liu, H. Liu // *Proceedings of the 22nd International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2019)*. – 2019. – Pp. 53–60.
2. Mobile Climbing Robot for High Precision Manufacture and Inspection of Aerostructures / T. S. White, R. Alexander, G. Callow, A. Cooke, S. Harris, J. Sargent // *The International Journal of Robotics Research* – 2005. – Vol. 24. – Pp. 589–598.
3. Lin, Y. H. A searching technique for obstacle avoidance of autonomous underwater vehicles by using the selftuning fuzzy controller / Y. H. Lin, M. C. Fang, H. H. Chang // *Proc. of the Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE*. Vol. 7. 2014. – 8 p.
4. Mathematical modeling of mobile robot motion with the support surface / E. S. Briskin, Ya. V. Kalinin, A. V. Maloletov, N. G. Sharonov // *9th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD 2018): conf. proceedings, Austria, 2018*. – Pp. 259–264.
5. Малолетов, А. В. Оптимизация структуры, параметров и режимов движения шагающих машин со сдвоенными движителями : моногр. / А. В. Малолетов, Е. С. Брискин ; ВолГГТУ. – Волгоград. – 2015. – 175 с.
6. Яцун, С. Ф. Вибрационный мобильный робот для движения по вертикальной ферромагнитной стене / С. Ф. Яцун, А. А. Черепанов // *Естественные и технические науки*. – 2010. – № 6 (50). – С. 400–401.
7. Исследование мобильного робота вертикального перемещения на основе пневмопривода с многоступенчатым торможением / Е. В. Аверьянов, С. А. Арфьян, В. Г. Градецкий, А. Е. Чередникова // *Автоматизация. Современные технологии*. – 2015. – № 9. – С. 3–7.
8. Чернышев, В. В. Структура энергозатрат шагающих машин и роботов при реализации больших тяговых усилий / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2019. – № 1. – С. 6–18.
9. Чернышев, В. В. Underwater tests of the walking robot MAK-1 / V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev, Ya. V. Kalinin // *Human-Centric Robot-ics : Proceedings of the 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2017) (Porto, Portugal, 11-13 September, 2017) / School of Engineering of the Porto Polytechnic*. – [Publisher: World Scientific], [2018]. – P. 571–578.
10. Арыканцев, В. В. Подводные исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающего аппарата MAK-1 / В. В. Арыканцев, В. В. Чернышев // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 10 (Тем. вып. «Проблемы управления и робототехника»). – С. 169–178.
11. Перспективы применения лидаров в шагающих аппаратах, передвигающихся по дну / В. В. Арыканцев, Я. В. Калинин, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев // *Известия ВолГГТУ : научный журнал* № 3 (250) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 51–54.
12. Голованов, Н. Н. Геометрическое моделирование / Н. Н. Голованов. – М. : ДМК Пресс, 2020. – 406 с.