

Н. В. Быков, канд. техн. наук, доц., зав. отделом, bykov@bmstu.ru,

Н. С. Власова, ст. преподаватель, vlasovans@bmstu.ru,

М. Ю. Губанов, инженер, max.g.bmstu@gmail.com,

Д. В. Лапин, ассистент, lapin.sm6@gmail.com,

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, г. Москва

Механизм вертикального перемещения мобильного гусеничного робота с гибридным магнитно-ленточным принципом сцепления¹

Предложен новый гибридный пассивный принцип сцепления мобильного робота вертикального перемещения с рабочей поверхностью, основанный на сочетании магнитной и клеевой адгезии. Для реализации указанного принципа используется металлическая лента с клеевым слоем на одной из сторон для закрепления ленты на поверхности. Адгезия робота к ленте осуществляется с помощью пассивных магнитов, размещенных в его гусеничных траках. Проведены экспериментальные исследования принципа магнитного сцепления для определения удерживающей силы робота на рабочей поверхности. Экспериментально показана возможность функционирования предложенного механизма перемещения. Предложенный гибридный способ позволяет роботу перемещаться в закрытых помещениях по вертикальным поверхностям разного типа.

Ключевые слова: роботы вертикального перемещения, мобильные роботы, механизмы перемещения, адгезия, принципы сцепления, адгезионные методы, магнитное сцепление, клеевая адгезия, гибридные принципы сцепления

Введение

Роботы вертикального перемещения (РВП) предназначены для решения сложных или потенциально опасных для человека задач [1]. К ним относятся, например, задачи неразрушающего контроля, очистка окон или покраска стен, аудиовизуальная разведка и наблюдение [2–8]. РВП должен надежно закрепляться, удерживаться, отсоединяться и перемещаться по поверхностям различного наклона. Эти задачи решаются механизмом перемещения, реализующим тот или иной принцип сцепления с поверхностью.

Определяющим функционирование РВП и его конструкцию является используемый принцип сцепления. Среди принципов сцепления, реализованных в РВП на текущий момент, можно выделить принципы на основе сил трения [9–11], постоянных магнитов или электромагнитов [12–16], вакуумного сцепления [16–19], эффекта Бернулли [20], вихревого эффекта [21], аэродинамического прижатия [22], электростатической адгезии [23], адгезии полимеров

с микроструктурами и эластомеров [24–26], клеев, чувствительных к давлению [27, 28], а также реологических свойств жидкости [29]. Имеются примеры комбинации различных принципов сцепления в одном РВП [30–32]. Принципы сцепления можно разделить на активные и пассивные в зависимости от того, затрачивается ли дополнительная электрическая энергия на создание и поддержание удерживающей силы [33]. Активные принципы сцепления, как правило, обеспечивают более высокие значения полезной нагрузки и более надежное сцепление РВП с вертикальной поверхностью, но нередко требуют внешнего источника питания, что делает РВП неавтономным.

Среди механизмов перемещения РВП выделяют колесные, гусеничные, шагающие, сдвиговые (рамочные), а также гибридные механизмы, совмещающие несколько указанных типов [1, 34–37]. В отдельную группу могут быть выделены специфические механизмы, которые нельзя отнести ни к одной из перечисленных групп [33].

Комбинация принципа сцепления и механизма перемещения определяется особенностями решаемой задачи и условиями применения, к которым в первую очередь относятся материал

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-29-09596 офи-м).

и качество рабочей поверхности. Одной из проблем текущего уровня развития РВП является то, что пока не существует примера РВП, который мог бы перемещаться по поверхностям любого или почти любого типа: например, РВП хорошо перемещающиеся по стеклу, не могут двигаться по шероховатым поверхностям, и наоборот.

В настоящей работе предпринята попытка создания механизма перемещения, реализующего два принципа сцепления (т. е. с гибридным принципом сцепления), позволяющего РВП двигаться по поверхностям широкой номенклатуры типов, имеющихся в закрытых помещениях. Такой РВП предназначен для решения задач аудиовизуальной разведки и наблюдения за помещениями. Ранее в работе авторов проведено математическое моделирование такого механизма [38]. Текущая работа описывает результаты экспериментальных исследований принципа сцепления и прототипа механизма перемещения.

Для определения силовых характеристик и работоспособности принципа сцепления были проведены четыре серии экспериментальных исследований. В первой серии рассматривали свойства постоянных магнитов и магнитных лент. Во второй серии исследований экспериментально определяли силы сцепления макета механизма перемещения РВП с рабочей поверхностью. В третьей серии экспериментов исследовали возможность перемещения прототипа механизма перемещения РВП по вертикальной поверхности. В четвертой серии рассматривали вопрос размотки ленты прототипом РВП.

Прототип РВП с гибридным принципом сцепления

Робот, для которого исследуется новый гибридный метод сцепления, предназначен для проведения разведывательных задач внутри помещений. Тактика его применения предполагает: 1) перемещение по горизонтальным поверхностям; 2) возможность совершения перехода с горизонтальной поверхности на вертикальную; 3) перемещение по вертикальной поверхности в нужную точку; 4) зависание на вертикальной поверхности на неопределенное время. При этом предполагается, что набор рабочих (вертикальных) поверхностей может быть достаточно широким (бетон, штукатурка, дерево, стекло, металл и т. д.) без значительных неровностей или препятствий. К роботу также предъявляются требования автономности. Существующие прототипы РВП для выполнения схожих задач

часто не удовлетворяют указанным требованиям даже при возможности перемещения по широкому набору рабочих поверхностей.

Для обеспечения сцепления РВП с поверхностями разного типа удобно использовать клеевые принципы, основной недостаток которых заключается в возможности быстрой потери адгезионных свойств из-за загрязнения контактной поверхности. Эта проблема может быть решена использованием сменной контактной адгезионной поверхности, такой как клейкая лента, которая выступает адгезионным агентом между РВП и рабочей поверхностью. РВП по ленте при этом должен перемещаться относительно свободно, поэтому использование клеевого принципа для адгезии его к ленте не будет эффективным. Одним из возможных решений этой задачи является использование пассивных магнитов в совокупности с металлической лентой, на одну сторону которой нанесен клеевой слой. Таким образом, в основе такого магнитно-ленточного принципа сцепления лежат две составляющие: взаимодействие ленты с рабочей поверхностью посредством клеевого слоя и взаимодействие РВП с лентой посредством магнитной силы. Следует отметить, что такой гибридный принцип сцепления пассивен, поскольку основан на комбинации двух пассивных принципов.

Модель гусеничного РВП с магнитно-ленточным механизмом сцепления с вертикальными поверхностями показана на рис. 1.

В процессе перемещения робот наклеивает на вертикальную поверхность ленту, находящуюся в кассете на передних гусеницах. Одновременно с этим РВП прикрепляется к ленте с помощью постоянных магнитов, расположенных в траках гусениц. Подача ленты осуществляется механизмом, раскручивающим кассету с лентой, которая отделяется от защитной пленки и подается на рабочую поверхность, сцепляясь с ней с помощью клея. Дальнейшее разматывание ленты осуществляется пассивным образом в результате движения по ней гусениц РВП.

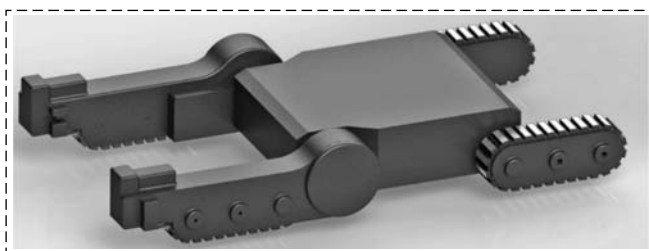


Рис. 1. 3D-модель прототипа РВП

Fig. 1. 3D-model of the WCR prototype

Задние гусеничные модули РВП способны совершать полный оборот вокруг оси в корпусе робота. Это позволяет создавать дополнительное усилие для наклеивания магнитной ленты на начальной стадии перемещения робота по вертикальной поверхности (аналог "хвоста").

Экспериментальные исследования свойств магнитов и магнитных лент

В качестве магнитных элементов использовались неодимовые магниты в форме параллелепипеда с габаритными размерами 20×5×5 мм и массой 3,7 г каждый. Для сравнения сил сцепления между магнитными элементами и лентой были проведены исследования двух типов лент, характеристики которых приведены в табл. 1.

Схемы экспериментальных исследований приведены на рис. 2.

На рабочую поверхность наклеивалась клейкая лента, а к ней на жестком или мягком каркасе за счет действия магнитных сил прикреплялось определенное число магнитов. Далее к каркасу с магнитами в определенных точках прикладывалась нагрузка: крепился гибкий элемент с подвешенным грузом. По максимальной массе груза, при которой сохранялся контакт магнита и магнитной ленты, определялась удерживающая сила.

В экспериментах этой серии варьировался тип ленты, тип каркаса (жесткий и гибкий), число магнитных элементов в каркасе и точка приложения силы. Из результатов, показанных на рис. 3, можно сделать следующие выводы:

- мягкое железо (лента № 2) превосходит магнитный винил (ленту № 1) по значению удерживающей силы;

Таблица 1
Table 1

Характеристики магнитных лент
Parameters of magnetic tapes

Параметр	Лента № 1	Лента № 2
Материал слоя, формирующего магнитное взаимодействие	Магнитный винил	Мягкое железо
Плотность материала, г/см ³	4,375	7,48
Толщина ленты, мм	1,5	0,4
Ширина ленты, мм	25,4	20

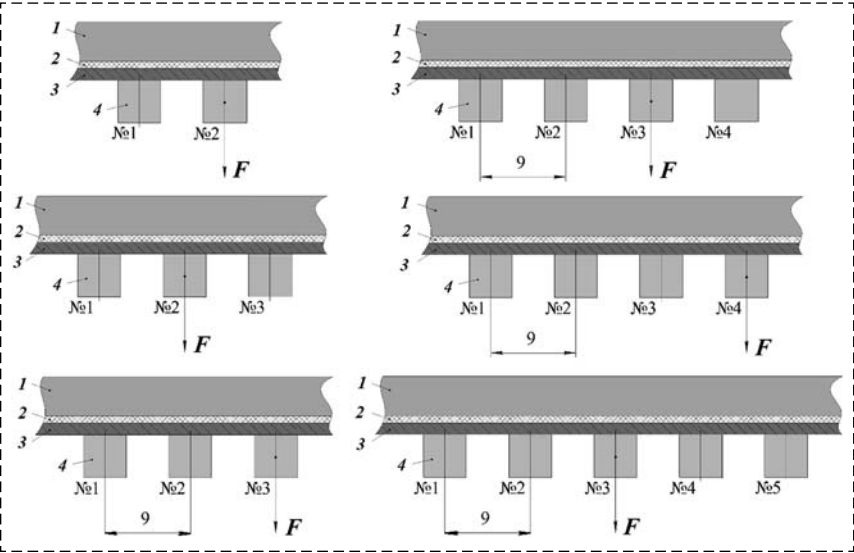


Рис. 2. Схемы экспериментальных исследований:
1 — рабочая поверхность (потолок); 2 — клеевой слой ленты; 3 — магнитная лента; 4 — магниты (№ 1...5); F — прикладываемая сила
Fig. 2. Schemes of experiments:
1 — operating surface (ceiling); 2 — adhesive layer of tape; 3 — magnetic tape; 4 — magnets (No. 1...5); F — applied force

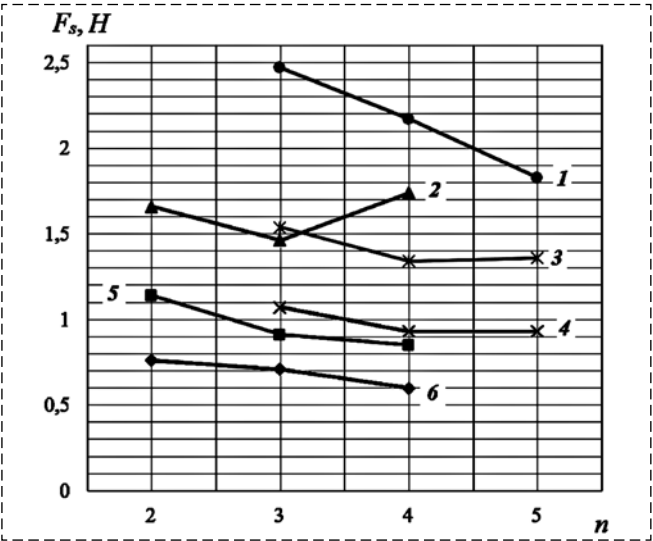


Рис. 3. Зависимость средней удерживающей силы на одном элементе F_s от числа магнитных элементов n на ленте:
1 — лента № 2, жесткий каркас, точка приложения силы на среднем элементе; 2 — лента № 2, жесткий каркас, точка приложения силы крайняя; 3 — лента № 2, гибкий каркас, точка приложения силы на среднем элементе; 4 — лента № 1, гибкий каркас, точка приложения на среднем элементе; 5 — лента № 2, гибкий каркас, точка приложения крайняя; 6 — лента № 1, гибкий каркас, точка приложения крайняя
Fig. 3. The dependence of the average holding force on one magnet F_s on the number of magnets n on the tape:
1 — tape No. 2, a rigid frame, the point of application of force on the middle magnet; 2 — tape No. 2, a rigid frame, the point of application of force on the last magnet; 3 — tape No. 2, a flexible frame, the point of application of force on the middle magnet; 4 — tape No. 1, a flexible frame, the point of application on the middle magnet; 5 — tape No. 2, a flexible frame, the application point of force on the last magnet; 6 — tape No. 1, flexible frame, the point of force on the last magnet

- при использовании жесткого каркаса для закрепления нескольких магнитов удерживающая сила больше, поскольку в таком каркасе магниты не могут изменить своего положения, и взаимодействие между ними минимально. При использовании гибкого каркаса магниты, вступая во взаимодействие друг с другом, деформируют его, в результате чего площадь соприкосновения магнитов с лентой уменьшается, а следовательно, снижается и удерживающая сила;
- удерживающая сила зависит от точки приложения нагрузки.

На основании этих результатов для дальнейших исследований было выбрано размещение магнитов на жестком каркасе в гусеничных траках робота и мягкое железо в качестве образца клейкой ленты.

Исследования адгезии корпуса робота

Вторая серия экспериментов была посвящена экспериментальному определению силы сцепления макета корпуса робота с рабочей поверхностью для выбранной ленты. Корпус макета механизма перемещения РВП (рис. 4) имеет габаритные размеры $175 \times 150 \times 50$ мм, а имитаторы гусениц, закрепленные на нем и способные менять свое положение относительно корпуса, имеют размеры $165 \times 30 \times 30$ мм (передние) и $115 \times 30 \times 30$ мм (задние). На каждом имитаторе гусениц РВП закреплены восемь

неодимовых магнитов, которые использовались в предыдущем эксперименте, на расстоянии 9 мм между центрами соседних магнитов, т. е. в один момент времени робот удерживается за счет магнитного сцепления 32 магнитов на четырех гусеничных имитаторах.

На рабочую поверхность предварительно наклеивали две полосы мягкого железа шириной 20 мм, в корпус робота помещали груз, и далее макет прикреплялся к лентам за счет магнитных сил. Моделировалось крепление корпуса РВП к потолку и вертикальной поверхности. При этом для вертикальной поверхности были рассмотрены случаи использования гусеничных частей без резиновых накладок на магниты, с накладками только на передние имитаторы гусениц, с накладками на передние и задние имитаторы, а также крепление РВП к вертикальной поверхности только на передних "гусеницах" с накладками. Резиновые накладки применяли для увеличения силы трения магнитов с магнитной лентой. Путем подбора максимальной массы груза, при которой не терялся контакт макета робота с рабочей поверхностью (отрыв или скольжение), определяли максимальную удерживающую силу.

Результаты экспериментов (табл. 2) показали, что без использования резиновых накладок на магниты робот, имеющий габаритные параметры, схожие с макетом, может обладать массой не более 2,5 кг, чтобы удерживаться на вертикальной поверхности. При использо-

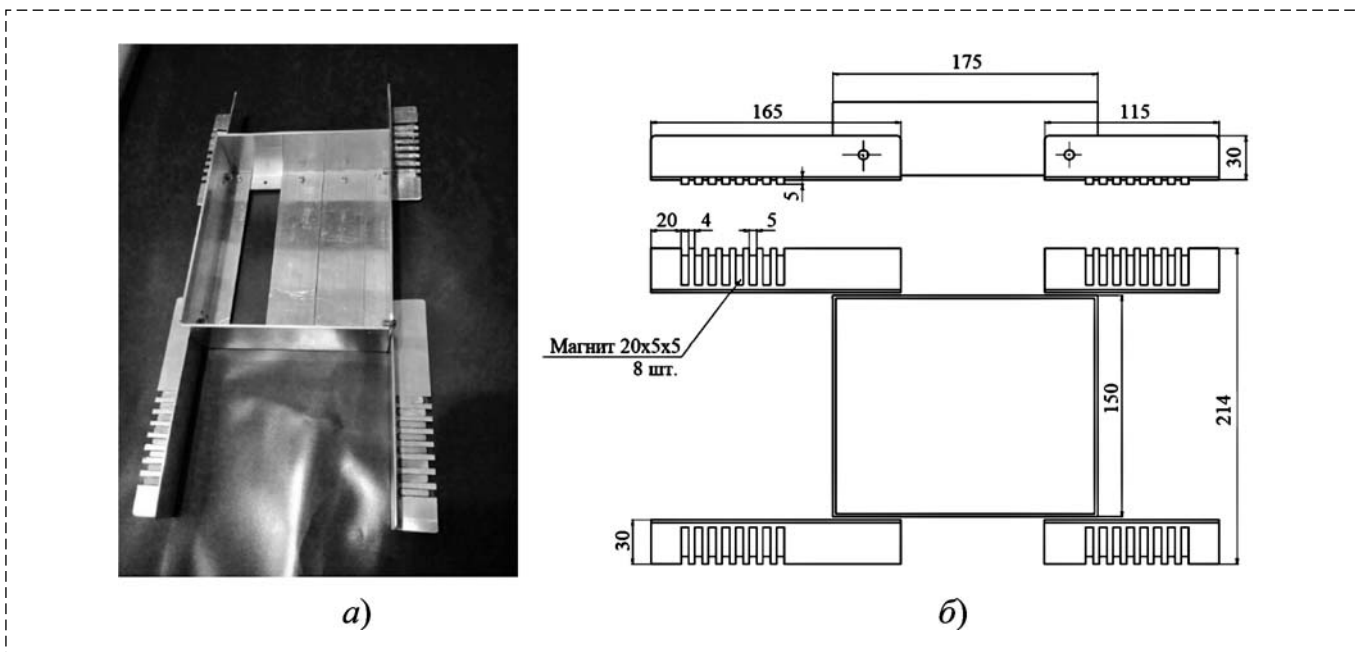


Рис. 4. Общий вид (а) и схема макета (б) механизма перемещения РВП

Fig. 4. General view (a) and layout (b) of the WCR prototype locomotion mechanism

Таблица 2
Table 2

**Результаты измерений адгезии силы
прототипа механизма перемещения РВП**
*Adhesion force measurements
of the WCR prototype locomotion mechanism*

Тип эксперимента	Число магнитных элементов	Средняя удерживающая сила, Н
Без резиновых накладок	32	24,82
Резиновые накладки на передних "гусеницах"	32	46,35
Резиновые накладки на передних и задних "гусеницах"	32	58,95
Контакт только передними "гусеницами" с резиновыми накладками	16	29,95

вании резиновых накладок на магниты в случае контакта с вертикальной поверхностью только двумя передними "гусеницами" робот может иметь суммарную массу около 3 кг.

Исследование движения механизма перемещения

В третьей серии экспериментов проверялась возможность движения прототипа механизма перемещения РВП по магнитной ленте на вертикальной поверхности. Мягкое железо предварительно наклеивали на рабочую поверхность, а перед началом испытаний на ней размещался прототип РВП. Для обеспечения движения

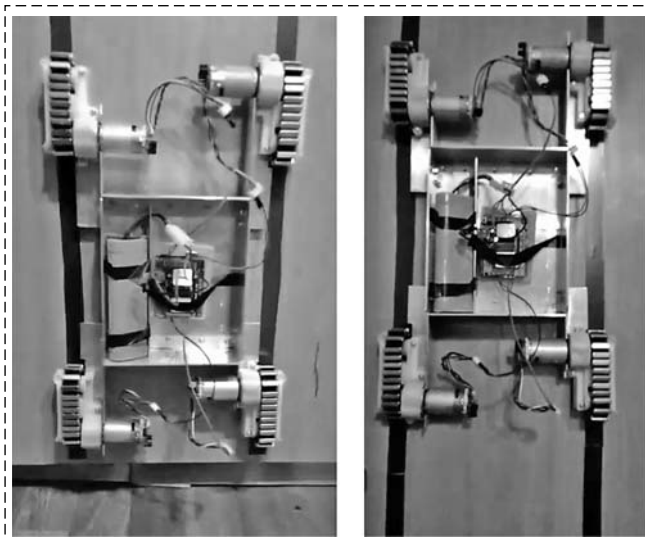


Рис. 5. Фотографии испытаний движения макета
Fig. 5. The WCR prototype motion test process

прототипа робота использовали гусеничные приводы с четырьмя электродвигателями постоянного тока номинальной мощностью 12 Вт.

На рис. 5 приведены кадры исследований макета механизма перемещения РВП в движении.

Результаты показали, что средняя скорость движения робота по вертикальной поверхности, при которой не терялся контакт прототипа РВП с магнитной лентой, составляет 2 см/с.

Исследование процесса разматывания ленты

В четвертой серии экспериментов проводили исследования возможности разматывания ленты. В этой серии экспериментов использовался прототип РВП, показанный на рис. 6 (см. вторую сторону обложки). Для простоты в этом прототипе реализовано два гусеничных трака, а для обеспечения необходимого усилия прижатия используется хвостовая часть. В качестве материала корпуса был выбран листовый вспененный поливинилхлорид (ПВХ) в виде модульной конструкции "Структор". Разъемное крепление элементов осуществляется с помощью пазов и шипов. Для укрепления соединений используется цианакрилатный клей с последующей полимеризацией гидрокарбонатом натрия. В качестве силовых приводов движителей используются сервоприводы постоянного вращения.

Основные конструктивные характеристики прототипа представлены ниже.

Технические характеристики прототипа РВП

Масса, кг	0,815
Длина, мм	215
Высота, мм	150
Ширина, мм	200
Грузоподъемность, кг	~1
Скорость крейсерская, м/с	0,01
Скорость форсажа, м/с	0,03

Для реализации эксперимента на один из гусеничных модулей был предустановлен механизм размотки ленты. Первый этап эксперимента заключался в проверке возможности контроля ленты при ее размотке на горизонтальной поверхности. Фотографии первого этапа эксперимента представлены на рис. 7 (см. вторую сторону обложки).

В ходе первого этапа эксперимента было установлено, что при свободном закреплении магнитной ленты силы неодимовых магнитов на траках достаточно для непрерывной размотки ленты; для реализации контроля ленты управляемым электромагнитом необходимо

учитывать задержку на окончательное формирование магнитного поля.

Второй этап эксперимента направлен на исследование поведения механизма вертикального перемещения на этапе прижатия ленты к вертикальной поверхности. Фотография второго этапа эксперимента представлена на рис. 8 (см. вторую сторону обложки).

В ходе эксперимента было установлено, что оптимальным режимом установки ленты на вертикальной поверхности является режим крейсерской скорости, так как слишком большая скорость вращения движителей приводит к перекосу ленты.

Заключение

В настоящей работе предложен новый гибридный пассивный принцип адгезии РВП с вертикальной поверхностью, основанный на комбинации пассивного магнитного сцепления робота с металлической лентой и ленты с рабочей поверхностью за счет клеевого слоя. Разработана концепция построения механизмов сцепления и перемещения, а также конструкция прототипа платформы вертикального перемещения. Особенностью данной концепции РВП, работающего на магнитно-ленточном принципе сцепления, является возможность его перемещения без задействования магнитной ленты по горизонтальным поверхностям, а также по вертикальным ферромагнитным поверхностям — исключительно с помощью гусеничных приводов с постоянными магнитами.

Проведены экспериментальные исследования магнитных свойств предложенного механизма перемещения, показавшие его работоспособность. Полученные в ходе экспериментов количественные характеристики взаимодействия РВП с лентой были использованы при построении математической модели [38].

Список литературы

1. Chu B., Jung K., Han C.-S., Hong D. A survey of climbing robots: locomotion and adhesion // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2010. Vol. 11 (4). P. 633–647.
2. Градецкий В. Г., Князьков М. М. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2014. № 1. С. 9–16.
3. Berns K., Hillenbrand C., Luksch T. Climbing robots for commercial applications — a survey // *Proc. of the 6th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2003)*. Catania, Italy. P. 771–776.
4. Schmidt D., Berns K. Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures — A survey of design aspects and technologies // *Robotics and Autonomous Systems*. 2013. Vol. 61 (12). P. 1288–1305.

5. Liu S., Gao X., Li K., Li J., Duan X. A small-sized wall-climbing robot for anti-terror scout // *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2007)*. Sanya, China, 2007. P. 1866–1870.
6. Akinfiev T., Armada M., Nabulsi S. Climbing cleaning robot for vertical surfaces // *Industrial Robot: An International Journal*. 2009. Vol. 36, N. 4. P. 352–357.
7. Батанов А. Ф., Грицынин С. Н., Муркин С. В. Робототехнические комплексы для обеспечения специальных операций // *Специальная техника*. 1999. № 6. С. 10–17.
8. Аверьянов Е. В., Коваленко Б. Б., Костин А. В., Пелепас Е. И., Подураев Ю. В., Яковлев С. Ф. Основные аспекты создания отечественных технологических мобильных роботов вертикального перемещения // *Мехатроника, автоматизация и управление*. 2013. № 8. С. 23–27.
9. Xu F., Wang X., Jiang G. Design and analysis of a wall-climbing robot based on a mechanism utilizing hook-like claws // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2012. Vol. 9 (6). P. 261.
10. Xu F., Wang B., Shen J., Hu J., Jiang G. Design and realization of the claw gripper system of a climbing robot // *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2018. Vol. 89, N. 3–4. P. 301–317.
11. Голубев Ю. Ф., Корянов В. В. Экстремальные локомоционные возможности инсектоморфных роботов. М.: Изд-во ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2018. 212 с.
12. Khirade N. R., Sanghi R. K., Tidke D. J. Magnetic wall climbing devices — a review // *Proc. of International Conference of Advances in Engineering and Technology (ICAET 2014)*. Nagapattinam, India, 2014. P. 55–59.
13. Lee G., Kim H., Seo K., Kim J., Sitti M., Seo T. W. Series of multilinked caterpillar track-type climbing robots // *Journal of Field Robotics*. 2016. Vol. 33 (6). P. 737–750.
14. Shen W., Gu J., Shen Y. Permanent magnetic system design for the wall-climbing robot // *Applied Bionics and Biomechanics*. 2006. Vol. 3 (3). P. 151–159.
15. Сырых Н. В., Чашухин В. Г. Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами // *Изв. РАН. ТиСУ*. 2019. № 5. С. 163–174.
16. Chernousko F. L. Simulation and Optimization of Crawling Robots / Bock H. G., Phu H. X., Kostina E., Rannacher R. (eds) // *Modeling, Simulation and Optimization of Complex Processes*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. P. 85–104.
17. Brusell A., Andrikopoulos G., Nikolakopoulos G. A survey on pneumatic wall-climbing robots for inspection // *Proc. of the 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. Athens, Greece, 2016. P. 220–225.
18. Тачков А. А., Калинин С. В., Малыхин А. Ю. Моделирование и оценка эффективности системы удержания малогабаритного автономного робота вертикального перемещения с вакуумными захватами // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. Т. 17, № 3. С. 178–186.
19. Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N., Chashchukhin V. G. Climbing robot for actions in underwater conditions // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2018. Vol. 10 (1). P. 65–71.
20. Chen X. Q., Wager M., Nayyerloo M., Wang W., Chase J. G. A novel wall climbing robot based on Bernoulli effect // *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA 2008)*. Beijing, China, 2008. P. 210–215.
21. Koo I. M., Trong T. D., Lee Y. H., Moon H., Koo J., Park S. K., Choi H. R. Development of wall climbing robot system by using impeller type adhesion mechanism // *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2013. Vol. 72. P. 57–72.
22. Nishi A., Miyagi H. Propeller type wall-climbing robot for inspection use // *Proc. of the 10th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. Houston, USA, 1993. P. 189–196.
23. Chen R., Liu R., Chen J., Zhang J. A gecko inspired wall-climbing robot based on electrostatic adhesion mechanism // *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2013)*. Shenzhen, China, 2013. P. 396–401.

24. Kim S., Spenk M., Trujillo S., Heyneman B., Santos D., Cutkosky M. R. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion // IEEE Transactions on Robotics. 2008. Vol. 24 (1). P. 65–74.
25. Aksak B., Murphy M. P., Sitti M. Adhesion of biologically inspired vertical and angled polymer microfiber arrays // Langmuir. 2007. Vol. 23 (6). P. 3322–3332.
26. Unver O., Sitti M. Flat dry elastomer adhesives as attachment materials for climbing robots // IEEE Transactions on Robotics. 2010. Vol. 26 (1). P. 131–141.
27. Osswald M., Iida F. Design and control of a climbing robot based on hot melt adhesion // Robotics and Autonomous Systems. 2013. Vol. 61 (6). P. 616–625.
28. Wang L., Graber L., Iida F. Large-payload climbing in complex vertical environments using thermoplastic adhesive bonds // IEEE Transactions on Robotics. 2013. Vol. 29 (4). P. 863–874.
29. Wiltse N., Lanzetta M., Iagnemma K. A controllably adhesive climbing robot using magnetorheological fluid // Proc. of the IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA). Woburn, USA, 2012. P. 91–96.
30. Dong W., Wang H., Li Z., Jiang Y., Xiao J. Development of a wall-climbing robot with biped-wheel hybrid locomotion mechanism // Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013). Tokyo, Japan, 2013. P. 2333–2338.
31. Koh K. H., Sreekumar M., Ponnambalam S. G. Hybrid electrostatic and elastomer adhesion mechanism for wall climbing robot // Mechatronics. 2016. Vol. 35. P. 122–135.
32. Xu L., Liu J., Xu J., Wu X., Fan S. Design and experimental study of a bioinspired wall-climbing robot with multi-locomotion modes // Proc. of the ASME 2018 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS 2018). San Antonio, USA, 2018. P. 1–6.
33. Vlasova N. S., Bykov N. V. The problem of adhesion methods and locomotion mechanism development for wall-climbing robots [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2019. arXiv:1905.09214. Дата обновления: 22.05.2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.09214> (дата обращения: 02.07.2019).
34. Silva M. F., Machado J. A. T., Tar J. K. A survey of technologies for climbing robots adhesion to surfaces // Proc. of the 6th International Conference on Computational Cybernetics (ICCC 2008). Stara Lesná, Slovakia, 2008. P. 127–132.
35. Nansai S., Mohan R. E. A survey of wall climbing robots: recent advances and challenges // Robotics. 2016. Vol. 5 (3). P. 5030014.
36. Fu Y., Li Z., Wang S. A wheel-leg hybrid wall climbing robot with multi-surface locomotion ability // Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Takamatsu, Japan, 2008. P. 627–632.
37. Tavakoli M., Lourenço J., Viegas C., Neto P., de Almeida A. T. The hybrid OmniClimber robot: wheel based climbing, arm based plane transition, and switchable magnet adhesion // Mechatronics. 2016. Vol. 36. P. 136–146.
38. Товарнов М. С., Быков Н. В. Математическая модель механизма перемещения мобильного гусеничного робота с магнитно-ленточным принципом вертикального перемещения // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2019. № 3. С. 74–84.

A Locomotion Mechanism for a Mobile Wall-Climbing Robot with a Hybrid Magnetic-Tape Adhesion Method

N. V. Bykov, bykov@bmstu.ru, N. S. Vlasova, vlasovans@bmstu.ru, M. Yu. Gubanov, max.g.bmstu@gmail.com, D. V. Lapin, lapin.sm6@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Bykov Nikita V., Ph. D., Associate Professor, Chief of Department, Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: bykov@bmstu.ru

Accepted on November 12, 2019

Abstract

In the present study, a new hybrid passive adhesion method for a mobile wall-climbing robot (WCR) is proposed. This method is based on a combination of magnetic and glue adhesion. For its implementation, a flexible magnetic tape with glue on one side is used to fasten the tape to the working surface. Holding and climbing of the WCR on the magnetic tape, fixed by the robot in the process of movement, occurs with the help of the tracked locomotion mechanism. Permanent magnets are placed in the tracks of the WCR interacting with the tape as the robot climbs along a vertical surface. The concept of the adhesion and locomotion mechanisms, as well as the design of the WCR prototype is developed. Experimental studies of the magnetic properties of the proposed locomotion mechanism have been carried out. They showed its feasibility and efficiency. Also from experimental studies were obtained quantitative characteristics of the interaction of the WCR with tape, used in the construction of its mathematical model. A feature of this WCR concept, working on the magnetic-tape adhesion, is the possibility of moving it without using magnetic tape on horizontal surfaces, as well as on vertical ferromagnetic surfaces — only with tracks with permanent magnets. The WCR with a hybrid magnetic-tape adhesion mechanism is designed to move on various surfaces indoor spaces.

Keywords: wall-climbing robots, mobile robots, locomotion mechanisms, adhesion, adhesion methods, magnetic force adhesion, glue adhesion, hybrid adhesion principles

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project no. 16-29-09596 ofi-m.

For citation:

Bykov N. V., Vlasova N. S., Gubanov M. Yu., Lapin D. V. A Locomotion Mechanism for a Mobile Wall-Climbing Robot with a Hybrid Magnetic-Tape Adhesion Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 158–165.

DOI: 10.17587/mau.21.158-165

References

1. Chu B., Jung K., Han C.-S., Hong D. A survey of climbing robots: locomotion and adhesion, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, vol. 11, no. 4, pp. 633–647.
2. Gradetsky V. G., Knyazkov M. M. The state and prospects of climbing robots development for extreme environments) *Robototekhnika i Tekhnicheskaya Kibernetika*, 2014, no. 1, pp. 9–16 (in Russian).

3. Berns K., Hillenbrand C., Luksch T. Climbing robots for commercial applications — a survey, *Proc. of the 6th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2003)*, Catania, Italy, 2003, pp. 771–776.
4. Schmidt D., Berns K. Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures — A survey of design aspects and technologies, *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, vol. 61 (12), pp. 1288–1305.
5. Liu S., Gao X., Li K., Li J., Duan X. A small-sized wall-climbing robot for anti-terror scout, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2007)*, Sanya, China, 2007, pp. 1866–1870.
6. Akinfiev T., Armada M., Nabulsi S. Climbing cleaning robot for vertical surfaces, *Industrial Robot: An International Journal*, 2009, vol. 36, no. 4, pp. 352–357.
7. Batanov A. F., Gricynin S. N., Murkin S. V. Robotic systems for special operations) *Spetsial'naya tekhnika*, 1999, no. 6, pp. 10–17 (in Russian).
8. Aver'yanov E. V., Kovalenko B. B., Kostin A. V., Pelepas E. I., Poduraev Y. V., Yakovlev S. F. The main aspects of the creation of domestic technology wall-climbing mobile robots) *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 8, pp. 23–27 (in Russian).
9. Xu F., Wang X., Jiang G. Design and analysis of a wall-climbing robot based on a mechanism utilizing hook-like claws, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2012, vol. 9, no. 6, 261.
10. Xu F., Wang B., Shen J., Hu J., Jiang G. Design and realization of the claw gripper system of a climbing robot, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2018, vol. 89, no. 3–4, pp. 301–317.
11. Golubev Y. F., Koryanov V. V. Extreme locomotion capabilities of insectomorphic robots, Moscow, Publishing house of Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, 2018 (in Russian).
12. Khirade N. R., Sanghi R. K., Tidke D. J. Magnetic wall climbing devices — a review, *Proc. of International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET 2014)*, Nagapatnam, India, 2014, pp. 55–59.
13. Lee G., Kim H., Seo K., Kim J., Sitti M., Seo T. W. Series of multilinked caterpillar track-type climbing robots, *Journal of Field Robotics*, 2016, vol. 33, no. 6, pp. 737–750.
14. Shen W., Gu J., Shen Y. Permanent magnetic system design for the wall-climbing robot, *Applied Bionics and Biomechanics*, 2006, vol. 3, no. 3, pp. 151–159.
15. Syryh N. V., Chashchuhin V. G. Wall-climbing robots with permanent-magnet contact devices: design and control concept of the contact devices, *Izvestiya Akademii Nauk, Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2019, no. 5, pp. 163–173 (in Russian).
16. Chernousko F. L. Simulation and Optimization of Crawling Robots, in Bock H. G., Phu H. X., Kostina E., Rannacher R. (eds) *Modeling, Simulation and Optimization of Complex Processes*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, pp. 85–104.
17. Brusell A., Andrikopoulos G., Nikolakopoulos G. A survey on pneumatic wall-climbing robots for inspection, *Proc. of the 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Athens, Greece, 2016, pp. 220–225.
18. Tachkov A. A., Kalinichenko S. V., Malyhin A. Yu. Modeling and evaluation of the effectiveness of the retention system of a small-sized autonomous vertical movement robot with vacuum grippers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 178–186 (in Russian).
19. Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N., Chashchukhin V. G. Climbing robot for actions in underwater conditions, *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2018. Vol. 10 (1). P. 65–71.
20. Chen X. Q., Wager M., Nayerloo M., Wang W., Chase J. G. A novel wall climbing robot based on Bernoulli effect, *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA 2008)*, Beijing, China, 2008, pp. 210–215.
21. Koo I. M., Trong T. D., Lee Y. H., Moon H., Koo J., Park S. K., Choi H. R. Development of wall climbing robot system by using impeller type adhesion mechanism, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2013, vol. 72, pp. 57–72.
22. Nishi A., Miyagi H. Propeller type wall-climbing robot for inspection use, *Proc. of the 10th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Houston, USA, 1993, pp. 189–196.
23. Chen R., Liu R., Chen J., Zhang J. A gecko inspired wall-climbing robot based on electrostatic adhesion mechanism, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2013)*, Shenzhen, China, 2013, pp. 396–401.
24. Kim S., Spenko M., Trujillo S., Heyneman B., Santos D., Cutkosky M. R. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion, *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, vol. 24, no. 1, pp. 65–74.
25. Aksak B., Murphy M. P., Sitti M. Adhesion of biologically inspired vertical and angled polymer microfiber arrays, *Langmuir*, 2007, vol. 23, no. 6, pp. 3322–3332.
26. Unver O., Sitti M. Flat dry elastomer adhesives as attachment materials for climbing robots, *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, vol. 26, no. 1, pp. 131–141.
27. Osswald M., Iida F. Design and control of a climbing robot based on hot melt adhesion, *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, vol. 61, no. 6, pp. 616–625.
28. Wang L., Graber L., Iida F. Large-payload climbing in complex vertical environments using thermoplastic adhesive bonds, *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, vol. 29, no. 4, pp. 863–874.
29. Wiltsie N., Lanzetta M., Iagnemma K. A controllably adhesive climbing robot using magnetorheological fluid, *Proc. of the IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*, Woburn, USA, 2012, pp. 91–96.
30. Dong W., Wang H., Li Z., Jiang Y., Xiao J. Development of a wall-climbing robot with biped-wheel hybrid locomotion mechanism, *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013)*, Tokyo, Japan, 2013, pp. 2333–2338.
31. Koh K. H., Sreekumar M., Ponnambalam S. G. Hybrid electrostatic and elastomer adhesion mechanism for wall climbing robot, *Mechatronics*, 2016, vol. 35, pp. 122–135.
32. Xu L., Liu J., Xu J., Wu X., Fan S. Design and experimental study of a bioinspired wall-climbing robot with multi-locomotion modes, *Proc. of the ASME 2018 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS 2018)*, San Antonio, USA, 2018, pp. 1–6.
33. Vlasova N. S., Bykov N. V. The problem of adhesion methods and locomotion mechanism development for wall-climbing robots, *arXiv:1905.09214*, 2019, <https://arxiv.org/abs/1905.09214>.
34. Silva M. F., Machado J. A. T., Tar J. K. A survey of technologies for climbing robots adhesion to surfaces, *Proc. of the 6th International Conference on Computational Cybernetics (ICCC 2008)*, Stara Lesná, Slovakia, 2008, pp. 127–132.
35. Nansai S., Mohan R. E. A survey of wall climbing robots: recent advances and challenges, *Robotics*, 2016, vol. 5, no. 3, 5030014.
36. Fu Y., Li Z., Wang S. A wheel-leg hybrid wall climbing robot with multi-surface locomotion ability, *Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Takamatsu, Japan, 2008, pp. 627–632.
37. Tavakoli M., Lourenço J., Viegas C., Neto P., de Almeida A. T. The hybrid OmniClimber robot: wheel based climbing, arm based plane transition, and switchable magnet adhesion, *Mechatronics*, 2016, vol. 36, pp. 136–146.
38. Tovarnov M. S., Bykov N. V. A Mathematical Model of the Locomotion Mechanism of a Mobile Track Robot with the Magnetic-Tape Principle of Wall Climbing, *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2019, vol. 48, no. 3, pp. 250–258 (in Russian).