

УДК 629.1.02

DOI 10.35211/1990-5297-2025-4-299-16-22

*Д. В. Бордюгов, А. С. Прокопов***ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ ДВУХСЕКЦИОННОГО
КАПСУЛЬНОПОДОБНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА*****Волгоградский государственный технический университет**

denklopuk@gmail.com, proas98@mail.ru

Рассматривается двухсекционный капсульноподобный мобильный робот, перемещающийся по горизонтально расположенной поверхности. Конструкция включает два твердых тела (секции), на нижней поверхности корпуса расположены шариковые опоры, также в общем случае робот оснащен N -выдвижными стойками с возможностью их поочередного взаимодействия с опорной поверхностью. Взаимодействие между секциями осуществляется за счет линейного привода.

Ключевые слова: мобильный робот, дискретное взаимодействие, математическая модель.

*D. V. Bordyugov, A. S. Prokopov***ABOUT MOTION CONTROL OF A TWO-SECTION
CAPSULE-LIKE MOBILE ROBOT****Volgograd State Technical University**

A two-section capsule-like mobile robot moving along a horizontally positioned surface is considered. The design includes two solid bodies (sections), ball bearings are located on the lower surface of the housing, and, in general, the robot is equipped with N -extendable racks, with the possibility of their alternate interaction with the support surface. The interaction between the sections is carried out by a linear actuator.

Keywords: mobile robot, discrete interaction, mathematical model.

Введение

Создание мобильных роботов различных классов остается актуальной задачей благодаря их широкому спектру применения: подводные инспекции, перемещение по специализированным поверхностям, преодоление сложного рельефа и др. Характеристики их движения (маневренность, скорость, устойчивость) определяются типом двигателей и движителей. Классификация по типу применяемых движителей включает: колесные, гусеничные, шагающие и прочие.

Среди мобильных роботов со свойствами капсульноподобных можно выделить шагающие и шагающеподобные. Теоретической основой методов анализа их движения являются труды И. И. Артоболевского, Н. В. Умнова, Д. Е. Охочимского и т.д. [1–6]. Ключевая особенность данного типа роботов – дискретность взаимодействия с опорной поверхностью. Они демонстрируют преимущества при движении в неорганизованных средах или по различным направляющим (балкам, тросам, столбам), для перемещения и обеспечения постоянного контакта с которыми конструкция робота может

включать механические захваты, вакуумные присоски и другие механизмы [6–10].

Дискретность взаимодействия (периодическая фиксация точек движителя) может реализовываться различными методами. Например, перемещение корпуса робота достигается за счет дискретного взаимодействия опорных элементов с поверхностью и стационарного движения внутренних тел, вспомогательных подвижных масс [11]. В таком случае робот обладает свойствами локомоторной системы с вибрационным возбуждением, представляющей собой совокупность твердых тел, взаимодействующих между собой и со средой посредством колебаний (капсульный робот). Конструктивно они могут исключать внешние движители: перемещение корпуса обеспечивается движением внутренних масс под действием приводов, что вызывает силу реакции, изменяющую скорость корпуса, тем самым изменяя силу сопротивления среды. Ключевые этапы разработки капсульных роботов включают: анализ динамики и управляющих процессов; синтез алгоритмов движения; учет массово-геометрических параметров системы; изуче-

© Бордюгов Д. В., Прокопов А. С., 2025.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

ние свойств поверхности и характеристик приводов.

Значительный вклад в эту область внесли И. И. Блехман, Р. Ф. Нагаев, Ф. Л. Черноусько, Н. Н. Болотник и их коллеги [12-14].

В [15; 16] рассматривается движение робота, состоящего из двух секций, связанных между собой линейным приводом, который шарнирно закреплен в центре масс каждой из секций. Приведены результаты изменения продольной, поперечной и угловых координат центра масс каждой из секций робота, а также выбор оптимального режима движения двухсекционного робота.

В настоящей работе представлены результаты геометрического расчета изменения положения секций капсульноподобного робота при выдвигании штока линейного привода и дискретном взаимодействии одной из опорных стоек с поверхностью.

Актуальность обусловлена принципом перемещения «капсульноподобного» мобиль-

ного робота, который заключается в дискретном управлении взаимодействия опорных элементов с поверхностью, что на практике является более простой задачей в сравнении с управлением движения внутреннего тела. Организация движения мобильного робота сводится к определению алгоритмов управления опорными элементами, которые поочередно контактируют с поверхностью, в то время как внутреннее тело перемещается стационарно (с постоянной скоростью).

Схема двухсекционного мобильного робота и описание принципа его движения

Мобильный робот (рис. 1) состоит из двух твердых тел 1, 2 (секций) и снабжен шариковыми опорами, расположенными на нижней поверхности корпуса и в общем случае N -выдвижными стойками 4, с возможностью их поочередного контакта с опорной поверхностью. Взаимодействие между секциями осуществляется за счет линейного привода 3 [15; 16].

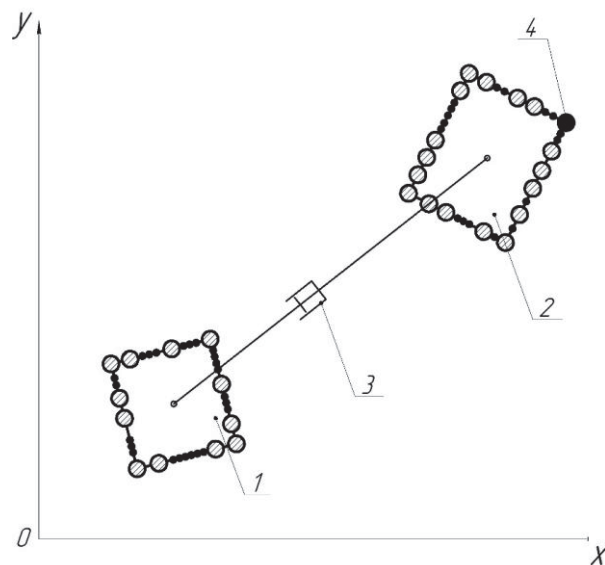


Рис. 1. Схема двухсекционного мобильного робота:
1, 2 — первая и вторая секции мобильного робота; 3 — линейный привод;
4 — опорная стойка, взаимодействующая с поверхностью

Особенность управления представленного на рисунке робота заключается в следующем: в процессе движения у одной из секций в заторможенном состоянии постоянно находятся N движителей для закрепления данной секции на опорной поверхности, в то время как у другой — в опорной фазе находится только один из движителей, тем самым позволяя секции совершать вращательное движение относительно вертикальной оси под действием силы со стороны линейного привода. Причем требуется

обеспечивать неподвижность заторможенных опор, что может достигаться как нормальной реакцией, действующей между опорой и опорной поверхностью, так и выбором материалов для увеличения коэффициента сцепления.

Математическое моделирование

Геометрическая схема робота, состоящего из двух секций, представлена на рис. 2. Количество движителей каждой из секций примем равным четырем.

Таблица 1

Начальные условия

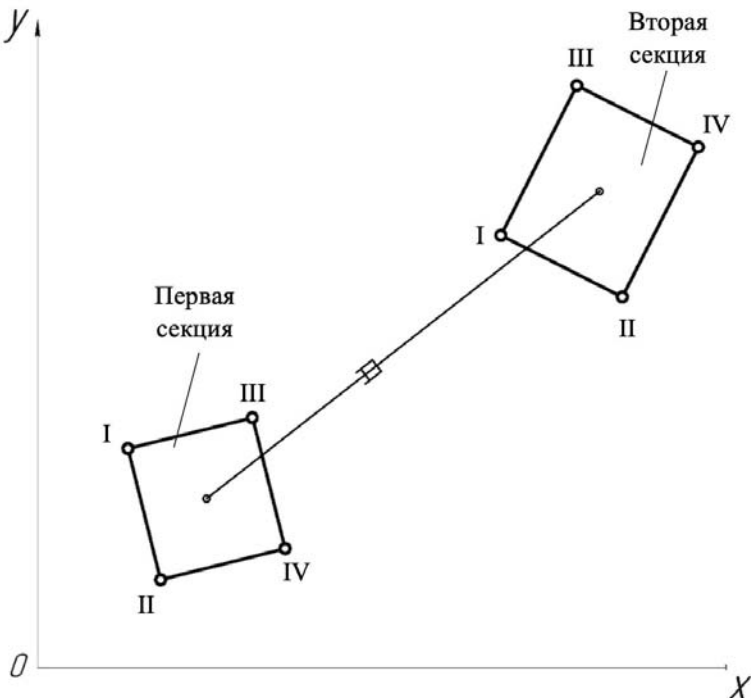
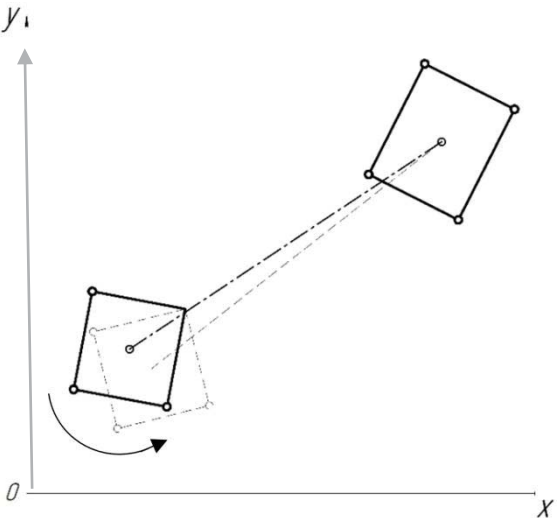
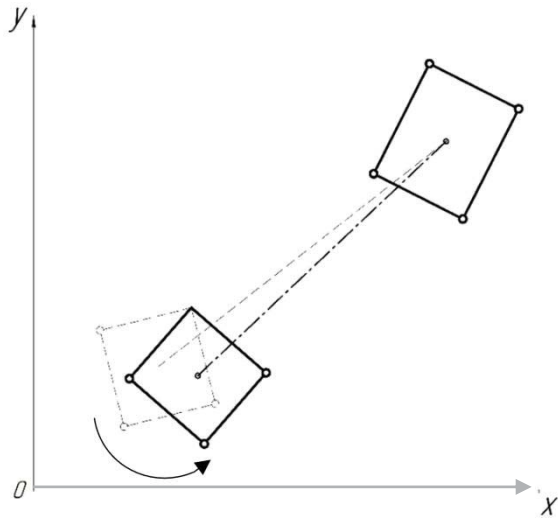
$x_1 = 50$ мм	$y_1 = 50$ мм	$\varphi_1 = 14$ град	$\rho_1 = 27,5$ мм	$\alpha_1 = 46,467$ град
$x_2 = 166,19$ мм	$y_2 = 141$ мм	$\varphi_2 = 26,867$ град	$\rho_2 = 32$ мм	$\alpha_2 = 51$ град
Начальное положение				
				

Таблица 2

Движение первой секции, III опора в зацеплении

$\Delta l = 2,5$ мм	$\Delta l = -10$ мм
$x_{21} = 41,246$ мм	$x_{21} = 66,147$ мм
$y_{21} = 57,848$ мм	$y_{21} = 46,549$ мм
$\Delta \gamma = 24,685$ град	$\Delta \gamma = 34,941$ град
Положение робота	
	

Окончание табл. 2

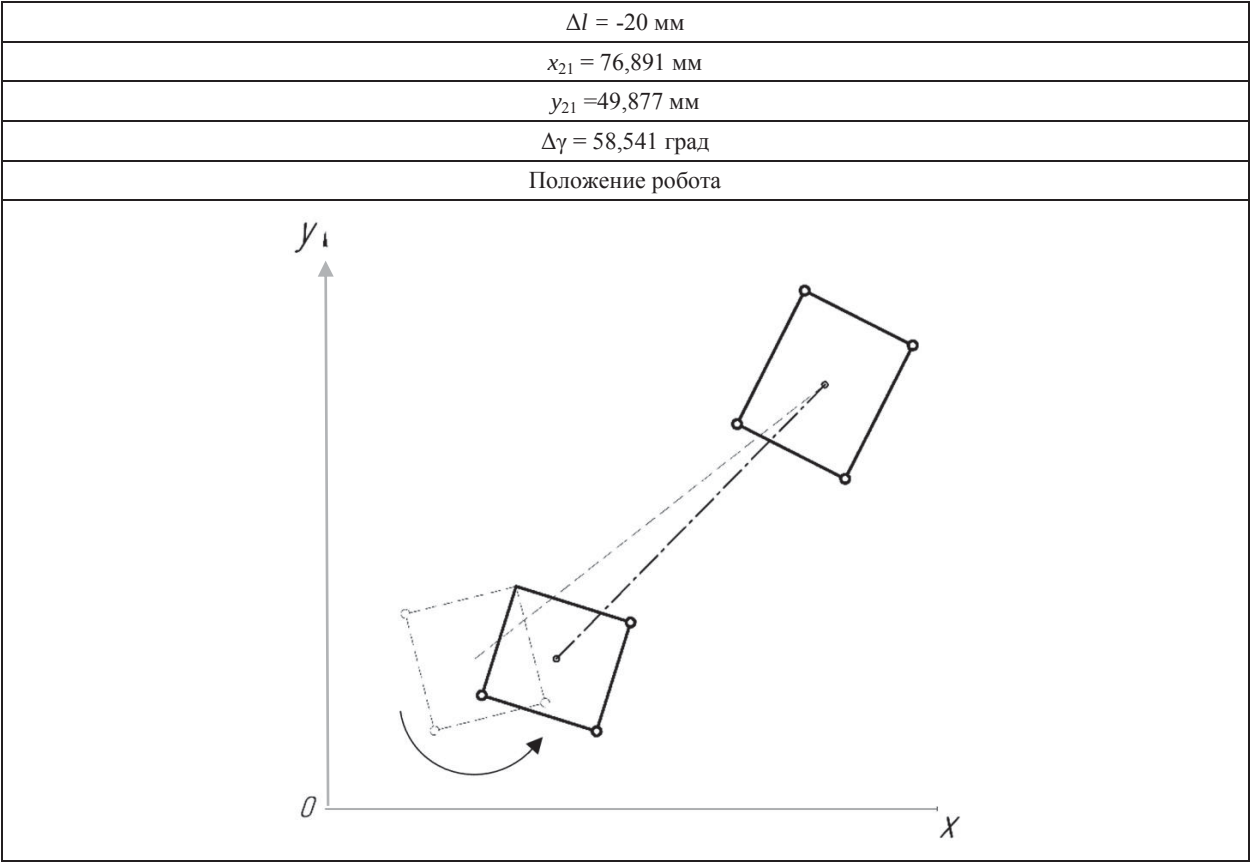
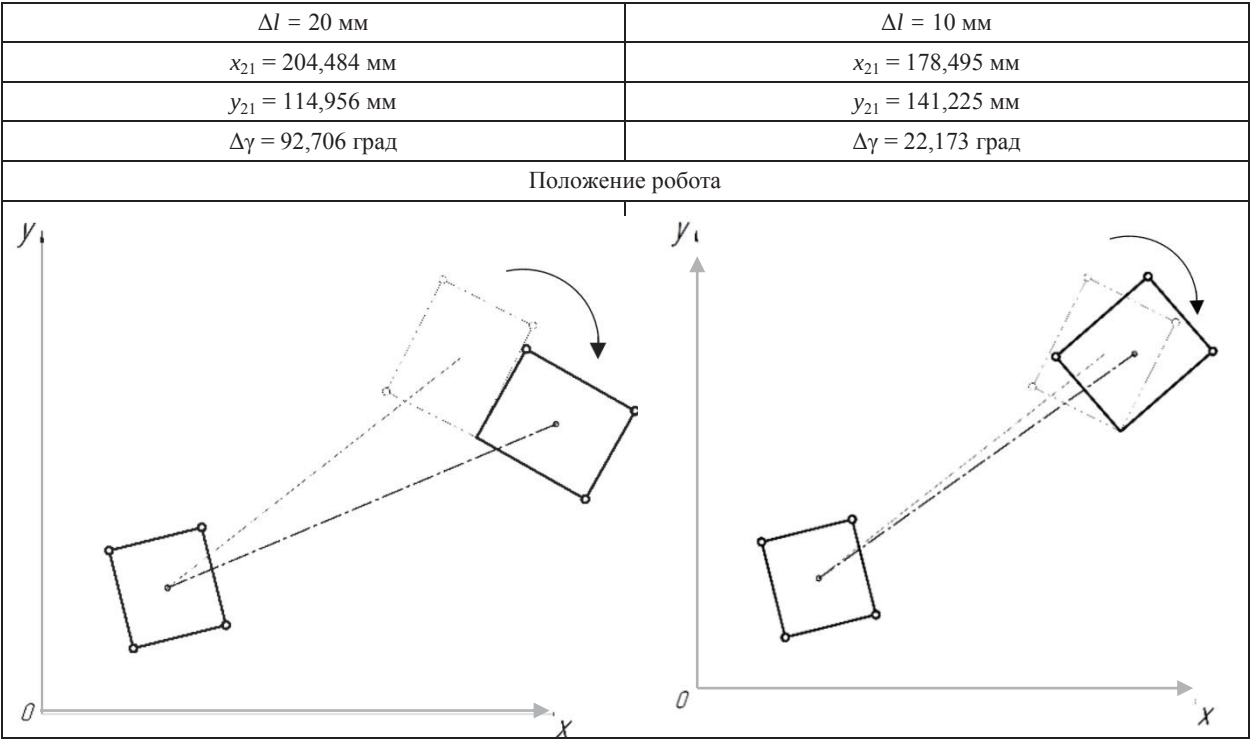
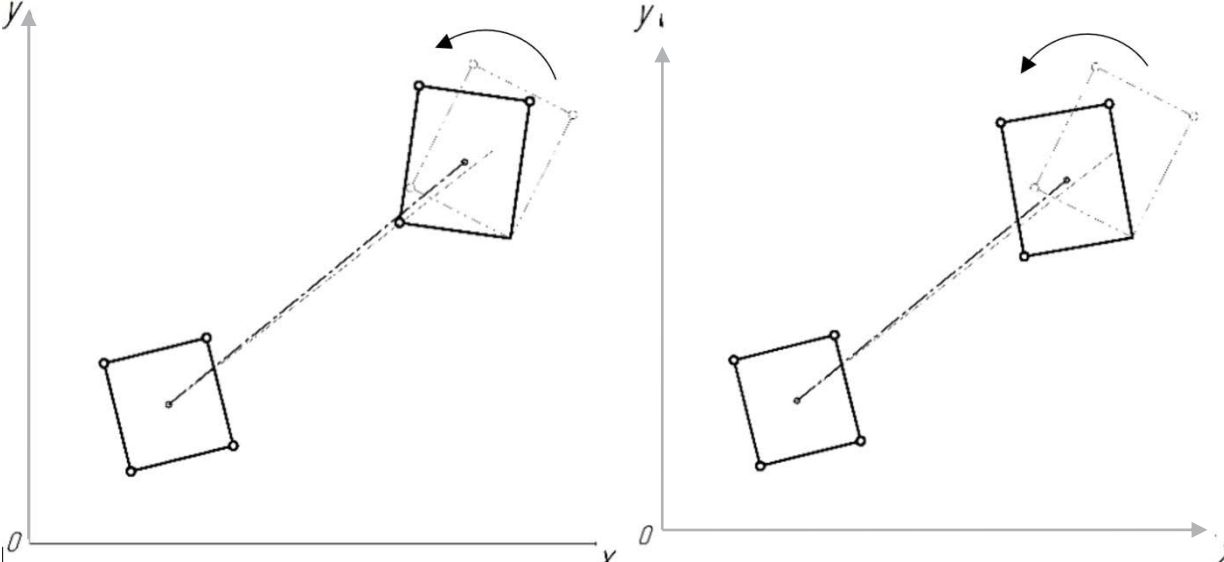


Таблица 3

Движение второй секции, IV опора в зацеплении



Окончание табл. 3

$\Delta l = -10$ мм	$\Delta l = -20$ мм
$x_{21} = 156,457$ мм	$x_{21} = 148,789$ мм
$y_{21} = 137,157$ мм	$y_{21} = 130,737$ мм
$\Delta\gamma = 18,821$ град	$\Delta\gamma = 36,801$ град
Положение робота	
	

Выводы

Рассматривается схема двухсекционного капсульноподобного мобильного робота с опорными стойками, дискретно взаимодействующими с поверхностью; приведены геометрические расчеты, демонстрирующие изменение положения одной из секции робота в процессе работы линейного привода и фиксации одной из опорных стоек.

Анализ полученных результатов позволяет ставить задачу об определении методов (алгоритмов) управления опорными элементами для целенаправленного движения мобильного робота из начальной точки в конечную, а также реализации оптимального программного движения, зависящего от условий, необходимых для выполнения роботом технологической операции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
2. Артоболевский, И. И. Некоторые проблемы создания шагающих машин / И. И. Артоболевский, Н. В. Умнов // Вестник АН СССР. – 1969. – № 2. – С. 44–51.
3. Охоцимский, Д. Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д. Е. Охоцимский, Ю. Ф. Голубев. – М.: Наука. Физматлит, 1984. – 312 с.

4. Лапшин, В. В. Управление движением четырехного аппарата, перемещающегося рысью, иноходью и галопом / В. В. Лапшин // Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. – 1985. – № 5. – С. 39–45.

5. Брискин, Е. С. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 2. Динамика движения шагающих машин серии «Восьминог» / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 19–26.

6. Брискин, Е. С. Об управлении походкой шагающей машины «Восьминог» / Е. С. Брискин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 5. – С. 6–10.

7. Parker, R. Robotics in forestry / R. Parker, K. Bayne, P. Clinton // New Zealand Journal of Forestry. – 2016. – № 60 (4). – С. 8–14.

8. Голубев, Ю. Ф. Управление инсектоморфным роботом при залезании на вершину вертикального угла и при движении по приставной лестнице / Ю. Ф. Голубев, В. В. Корянов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2008. – № 1. – С. 148–157.

9. 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.

10. Шаронов, Н. Г. О перемещении роботов по вертикальной шероховатой поверхности с помощью тросовых движителей / Н. Г. Шаронов, М. И. Ефимов // Известия ВолгГТУ: научный журнал № 3(226) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – С. 51–54.

11. П. м. № 230052 U1 Российская Федерация, МПК В25J 9/10. Мобильный робот / Д. В. Бордюгов, Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2024.

12. *Блехман, И. И.* Вибрационное перемещение / И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 410 с.

13. *Нагаев, Р.Ф.* Периодические режимы вибрационного перемещения / Р.Ф. Нагаев. – М.: Наука, 1978. – 160 с.

14. *Черноусько, Ф. Л.* Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией / Ф. Л. Черноусько, Н. Н. Болотник. – М.: Физматлит, 2022. – 464 с.

15. *Прокопов, А. С.* Выбор оптимального режима движения двухсекционного робота / А. С. Прокопов, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (292) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. — С. 61–67.

16. *Прокопов, А. С.* О точности позиционирования двухсекционного робота / А. С. Прокопов, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(287) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – С. 75–81.