УДК 621.865

DOI 10.35211/1990-5297-2020-9-244-17-21

*Л. Ю. Ворочаева¹, С. И. Савин², А. С. Яцун¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНФИГУРАЦИИ ПОЛЗАЮЩЕГО РОБОТА
ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДЛИНАМИ МОДУЛЕЙ***¹ Юго-Западный государственный университет² Университет Иннополис

mila180888@yandex.ru

В статье рассматривается один из возможных вариантов перемещения трехмодульного ползающего робота по горизонтальной шероховатой поверхности – изменение его конфигурации при фиксировании на поверхности двух крайних опор и управлении длинами модулей.

Ключевые слова: ползающий робот, модульная система, управление длинами, области управления, управление коэффициентом трения.

*L. Yu. Vorochaeva¹, S. I. Savin², A. S. Yatsun¹***INVESTIGATION OF CHANGING THE CONFIGURATION
OF A CRAWLING ROBOT WHEN CONTROLLING MODULE LENGTHS**¹ Southwest State University² Innopolis University

The article considers one of the possible variants of moving a three-module crawling robot on a horizontal rough surface – changing its configuration when fixing two extreme supports on the surface and controlling the module lengths.

Keywords: crawling robot, modular system, length control, control areas, friction coefficient control.

Введение

Ползающие роботы являются одним из наиболее часто используемых классов роботов для проведения поисковых работ в труднодоступных для человека и роботов других классов местах (например, под завалами внутри полностью или частично разрушенных зданий, в узких проходах пещер и т. д.) [1–3]. Это обусловлено высокой маневренностью такого типа роботов, способностью перемещаться по различным типам поверхностей, обходить встречающиеся на пути следования препятствия [4, 5]. В данной работе предложена усовершенствованная конструкция ползающего робота, описанного в [6], которую отличает возможность управления длинами модулей, каждый из которых образован поступательной парой с линейным приводом, а также наличие четырех опор с управляемым коэффициентом трения между ними и поверхностью движения.

Статья посвящена детальному изучению особенностей движения предложенной конструкции робота по горизонтальной шероховатой поверхности, для этого в качестве наиболее наглядного режима перемещения выбрано изменение конфигурации устройства при фиксации на поверхности двух крайних опор.

**Плоская задача движения
робота**

Рассмотрим движение змееподобного ползающего робота, представляющего собой цепочку из трех однотипных телескопических модулей 1–3 длинами $l_i \in [l_{i\min}, l_{i\max}]$, соединенных вращательными шарнирами, обеспечивающими повороты модулей на углы φ_i в горизонтальной плоскости Oxy , контакт с которой происходит в опорных точках O_1 – O_4 , две крайние из них (O_1 и O_4) зафиксированы на поверхности за счет управления коэффициентом трения [7]. Пусть робот располагается на плоскости Oxy , как показано на рис. 1.

Рис. 1. Начальное (основные линии) и конечное (штриховые линии) положения трехмодульного ползающего робота

Опора O_1 имеет координаты $\mathbf{r}_{O1} = (x_{O1}, y_{O1})^T$, модуль 1 располагается под углом $\varphi_1 = \varphi_1^0$, а модули 2 и 3 – под углом $\varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_2^0$ таким, что $\varphi^* = \pi - (\varphi_2 - \varphi_1)$, где $\varphi^* \in [10^0, 170^0]$. Длины мо-

$$n = \begin{cases} 1, & \text{if } [l_{2\min} < l_2 < l_{2\max}], \\ 2, & \text{if } [l_{1\min} < l_1 < l_{1\max}] \wedge [(l_2 = l_{2\max}) \vee (l_2 = l_{2\min})], \\ 3, & \text{if } [l_{3\min} < l_3 < l_{3\max}] \wedge [(l_{1,2} = l_{1,2\max}) \vee (l_{1,2} = l_{1,2\min})]. \end{cases}$$

Вектор обобщенных координат на каждом из этапов движения робота можно записать следующим образом:

$$\mathbf{q} = \begin{cases} (l_2, \varphi_1, \varphi_3)^T, & \text{if } n = 1, \\ (l_1, \varphi_1, \varphi_3)^T, & \text{if } n = 2, \\ (l_3, \varphi_1, \varphi_3)^T, & \text{if } n = 3. \end{cases}$$

Если длина модуля 3 станет предельной до тех пор, пока робот займет конечное положение, произойдет остановка устройства и его переход в особое положение, при котором для дальнейшего перемещения объекта потребуются смена зафиксированных опорных точек.

дулей в момент начала движения имеют одинаковую длину l_i^0 . Робот достигает конечного положения путем поворота модуля 1 против часовой стрелки по закону $\varphi_1 = \varphi_1(t)$ с угловой скоростью $\dot{\varphi}_1$ относительно неподвижной опоры O_1 и модуля 3 по часовой стрелке по закону $\varphi_3 = \varphi_3(t)$ с угловой скоростью $\dot{\varphi}_3 = -\dot{\varphi}_1$ относительно зафиксированной опоры O_4 , а также изменения длин модулей 1–3. В конечном положении модули располагаются следующим образом: $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_2^0$; $\varphi_3 = \varphi_1^0$, а $\varphi^* = \pi + (\varphi_3 - \varphi_2)$, длины модулей равны своим начальным значениям. Последовательный трехэтапный ($n=3$) алгоритм управления длинами модулей робота детально рассмотрен в [8]. Условия переключения между этапами $n=1-3$ можно описать формулой

Моделирование изменения конфигурации ползающего робота

Ниже представлены результаты исследования движения робота для безразмерных величин длин модулей $l_{i=1-3}^0 = 1$, угол φ^* для удобства восприятия и анализа графиков показан в градусах. На рис. 2, а приведена диаграмма $\Delta l_m(\varphi^*)$ этапов движения (управления длинами модулей), на которой выделены четыре области: номера областей I–III соответствуют номерам этапов управления; область IV представляет собой область перехода робота в особое положение; $\Delta l_m = l_{i\max} - l_i^0 = l_i^0 - l_{i\min}$ – диапазон изменения длины модуля.

Рис. 2. Диаграммы $\Delta l_m(\varphi^*)$: а – этапов управления длинами звеньев; I – $n=1$; II – $n=2$; III – $n=3$; IV – особое положение; б – участков 1–5 области II

По диаграмме рис. 2, а видно, что для изменения конфигурации робота при большинстве значений Δl_m и φ^* достаточно управления длиной только модуля 2 (область I). По мере уменьшения значения Δl_m потребуется дополнительное управление длиной модуля 1 (область II), а при дальнейшем уменьшении Δl_m необходимо будет управление длиной модуля 3 (область III). Ниже области III располагается область IV, т. е. при малых значениях Δl_m управление длинами всех трех модулей не позволит роботу совершить требуемое перемещение. При этом можно отметить, что в диапазоне

$\varphi^* \in [10^\circ, 55^\circ]$ переход из одной области в другую представляет собой наклонную прямую, а в области $\varphi^* \in [55^\circ, 170^\circ]$ – кривую с выпуклостью вверх. В данной работе остановимся на детальном изучении областей II и III управления длинами боковых модулей.

Исследование области II

Характер изменения длин l_1 и l_2 в области II может быть различным, что наглядно проиллюстрировано на рис. 2, б, где представлено разбиение области II на участки 1–5, а также на рис. 3, где приведены соответствующие временные зависимости для каждого из выделенных участков.

Рис. 3. Графики зависимостей $l_i(t)$ на участках 1–5 области II

Таблица 1

Описание участков 1–5 области II

Область	$l_2 \nearrow$	$l_{2\max}$	$l_2 \nearrow$	$l_{2\min}$	$l_1 \nearrow$	$l_1 \searrow$
1	1	1	2	-	-	1
2	1	1	2	2	1	2
3	1	-	2	2	1	1
4	-	-	1	1	1	1
5	-	-	1	1	-	1

В табл. 1 представлено схематичное описание участков 1–5 в виде указания числа возрастаний

$l_1 \nearrow$, $l_2 \nearrow$ и убываний $l_1 \searrow$, $l_2 \searrow$ длин модулей, а также указания числа достижений максимального $l_{2\max}$ и минимального $l_{2\min}$ значений длины модуля 2.

Более наглядно участки 1–5 с точки зрения изменения длины модуля 2 можно описать следующим образом: участок 1 – при достижении $l_{2\max}$; участок 2 – при достижении $l_{2\max/\min}$; участки 3–5 – при достижении $l_{2\min}$; что для лучшего восприятия в табл. 1 показано цветом.

Исследование области III

Ниже представлено аналогичное ранее проведенному исследование области III. В этой

области можно выделить участки 1–8 (рис. 4), на каждом из которых наблюдается разное сочетание законов изменения длин модулей 1–3 (рис. 5, табл. 2). Наибольшее число участков

располагается на небольшом интервале изменения угла φ^* , когда происходит излом области III при $\varphi^* = 55^\circ$.

Рис. 4. Диаграмма участков 1–8 области III

Рис. 5. Графики зависимостей $l_i(t)$ на участках 1–8 области III

В табл. 2 участки области III представлены с точки зрения числа возрастаний $l_i \nearrow$ и убываний $l_i \searrow$ длин модулей, а также числа достижений ими минимальных $l_{\min}$ и максимальных $l_{\max}$ значений. В результате анализа данных табл. 2 можно выделить следующие варианты изменения длины модулей 1 и 2: участки

1, 3 – при достижении $l_{1\min}$, $l_{2\max}$; участки 2, 5, 6 – при достижении $l_{1\min/\max}$, $l_{2\min}$; участок 4 – при достижении $l_{1\min/\max}$, $l_{2\min/\max}$; участки 7, 8 – при достижении $l_{1\min}$, $l_{2\min}$. Объединение участков в описанные группы показано в табл. 2 цветом. Следует отметить, что участки 1–8 области III соответствуют участкам 1–5 области II, как показано на рис. 6.

Таблица 2

Описание участков 1–8 области III

Область	$l_1 \nearrow$	$l_{1\max}$	$l_1 \searrow$	$l_{1\min}$	$l_2 \nearrow$	$l_{2\max}$	$l_2 \searrow$	$l_{2\min}$	$l_3 \nearrow$	$l_3 \searrow$
1	-	-	1	1	1	1	2	-	-	1
2	1	-	2	1	1	1	2	2	-	1
3	-	-	1	1	1	1	2	-	-	1
4	1	1	2	1	1	1	2	2	-	1
5	2	1	1	1	1	-	2	2	2	2
6	1	1	1	1	-	-	1	1	1	1
7	1	-	1	1	-	-	1	1	-	1
8	-	-	1	1	-	-	1	1	-	1

Рис. 6. Соответствие участков областей II и III

Заключение

В статье рассматривается плоское движение трехмодульного ползающего робота при изменении его конфигурации путем перехода из начального положения в конечное при фиксации на поверхности двух крайних опор, что достигается управлением коэффициентом трения между ними и плоскостью движения, за счет изменения ориентации модулей робота друг относительно друга и управления их длинами по специально разработанному алгоритму.

В результате моделирования построена диаграмма этапов управления длинами модулей в зависимости от значения предельно допустимого удлинения/укорочения модулей и от величины угла φ^* их взаимной ориентации. Детально изучены этапы управления длинами боковых звеньев, для каждого из них области управления разбиты на участки, отличающиеся характером изменения длин модулей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Granosik, G. The OmniTread serpentine robot for industrial inspection and surveillance / G. Granosik, M. G. Hansen, J. Borenstein // *Industrial Robot: An International Journal*. – 2005. – Vol. 32(2). – P. 139–148.
2. Paap, K. L. A robot snake to inspect broken buildings / K. L. Paap, T. Christaller, F. Kirchner // *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS-2000)*. – Takamatsu, Japan, 2000. – P. 2079–2082.
3. Snake robot locomotion in environments with obstacles / P. Liljeback, K. Y. Pettersen, O. Stavdahl, J. T. Gravdahl // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2011. – Vol. 17(6). – P. 1158–1169.
4. Hirose, S. Development of mobile robots for rescue operations / S. Hirose, E. F. Fukushima // *Advanced Robotics*. – 2002. – Vol. 16(6). – P. 509–512.
5. Yamada, H. A snake-like robot for real-world inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism) / H. Yamada, S. Takaoka, S. Hirose // *Advanced Robotics*. – 2013. – Vol. 27(1). – P. 47–60.
6. Ворочаева, Л. Ю. Моделирование движения пятизвенового ползающего робота с управляемым трением по поверхности с препятствиями / Л. Ю. Ворочаева, А. С. Яцун, С. Ф. Яцун // *Изв. РАН. ТИСУ*. – 2017. – № 3. – С. 191–216.
7. Vorochaeva, L. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction / L. Vorochaeva, S. Savin, A. Yatsun // *Russian J. of Nonlinear Dynamics*. – 2019. – Vol. 15(4). – P. 623–632.
8. The study of special positions of a crawling robot when changing its configuration / L. Yu. Vorochaeva, A. V. Malchikov, A. S. Yatsun, A. Martinez // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 747. – P. 012094.