

ФОРМИРОВАНИЕ БАНКА ПОХОДОК ПОЛЗАЮЩЕГО ПОИСКОВОГО РОБОТА С УПРАВЛЯЕМЫМ ТРЕНИЕМ В ОПОРАХ

© 2019

Л.Ю. Ворочаева, кандидат технических наук,
доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники
Юго-Западный государственный университет, Курск (Россия)

С.И. Савин, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории мехатроники, управления и прототипирования
Университет Иннополис, Иннополис (Россия)

Ключевые слова: ползающий поисковый робот; режимы управления; банк походок; инерционные походки; управляемые походки; комбинированные походки; управление трением.

Аннотация: В работе рассматривается трехзвенный ползающий змееподобный робот, звенья которого последовательно соединены друг с другом двухкоординатными шарнирами. Робот оснащен четырьмя опорами с управляемым коэффициентом трения между ними и поверхностью. Устройство предназначено для передвижения внутри зданий после чрезвычайных происшествий с целью поиска под завалами людей и транспортировки им предметов первой необходимости. Движение робота осуществляется при управлении оператором в двух режимах: последовательном выполнении команд (вперед, назад, поворот и т. д.) и перемещении из начальной точки в конечную. Для работы в каждом из режимов управления требуется использование банка походок устройства.

Разработаны классификации походок ползающего робота по нескольким критериям: по возможности периодического отрыва звеньев от поверхности, по возможности управления трением в опорах, по комбинациям управляемых опор, по типу реализуемого движения устройства. Детально рассмотрены управляемые плоские походки робота при перемещении его вперед, выделено четыре типа походок: продольная, поперечная, поперечная *s*-образная, продольно-поперечная. Для каждой походки разработана последовательность этапов, сформулированы условия их начала и завершения, накладываемые на движения звеньев связи, определен вектор обобщенных координат.

В результате численного моделирования построены графики траекторий центров масс звеньев и центра масс всего устройства для каждой походки, а также графики временных зависимостей углов поворота звеньев. Установлено влияние углов взаимного расположения звеньев на преодолеваемое роботом расстояние. Выявлено, что за одно и то же время движения робот пройдет наибольшее расстояние при продольной походке независимо от углов взаимного расположения звеньев, это же расстояние устройство сможет преодолеть при двух видах поперечных походок при максимально возможном угле взаимного расположения звеньев.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире все чаще при возникновении природных и техногенных катастроф, таких как землетрясения, пожары, наводнения, террористические акты, для проведения спасательных, поисковых, разведывательных работ в полностью или частично разрушенных зданиях используются ползающие змееподобные роботы. Это обусловлено их хорошей проходимостью по недетерминированной поверхности при наличии препятствий, а также высокой маневренностью и способностью проникать в пространства ограниченного объема.

В настоящее время большое число работ российских и зарубежных ученых посвящено тематике ползающих змееподобных роботов. Во многих из них рассматриваются некоторые узкие вопросы, связанные с методами генерации походок [1–3], разработкой алгоритмов работы систем управления [4–9], подходами к разработке математических моделей [10; 11] и т. д. В то же время встречаются и комплексные работы [12–15], в которых исследованы вопросы разработки математической модели, формирования походки, настройки работы системы управления и проведения численных или натурных экспериментов.

В работе рассматривается ползающий робот, предназначенный для проведения спасательных работ в зданиях после чрезвычайных ситуаций. К таким работам относятся поиск под завалами или в помещениях лю-

дей, транспортировка к ним средств связи со спасателями, средств первой медицинской помощи, средств первой необходимости и т. д.

Цель исследования – разработка банка походок змееподобного ползающего робота на основании их классификации и исследование управляемых плоских походок, обеспечивающих перемещение устройства вперед.

ОПИСАНИЕ ПОЛЗАЮЩЕГО РОБОТА

Расчетная схема робота приведена на рис. 1. Устройство представляет собой трехзвенный механизм, звенья $i=1-3$ которого длинами l_i и массами m_i последовательно соединены между собой двухкоординатными шарнирами 4 и 5. Звено 2 будем называть корпусом, а звенья 1 и 3 – боковыми. В крайних точках звеньев O_1-O_4 установлены опорные элементы 6–9 с управляемым коэффициентом трения (f_{\min} и f_{\max}) между ними и поверхностью.

Конструкция и принцип работы таких опор описаны в [16–19], а их использование позволяет опорам периодически фиксироваться на поверхности при максимальном коэффициенте трения и скользить по поверхности при минимальном:

$$x_{O_i}, y_{O_i} = \text{const}, \text{ если } f = f_{\max}, \\ x_{O_i}, y_{O_i} \neq \text{const}, \text{ если } f = f_{\min}.$$

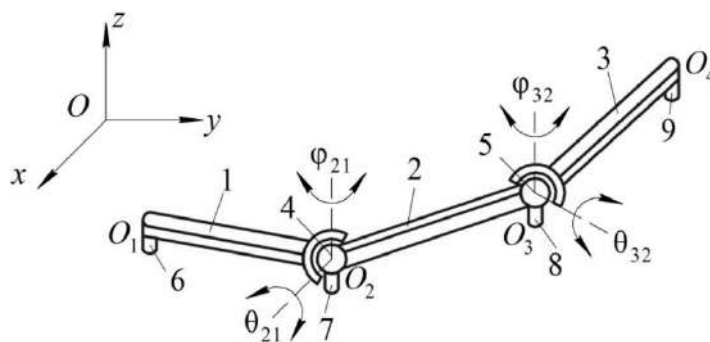


Рис. 1. Расчетная схема трехзвенного ползающего робота

Положение каждого звена в пространстве $Oxyz$ описывается координатами его центра масс – точки C_i , являющейся центром симметрии звена, и углами φ_i и θ_i поворота звеньев в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Углы φ_i отсчитываются от оси Ox против часовой стрелки, а углы θ_i – от плоскости Oxy к оси Oz . Такое описание положения звеньев робота допустимо ввиду того, что хотя бы одно из них во время движения лежит в плоскости Oxy . На рис. 1 показаны оси поворота звеньев на относительные углы:

$$\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1, \quad \varphi_{32} = \varphi_3 - \varphi_2,$$

$$\theta_{21} = \theta_2 - \theta_1, \quad \theta_{32} = \theta_3 - \theta_2.$$

Вектор обобщенных координат устройства можно записать следующим образом:

$$\mathbf{q} = x_c^* \quad y_c^* \quad z_c^* \quad \varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3^T,$$

где x_c^* , y_c^* , z_c^* – координаты центра масс звена, лежащего в плоскости Oxy .

В случае если на поверхности находятся несколько звеньев, то в качестве базового для определения вектора \mathbf{q} используется то, от которого наиболее удобно осуществлять моделирование движения робота.

СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХЗВЕННЫМ ПОЛЗАЮЩИМ РОБОТОМ

Данное устройство работает при взаимодействии с оператором, которое может быть реализовано в двух режимах: один из них заключается в последовательном, пошаговом задании направления движения и реализуемого поведения (движение вперед, поворот направо, разворот на n -е число градусов и т. д.), а при втором оператор задает конечную точку пространства, которой должен достичь робот.

Для реализации движения робота при связи с оператором в двух режимах необходимо решать прямую и обратную задачи динамики на основании банка походок устройства. Будем считать, что походки состоят из серий циклически повторяющихся этапов движения. Каждый этап характеризуется определенными перемещениями звеньев, накладываемыми на их движения связями, а также условиями начала и завершения.

Осуществление движения устройства в первом режиме управления предполагает моделирование прямой задачи динамики, в результате решения которой будут выявлены закономерности различных походок змееподобного робота, установлены зависимости между направлением движения, скоростью перемещения объекта, «коридором» (т. е. минимальной шириной пространства, свободного от препятствий), в котором происходит движение, и управляющими моментами приводов. Второй режим движения требует решения обратной задачи динамики, когда система управления робота выбирает походку, при помощи которой будет реализовано движение, или комбинацию походок в зависимости от поверхности, по которой необходимо перемещаться. В результате решения обратной задачи динамики будут определены законы моментов, которые должны быть сгенерированы приводами робота.

В данной работе решено остановиться непосредственно на разработке банка походок устройства, которые в дальнейшем будут использоваться для решения прямой и обратной задач динамики при моделировании перемещения робота.

ФОРМИРОВАНИЕ БАНКА ПОХОДОК ТРЕХЗВЕННОГО ПОЛЗАЮЩЕГО РОБОТА И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Все походки исследуемого робота можно подразделить на два класса: реализуемые без отрыва звеньев от поверхности (плоские походки) и с периодическим отрывом звеньев от поверхности (пространственные походки). В обоих классах походок можно выделить инерционные, комбинированные и управляемые. Инерционные походки осуществляются при отсутствии управления коэффициентом трения в опорах ($f=f_{\min}$ во время всех этапов) за счет чередования быстрых и медленных движений. Такие походки были рассмотрены в работах [20–22]. Комбинированные походки реализуются путем сочетания этапов движения, во время одних из которых осуществляется управление коэффициентом трения и фиксирование некоторых опор на поверхности, при этом $f=f_{\max}$, а во время других робот совершает инерционные движения без фиксации опор на поверхности, при этом $f=f_{\min}$. Управляемые походки отличаются от ранее рассмотренных тем, что во время каждого из их этапов какие-либо две опоры зафиксированы на поверхности ($f=f_{\max}$) за счет управления коэффициентом трения.

Наибольший интерес представляют именно управляемые походки, поэтому в дальнейшем остановимся только на их рассмотрении. Будем считать, что отрыва звеньев устройства от поверхности не происходит. Тогда управляемые плоские походки можно подразделить на три типа в зависимости от управляемых опор.

Для походок первого типа характерно сочетание этапов, во время которых происходит управление опорами O_2 и O_3 корпуса, с этапами, на которых осуществляется управление крайними опорами боковых звеньев O_1 и O_4 . Это означает, что фиксация на поверхности корпуса сочетается с фиксацией на поверхности двух крайних опор, причем в последнем случае ни одно из звеньев не располагается на поверхности статично, а происходит изменение конфигурации робота. Второй тип походок осуществляется при попеременном управлении опорами O_2 и O_3 корпуса и опорами O_1 и O_2 (или O_3 и O_4) боковых звеньев. Это приводит к попеременной фиксации на поверхности корпуса или одного из боковых звеньев. К третьему типу относятся походки, во время которых осуществляется управление опорами боковых звеньев: O_1 и O_2 звена 1 и O_3 и O_4 звена 3, эти звенья попеременно фиксируются на поверхности.

Каждый из типов управляемых походок требует проведения своего исследования, в рамках данной работы ограничимся только третьим типом походок. Походки этого типа можно классифицировать по виду реализуемых движений на две группы: перемещение вперед и поворот. При этом каждая группа движений может быть осуществлена с использованием различных походок, отличающихся числом этапов, накладываемыми на звенья связями и реализуемыми ими движениями. Условно для реализации первой группы движений можно выделить четыре типа походок, которые и рассматриваются в данной работе:

- $p=1$ – продольная;
- $p=2$ – поперечная;
- $p=3$ – поперечная s -образная;
- $p=4$ – продольно-поперечная.

УПРАВЛЯЕМЫЕ ПЛОСКИЕ ПОХОДКИ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ РОБОТА ВПЕРЕД

Каждая из разработанных управляемых походок ползающего робота в плоскости Oxy состоит из двух этапов n , начальные положения устройства во время которых приведены в таблице 1.

В момент начала первого этапа углы наклона звеньев к оси Ox обозначены как φ_i^{01} , а в момент начала второго – как φ_i^{02} , на пиктограммах в таблице 1 данные углы не показаны, но их значения и соотношения прописаны в тексте. Следует отметить, что в начальные моменты этапов звенья 1 и 3 объекта параллельны между собой. В таблице 1 зафиксированные на этапе звенья закрашены черным. При всех рассматриваемых походках во время первого этапа ($n=1$) на поверхности зафиксировано звено 1, а во время второго ($n=2$) – звено 3, что можно описать следующими формулами:

$$f_{O1,O2} = \begin{cases} f_{\max}, & \text{если } (p=1-4) \wedge (n=1), \\ f_{\min}, & \text{если } (p=1-4) \wedge (n=2), \end{cases} \quad (1)$$

$$f_{O3,O4} = \begin{cases} f_{\max}, & \text{если } [(p=1-4) \wedge (n=2)], \\ f_{\min}, & \text{если } [(p=1-4) \wedge (n=1)]. \end{cases} \quad (2)$$

Это приводит к наложению на движение звеньев робота связей, которые можно записать в виде

$$\left. \begin{matrix} x_{C1} = \text{const} \\ y_{C1} = \text{const} \\ \varphi_1 = \text{const} \end{matrix} \right\} \text{если } (p=1-4) \wedge (n=1), \quad (3)$$

$$\left. \begin{matrix} x_{C3} = \text{const} \\ y_{C3} = \text{const} \\ \varphi_3 = \text{const} \end{matrix} \right\} \text{если } (p=1-4) \wedge (n=2). \quad (4)$$

В таблице 1 показаны направления вращения звеньев на каждом из этапов, помимо этого на рис. 2 приведены поэтапные диаграммы угловых скоростей, где «1» означает вращение против часовой стрелки, а «-1» – по часовой стрелке.

В качестве точки, движение которой на плоскости исследуется, будем рассматривать центр масс устройства – точку C :

$$x_C = \frac{\sum_{i=1}^3 m_i x_{Ci}}{\sum_{i=1}^3 m_i}, \quad y_C = \frac{\sum_{i=1}^3 m_i y_{Ci}}{\sum_{i=1}^3 m_i}.$$

Рассмотрим реализацию каждой походки более подробно. Следует отметить, что для удобства описания походок положение какого-либо из звеньев в момент начала одного из этапов принимается параллельным оси Ox или оси Oy .

При продольной походке ($p=1$) движение центра масс робота происходит вдоль звена 2, в представленном в таблице 1 случае это направление совпадает с направлением оси Ox , так как $\varphi_2^{01} = -\pi$. Углы звеньев 1 и 3 в момент начала первого этапа связаны между собой соотношением $\varphi_3^{01} = -\pi - \varphi_1^{01}$. Во время этого этапа на поверхности зафиксировано звено 1, звенья 2 и 3 вращаются против часовой стрелки до тех пор, пока не будут выполнены условия: $\varphi_2^{02} = \varphi_2^{01} + \pi$, $\varphi_1^{02} = \pi - \varphi_3^{02}$. На втором этапе зафиксировано звено 3, а звенья 1 и 2 поворачиваются против часовой стрелки до тех пор, пока объект не примет положение, аналогичное начальному положению первого этапа, углы звеньев 1 и 3 при этом будут на 2π больше соответствующих значений в момент начала первого этапа.

Поперечная походка ($p=2$) робота начинается из положения, при котором звенья 1 и 3 параллельны оси Oy , $\varphi_3^{01} = -\varphi_1^{01} = \pi/2$, на поверхности зафиксировано звено 1. Движение устройства при такой походке происходит вдоль оси Oy . Во время первого этапа звенья 2 и 3 поворачиваются в противоположных направлениях (звено 2 против часовой стрелки) при сохранении ориентации звена 3 ($\varphi_3 = \text{const}$) до выполнения условий $\varphi_2^{02} = -\varphi_2^{01}$, $\varphi_3^{02} = -\varphi_1^{02} = \pi/2$. Во время второго этапа на поверхности

Таблица 1. Положения робота в начальные моменты этапов при управляемых плоских походках при перемещении вперед

Походка	Начальное положение	
	этап $n=1$	этап $n=2$
Продольная ($p=1$)		
Поперечная ($p=2$)		
Поперечная s-образная ($p=3$)		
Продольно-поперечная ($p=4$)		

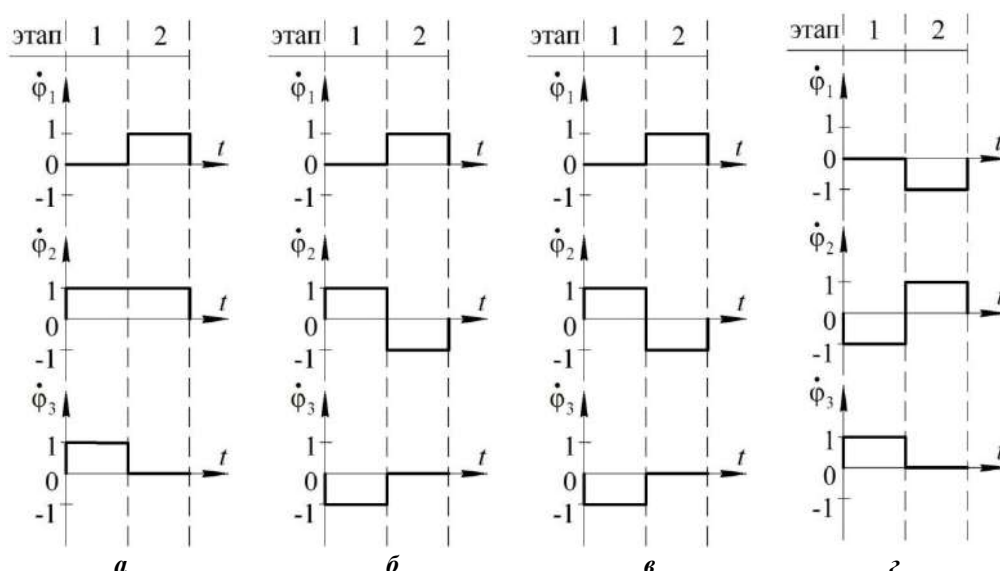


Рис. 2. Диаграммы $\dot{\varphi}_i(t)$ при управляемых походках:

а – продольная; *б* – поперечная; *в* – поперечная *s*-образная; *г* – продольно-поперечная

зафиксировано звено 3, а звенья 1 и 2 поворачиваются также в противоположных направлениях, только теперь звено 2 движется по часовой стрелке, при неизменной ориентации звена 1 ($\varphi_1 = \text{const}$) до выполнения условий, соответствующих началу первого этапа.

При поперечной *s*-образной походке ($p=3$) робот также движется вдоль оси Oy . В момент начала первого этапа звенья 1 и 3 располагаются параллельно оси Ox : $\varphi_3^{01} = \varphi_1^{01} = 0$. Во время первого этапа при фиксации на поверхности звена 1 происходит поворот звена 2 против часовой стрелки, а звена 3 – по часовой стрелке при сохранении его ориентации ($\varphi_3 = \text{const}$), при котором наблюдается «перебрасывание» звеньев 2 и 3 относительно звена 1 до тех пор, пока не станут справедливыми условия $\varphi_3^{01} = \varphi_1^{01} = 0$, $\varphi_2^{02} = -\varphi_1^{01}$. После этого на поверхности фиксируется звено 3 и происходит «перебрасывание» звеньев 1 и 2 относительно звена 3 путем их поворота в противоположных направлениях (звена 2 по часовой стрелке, а звена 1 – против часовой) с сохранением ориентации звена 1 ($\varphi_1 = \text{const}$). Второй этап завершается при выполнении условий, соответствующих началу первого этапа.

Продольно-поперечная походка ($p=4$) позволяет роботу совершать движение вдоль двух осей Ox и Oy одновременно. В начальный момент первого этапа звенья 1 и 3 робота располагаются параллельно оси Ox под углами $\varphi_1^{01} = \varphi_3^{01} = 0$, на поверхности зафиксировано звено 1. Звенья 2 и 3 поворачиваются в противоположных направлениях (звено 2 по часовой стрелке, а звено 3 – против часовой стрелки), «отодвигая» звенья 2 и 3 от звена 1, до тех пор, пока не будут выполняться условия: $\varphi_2^{02} = \pi/2$, $\varphi_1^{02} = \varphi_3^{02} = 0$, причем во время данного этапа звено 3 сохраняет свою ориентацию в плоскости Oxy ($\varphi_3 = \text{const}$). После этого начинается второй этап, во время которого на поверхности фиксируется звено 3, а звенья 1 и 2 поворачиваются в противоположных на-

правлениях (звено 2 теперь движется против часовой стрелки), «подтягиваясь» к звену 3 до справедливости условий, соответствующих началу первого этапа. Угол звена 1 при этом остается постоянным ($\varphi_1 = \text{const}$).

Путем обобщения накладываемых при движении устройства связей, обусловленных сохранением ориентации отдельных звеньев, можно записать следующие условия:

$$\varphi_3 = \text{const} \text{ если } (p = 2 - 4) \wedge (n = 1),$$

$$\varphi_1 = \text{const} \text{ если } (p = 2 - 4) \wedge (n = 2).$$

Следует отметить, что во всех предложенных походках, за исключением продольной, на каждом из этапов ориентация звена 1 или 3 поддерживается постоянной. Такое условие невозможно обеспечить при продольной походке, так как при этом будет наблюдаться самопересечение механизма. Тогда связи, накладываемые на звенья устройства во время первого этапа движения, описываются формулами (1) и (3), а во время второго этапа – формулами (2) и (4).

Можно записать вектор обобщенных координат, меняющийся в зависимости от этапов походок:

$$\mathbf{q} = \begin{cases} (\varphi_2 \quad \varphi_3)^T, & \text{если } (p = 1 - 4) \wedge (n = 1), \\ (\varphi_1 \quad \varphi_2)^T, & \text{если } (p = 1 - 4) \wedge (n = 2). \end{cases}$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОЛЗАЮЩЕГО РОБОТА

Проведем моделирование движения робота при реализации им четырех ранее приведенных походок, обеспечивающих перемещение устройства вперед. На рис. 3 показаны графики траекторий центров масс звеньев (кривые 1–3), а также центра масс всей системы (кривая 4) при осуществлении двух этапов движения.

Моделирование проводилось для случая, когда углы наклона звеньев в моменты начала и завершения этапов

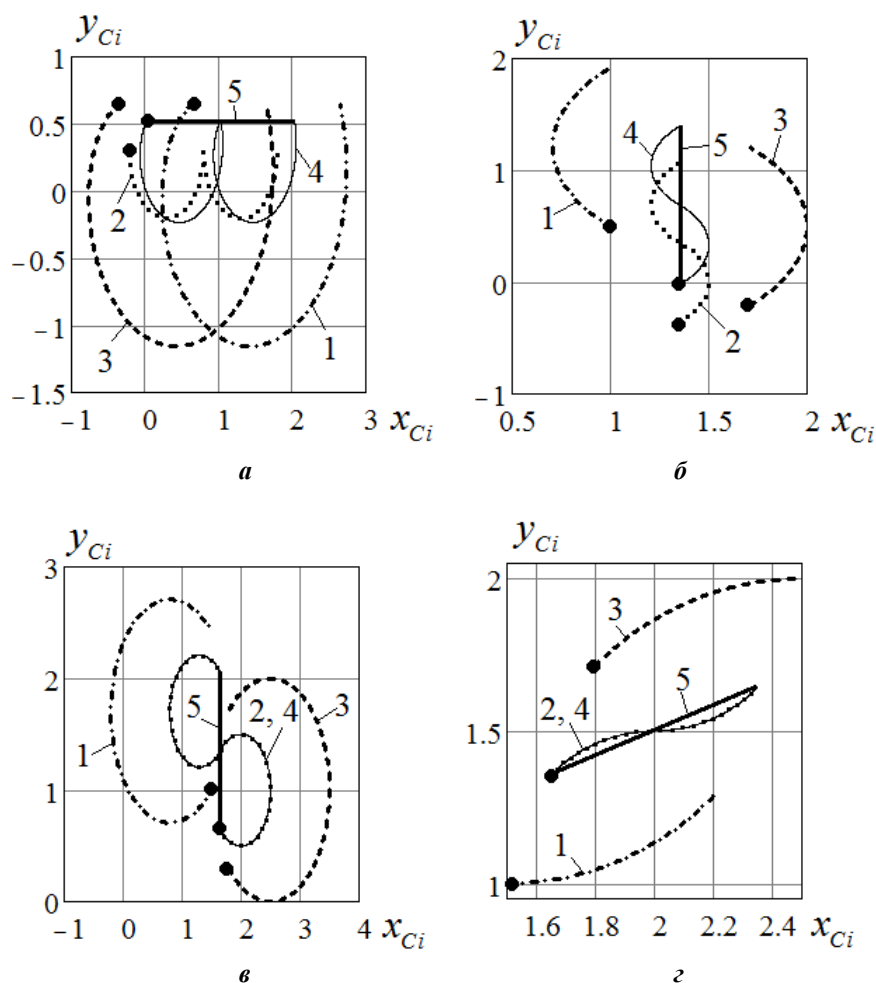


Рис. 3. Графики траекторий центров масс $y_{Ci}(x_{Ci})$:
а – продольная походка; *б* – поперечная походка;
в – поперечная s-образная походка; *г* – продольно-поперечная походка;
 1 – звено 1; 2 – звено 2; 3 – звено 3; 4 – робот;
 5 – расстояние L , пройденное точкой C

в случае их непараллельности оси Ox или Oy принимались кратным углу $\pi/4$. Положения центров масс звеньев в момент начала первого этапа показаны точками. Помимо этого на данных графиках показано расстояние L , пройденное центром масс робота за два этапа движения (прямая 5). Будем считать, что это расстояние вычисляется по формуле

$$L = \sqrt{(x_{Ck} - x_{Cn})^2 + (y_{Ck} - y_{Cn})^2},$$

где x_{Cn}, y_{Cn} – координаты точки C в момент начала первого этапа;

x_{Ck}, y_{Ck} – координаты точки C в момент завершения второго этапа.

Следует отметить, что при продольной походке $y_{Cn}=y_{Ck}$, а при поперечных – $x_{Cn}=x_{Ck}$. По приведенным на рис. 3 графикам видно, что при продольной походке траектория центра масс не пересекает прямую 5, а имеет с ней общие точки в моменты начала и завершения этапов. При всех остальных типах походок зависимость $y_C(x_C)$ и прямая 5 пересекаются в момент завершения

первого этапа, причем кривая $y_C(x_C)$ расположена симметрично относительно прямой 5.

На рис. 4 представлены временные зависимости изменения углов ориентации звеньев устройства. При всех походках, за исключением продольной, значение угла звена 2 в момент начала первого этапа и в момент завершения второго равны между собой. При продольной походке этот угол монотонно увеличивается. При поперечной s-образной и продольно-поперечной походках углы звеньев 1 и 3 во время двух этапов движения робота равны между собой и неизменны, эти звенья параллельны оси Ox . При поперечной походке для углов наклона звеньев 1 и 3 справедливо равенство $\varphi_1 = -\varphi_3$, данные звенья параллельны оси Oy .

Взаимное расположение звеньев робота в моменты начала и завершения этапов влияют на расстояние L , которое проходит центр масс устройства за два этапа движения. Для удобства исследований введем понятие угла φ^* , определяющего взаимную ориентацию звеньев робота, но не являющегося относительным углом между ними, данный угол показан на пиктограммах в таблице 1. На рис. 5 представлены зависимости расстояния L от угла φ при четырех рассматриваемых походках.

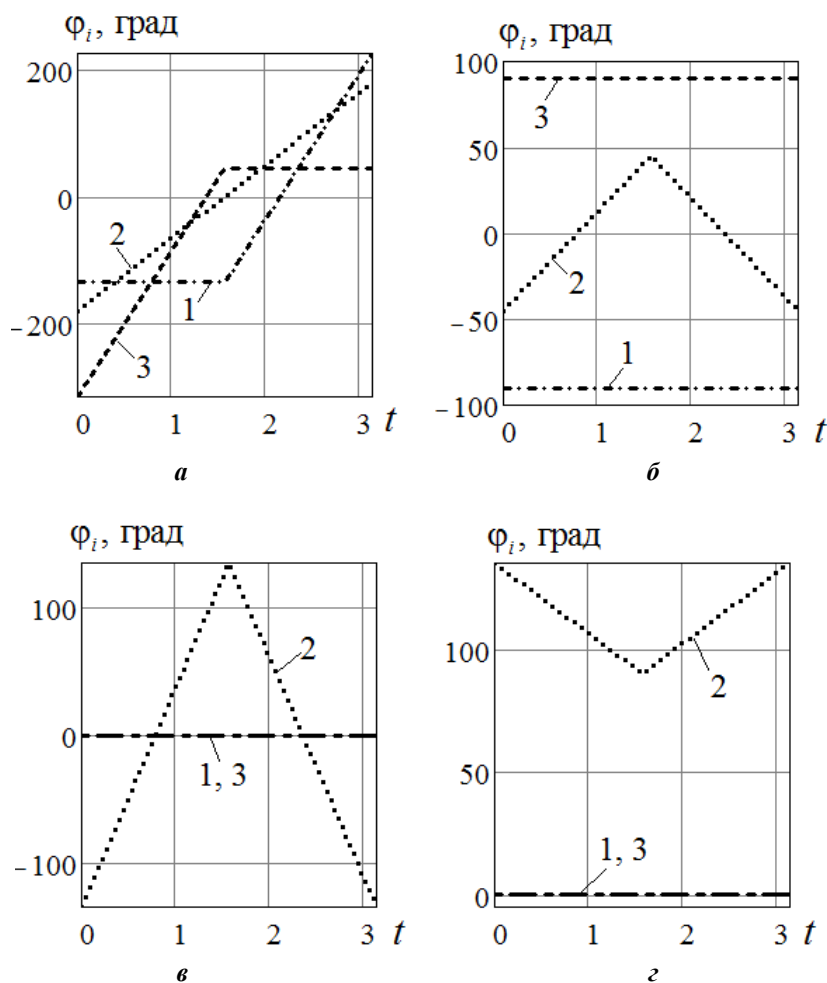


Рис. 4. Графики $\varphi_i(t)$: а – продольная походка; б – поперечная походка; в – поперечная s-образная походка; г – продольно-поперечная походка; 1 – $i=1$; 2 – $i=2$; 3 – $i=3$

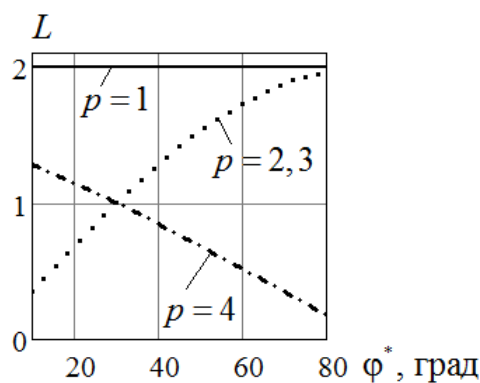


Рис. 5. Графики зависимостей $L(\varphi^*)$ для четырех походок ползающего робота

На графиках видно, что расстояние, преодолеваемое центром масс робота при продольной походке, не зависит от угла φ^* . При двух поперечных походках расстояние L монотонно возрастает с увеличением угла φ^* , а при продольно-поперечной походке убывает пропорционально росту значения φ^* . Также можно сделать вывод о том, что скорость перемещения робота является наибольшей при продольной походке, этого же значения скорость будет достигать при наибольшем из рассмотренных углов φ^* при поперечной и поперечной s-образной походках.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработана расчетная схема трехзвенного ползающего робота с управляемыми опорными элементами, предназначенного для поисковых и спасательных работ в зданиях после чрезвычайных ситуаций. Предложены два режима управления устройством при его взаимодействии с оператором: последовательное выполнение команд и передвижение из заданной начальной точки в заданную конечную. Установлено, что при обоих режимах управления необходимо использование банка

походок устройства. Разработаны классификации походок робота в зависимости от наличия/отсутствия отрыва звеньев от поверхности; от наличия/отсутствия управления трением в опорах; от комбинаций опор, фиксируемых на поверхности; от варианта движения устройства (вперед или поворот). Разработаны четыре походки, обеспечивающие передвижение робота вперед при управлении трением в опорах боковых звеньев и при движении всех звеньев робота в плоскости: продольная, поперечная, поперечная s -образная и продольно-поперечная. Для этих походок выделены этапы движения, сформулированы условия их начала и завершения, указаны накладываемые на звенья связи, определены обобщенные координаты, построены диаграммы направлений вращения звеньев. Проведено моделирование походок устройства, построены графики траекторий движения центров масс звеньев, а также временные зависимости углов поворота звеньев. Установлено влияние угла ϕ^* взаимного расположения звеньев робота на расстояние, преодолеваемое центром масс объекта во время каждой из походок.

Работа выполнена в рамках Гранта Президента МК-200.2019.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Conkur E.S., Gurbuz R. Path Planning Algorithm for Snake-Like Robots // *Information Technology and Control*. 2008. Vol. 37. № 2. P. 159–162.
- Takemori T., Tanaka M., Matsuno F. Gait Design for a Snake Robot by Connecting Curve Segments and Experimental Demonstration // *IEEE Transactions on Robotics*. 2018. № 9. P. 1–8.
- Fu Q., Mitchel T., Yi N., Gart S., Li C. Snake robot's poor 3-D obstacle traversal reveals snake's better stability mechanisms // *APS March Meeting 2018*. 2018. Vol. 63. № 1. Abs. ID: BAPS.2018.MAR.B50.6.
- Ouyang W., Li C., Ren Q., Li P. Steering control of a snake robot with environment uncertainties // *13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Wuhan, 2018. P. 998–1003.
- Nakajima M., Tanaka M., Tanaka K., Matsuno F. Motion control of a snake robot moving between two non-parallel planes // *Advanced Robotics*. 2018. Vol. 32. № 10. P. 559–573.
- Zhao X., Dou L., Su Z., Liu N. Study of the Navigation Method for a Snake Robot Based on the Kinematics Model with MEMS IMU // *Sensors*. 2018. Vol. 18. № 3. P. 879.
- Cao Z., Xiao Q., Huang R., Zhou M. Robust Neuro-Optimal Control of Underactuated Snake Robots with Experience Replay // *IEEE transactions on neural networks and learning systems*. 2018. Vol. 29. № 1. P. 208–217.
- Matsuo T., Ishii K. Adaptive motion control system of a snake-like robot using a neural oscillator network // *IEEE Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*. Kitakyushu, 2014. P. 253–258.
- Li G., Li W., Zhang J., Zhang H. Analysis and Design of Asymmetric Oscillation for Caterpillar-Like Locomotion // *Journal of Bionic Engineering*. 2015. Vol. 12. № 2. P. 190–203.
- Соболев Н.А., Сорокин К.С. Экспериментальное исследование змееподобных движений трехзвенного механизма // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2006. № 5. С. 168–176.
- Malayjerdi M., Akbarzadeh A. Analytical modeling of a 3-D snake robot based on sidewinding locomotion // *International Journal of Dynamics and Control*. 2019. Vol. 7. № 1. P. 83–93.
- Сорокин К.С. Управление перемещением трехзвенника на плоскости с трением // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2009. № 3. С. 165–176.
- Luo M., Yan R., Wan Z., Qin Y., Santoso J., Skorina E.H., Onal C.D. OriSnake: Design, Fabrication, and Experimental Analysis of a 3-D Origami Snake Robot // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018. Vol. 3. № 3. P. 1993–1999.
- Manzoor S., Cho Y.G., Choi Y. Neural Oscillator Based CPG for Various Rhythmic Motions of Modular Snake Robot with Active Joints // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2019. Vol. 94. № 3-4. P. 641–654.
- Иванов В.С., Васильев Г.Н. Структурный анализ технологических мехатронных систем с параллельной кинематикой // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2004. № 5. С. 37–43.
- Vorocheva L.Yu., Panovko G.Ya., Savin S.I., Yatsun A.S. Movement Simulation of a Five-Link Crawling Robot with Controlled Friction Forces // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017. Vol. 46. № 6. P. 527–535.
- Vorocheva L.Yu., Yatsun A.S., Yatsun S.F. Simulation of the motion of a five-link crawling robot with controlled friction on a surface having obstacles // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017. Vol. 56. № 3. P. 527–552.
- Vorocheva L.Yu., Naumov G.S., Yatsun S.F. Simulation of Motion of a Three-Link Robot with Controlled Friction Forces on a Horizontal Rough Surface // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2015. Vol. 54. № 1. P. 151–164.
- Vorocheva L.Yu., Savin S.I., Yatsun A.S. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction // *Nonholonomic Mechanics, vortex structures and hydrodynamics*. Cheboksary, 2019. P. 207–209.
- Черноусько Ф.Л. О движении трёхзвенника по горизонтальной плоскости // *Прикладная математика и механика*. 2001. Т. 65. № 1. С. 15–20.
- Черноусько Ф.Л. Движение многозвенников по плоскости // *Проблемы механики*. М.: Физматлит, 2003. С. 783–802.
- Черноусько Ф.Л. Движение плоского многозвенника по шероховатой горизонтальной плоскости // *Доклады Академии наук*. 2000. Т. 370. № 2. С. 186–189.

REFERENCES

- Conkur E.S., Gurbuz R. Path Planning Algorithm for Snake-Like Robots. *Information Technology and Control*, 2008, vol. 37, no. 2, pp. 159–162.
- Takemori T., Tanaka M., Matsuno F. Gait Design for a Snake Robot by Connecting Curve Segments and Experimental Demonstration. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, no. 9, pp. 1–8.

3. Fu Q., Mitchel T., Yi N., Gart S., Li C. Snake robot's poor 3-D obstacle traversal reveals snake's better stability mechanisms. *APS March Meeting 2018*, 2018, vol. 63, no. 1, abs. ID: BAPS.2018.MAR.B50.6.
4. Ouyang W., Li C., Ren Q., Li P. Steering control of a snake robot with environment uncertainties. *13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Wuhan, 2018, pp. 998–1003.
5. Nakajima M., Tanaka M., Tanaka K., Matsuno F. Motion control of a snake robot moving between two non-parallel planes. *Advanced Robotics*, 2018, vol. 32, no. 10, pp. 559–573.
6. Zhao X., Dou L., Su Z., Liu N. Study of the Navigation Method for a Snake Robot Based on the Kinematics Model with MEMS IMU. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 3, p. 879.
7. Cao Z., Xiao Q., Huang R., Zhou M. Robust Neuro-Optimal Control of Underactuated Snake Robots with Experience Replay. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 208–217.
8. Matsuo T., Ishii K. Adaptative motion control system of a snake-like robot using a neural oscillator network. *IEEE Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*. Kitakyushu, 2014, pp. 253–258.
9. Li G., Li W., Zhang J., Zhang H. Analysis and Design of Asymmetric Oscillation for Caterpillar-Like Locomotion. *Journal of Bionic Engineering*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 190–203.
10. Sobolev N.A., Sorokin K.S. Experimental investigation of snakelike motions of a three-link mechanism. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2006, vol. 45, no. 5, pp. 841–849.
11. Malayjerdi M., Akbarzadeh A. Analytical modeling of a 3-D snake robot based on sidewinding locomotion. *International Journal of Dynamics and Control*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 83–93.
12. Sorokin K.S. Control of a three-link robot moving on the plane with friction. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2009, vol. 48, no. 3, pp. 489–499.
13. Luo M., Yan R., Wan Z., Qin Y., Santoso J., Skorina E.H., Onal C.D. OriSnake: Design, Fabrication, and Experimental Analysis of a 3-D Origami Snake Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, vol. 3, no. 3, pp. 1993–1999.
14. Manzoor S., Cho Y.G., Choi Y. Neural Oscillator Based CPG for Various Rhythmic Motions of Modular Snake Robot with Active Joints. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, vol. 94, no. 3-4, pp. 641–654.
15. Ivanov V.S., Vasil'ev G.N. Structural analysis of technological mechatronic systems with parallel kinematics. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2004, no. 5, pp. 37–43.
16. Vorochaeva L.Yu., Panovko G.Ya., Savin S.I., Yatsun A.S. Movement Simulation of a Five-Link Crawling Robot with Controlled Friction Forces. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, no. 6, pp. 527–535.
17. Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Yatsun S.F. Simulation of the motion of a five-link crawling robot with controlled friction on a surface having obstacles. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, no. 3, pp. 527–552.
18. Vorochaeva L.Yu., Naumov G.S., Yatsun S.F. Simulation of Motion of a Three-Link Robot with Controlled Friction Forces on a Horizontal Rough Surface. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2015, vol. 54, no. 1, pp. 151–164.
19. Vorochaeva L.Yu., Savin S.I., Yatsun A.S. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction. *Nonholonomic Mechanics, vortex structures and hydrodynamics*. Cheboksary, 2019, pp. 207–209.
20. Chernous'ko F.L. The motion of a three-link system along a plane. *Journal of applied mathematics and mechanics*, 2001, vol. 65, no. 1, pp. 13–19.
21. Chernous'ko F.L. Movement of multi-links on the plane. *Problemy mekhaniki* [Problems of mechanics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, pp. 783–802.
22. Chernous'ko F.L. The motion of a flat linkage over a horizontal plane. *Doklady Physics*, 2000, vol. 45, no. 1, pp. 42–45.

THE FORMATION OF THE BANK OF GAITS FOR A CRAWLING SEARCH ROBOT WITH CONTROLLABLE FRICTION IN BEARING SUPPORTS

© 2019

L.Yu. Vorochaeva, PhD (Engineering),
assistant professor of Chair of Mechanics, Mechatronics and Robotics
Southwest State University, Kursk (Russia)
S.I. Savin, PhD (Engineering),
senior researcher of the Laboratory of Mechatronics, Control and Prototyping
Innopolis University, Innopolis (Russia)

Keywords: crawling search robot; control modes; gaits bank; inertial gaits; controlled gaits; combined gaits; friction control.

Abstract: The paper considers a three-link crawling snake-like robot, the links of which are connected by two-axis hinges. The robot is equipped with four bearing supports with the controlled coefficient of friction between them and the surface. The device is designed to move inside buildings after the emergencies to search for people under the debris and to transport the essentials to them. The robot is controlled by the operator in two modes: the sequential execution of commands (forward, backward, turn, etc.) and moving from the starting point to the final one. Working in each of the control modes requires the use of the gaits bank.

The authors developed the classification of gaits for a crawling robot based on several criteria: the admissible periodic separation of links from a surface, the ability to control by friction in the supports, the combinations of controllable bearing supports, and the implemented type of motion. The authors studied in detail the controllable planar gaits of a robot when moving it forward and distinguished four types of gaits: longitudinal, transverse, transverse *s*-shaped, and longitudinal-transverse. For each gait the sequence of stages is developed, the conditions of their beginning and end imposed on the movements of the links are formulated and the vector of generalized coordinates is defined.

As a result of numerical simulation, the authors built the graphs of trajectories of the centers of mass of links and the center of mass of the entire device for each gait, as well as the graphs of time dependences of the angles of rotation of links. The study identified the influence of angles of links relative positions on the distance traveled by the robot. It is revealed that for the same time of movement, the robot will pass the greatest distance with a longitudinal gait irrespective of angles of links relative position. The device will be able to march the same distance at two types of transverse gaits at the maximum possible angle of the links relative position.