

## Переправа автономного шестиногого робота на плоту через водную преграду

© Ю.Ф. Голубев, В.В. Корянов

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 125047, Россия

*Рассмотрен построенный алгоритм управления движением шестиногого шагающего робота. В простейшем случае он позволяет роботу осуществить переправу на прямоугольном плоту на другой берег небольшой водной преграды, сообщив плоту начальный толчок от берега. Выбрана такая ширина преграды, что робот не может ее перешагнуть, но для того, чтобы переплыть ее на плоту, достаточно толчка от берега. Предложенный алгоритм отработан средствами компьютерного моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм». Уравнения движения механической системы синтезируются этим комплексом автоматически. Дано сокращенное описание использованной при моделировании математической модели воздействия воды на плот при нестационарном движении. Представлены результаты расчетов, свидетельствующие о работоспособности алгоритма при наличии информации о движении, достаточной для целей управления.*

**Ключевые слова:** *плот, архимедова сила, сопротивление воды, вязкое трение, шестиногий робот, переправа, водная преграда*

**Введение.** Разработка мобильных роботов, способных перемещаться в пространстве с различными препятствиями, является актуальной и интересной задачей [1–11]. В некоторых случаях робот может использовать препятствия для своего перемещения вместе с ними [1, 11]. Например, в работе [11] исследуется возможность маневрирования шестиногого шагающего робота на свободно катающихся шарах, включая залезание на шар, перелезание с одного шара на другой и спезание с шара.

Если наземный автономный мобильный робот не имеет плавучести и не приспособлен к функционированию в водной среде, то подходящим способом преодоления водной преграды, через которую он не может перешагнуть, будет применение прямоугольного плота, обладающего достаточной горизонтальной поверхностью. Далее используется представленная в работе [12] математическая модель сил сопротивления воды движению плота, основанная на гипотезе о «струйном» характере воздействия воды на отдельные элементы плота.

Данная статья является развитием предыдущих работ авторов, в том числе работ [10, 11], по построению движений шестиногого робота для преодоления различных подвижных и стационарных препятствий.

**Постановка задачи.** Первоначально робот идет по горизонтальной поверхности. На его пути расположена не очень широкая, но достаточно протяженная водная преграда с перпендикулярными к направлению движения берегами. На воде у ближайшего к роботу берега свободно лежит плот. Робот должен подойти к плоту, перейти на него, затем, оттолкнувшись от берега с достаточной силой, переплыть на плоту к другому берегу, одновременно переместившись к соответствующему краю плота, и перейти на другой берег.

При выполнении этих маневров возникают колебания плота относительно воды. Если к тому же робот оказывается не на осевой линии плота, то при движении робота по плоту, особенно при отталкивании от берега, возникает закрутка плота вокруг вертикальной оси, что усложняет задачу управления.

Цель работы — конструктивное построение алгоритма преодоления шестиногим роботом небольшой водной преграды с помощью плота при указанных в постановке задачи условиях и отработка этого алгоритма на программном комплексе «Универсальный механизм» [13] с учетом полной динамики системы в целом.

В статье представлены результаты компьютерного моделирования, которые свидетельствуют о принципиальной реализуемости предложенного алгоритма решения поставленной задачи.

**Уравнения движения плота на воде.** Как и в работе [14], предполагается, что однородный плот в форме прямоугольного параллелепипеда находится на поверхности воды под действием нагрузки  $\mathbf{F}$ , силового момента  $\mathbf{M}$  относительно центра масс  $C_p$  плота и архимедовой силы. Размеры плота:  $2a$  — длина,  $2b$  — ширина,  $2d$  — толщина.

Будем считать, что декартов репер  $C_p \mathbf{e}'_1 \mathbf{e}'_2 \mathbf{e}'_3$  соответствует главным центральным осям инерции плота, а его главные моменты инерции равны  $A$ ,  $B$ ,  $C$  относительно осей с направляющими векторами  $\mathbf{e}'_1$ ,  $\mathbf{e}'_2$ ,  $\mathbf{e}'_3$  соответственно. Пусть  $O \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_3$  — неподвижный декартов репер, причем вектор  $\mathbf{e}_3$  направлен вертикально вверх и угол между ним и вектором  $\mathbf{e}'_3$  оставляет всю нижнюю часть плота под водой. Примем, что

$$\mathbf{e}_i = \sum_{j=1}^3 a_{ij} \mathbf{e}'_j, \quad i = 1, 2, 3,$$

где коэффициенты  $a_{ij}$  образуют ортогональную матрицу.

Динамические уравнения плота имеют вид

$$\begin{aligned}
 M_p \ddot{\mathbf{r}}_c &= 4\gamma(\zeta + d)ab\mathbf{e}_3 + \mathbf{F} + \mathbf{R}; \\
 A\dot{p} + (C - B)qr &= -a_{32}s_1 + M_x + N_x; \\
 B\dot{q} + (A - C)pr &= a_{31}s_2 + M_y + N_y; \\
 C\dot{r} + (B - A)pq &= -\gamma \frac{4a_{31}a_{32}ab}{3a_{33}}(a^2 - b^2) + M_z + N_z; \quad (1) \\
 \dot{a}_{31} &= a_{33}q - a_{32}r; \\
 \dot{a}_{32} &= a_{31}r - a_{33}p; \\
 \dot{a}_{33} &= a_{32}p - a_{31}q,
 \end{aligned}$$

где  $M_p$  — масса плота;  $\mathbf{r}_c = \xi\mathbf{e}_1 + \eta\mathbf{e}_2 + \zeta\mathbf{e}_3$  — смещение центра масс плота в репере  $O\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2\mathbf{e}_3$ ;  $\gamma$  — удельный вес воды;  $p, q, r$  — проекции вектора угловой скорости плота на оси репера  $C_p\mathbf{e}'_1\mathbf{e}'_2\mathbf{e}'_3$ ;  $\mathbf{R}$  — сила сопротивления воды;  $\mathbf{N} = N_x\mathbf{e}'_1 + N_y\mathbf{e}'_2 + N_z\mathbf{e}'_3$  — момент сил сопротивления воды относительно центра масс плота.

Величины  $s_1, s_2$  выражают действие момента архимедовых сил на плот:

$$\begin{aligned}
 s_1 &= \gamma ab \left\{ \frac{2}{3} \left[ \left( 2 + \frac{a_{32}^2}{a_{33}^2} \right) b^2 + \frac{a_{31}^2}{a_{33}^2} a^2 \right] + \frac{1}{2} (\zeta^2 - d^2) \right\}; \\
 s_2 &= \gamma ab \left\{ \frac{2}{3} \left[ \left( 2 + \frac{a_{31}^2}{a_{33}^2} \right) a^2 + \frac{a_{32}^2}{a_{33}^2} b^2 \right] + \frac{1}{2} (\zeta^2 - d^2) \right\}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

В общем случае, чтобы замкнуть систему (1), к ней следует добавить еще шесть кинематических уравнений вида

$$\begin{aligned}
 \dot{a}_{11} &= a_{13}q - a_{12}r, & \dot{a}_{21} &= a_{23}q - a_{22}r, \\
 \dot{a}_{12} &= a_{11}r - a_{13}p, & \dot{a}_{22} &= a_{21}r - a_{23}p, \\
 \dot{a}_{13} &= a_{12}p - a_{11}q, & \dot{a}_{23} &= a_{22}p - a_{21}q
 \end{aligned} \quad (3)$$

или использовать выражения [12]

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= 1 - \frac{a_{31}^2}{1 + a_{33}}, & a_{12} &= -\frac{a_{31}a_{32}}{1 + a_{33}}, & a_{13} &= -a_{31}, \\
 a_{21} &= -\frac{a_{31}a_{32}}{1 + a_{33}}, & a_{22} &= 1 - \frac{a_{32}^2}{1 + a_{33}}, & a_{23} &= -a_{32}, \\
 a_{31}, & & a_{32}, & & a_{33},
 \end{aligned} \quad (4)$$

которые в рассматриваемом диапазоне угловых отклонений плота (плот не переворачивается:  $a_{33} > 0$ ) не имеют вырождений.

Для расчета сил и моментов сопротивления воды движению плота предполагается [12], что удельная сила  $\mathbf{R}_{sp}$  сопротивления воды, действующая на каждый элемент погруженной в воду части плота, выражается формулой

$$\mathbf{R}_{sp} = -\kappa \mathbf{v}_\tau - \kappa_1 \mathbf{v} |v_v| v_v = -\kappa \mathbf{v} - \mathbf{v} (\kappa_1 |v_v| - \kappa) v_v, \quad (5)$$

где  $\kappa \geq 0$  и  $\kappa_1 \geq 0$  — соответствующие коэффициенты пропорциональности, причем, по имеющимся экспериментальным данным, для воды  $\kappa_1 \gg \kappa$  (коэффициенты  $\kappa$  и  $\kappa_1$  считаются одинаковыми для всех элементов плота);  $\mathbf{v}_\tau$  — составляющая скорости, касательная к элементу плота;  $\mathbf{v}$  — единичный вектор внешней нормали к поверхности плота;  $v_v = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}$  — составляющая скорости, перпендикулярная элементу;  $\mathbf{v}$  — скорость характерной точки элемента относительно воды.

Поскольку в норме верхняя часть плота находится над водой, будем считать, что силы сопротивления воды приложены только к днищу плота и к его боковым поверхностям.

Конечные формулы содержатся в работе [12] и по причине их громоздкости здесь не приводятся.

В работе [14] по первому приближению исследована устойчивость стационарных движений, возникающих из-за действия простейших активных сил. При условии, что под действием указанных сил плот остается на плаву, установлены следующие свойства движения.

1. Положение равновесия, возникающее под действием постоянной вертикальной силы, асимптотически устойчиво.

2. Если компоненты силы постоянны в осях, связанных с плотом, то возникающее при этом стационарное движение неустойчиво. Другими словами, для плота с мотором обязательно требуется активное управление движением.

3. Если компоненты силы постоянны в неподвижных осях (плот на буксире), то движение будет устойчивым, когда точка приложения силы смещена от центра плота в сторону действия силы (трос от буксира привязан к носовой части плота). В противном случае движение будет неустойчивым.

**Механическая система.** Конструкция робота совпадает с конструкцией, принятой в работах [10, 11]. Твердый корпус робота имеет форму прямоугольного параллелепипеда массой  $m_0$ ,  $a^r$  — его боковая сторона (длина),  $b^r$  — передний или задний край (ширина),

$c'$  — высота параллелепипеда. По бокам корпуса симметрично прикреплены шесть одинаковых двухзвенных ног. Точки прикрепления ног с каждой стороны корпуса расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Отдельная нога состоит из двух твердых звеньев: бедра длиной  $l_1$ , массой  $m_1$  и голени длиной  $l_2$ , массой  $m_2$ . Допускается касание роботом поверхности опоры и окружающих предметов только стопами, ноги робота не должны иметь взаимных пересечений во все время движения.

Предполагается, что роботу известны: собственное положение относительно препятствий; несущая способность участков поверхности, выбираемых для опоры; шарнирные углы; скорость перемещения как самого робота, так и объектов, выбираемых для опоры. Программные значения шарнирных углов генерируются алгоритмом управления с учетом информации о конфигурации робота, реализованной при его движении. Реализация программных значений шарнирных углов осуществляется так же, как в работе [10].

Траектории переносов ног формируются в виде плоских шаговых циклов [10], адаптируемых в зависимости от характеристик поверхности препятствий, скорости движения робота, предписанных следовых точек. Движения ног, соответствующие шаговым циклам, сглаживаются, чтобы сохранить непрерывность как самого движения, так и его скорости [10].

Силовой момент в опорных точках не предполагается. Реакции в них удовлетворяют условию малой деформации опорной поверхности и должны принадлежать конусам кулоновского трения с заданным коэффициентом трения [10]. Если требуемая реакция выходит за пределы конуса трения, возникает проскальзывание. Коэффициент кулоновского сухого трения предполагается равным единице. Программное движение создается в виде последовательности событий, в начале каждого из которых в неподвижном репере  $Oe_1e_2e_3$  определяются траектории перемещений стоп и точек крепления ног к корпусу.

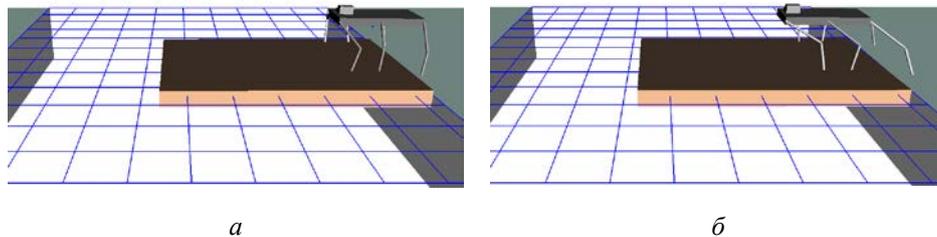
Плот представляет собой прямоугольный параллелепипед, способный свободно перемещаться на поверхности воды. Предполагается, что плот однороден и не зафиксирован относительно берега при переходе на него робота с берега и обратном переходе робота на берег. Взаимодействие плота с берегом предполагается вязкоупругим с существенным преобладанием вязкой компоненты.

**Переправа на другой берег.** Решаемая задача формулируется следующим образом. Робот прямолинейно идет по горизонтальной плоскости. На его пути имеется протяженная водная преграда со спокойной водой, ограниченная двумя берегами, находящимися на одном уровне и перпендикулярными к направлению движения робота. Около ближайшего к роботу берега на воде покоится плот, касаясь

берега своей узкой стороной. Робот должен подойти к берегу, перебраться на плот и, оттолкнувшись от берега с достаточной силой, доплыть на плоту до противоположного берега водной преграды. Затем он должен перебраться на другой берег и продолжить движение. Переправа происходит в соответствии со следующими этапами.

*Этап 1.* Робот приближается к берегу маршевой походкой трешки. Подойдя к берегу, он переходит на походку «галоп».

*Этап 2.* В режиме походки «галоп» робот переходит в конфигурацию, при которой передние и средние ноги находятся на плоту, а положение корпуса обеспечивает достаточный запас статической устойчивости для переноса задних ног, которые пока остаются на берегу (рис. 1, а).



**Рис. 1.** Моделирование этапов 2 и 3 переправы робота на плоту:

а — позиция перед отталкиванием от берега; б — отталкивание от берега задними ногами

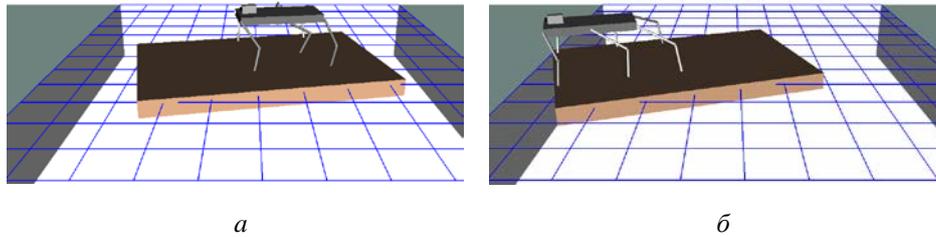
*Этап 3.* Стоя на плоту на передних и средних ногах, робот отталкивается от берега, придавая плоту начальную скорость  $v_0$ , достаточную для достижения другого берега (рис. 1, б). Задние ноги после толчка переносятся на плот.

Скорость  $v_0$  в зависимости от расстояния  $S$  между берегами можно оценить по приближенной формуле

$$v_0 = v_\varepsilon \exp \frac{\kappa_2(S - \sigma)}{m + M_p},$$

где  $v_\varepsilon$  — максимально допустимая малая скорость причаливания плота к другому берегу;  $\kappa_2$  — коэффициент квадратичного по скорости сопротивления воды с учетом формы плота при поступательном движении;  $\sigma$  — длина проекции плота на направление перпендикуляра к берегу;  $m$  — масса робота [12].

*Этап 4.* После толчка плот плывет к противоположному берегу, а робот идет по плоту к краю, которым плот должен причалить после переправы (рис. 2, а).



**Рис. 2.** Моделирование этапов 3 и 4 переправы робота на плоту:  
*a* — переправа на другой берег; *б* — причаливание

Движение плота по воде является возмущенным в связи с ошибками исполнения при маневрах и вследствие возникновения дополнительной нагрузки от веса робота и его перемещений на плоту. В частности, в процессе движения плот может поворачиваться вокруг вертикальной оси из-за того, что центр плота не принадлежал основанию суммарной силы при толчке от берега. Пока плот плышет, робот идет в системе координат, связанной с плотом, чтобы не потерять опору из-за вращения плота.

*Этап 5.* В зависимости от ширины водной преграды плот может приблизиться к берегу, имея некоторый угол поворота вокруг вертикальной оси (рис. 2, *б*). Угол поворота можно оценить заранее по приближенной формуле

$$\varphi = \frac{J}{\kappa_3} \ln \left\{ 1 + \frac{\kappa_3(M_p + m)}{J\kappa_2 h} \left[ \exp \frac{\kappa_2(S - \sigma)}{m + M_p} - 1 \right] \right\}, \quad (6)$$

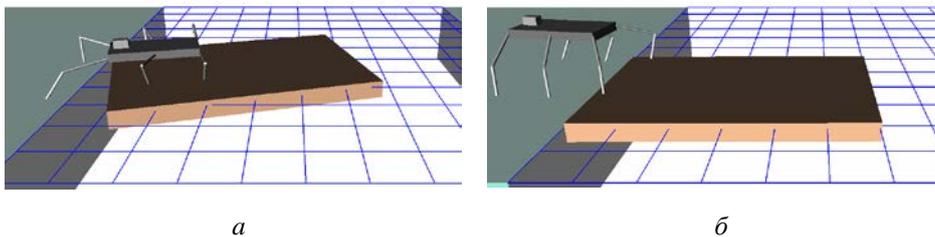
где  $J$  — эффективный момент инерции плота вместе с роботом вокруг вертикальной оси;  $\kappa_3$  — коэффициент сопротивления воды с учетом формы плота при вращении вокруг вертикальной оси [12];  $h$  — расстояние от центра плота до линии действия суммарного импульса сил при отталкивании от берега.

При малом значении отношения  $\kappa_3/J$  формула (6) упрощается:

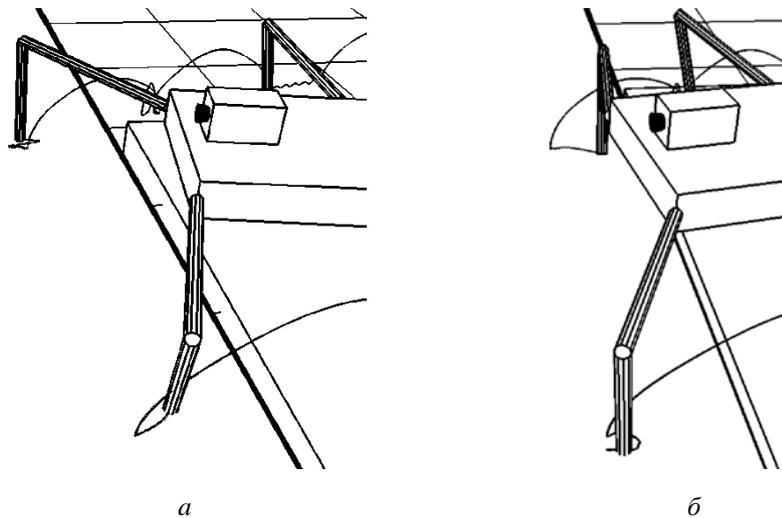
$$\varphi = \frac{M_p + m}{\kappa_2 h} \left[ \exp \frac{\kappa_2(S - \sigma)}{m + M_p} - 1 \right].$$

Если угол поворота плота окажется меньше  $\pi/4$ , то плот причалит к берегу так, что узкая сторона, противоположная той, которой он касался берега в начале движения, составит наименьший угол с другим берегом. Тогда роботу не придется существенно маневрировать на плоту при причаливании. Единственное, что может потребоваться, — это подойти поближе боком к угловой точке плота, которой тот коснется берега.

*Этап 6.* Для обеспечения надежного перехода с плоты на берег необходимо, чтобы вся сторона плоты, у которой стоит робот, касалась берега или, по крайней мере, отстояла от него ненамного. С этой целью робот приседает, тем самым максимально обеспечивая возможность дотягивания до берега, переносит на берег передние ноги и, прижимая их стопы к берегу, подтягивает плот, поворачивая его так, чтобы приблизить к берегу всю соответствующую сторону плоты (рис. 3, *а*). Левая стопа (относительно корпуса по ходу движения) подтягивается к корпусу, оставаясь неподвижной на берегу, а правая нога, как и все остальные ноги, фиксируется относительно корпуса. При этом стопы передних ног из-за значительного горизонтального усилия могут проскальзывать относительно берега, а угловая точка плоты, первоначально бывшая в соприкосновении с берегом, может отойти от берега (рис. 4, *а*). Если этот отход оказался значительным, то подтягивание к берегу следует продолжить.



**Рис. 3.** Моделирование этапов 6 и 7 переправы робота на плоту:  
*а* — подтягивание плоты к берегу; *б* — переход на другой берег



**Рис. 4.** Проскальзывание передних ног при подтягивании плоты к берегу  
левой ногой (*а*), обеими ногами (*б*)

Возможен вариант, когда плот подтягивается к берегу обеими ногами робота (рис. 4, б). Такой вариант предпочтительнее, когда требуется уменьшить нагрузку на ноги. На рис. 4 тонкими линиями показаны абсолютные траектории стоп передних ног робота.

На рис. 4, а видно, что, когда стопы стоят на плоту, имеется их некоторое колебание из-за возмущенного движения плота. Когда стопы стоят на берегу и подтягивание выполняется левой ногой, то след левой стопы является монотонным, а след правой стопы немонотонен, что отражает движение плота относительно берега при подтягивании плота. Для того чтобы уменьшить проскальзывание, усиливается прижатие передних стоп к берегу в зависимости от смещения соответствующей стопы относительно исходной точки ее опоры. Если смещение стопы при проскальзывании оказалось недопустимо большим (теряется контакт с берегом), стопа вновь переносится в исходную точку опоры и подтягивание продолжается. При проскальзывании может возникнуть значительный горизонтальный перекося корпуса робота относительно поверхности плота.

*Этап 7.* Как только соответствующая сторона плота приблизится к берегу, робот поднимает корпус до маршевой высоты и переходит на другой берег, поскольку из-за того, что плот находится в постоянном движении, могут нарушиться условия дотягивания ног до возможных точек опоры на берегу (рис. 3, б).

**Компьютерное моделирование.** Моделирование переправы робота на плоту осуществлялось аналогично тому, как это было сделано в работах [10, 11]. Управление роботом и модель движения плота по воде реализованы в виде DLL-библиотек, подключенных к программному комплексу «Универсальный механизм» [13]. Тем самым создается виртуальная среда обитания робота. Неподвижная опорная поверхность в ней представлена горизонтальной плоскостью с расположенной на ней водной преградой.

Для моделирования подтягивания программное положение стопы устанавливалось ниже уровня берега и ее движение задавалось в горизонтальной плоскости по направлению к корпусу. Скорость этого движения уменьшалась после того, как перекося плота относительно берега становился небольшим.

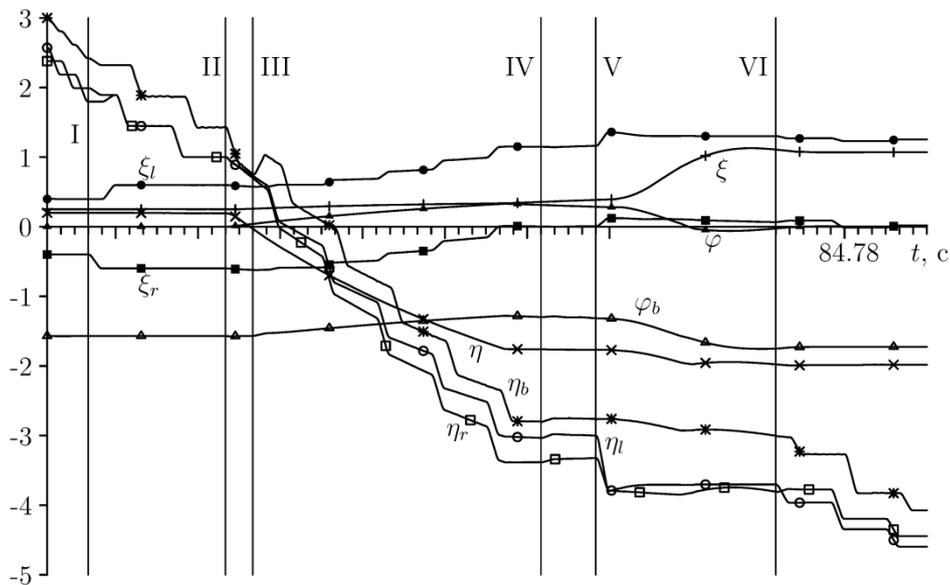
Отдельные объекты, такие как плот и робот, взаимодействуют с опорной поверхностью и между собой согласно модели трения, основанной на вязкоупругом взаимодействии тел в точках контакта. Применяется также модель сопротивления воды движению плота из работы [12]. Управление движением реализуется посредством компьютерного моделирования работы электромеханических приводов шарнирных углов. Требуемое движение робота осуществляется, как и в реальности, лишь путем подачи управляющего электрического напряжения на модели электромеханических приводов. Соотношение

размеров корпуса робота, звеньев ног, размеров плота и ширины водной преграды имеет вид

$$a^r : b^r : c^r : l_1 : l_2 : a : b : d : S = 1,0 : 0,5 : 0,1 : 0,5 : 0,33 : 1,5 : 1,0 : 0,1 : 5,2.$$

Представление о движении робота и других элементов виртуальной среды возникает в результате численного интегрирования дифференциальных уравнений полной трехмерной динамики робота вместе с входящими в систему окружающими предметами. Поскольку в точках контакта объектов предполагается силовое взаимодействие, соответствующая механическая система имеет 30 степеней свободы. Уравнения динамики синтезируются автоматически [13]. Результаты компьютерного моделирования могут отображаться на экране монитора в виде движения геометрических образов исследуемых материальных объектов.

На рис. 5 представлены графики изменения во времени горизонтальных координат  $\xi$ ,  $\eta$  середины плота, причем ось  $\eta$  ориентирована против направления движения робота до переправы; координаты  $\eta_b$  центра корпуса; координат  $\xi_r$ ,  $\eta_r$  передней правой ноги и  $\xi_l$ ,  $\eta_l$  передней левой ноги; угла  $\varphi_b$  вращения корпуса относительно вертикали, отсчитываемого от оси  $\xi$ , и угла  $\varphi$  вращения плота вокруг вертикали, отсчитываемого от оси  $\eta$ . Все координаты приведены в метрах, а углы — в радианах.



**Рис. 5.** Зависимость основных параметров переправы на плоту от времени:  
 $\xi$  — +;  $\xi_l$  — ●;  $\xi_r$  — ■;  $\varphi$  — ▲;  $\varphi_b$  — △;  $\eta$  — ×;  $\eta_b$  — \*;  $\eta_r$  — □;  $\eta_l$  — ○

Прямые, параллельные оси ординат и обозначенные римскими цифрами I–VI, выделяют этапы движения робота. Линия I соответствует окончанию этапа 1 и началу этапа 2, линия II — окончанию этапа 2 и началу этапа 3, на котором робот отталкивается вместе с плотом от берега. Линия III (начало этапа 4) отмечает окончание толчка и начало переправы. Между линиями III и IV заметно вращение плота вместе с роботом. Между линиями IV и V выполняется этап 5, т. е. робот подходит к тому краю плота, который ближе всего к берегу. От линии V до линии VI выполняется этап 6: плот подтягивается к берегу. Наконец, после линии VI робот заканчивает переправу на другой берег.

**Заключение.** Представлено решение новой задачи о преодолении инсектоморфным роботом водной преграды с применением плота. Синтезировано устойчивое движение системы при переходе робота с берега на плот, перемещении робота на плоту к другому берегу, причаливании плота с роботом на борту к берегу, переходе робота на другой берег. Выполнение этих маневров затруднено подвижностью плота на воде, возможностью проскальзывания ног при опоре на берег в момент причаливания плота, опасностью взаимного пересечения ног.

Предложенный алгоритм формирования движения робота при преодолении водной преграды был отработан средствами компьютерного моделирования. Программная среда реализует расчет взаимодействия трехмерной полной динамической модели механической системы, состоящей из робота, плота и водной поверхности, с учетом сил сопротивления воды, сил кулоновского трения и моделей электромеханических приводов в шарнирах робота.

Показано, что рассчитываемое по ходу маневрирования программное движение робота, обеспечивающее требуемое движение системы в целом, реализуемо при коэффициенте трения, не превышающем единицу. В данной работе это значение коэффициента трения считается предельным для трения покоя стопы об опорную поверхность.

Стабилизация движения робота в окрестности его программного движения осуществляется по принципу обратной связи, кусочно-формируемой с дискретностью шага интегрирования. Обратная связь рассчитывается по рассогласованиям реальных и программных шарнирных углов с требованием минимальных значений угловых скоростей. Возникающие в шарнирных углах переходные процессы не разрушают требуемое программное движение корпуса робота на всех этапах движения системы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ: 16-01-00131).*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kumagai M., Ochiai T. Development of a robot balanced on a ball — Application of passive motion to transport. *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2009*. Kobe, Japan, 2009, pp. 4106–4111.

- [2] Труды международных конференций CLAWAR — Climbing and Walking Robots. URL: <http://www.clawar.org/> (дата обращения 07.02.2018).
- [3] Sandoval-Castro X.Ya., Gracia-Murillo M.A., Zavala-De Paz J.P., Castillo-Castaneda E. Hex-Piderix: A Six-Legged Walking Climbing Robot to Perform Inspection Tasks on Vertical Surfaces. *Proc. 16th Int. Conf. CLAWAR-2013. Nature-Inspired Mobile Robotics. Sydney. Australia.* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2013, pp. 399–407.
- [4] Lopes G. Abstractions for Legged Locomotion. *Mobile Service Robotics: Proc. of the 17th Int. Conf. CLAWAR-2014. Poznan. Poland.* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2014, pp. 3–37.
- [5] Al-Homsi A., Frost J., Maehle E. Adaptive Walking on Uphill Sandy Surface Based on Organic Computing and Somatosensory Feedback. *Proc. 18th Int. Conf. CLAWAR-2015. Zhejiang University, Hang Zhou. China.* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 157–166.
- [6] Xu F., Shen J., Wang B. Analysis, Design and Experiments of a Rough Wall Climbing Robot Based on Grabbing Claws. *Proc. 18th Int. Conf. CLAWAR-2015. Zhejiang University, Hang Zhou. China.* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 191–198.
- [7] Panchenko A.V., Orlov I.A., Pavlovsky V.E. Control Algorithm for Walking Robot with Mosaic Body. *Proc. 18th Int. Conf. CLAWAR-2015. Zhejiang University, Hang Zhou. China.* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 265–274.
- [8] Uchida H., Itho H., Numata N. Experimental Examination of Walking Directional Control for a Six-Legged Robot. *Proc. 18th Int. Conf. CLAWAR-2015. Zhejiang University, Hang Zhou. China.* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 381–388.
- [9] Xu P., Song R., Mao S., Rong X., Li Y. Quadruped Robot Mechanism Design and Motion Simulation Based on SolidWorks and Adams. *Proc. 18th Int. Conf. CLAWAR-2015. Zhejiang University, Hang Zhou. China.* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 454–460.
- [10] Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Построение движений инсектоморфного робота, преодолевающего комбинацию препятствий с помощью сил кулоновского трения. *Изв. РАН. ТуСУ*, 2005, № 3, с. 143–155.
- [11] Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Маневрирование инсектоморфного робота на свободно катающихся шарах. *Изв. РАН. ТуСУ*, 2016, № 1, с. 134–146.
- [12] Голубев Ю.Ф. Нестационарная модель сил воздействия воды на плоский прямоугольный плот. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. Москва, 2016, № 53, 40 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-53> DOI: 10.20948/prepr-2016-53 (дата обращения 21.12.2017).
- [13] *Универсальный механизм. Моделирование динамики механических систем.* URL: <http://www.umlab.ru> (дата обращения 10.03.2017).
- [14] Голубев Ю.Ф. Нестационарная модель возмущенной динамики прямоугольного плота на спокойной воде. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. Москва, 2016, № 54, 18 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-54>. DOI: 10.20948/prepr-2016-54 (дата обращения 21.12.2017).

Статья поступила в редакцию 22.12.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Переправа автономного шестиногого робота на плоту через водную преграду. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1748>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Международной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики FAPM-2017», посвященной 170-летию со дня рождения великого русского ученого Николая Егоровича Жуковского, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 октября 2017 г.*

**Голубев Юрий Филиппович** — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий отделом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: теоретическая механика; методы математического моделирования, оценивания и управления механическими и биомеханическими системами; контактное взаимодействие; механика машин и роботов; небесная механика, баллистика; искусственный интеллект; нейронные сети. e-mail: golubev@keldysh.ru

**Корянов Виктор Владимирович** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: теоретическая механика; методы математического моделирования, оценивания и управления механическими и биомеханическими системами; контактное взаимодействие; механика машин и роботов; небесная механика, баллистика; компьютерное моделирование; численные методы; программирование. e-mail: korianov@keldysh.ru

## An autonomous hexapod robot crossing a water obstacle on a raft

© Yu.F. Golubev, V.V. Koryanov

Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, 125047, Russia

*The article presents an algorithm for controlling the motion of a hexapod walking robot. In the simplest case it enables the robot to cross a small body of water on a rectangular raft by means of imparting an initial impulse to the raft. We chose the obstacle to be so wide so that the robot would not be able to step over it, but pushing away from land should be enough to sail a raft over it. We ran simulations in the Universal Mechanism software package to test the algorithm proposed. This package synthesises the equations of motion for a mechanical system automatically. We provide a concise description of the mathematical model used to simulate the water affecting the raft in the case of transient motion. We present computation results that validate algorithm efficiency when the motion data available is sufficient for control purposes.*

**Keywords:** raft, buoyancy, hydrodynamic drag, viscous friction, hexapod robot, crossing, water obstacle

### REFERENCES

- [1] Kumagai M., Ochiai T. Development of a robot balanced on a ball — Application of passive motion to transport. *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2009*. Japan, Kobe, 2009, pp. 4106–4111.
- [2] *Proc. of CLAWAR — Climbing and Walking Robots international events*. Available at: <http://www.clawar.org/> (accessed February 07, 2018).
- [3] Sandoval-Castro X.Ya., Gracia-Murillo M.A., Zavala-De Paz J.P., Castillo-Castaneda E. Hex-Piderix: A Six-Legged Walking Climbing Robot to Perform Inspection Tasks on Vertical Surfaces. *Proc. 16th Int. Conf. CLAWAR-2013. Nature-Inspired Mobile Robotics. Sydney. Australia*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2013, pp. 399–407.
- [4] Lopes G. Abstractions for Legged Locomotion. *Mobile Service Robotics: Proc. of the 17th Int. Conf. CLAWAR-2014. Poznan. Poland*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2014, pp. 3–37.
- [5] Al-Homsy A., Frost J., Maehle E. Adaptive Walking on Uphill Sandy Surface Based on Organic Computing and Somatosensory Feedback. *Proc. 18th Int. Conf. CLAWAR-2015. Zhejiang University, Hang Zhou. China*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 157–166.
- [6] Xu F., Shen J., Wang B. Analysis, Design and Experiments of a Rough Wall Climbing Robot Based on Grabbing Claws. *Proc. 18th Int. Conf. CLAWAR-2015. Zhejiang University, Hang Zhou. China*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 191–198.
- [7] Panchenko A.V., Orlov I.A., Pavlovsky V.E. Control Algorithm for Walking Robot with Mosaic Body. *Proc. 18th Int. Conf. CLAWAR-2015. Zhejiang University, Hang Zhou. China*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 265–274.
- [8] Uchida H., Itho H., Numata N. Experimental Examination of Walking Directional Control for a Six-Legged Robot. *Proc. 18th Int. Conf. CLAWAR-2015. Zhejiang University, Hang Zhou. China*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 381–388.

- [9] Xu P., Song R., Mao S., Rong X., Li Y. Quadruped Robot Mechanism Design and Motion Simulation Based on SolidWorks and Adams. *Proc. 18th Int. Conf. CLAWAR-2015. Zhejiang University, Hang Zhou. China.* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 454–460.
- [10] Golubev Yu.F., Koryanov V.V. *Izvestiya Akademii Nauk, Teoriya i Sistemy Upravleniya — Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2005, no. 3, pp. 143–155.
- [11] Golubev Yu.F., Koryanov V.V. *Izvestiya Akademii Nauk, Teoriya i Sistemy Upravleniya — Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2016, no. 1, pp. 134–146.
- [12] Golubev Yu.F. Nestatsionarnaya model sil vozdeystviya vody na ploskiy pryamougolnyy plot [Non-steady-state model of the forces arising in water affecting a flat rectangular raft]. *Preprinty IPM RAN [Keldysh Institute Preprints]*. Moscow, 2016, no. 53, 40 p. Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-53>. DOI: 10.20948/prepr-2016-53 (accessed December 21, 2017).
- [13] *Universalnyy mekhanizm. Modelirovanie dinamiki mekhanicheskikh sistem [Universal mechanism. Simulating dynamics in mechanical systems]*. Available at: <http://www.umlub.ru> (accessed March 10, 2017).
- [14] Golubev Yu.F. Nestatsionarnaya model vozmushchennoy dinamiki pryamougolnogo plota na spokojnoy vode [Non-steady-state model of turbulent dynamics of a rectangular raft on calm water]. *Preprinty IPM RAN [Keldysh Institute Preprints]*. Moscow, 2016, no. 54, 18 p. Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-54>. DOI: 10.20948/prepr-2016-54 (accessed December 21, 2017).

**Golubev Yu.F.**, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of Department, Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences). Specialises in theoretical mechanics; methods of mathematical modeling, estimation and control of mechanical and biomechanical systems; contact problems; mechanics of machines and robots; celestial mechanics, ballistics; artificial intelligence; neural networks.  
e-mail: [golubev@keldysh.ru](mailto:golubev@keldysh.ru)

**Koryanov V.V.**, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences). Specialises in theoretical mechanics; methods of mathematical modeling, estimation and control of mechanical and biomechanical systems; contact problems; mechanics of machines and robots; celestial mechanics, ballistics; computer simulation; numerical methods; programming.  
e-mail: [korianov@keldysh.ru](mailto:korianov@keldysh.ru)