



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 15 за 2017 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.

Преодоление шестиногим роботом неширокой водной преграды на плоту

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Преодоление шестиногим роботом неширокой водной преграды на плоту // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 15. 16 с. doi:[10.20948/prepr-2017-15](https://doi.org/10.20948/prepr-2017-15)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-15>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук

Ю.Ф. Голубев, В.В. Корянов

Преодоление шестиногим роботом
неширокой водной преграды на плоту

Москва – 2017

УДК 531.38

Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Преодоление шестиногим роботом неширокой водной преграды на плоту

Дано сокращенное описание математической модели воздействия воды на прямоугольный плот при нестационарном движении. Построено движение робота, позволяющее осуществить его переправу на другой берег водной преграды в простейшем случае, когда робот сообщает плоту начальный толчок от берега. Предложенный алгоритм отработан средствами компьютерного моделирования. 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.

Yury Filippovich Golubev, Victor Vladimirovich Koryanov. Six-legged robot overcoming a not wide water obstacle by a raft

The short description is given of the mathematical model of the influence of water for a rectangular raft during its unsteady motion. Motion of the robot is formed with the aim of crossing from one side onto the other side of the water obstacle in the simplest case, when the robot initially pushes the raft from the shore. The proposed algorithm was worked out by means of computer simulation. The results of calculations showing the performance of the algorithm in the presence of a sufficient locomotion information are presented.

Key words: raft, buoyancy force, water resistance, viscous forces, six-legged robot, crossing, water obstacle.

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

Содержание

Введение	3
1. Уравнения движения плота на воде	4
2. Механическая система	7
3. Переправа инсектоморфного робота на плоту	8
4. Компьютерное моделирование	12
Список литературы	15

Введение

Автономный мобильный робот для передвижения по заранее неподготовленной пересеченной местности может активно использовать местные предметы как средство для выполнения поставленных перед ним задач [1–3]. Для компьютерного исследования соответствующих алгоритмов управления необходимо иметь математические модели силового взаимодействия робота с элементами среды, а также и элементов среды между собой, если эти элементы могут совершать самостоятельное движение. Например, в работах [4, 5] при моделировании движения робота на свободно катающихся шарах использовались модель сухого трения при взаимодействии стоп ног робота с шарами и модель трения качения шаров по плоскости.

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 какого-нибудь плавучего предмета подходящего размера и обладающего определенной устойчивостью на водной поверхности. Одним из таких естественных предметов может служить прямоугольный плот, имеющий достаточную горизонтальную поверхность. В данной работе используется математическая модель сил сопротивления воды движению плота, представленная в [6], которая основывается на гипотезе о “струйном” характере воздействия воды на отдельные элементы плота. Другими словами, поверхность плота разбивается на небольшие элементы и предполагается, что на каждый такой элемент набегает струя воды со скоростью, обратной скорости этого элемента, забирает от него соответствующую часть количества движения, а также воздействует на него силой вязкого трения. Эта гипотеза не противоречит повсеместно эксплуатируемой модели сопротивления воды для поступательного движения, но позволяет учесть также произвольное нестационарное движение плота относительно его центра масс.

Предлагаемый препринт развивает результаты работ [1, 3, 7] для возможности преодоления усложненной полосы препятствий. Влияние сил сопротивления воды [8] на динамику системы в процессе управления хорошо проявляется на примере следующей локомоционной 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, с достаточной силой оттолкнувшись от берега, 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 в силу разных причин не на осевой линии плота, то при движении робота по плоту и особенно при отталкивании от берега возникает закрутка плота вокруг вертикальной оси, что осложняет задачу управления. В статье представлен конструктивно построенный алгоритм решения сформулированной задачи. Этот алгоритм был отработан на программном комплексе "Универсальный механизм" [9] с учетом полной динамики системы в целом. Представленные результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о принципиальной реализуемости предложенного алгоритма решения поставленной задачи.

1. Уравнения движения плота на воде

Как и в работе [8], 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 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 [10]

$$\begin{aligned} M_p \ddot{\mathbf{r}}_c &= \gamma(\zeta + d)4abe_3 + \mathbf{F} + \mathbf{R}, \\ A\dot{p} + (C - B)qr &= -a_{32}s_1 + M_x + N_x, \\ B\dot{q} + (A - C)pr &= a_{31}s_2 + M_y + N_y, \\ C\dot{r} + (B - A)pq &= -\gamma \frac{4a_{31}a_{32}ab}{3a_{33}}(a^2 - b^2) + M_z + N_z, \\ \dot{a}_{31} &= a_{33}q - a_{32}r, \\ \dot{a}_{32} &= a_{31}r - a_{33}p, \\ \dot{a}_{33} &= a_{32}p - a_{31}q, \end{aligned} \tag{1.1}$$

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 $O \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_3$, p , q , r — проекции вектора угловой скорости плота на оси

репера $C_p \mathbf{e}'_1 \mathbf{e}'_2 \mathbf{e}'_3$, величины

$$\begin{aligned} s_1 &= \gamma ab \left\{ \frac{2}{3} \left[\left(2 + \frac{a_{32}^2}{a_{33}^2} \right) b^2 + \frac{a_{31}^2}{a_{33}^2} a^2 \right] + \frac{1}{2} (\zeta^2 - d^2) \right\}, \\ s_2 &= \gamma ab \left\{ \frac{2}{3} \left[\left(2 + \frac{a_{31}^2}{a_{33}^2} \right) a^2 + \frac{a_{32}^2}{a_{33}^2} b^2 \right] + \frac{1}{2} (\zeta^2 - d^2) \right\} \end{aligned} \quad (1.2)$$

выражают действие момента архимедовых сил на плот, \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. В общем случае, чтобы замкнуть систему (1.1), к ней следует добавить еще шесть кинематических уравнений вида

$$\begin{aligned} \dot{a}_{11} &= a_{13}q - a_{12}r, & \dot{a}_{21} &= a_{23}q - a_{22}r, \\ \dot{a}_{12} &= a_{11}r - a_{13}p, & \dot{a}_{22} &= a_{21}r - a_{23}p, \\ \dot{a}_{13} &= a_{12}p - a_{11}q, & \dot{a}_{23} &= a_{22}p - a_{21}q \end{aligned} \quad (1.3)$$

или использовать соотношения [6]

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left(1 - \frac{a_{31}^2}{1 + a_{33}} \right), & a_{12} &= -\frac{a_{31}a_{32}}{1 + a_{33}}, & a_{13} &= -a_{31}, \\ a_{21} &= -\frac{a_{31}a_{32}}{1 + a_{33}}, & a_{22} &= \left(1 - \frac{a_{32}^2}{1 + a_{33}} \right), & a_{23} &= -a_{32}, \\ a_{31}, & & a_{32}, & & a_{33}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

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 [6], что удельная сила сопротивления воды \mathbf{R}_{sp} , действующая на каждый элемент погруженной в воду части плота, выражается формулой

$$\mathbf{R}_{sp} = -\varkappa \mathbf{v}_\tau - \varkappa_1 \boldsymbol{\nu} |v_\nu| v_\nu = -\varkappa \mathbf{v} - \boldsymbol{\nu} (\varkappa_1 |v_\nu| - \varkappa) v_\nu, \quad (1.5)$$

где \mathbf{v} – скорость характерной точки этого элемента относительно воды, $\boldsymbol{\nu}$ – единичный вектор внешней нормали к поверхности плота, \mathbf{v}_τ – составляющая скорости, касательная к элементу плота, $v_\nu = \boldsymbol{\nu} \cdot \mathbf{v}$ – составляющая скорости, перпендикулярная к элементу, $\varkappa \geq 0$ и $\varkappa_1 \geq 0$ – соответствующие коэффициенты пропорциональности, причем по имеющимся экспериментальным данным для воды $\varkappa_1 \gg \varkappa$. Коэффициенты \varkappa и \varkappa_1 считаются одинаковыми для всех элементов плота.

Формула (1.5) дает приближенное, но качественно верное представление о силах сопротивления воды при движении элементарной плоской площадки плота. Из нее, в частности, следует, что для значений $0 < |v_\nu| < \varkappa/\varkappa_1$ множитель при $\boldsymbol{\nu}$ в ней будет пренебрежимо мал.

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.

Для элементов днища плота получим

$$\mathbf{R}_{sp} = -\varkappa \mathbf{v} + \mathbf{e}'_3 (\varkappa_1 |v_z| - \varkappa) v_z, \quad (1.6)$$

т.к. для них $\boldsymbol{\nu} = -\mathbf{e}'_3$ и $v_z = \mathbf{e}'_3 \cdot \mathbf{v}$. При этом характерная точка элементов днища плота имеет радиус-вектор $\boldsymbol{\rho}_d = (x, y, -d)$.

Для боковых поверхностей плота, идущих вдоль вектора \mathbf{e}'_1 , получим

$$\boldsymbol{\nu} = \begin{cases} \mathbf{e}'_2 & \text{при } v_y \geq 0, \\ -\mathbf{e}'_2 & \text{при } v_y < 0. \end{cases} \quad (1.7)$$

Тогда элементарная сила сопротивления воды выражается формулой

$$\mathbf{R}_{sp} = -\varkappa_1 \mathbf{e}'_2 |v_y| v_y, \quad (1.8)$$

а радиус-векторы $\boldsymbol{\rho}_a$ соответствующих точек боковой поверхности имеют координаты

$$\boldsymbol{\rho}_a = \begin{cases} (x, b, z) & \text{при } v_y \geq 0, \\ (x, -b, z) & \text{при } v_y < 0. \end{cases} \quad (1.9)$$

В формуле (1.8) принято, что при воздействии сил сопротивления воды на боковую поверхность плота членом $\varkappa \mathbf{v}_\tau$ формулы (1.5) можно пренебречь ввиду малости погруженных в воду частей боковых поверхностей.

Аналогично для боковых поверхностей плота, идущих вдоль вектора \mathbf{e}'_2 , получим

$$\boldsymbol{\nu} = \begin{cases} \mathbf{e}'_1 & \text{при } v_x \geq 0, \\ -\mathbf{e}'_1 & \text{при } v_x < 0, \end{cases} \quad (1.10)$$

а элементарная сила сопротивления воды выражается формулой

$$\mathbf{R}_{sp} = -\varkappa_1 \mathbf{e}'_1 |v_x| v_x. \quad (1.11)$$

Радиус-векторы $\boldsymbol{\rho}_b$ соответствующих точек боковой поверхности имеют вид

$$\boldsymbol{\rho}_b = \begin{cases} (a, y, z) & \text{при } v_y \geq 0, \\ (-a, y, z) & \text{при } v_y < 0. \end{cases} \quad (1.12)$$

Конечные формулы для расчета суммарных силы \mathbf{R} и момента \mathbf{N} , действующих на плот со стороны воды, получаются путем интегрирования элементарных сил и их моментов по поверхности плота, погруженной в воду. Эти формулы содержатся в работе [6], и по причине их громоздкости здесь не приводятся.

В работе [8] 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 противоположном случае движение будет неустойчивым.

2. Механическая система

Конструкция робота совпадает с принятой в [7]. Твердый корпус робота имеет форму прямоугольного параллелепипеда массы m_0 , a^r — его боковая сторона (длина), b^r — передний или задний край (ширина), c^r — высота параллелепипеда. По бокам корпуса симметрично прикреплены шесть одинаковых инсектоморфных ног. Точки прикрепления ног с каждой стороны корпуса расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Отдельная нога состоит из двух твердых звеньев: бедра длины l_1 , массы m_1 и голени длины l_2 , массы 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, скорости перемещения как самого робота, так и объектов, выбираемых для опоры. Программные значения шарнирных углов генерируются алгоритмом управления с учетом информации о реализовавшейся конфигурации робота при его движении. Реализация программных значений шарнирных углов осуществляется так же, как в [5].

Траектории переносов ног формируются в виде плоских шаговых циклов [11], адаптируемых в зависимости от поверхностей препятствий, скорости движения робота, предписанных следовых точек. Движения ног, соответствующие шаговому циклам, сглаживаются, чтобы сохранить непрерывность как самого движения, так и его скорости [7].

Наличия силового момента в опорных точках не предполагается. Реакции

в них должны удовлетворять условию малой деформации опорной поверхности и должны принадлежать конусам кулоновского трения с заданным коэффициентом [7]. Если требуемая реакция выходит за пределы конуса трения, то возникает проскальзывание. Коэффициент трения предполагается равным единице. Программное движение создается в виде последовательности событий, в начале каждого из которых в неподвижном репере $O\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2\mathbf{e}_3$ определяются траектории перемещений стоп и точек их крепления к корпусу.

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

3. Переправа инсектоморфного робота на плоту

Решаемая задача формулируется следующим образом. Робот прямолинейно идет по горизонтальной плоскости. На его пути имеется водная преграда со спокойной водой, ограниченная двумя берегами, находящимися в 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 3.1. Робот приближается к берегу маршевой походкой трешки. Подойдя к берегу, он переходит на походку галоп.

Этап 3.2. В режиме походки галоп робот переходит в конфигурацию, при которой передние и средние ноги находятся на плоту с положением корпуса, обеспечивающим достаточный запас статической устойчивости для переноса задних ног, которые пока остаются на берегу (рис.3.1,a).

Этап 3.3. Стоя на плоту на передних и средних ногах, робот отталкивается от берега, придавая плоту вместе с роботом начальную скорость v_0 , достаточную для достижения другого берега (рис.3.1,b). Задние ноги после толчка переносятся на плот. Скорость v_0 в зависимости от расстояния S между берегами можно оценить по приближенной формуле

$$v_0 = v_\epsilon \exp \left[\frac{\alpha_2(S - \sigma)}{m + M} \right],$$

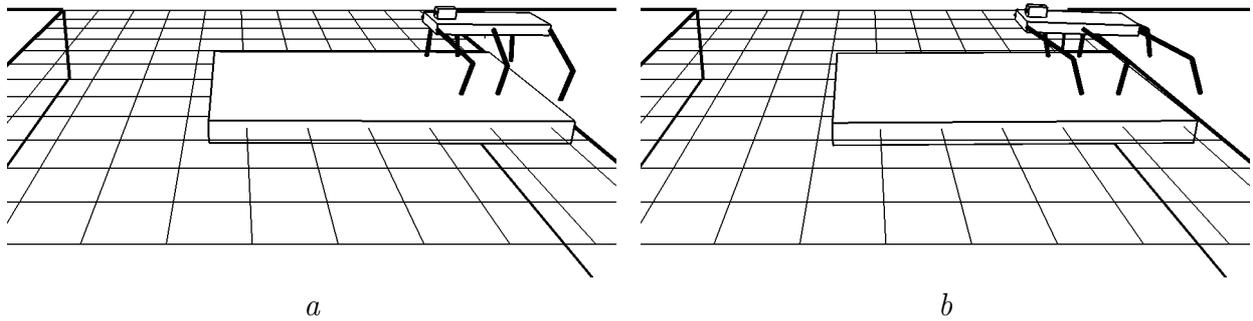


Рис. 3.1: а) Позиция перед отталкиванием от берега, б) отталкивание от берега задними ногами

где v_ϵ — максимально допустимая малая скорость причаливания плота к другому берегу, σ — длина плота в направлении на другой берег, M — масса плота, m — масса робота, α_2 — коэффициент квадратичного по скорости сопротивления воды с учетом формы плота при поступательном движении [6].

Этап 3.4. После толчка плот плышет к противоположному берегу, а робот идет по плоту к краю, которым плот должен причалить после переправы (рис.3.2,а).

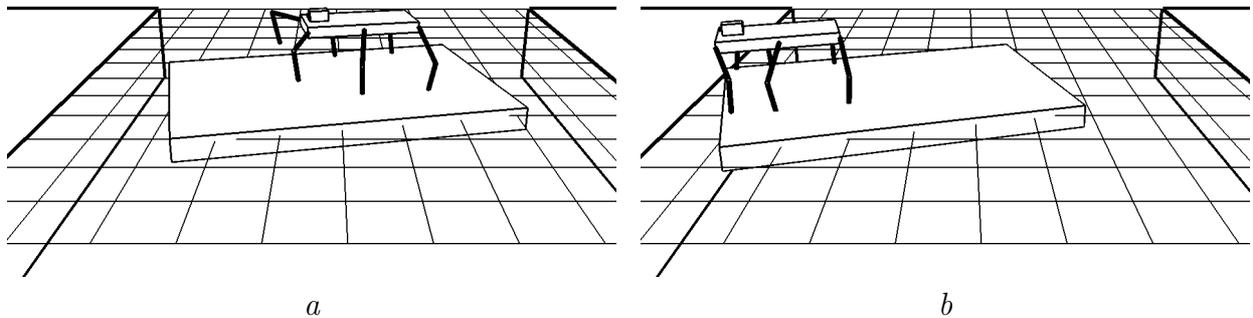


Рис. 3.2: а) Переправа на другой берег, б) причаливание

Движение плота на воде является возмущенным в связи с ошибками исполнения при маневрах и из-за появления дополнительной нагрузки в виде робота и его перемещений на плоту. Взаимодействие плота с роботом при моделировании осуществляется лишь силами, возникающими при контакте стоп ног робота с поверхностью плота. 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 плывет, робот идет в системе координат, связанной с плотом, чтобы не потерять опору из-за вращения плота.

Этап 3.5. В зависимости от ширины водной преграды плот может приблизиться к берегу, имея некоторый угол поворота вокруг вертикальной оси (рис.3.2,b). Величину угла поворота можно оценить по приближенной формуле

$$\varphi = \frac{J}{\alpha_3} \ln \left\{ 1 + \frac{\alpha_3(M+m)}{J\alpha_2 h} \left[\exp \left(\frac{\alpha_2(S-\sigma)}{m+M} \right) - 1 \right] \right\}, \quad (3.1)$$

где J – эффективный момент инерции плота вместе с роботом вокруг вертикальной оси, α_3 – коэффициент сопротивления воды с учетом формы плота при вращении вокруг вертикальной оси [6], h – расстояние от центра плота до линии действия суммарного импульса сил при отталкивании от берега. При малой величине отношения α_3/J формула (3.1) упрощается:

$$\varphi = \frac{(M+m)}{\alpha_2 h} \left[\exp \left(\frac{\alpha_2(S-\sigma)}{m+M} \right) - 1 \right].$$

Робот должен сориентировать свою конфигурацию так, чтобы его передняя часть была напротив той стороны плота, которая составляет наименьший угол с берегом при причаливании. В частности, если угол поворота плота оказывается меньше, чем $\pi/4$, 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 маневрировать на плоту при причаливании. Единственное, что может потребоваться – это подойти поближе боком к угловой точке плота, которая коснется берега.

Этап 3.6. Для того чтобы обеспечить надежный переход с плота на берег, необходимо добиться того, чтобы вся сторона плота, напротив которой стоит робот, касалась берега или, по крайней мере, отстояла от него ненамного. С этой целью робот приседает, чтобы максимально обеспечить 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 плота (рис.3.3,a). Левая стопа (относительно корпуса по ходу движения) подтягивается к корпусу, оставаясь неподвижной на берегу, а правая нога, как и все остальные ноги, зафиксирована относительно корпуса. При этом стопы передних ног из-за значительного горизонтального усилия могут проскальзывать относительно берега, а угловая точка плота, первоначально бывшая в соприкосновении с берегом, может отойти от берега (рис.3.4). Если этот отход оказался значительным, то подтягивание к берегу следует продолжить. На рис.3.4 тонкими линиями показаны абсолютные траектории стоп передних ног.

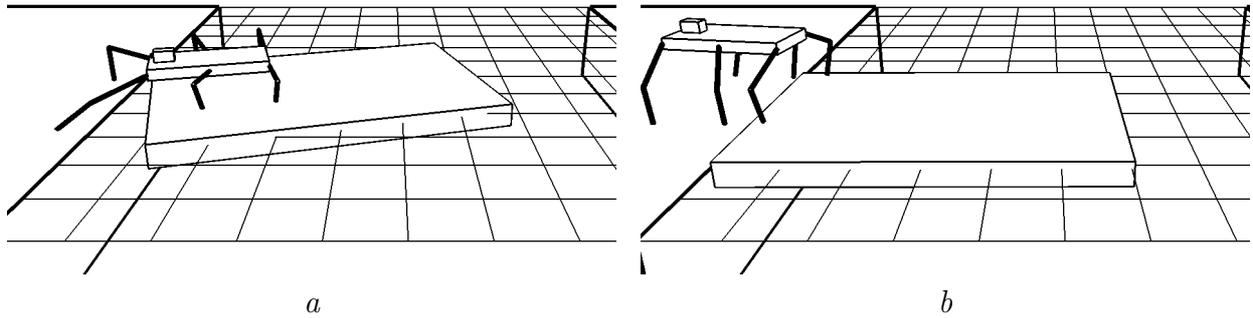


Рис. 3.3: а) Подтягивание пловца к берегу, б) переход на другой берег

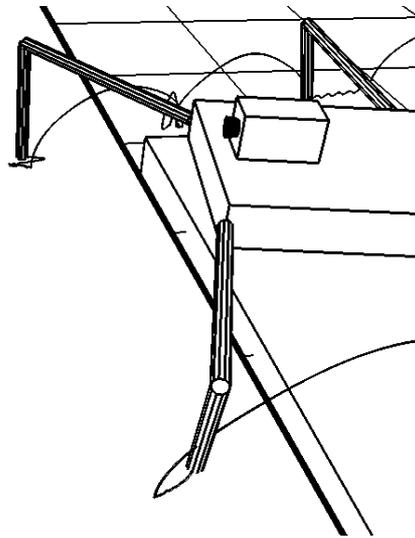


Рис. 3.4: Проскальзывание передних ног при подтягивании пловца к берегу

Видно, что, когда стопы стоят на пловце, имеется их некоторое колебание из-за возмущенного движения пловца. Когда стопы стоят на берегу, то след левой стопы является монотонным, а след правой стопы не монотонен, что отражает движение пловца относительно берега при подтягивании пловца. Чтобы уменьшить проскальзывание, прижатие передних стоп к берегу усиливается в зависимости от смещения соответствующей стопы от исходной точки ее опоры. Если смещение стопы при проскальзывании оказалось недопустимо большим (теряется контакт с берегом), то стопа вновь переносится в исходную точку опоры, и подтягивание продолжается. Возможен вариант, когда пловец подтягивается к берегу обеими ногами. Такой вариант предпочтительнее, когда требуется уменьшить нагрузку на ноги. При проскальзывании может возникнуть значительный горизонтальный перекося корпуса робота относительно поверхности пловца.

Этап 3.7. Как только соответствующая сторона пловца приблизится к бе-

регу на достаточно малое расстояние, робот незамедлительно, несмотря на возможный перекося корпуса относительно плота, поднимает корпус до маршевой высоты и осуществляет переход на другой берег, т.к. плот находится в постоянном движении и из-за этого могут нарушиться условия дотягивания ног до возможных точек опоры на берегу (рис.3.3,b).

4. Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование осуществлялось аналогично тому, как это было сделано в [1, 5]. Управление роботом и модель движения плота на воде реализованы в виде DLL-библиотек, подключенных к программному комплексу “Универсальный механизм” [9]. Тем самым создается виртуальная среда обитания робота. Неподвижная опорная поверхность в ней представлена горизонтальной плоскостью с расположенной на ней водной преградой. Отдельные объекты, такие плот и робот, взаимодействуют с опорной поверхностью и друг с другом согласно модели трения, основанной на вязкоупругом взаимодействии тел в точках контакта. Применяется также модель сопротивления воды движению плота из работы [6]. Управление движением реализуется посредством компьютерного моделирования работы электромеханических приводов шарнирных углов. Выполнение требуемого движения робота осуществляется, как и в реальности, лишь путем подачи значения управляющего электрического напряжения на модели электромеханических приводов. Соотношение размеров корпуса, звеньев ног, размеров плота и ширины водной преграды имеет вид

$$a^r : b^r : c^r : l_1 : l_2 : a : b : d : S = 1 : 0.5 : 0.1 : 0.5 : 0.33 : 1.5 : 1 : 0.1 : 5.2.$$

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 [9]. Результаты компьютерного моделирования отображаются на экране монитора в виде движения геометрических образов исследуемых материальных объектов.

На рис. 4.1 представлены графики изменения по времени горизонтальных координат ξ , η середины плота, причем ось η ориентирована против направления движения робота до переправы, координат центра корпуса η_b , координат

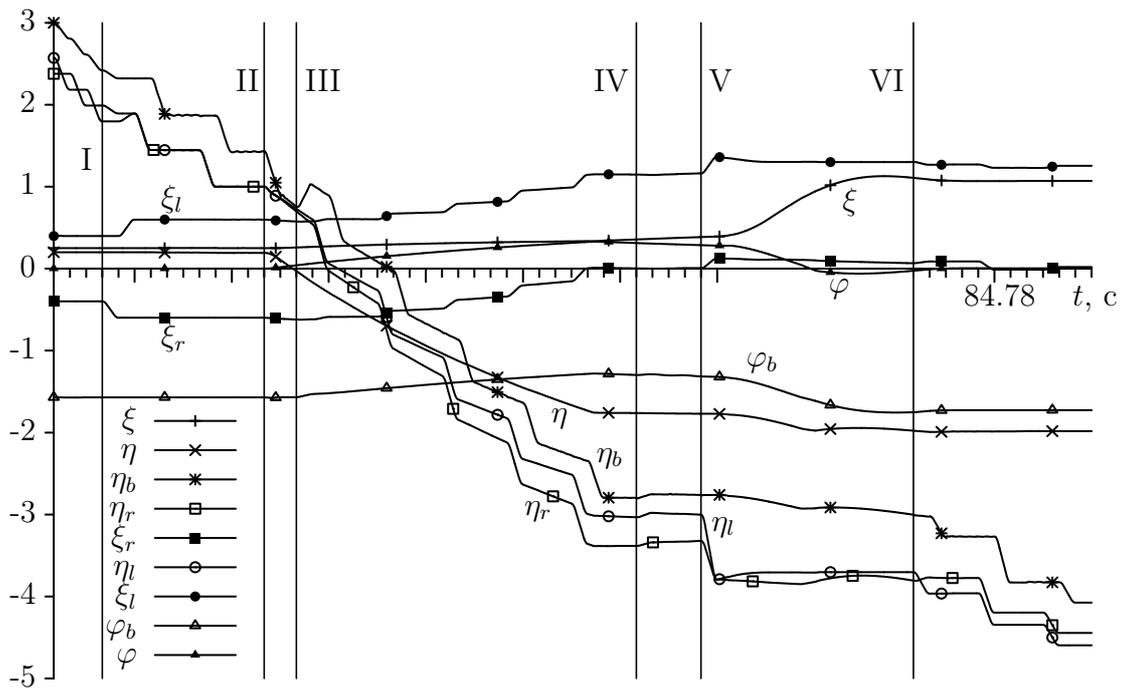


Рис. 4.1: Переправа на плоту, зависимость основных параметров от времени

ξ_r , η_r передней правой ноги, координат ξ_l , η_l передней левой ноги, угла φ_b вращения корпуса относительно вертикали, отсчитываемого от оси ξ и угла φ вращения плота вокруг вертикали, отсчитываемого от оси η . Все координаты приведены в метрах, а углы — в радианах.

Прямые, параллельные оси ординат и обозначенные римскими цифрами, выделяют этапы и стадии движения робота.

Линия I соответствует окончанию этапа 6.1 и началу этапа 6.2. Линия II соответствует окончанию этапа 6.2 и началу этапа 6.3, на котором робот отталкивается вместе с плотом от берега. Линия III (начало этапа 6.4) отмечает окончание толчка и начало переправы. Между линиями III и IV заметно вращение плота вместе с роботом. Между линиями IV и V выполняется этап 6.5, т.е. робот подходит к тому краю плота, который ближе всего к берегу. От линии V до линии VI выполняется этап 6.6, на котором плот подтягивается к берегу. Наконец, после линии VI робот заканчивает переправу на другой берег.

На рис. 4.2 приведен фрагмент компьютерной 3D анимации полученного решения в реальном масштабе времени. По нему можно наглядно и детально представить себе, как происходит переправа шестиногого автономного робота с одного на другой берег неширокой, но протяженной водной преграды.

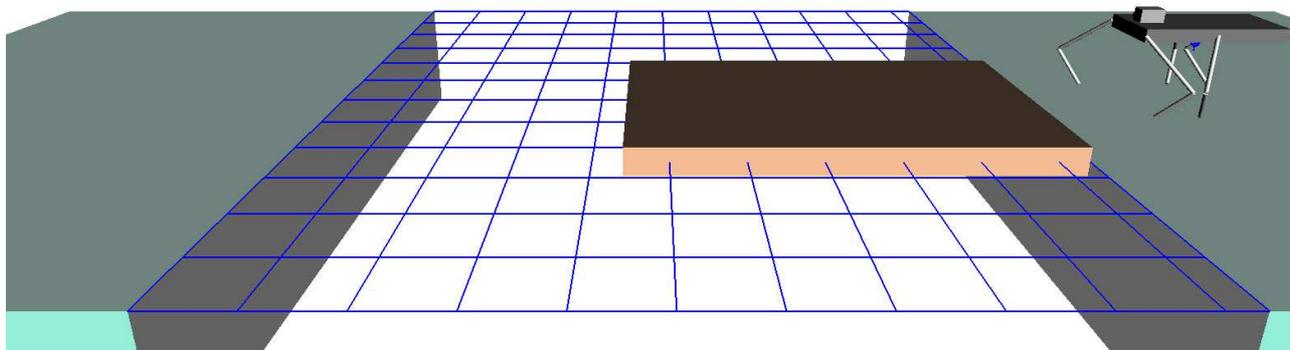


Рис. 4.2: Анимация движения. В случае сложностей с проигрыванием ролик можно скачать отдельно по адресу <http://keldysh.ru/attachment/2017-korianov/hexa2017.mp4> (5.47 Мб)

Заключение

Представлена и реализована в программном комплексе "Универсальный механизм" [9] математическая модель нестационарной пространственной динамики плота под действием активных сил, архимедовой силы и сил сопротивления воды движению [6, 8]. В разных точках плота его скорость относительно воды может быть различной не только по величине, но и по направлению. При этом сила сопротивления воды имеет слагаемое, пропорциональное квадрату величины скорости и направленное противоположно вектору скорости. Вычисление правых частей этой модели осложнено из-за наличия углов и ребер на поверхности плота.

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 при причаливании плота, опасностью взаимного пересечения ног.

Предложенные алгоритмы формирования движения робота при преодолении водной преграды были отработаны средствами компьютерного моделирования в программной среде, реализующей расчет взаимодействия трехмерной полной динамической модели механической системы, состоящей из робота, плота и водной поверхности с учетом сил сопротивления воды, сил кулонов-

ского трения, моделей электромеханических приводов в шарнирах робота.

Показано, что рассчитываемое по ходу маневрирования программное движение, обеспечивающее требуемое движение системы в целом, реализуемо при коэффициенте трения, не превышающем 1. В данной работе это значение коэффициента трения считается предельным для трения покоя стопы об опорную поверхность.

Стабилизация движения робота в окрестности программного движения построена по принципу кусочно-формируемой с дискретностью шага интегрирования обратной связи. 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.

Список литературы

1. *Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.* Управление инсектоморфным роботом при движении по вертикальному углу и по горизонтальному брусу // Изв. РАН. ТИСУ. 2006. № 1. С. 149-157; *Golubev Yu.F., Koryanov V.V.* A Control for an Insectomorphic Robot in Motion along a Vertical Corner and a Horizontal Beam. Pleiades Publishing, Ltd., Journal of Computer and System Sciences International. 2006. Vol. 45, No. 1. Pp. 144-152.
2. *Golubev Yu.F., Koryanov V.V.* Motion design for an insectomorphic robot on unstable obstacles // Proc. 11-th Intern. Conf. CLAWAR-2008. Coimbra, Portugal: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008. P. 654-661.
3. *Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.* Управление инсектоморфным роботом при залезании на вершину вертикального угла и при движении по приставной лестнице // Изв. РАН. ТИСУ. 2008. № 1. С. 148-157; *Golubev Yu.F., Koryanov V.V.* A Control for an Insectomorphic Robot in Climbing to the Top of a Vertical Corner and in Moving on a Step Ladder. Pleiades Publishing, Ltd., Journal of Computer and System Sciences International. 2008. Vol. 47, No. 1. Pp. 139-148.
4. *Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.* Движение инсектоморфного робота с использованием незакрепленных шаров // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. № 50. 24с.
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-50>

5. *Голубев Ю. Ф., Корянов В. В.* Маневрирование инсектоморфного робота на свободно катающихся шарах. Изв. РАН. ТиСУ. 2016. №1. С. 134-146. Golubev Yu. F., Koryanov V. V. Insectomorphic Robot Maneuvering on Freely Rolling Balls. Pleiades Publishing, Ltd., Journal of Computer and Systems Sciences International. 2016. Vol. 55, No. 1. Pp. 125-137.
6. *Голубев Ю.Ф.* Нестационарная модель сил воздействия воды на плоский прямоугольный плот//Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 53. 40с. doi:10.20948/prepr-2016-53
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-53>
7. *Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.* Построение движений инсектоморфного робота, преодолевающего комбинацию препятствий с помощью сил кулоновского трения // Изв. РАН. ТиСУ. 2005. № 3. С. 143-155; *Golubev Yu.F., Koryanov V.V.* Construction of Motions of an Insectomorphic Robot that Overcomes a Combination of Obstacles with the Help of Coulomb Friction Forces. Pleiades Publishing, Ltd., Journal of Computer and System Sciences International. 2005. Vol. 44, No. 3. Pp. 460-472.
8. *Голубев Ю.Ф.* Нестационарная модель возмущенной динамики прямоугольного плота на спокойной воде//Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 54. 18с. doi:10.20948/prepr-2016-54
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-54>
9. Универсальный механизм. Моделирование динамики механических систем. URL: <http://www.umlabor.ru> (дата обращения: 10.03.2017).
10. *Голубев Ю.Ф.* Основы теоретической механики: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2000. 719 с.
11. *Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф.* Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1984. 312 с.