



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

Препринты ИПМ • Препринт № 68 за 2018 г.



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

Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.

Переправа шестиногого
робота на плоту вместе с
грузом

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Переправа шестиногого робота на плоту вместе с грузом // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 68. 17 с. doi:[10.20948/prepr-2018-68](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-68)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-68>

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

Ю.Ф. Голубев, В.В. Корянов

Переправа шестиногого робота на плоту
вместе с грузом

Москва – 2018

УДК 531.38

Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Переправа шестиногого робота на плоту вместе с грузом

Построено движение робота, позволяющее осуществить его переправу вместе с грузом на другой берег водной преграды в простейшем случае, когда робот сообщает плоту начальный толчок от берега. Предложенный алгоритм управления предусматривает необходимость переноса груза с берега на плот, транспортировки груза по движущемуся плоту и переноса груза с плота на другой берег. 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, груз, шестиногий робот, переправа, водная преграда.

Yury Filippovich Golubev, Victor Vladimirovich Koryanov. Water body crossing by a six-legged robot on a raft with a cargo.

Motion of the robot is formed with the aim the crossing with a cargo from one side onto the other side of the water body in the simplest case, when the robot initially pushes the raft from the shore. The proposed control algorithm provides for the transfer of a cargo from a shore to the raft, transporting cargo on a moving raft and transfer of the cargo from the raft to the other shore. The algorithm was worked out by means of computer simulation. The results of calculations show the performance of the algorithm in the presence of motion information, adequate for management purposes.

Key words: raft, buoyancy force, water resistance, cargo, six-legged robot, crossing, water body.

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	5
3. Переправа робота с грузом на плоту	6
4. Компьютерное моделирование	13
Список литературы	16

Введение

Автономный мобильный робот, предназначенный для работы в условиях пересеченной местности, должен уметь активно использовать местные предметы не только как средство собственного передвижения [1], но и для транспортировки полезных грузов. Шестиногий мобильный робот имеет для этого потенциальные возможности, поскольку на некоторых фазах движения он способен освободить от опоры какую-нибудь пару ног без ущерба для статической устойчивости [1, 2]. Такое свойство особенно полезно, если робот не снабжен манипулятором или манипулятор по какой-либо причине не функционирует.

Данный препринт развивает результаты, представленные в работах [1, 3]. Предполагается, что шестиногий робот не имеет плавучести и не может функционировать в воде, но перед ним поставлена задача переправить некоторый груз на другой берег неширокой водной преграды. В этом случае он может воспользоваться каким-нибудь пассивным плавучим средством. Для переправы лучше всего подходит плот, так как на него при необходимости можно поставить переправляемый груз. Отработка алгоритмов управления роботом выполняется с применением математической модели сил сопротивления воды движению плота, представленной в [5], которая основывается на гипотезе о “струйном” характере воздействия воды на отдельные элементы плота. Математическая модель движения плота на воде вместе с грузом и роботом соответствует [6] и формируется автоматически средствами комплекса “Универсальный механизм” [7].

Решаемая задача формулируется следующим образом [8]. Первоначально робот идет по горизонтальной поверхности. На его пути расположена не очень широкая, но достаточно протяженная водная преграда с перпендикулярными к направлению движения берегами. Ширина водной поверхности не позволяет роботу перешагнуть через преграду, но для того, чтобы ее переплыть, достаточно оттолкнуться от берега ногами. На воде у ближайшего к роботу берега свободно лежит плот, а на берегу у воды лежит груз. Робот должен подойти к плоту, перейти на него и одновременно перенести груз. Затем, с достаточной силой оттолкнувшись от берега, переплыть на плоту к другому берегу, переместившись вместе с грузом к подходящему для переправы краю плота, и перейти на другой берег, переместив на него груз. При выполнении этих маневров возникают колебания плота относительно воды и удары, связанные с транспортировкой груза. Если к тому же робот вместе с грузом 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” [7] с учетом полной динамики системы в целом, имеющей 36 степеней свободы. Представленные результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о принципиальной реализуемости предложенного алгоритма управления роботом.

1. Уравнения движения плота на воде

Как и в работах [1, 3], предполагается, что однородный плот в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами $2a$ — длина, $2b$ — ширина, $2d$ — толщина движется по поверхности воды под действием нагрузки \mathbf{F} , силового момента \mathbf{M} относительно центра масс C_p плота, возникающих из-за перемещения по плоту робота и перевозимого груза, и архимедовой силы. Сила \mathbf{F} включает в себя также и вес плота. 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 с нагрузкой имеют вид [1, 3, 9]

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

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 [5]. В общем случае, чтобы замкнуть систему (1.1), к ней следует добавить еще шесть кинематических уравнений вида

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

Из уравнений (1.1), в частности, следует [1, 9], что если внешний по отношению к плоту силовой момент относительно центра масс плота имеет вертикальную составляющую, то плот будет вращаться вокруг вертикальной оси. Поэтому во избежание дополнительных трудностей при высадке на другой берег робот при своем движении по плоту не должен совершать вращений корпуса и груза в горизонтальной плоскости. Также желательно, чтобы он вместе с грузом двигался как можно ближе к осевой линии плота.

2. Механическая система

Конструкция робота совпадает с принятой в [1, 3]. 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 двухзвенных 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.

Траектории переносов ног формируются в виде плоских шаговых циклов [1, 10], адаптируемых в зависимости от поверхностей препятствий, скорости движения робота, предписанных следовых точек. Движения ног, соответствующие шаговым циклам, сглаживаются, чтобы сохранить непрерывность как самого движения, так и его скорости [1].

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 текущем положении окружающих объектов и о реализовавшейся конфигурации робота при его движении. Реализация программных значений шарнирных углов осуществляется так же, как в [1, 3].

Наличие стоп на концах ног и силового момента в опорных точках не предполагается [10]. Реакции в них должны удовлетворять условию малой деформации опорной поверхности и должны принадлежать конусам кулоновского трения с заданным коэффициентом [1]. 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. Соответствующую реперу $O\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2\mathbf{e}_3$ систему координат обозначим $O\xi\eta\zeta$. Ось $O\eta$ направим в сторону, противоположную движению робота.

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].

Переносимый груз имеет вид однородного прямоугольного параллелепипеда. Его габариты достаточно велики, так что роботу не требуется заводить стопы под корпус с целью его захвата ногами. Груз не закреплен на опорной плоскости и лежит на ней под действием силы тяжести.

3. Переправа робота с грузом 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. На берегу лежит груз так, что две его вертикальные грани параллельны берегу. Робот должен подойти к берегу, перенести груз на плот и,

оттолкнувшись от берега с достаточной силой, доплыть на плоту до противоположного берега водной преграды. Затем он должен перенести груз на другой берег и продолжить движение. Переправа происходит в соответствии со следующими этапами.

Этап 3.1. Робот приближается к берегу маршевой походкой трешки так, чтобы груз оказался симметрично расположенным относительно продольной плоскости симметрии корпуса. В достаточной близости от берега он переходит на походку галоп (рис. 3.1,а). Затем выполняется перенос на плот передних ног вместе с движением корпуса вперед (рис. 3.1,б), а затем делают шаг задние ноги (рис. 3.2,а). При планировании последовательных переносов средних ног проверяется, имеется ли возможность взять ими груз. Предполагается, что взять груз можно, если $\eta_{cr} < \eta_i < \eta_{cf}$, где η_i — координаты точек опоры средних ног на очередном шаге, η_{cr} и η_{cf} — координаты центров вертикальных граней груза, которые перпендикулярны направлению движения робота (параллельны берегам).

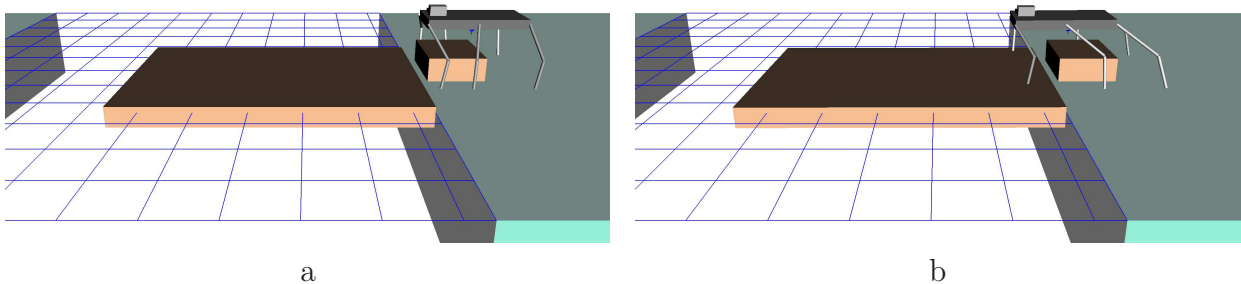


Рис. 3.1: а) Подход к берегу, б) перенос передних ног на плот

Этап 3.2. Если груз можно взять, то целевые точки для средних ног выбираются на боковых гранях груза. При этом они заглубляются внутрь груза, чтобы обеспечить необходимое давление на грани и тем самым предотвратить его выскальзывание. Кроме того целевые точки смещаются вверх относительно центра боковых граней, чтобы предотвратить переворачивание груза во время его переноса. С целью транспортировки груза планируются дополнительные переносы средних ног. Стопы средних ног переносятся в выбранные целевые точки на боковых гранях груза (рис. 3.2,б), затем средние ноги переносят груз вперед по направлению к берегу, а после того, как перенос закончен, средние ноги с боковых сторон груза возвращаются на следовую колею в новые точки опоры, сделав как бы очередной шаг (рис. 3.3,а). Длительность каждого из дополнительных переносов равна двойной длительности регулярного шагового цикла. В итоге средние ноги делают очередной шаг с одновременным переносом груза на расстояние, равное длине

шага средних ног. Следующий перенос груза осуществляется при очередном переносе средних ног в режиме походки “галоп”. Таким образом, робот вместе с грузом постепенно 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. 3.3,b).

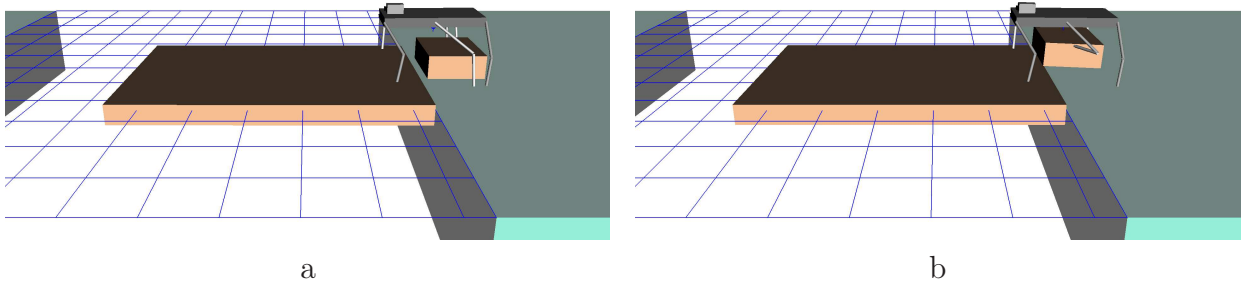


Рис. 3.2: а) Подготовка к переносу груза, б) частичный перенос груза на плот

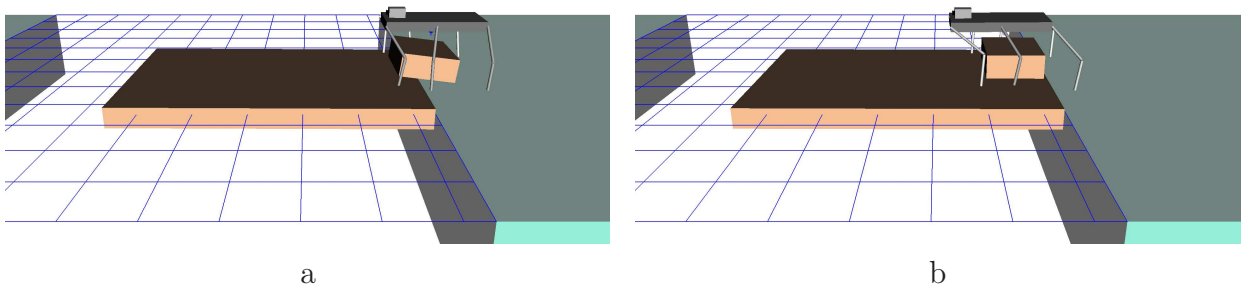


Рис. 3.3: а) Груз в процессе переноса на плот, б) позиция перед отталкиванием от берега

Этап 3.3. Стоя на плоту на передних и средних ногах, робот отталкивается от берега, придавая плоту вместе с роботом и грузом начальную скорость v_0 , достаточную для достижения другого берега (рис. 3.4,a). Задние ноги после толчка переносятся на плот. Скорость v_0 в зависимости от расстояния S между берегами можно оценить по приближенной формуле:

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

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, m^c – масса груза, α_2 – коэффициент квадратичного по скорости сопротивления воды с учетом формы плота при поступательном движении [1, 5].

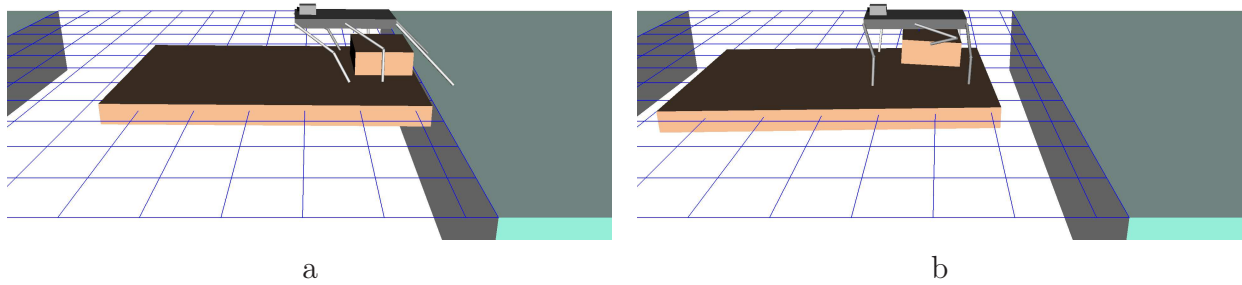


Рис. 3.4: а) Отталкивание от берега задними ногами, б) робот с грузом на плоту

Этап 3.4. После толчка плот плавает к противоположному берегу, а робот, перемещая груз, идет по плоту к краю, которым плот должен причалить после переправы (рис. 3.4,б). Для того чтобы робот не упал в воду, во время движения по плоту все переносы ног вместе с дополнительными переносами рассчитываются в связанной с плотом системе координат. Движение плота на воде оказывается возмущенным в связи с ошибками исполнения при маневрах и из-за появления дополнительной нагрузки в виде робота, груза и их перемещений на плоту. Взаимодействие плота с роботом при моделировании осуществляется лишь силами, возникающими при контакте стоп ног робота с поверхностью плота. Воздействие груза на плот также учитывается с помощью контактных сил.

Когда груз в конце его переноса встречается с поверхностью плота, возникает удар, который затрагивает все элементы рассматриваемой механической системы и может привести к слишком большим отклонениям реального движения робота от запланированного. Удар происходит из-за того, что плот колеблется на воде, груз совершает колебания при переносе. Кроме того, имеются ошибки исполнения во время регулярных переносов ног. Вследствие этого в конце переноса средние ноги с грузом еще продолжают свое движение, когда какая-то точка груза уже достигла поверхности плота, и момент контакта практически невозможно предсказать. Для того чтобы влияние неизбежного удара уменьшить, алгоритм планирования движения сравнивает на каждом шаге интегрирования программные положения стоп с теми, которые реализовались в процессе переноса. Если рассогласование оказывается значительным, то перенос прекращается и производится перерасчет программного движения. В случае, когда рассогласование невелико, непосредственно перед планируемым контактом груза с опорой корпус робота приподнимается. Такое движение корпуса способствует интенсивному прижатию стоп опорных ног к поверхности плота. После того как груз оказался на опорной поверхно-

сти, средние ноги еще некоторое небольшое время продолжают удерживать груз в фиксированном положении, успокаивая мелкие колебания системы относительно плота.

В процессе движения плот может поворачиваться вокруг вертикальной оси из-за того, что центр плота не принадлежал основанию суммарной силы при толчке от берега, а также из-за того, что, пока плот плывет, робот и груз перемещаются, вызывая дополнительный поворот плота вокруг той же оси.

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

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

где J – эффективный момент инерции плота вместе с роботом и грузом вокруг вертикальной оси, α_3 – коэффициент сопротивления воды с учетом формы плота при вращении вокруг вертикальной оси [5], h – расстояние от центра плота до линии действия суммарного импульса сил при отталкивании от берега. Если величина отношения α_3/J мала, то формулу (3.1) можно упростить:

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

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. 3.5,б). Левая стопа (относительно корпуса по ходу движения) подтягивается к корпусу, оставаясь неподвижной на берегу, а правая нога, как и все остальные ноги, зафиксиро-

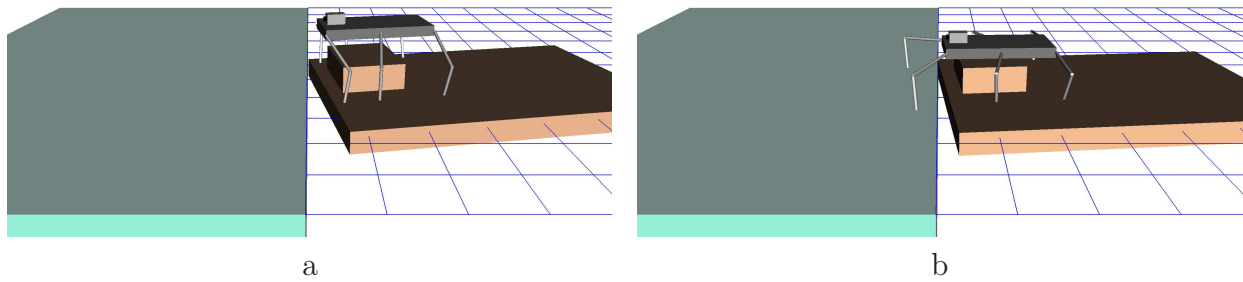


Рис. 3.5: а) Причаливание, б) подтягивание плота к берегу

вана 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.3.6). Если этот отход оказался значительным, то подтягивание к берегу следует продолжить. На рис.3.6 тонкими линиями показаны абсолютные траектории стоп передних ног.

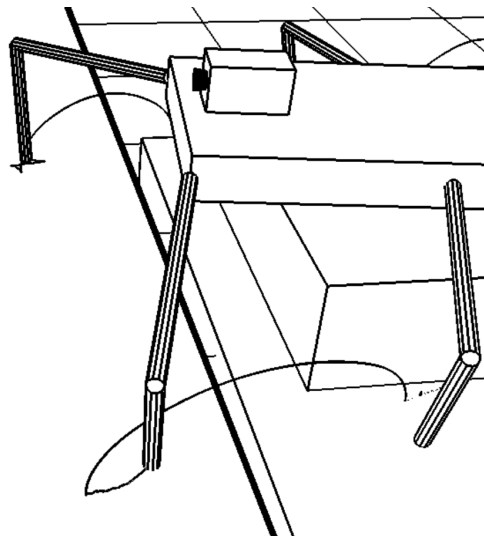


Рис. 3.6: Проскальзывание передних ног при подтягивании плота к берегу

Когда стопы стоят на плоту, имеется их некоторое колебание из-за возмущенного движения плота. Когда стопы стоят на берегу, то след левой стопы является монотонным, а след правой стопы немонотонен, что отражает движение плота относительно берега при подтягивании плота. 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 [3]. Возможен вариант, когда плот под-

тягивается к берегу обеими ногами. Такой вариант предпочтительнее, когда требуется уменьшить нагрузку на ноги.

Этап 3.7. Как только вся соответствующая сторона плота окажется достаточно близко у берега, робот незамедлительно начинает подготовку к транспортировке груза. В результате проскальзывания на предшествующем этапе стоп передних ног относительно берега может возникнуть значительный горизонтальный перекося корпуса робота относительно поверхности плота. Как следствие, возникает также перекося корпуса относительно транспортируемого груза (рис. 3.7,а). Если брать груз при перекошенной позиции корпуса, то надежный захват груза затруднен, и робот может уронить груз. Чтобы этого не произошло, перед тем как робот возьмет груз, следует откорректировать его конфигурацию, для чего иногда возникает необходимость менять точки опоры робота как на берегу (передние ноги), так и на плоту. Для такой коррекции позы неприемлема логика походки “галоп”, т.к. при одновременном переносе какой-нибудь пары ног в перекошенной позиции могут нарушаться условия статической устойчивости и достижимости до необходимых точек опоры. Если осторожно переносить ноги по одной, то для этого может потребоваться так много времени, что плот успеет отплыть от берега, сделав переправу практически невыполнимой. Дело в том, что плот находится в постоянном движении, и из-за этого могут нарушиться условия дотягивания ног до возможных точек опоры на берегу. Сравнительно быстро выполняется коррекция положения корпуса за два шага посредством логики походки “трешки”. Тогда возникает раскачивание плота, но численные эксперименты свидетельствуют, что это не вызывает нарушения общей структуры движения. За два шага тройками ног удается достаточно эффективно откорректировать позу робота относительно груза требуемым образом. Результат корректировки позы робота представлен на рис. 3.7,б.

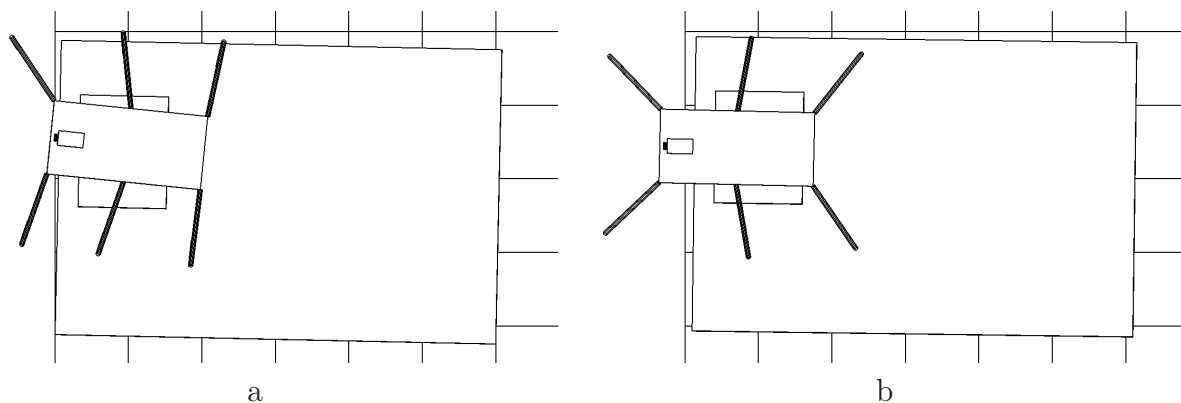


Рис. 3.7: а) Перекося корпуса относительно груза, б) корпус выровнен

Выполнив коррекцию положения корпуса относительно груза, робот под-

нимает корпус до маршевой высоты и осуществляет переход на другой берег, перенося при этом груз (рис. 3.8).

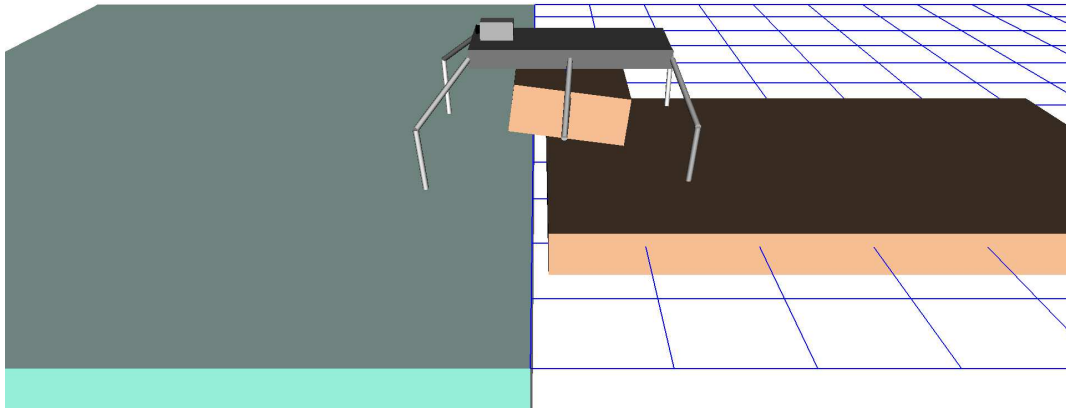


Рис. 3.8: Перенос груза на берег

4. Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование осуществлялось аналогично тому, как это было описано в [1, 3]. Управление роботом, закон взаимодействия стоп ног с опорой и с грузом, модель движения плота на воде реализованы в виде DLL-библиотеки, подключенной к программному комплексу “Универсальный механизм” [7]. Тем самым создается виртуальная среда обитания робота. Неподвижная опорная поверхность в ней представлена горизонтальной плоскостью с расположенной на ней водной преградой. Отдельные объекты, такие как плот, робот и груз, 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 [5]. Управление движением реализуется посредством компьютерного моделирования работы электромеханических приводов шарнирных углов. Выполнение требуемого движения робота осуществляется, как и в реальности, лишь в результате подачи значения управляющего электрического напряжения на модели электромеханических приводов. Соотношение размеров корпуса, звеньев ног, размеров плота и ширины водной преграды имеет вид

$$a^r : b^r : c^r : l_1 : l_2 : a : b : d : S : a^c : b^c : d^c = \\ = 1 : 0.5 : 0.1 : 0.5 : 0.33 : 1.5 : 1 : 0.1 : 5.2 : 0.3 : 0.38 : 0.125.$$

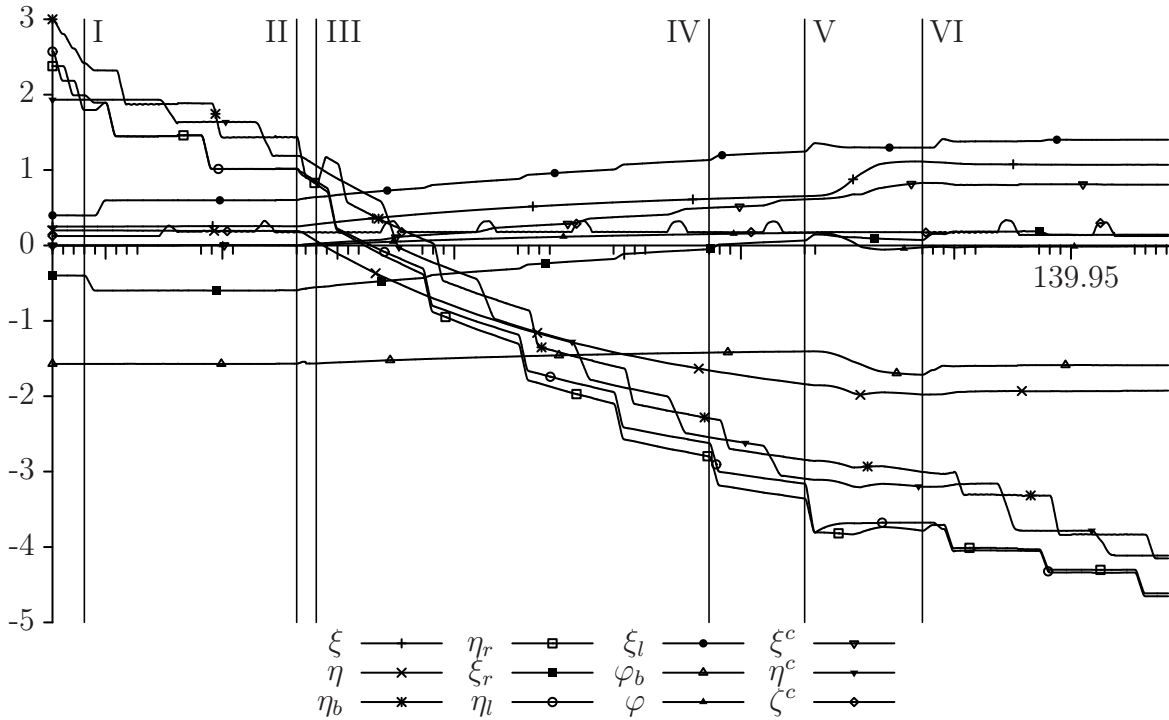


Рис. 4.1: Зависимость основных параметров от времени

Массы робота, переносимого груза и плота относятся как

$$16 : 10 : 840.$$

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 36 степеней свободы. Уравнения динамики синтезируются автоматически [7]. 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 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 $O\xi$ и угла φ вращения плота вокруг вертикали, отсчитываемого от оси $O\eta$, координат ξ^c , η^c , ζ^c середины груза. 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 и грузом. Между линиями IV и V выполняется этап 6.5, т.е. робот вместе с грузом 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 вместе с грузом 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 вместе с грузом с одного берега на другой неширокой, но протяженной водной преграды.

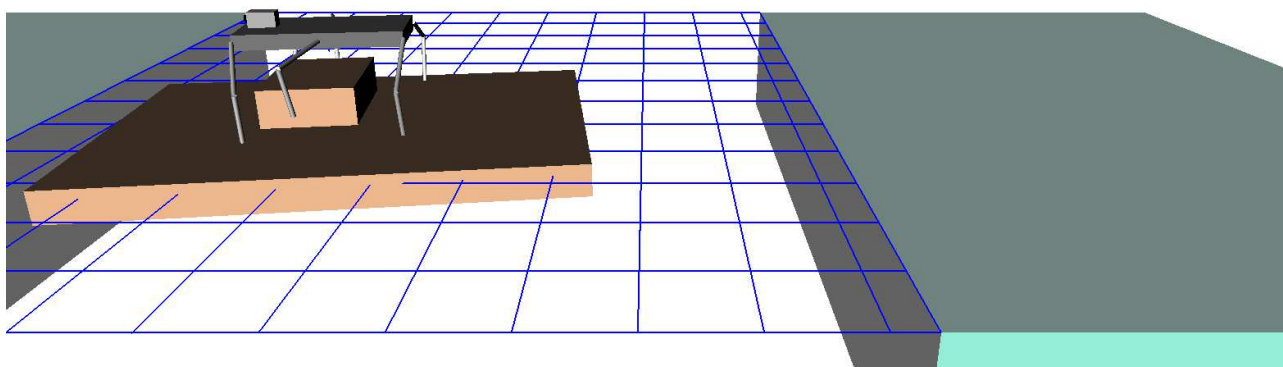


Рис. 4.2: Анимация движения, доступна в электронной версии препринта. Ролик отдельно можно скачать по адресу <http://keldysh.ru/e-biblio/golubev/raft-cargo.mp4>

Заключение

Представлено решение новой задачи о переправе автономного инсектоморфного робота вместе с грузом через водную преграду с применением плота. Синтезировано устойчивое движение системы при переносе груза роботом с берега на плот, перемещении робота вместе с грузом на плоту к другому берегу, причаливании плота с роботом и грузом на борту к берегу, перемещении груза на другой берег. Выполнение этих маневров затруднено подвижностью

плота на воде, возможностью проскальзывания ног при опоре о 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, груза, плота и водной поверхности с учетом архимедовых сил, сил сопротивления воды, сил кулоновского трения, моделей электромеханических приводов в шарнирах робота.

Показано, что рассчитываемое по ходу маневрирования программное движение, обеспечивающее требуемое движения 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.

Представленный видеоролик наглядно демонстрирует подробности переправы на плоту вместе с транспортировкой груза. Видно, что, несмотря на зыбкость опоры в виде плота на воде, сопутствующие удары и неизбежные ошибки исполнения, робот надежно выполняет двигательные задачи на всех этапах движения.

Список литературы

1. *Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.* Экстремальные локомоционные возможности инсектоморфных роботов. — М: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. — 212 с. ISBN 978-5-98354-040-8, doi:10.20948/mono-2018-golubev
2. *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.

3. *Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.* Преодоление небольшой водной преграды инсектоморфным роботом на плоту. Известия РАН. Теория и системы управления, 2017, №6, с. 141–162. DOI: 10.7868/S0002338817060117
Golubev Yu.F., Koryanov V.V. Crossing a Small Body of Water by an Insectomorphic Robot on a Raft. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2017. Vol. 56, No. 6, pp. 1037–1058. ©Pleiades Publishing, Ltd., 2017.
4. *Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.* Преодоление шестиногим роботом неширокой водной преграды на плоту//Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 15. 16с. doi:10.20948/prepr-2017-15
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-15>
5. *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>
6. *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>
7. Универсальный механизм. Моделирование динамики механических систем. URL: <http://www.umlabor.ru> (дата обращения: 18.06.2015).
8. *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>, ISSN: 2308-6033, DOI: 10.18698/2308-6033-2018-3-1748
9. *Голубев Ю.Ф.* Основы теоретической механики: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2000. 719 с.
10. *Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф.* Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1984. 312 с.