

Компьютерное исследование динамики и управления движением электромеханического лазающего робота*

Ю.Ф. Голубев, В.В. Корянов

Исследуется задача о преодолении шестиногим инсектоморфным роботом как отдельно стоящих, так и комбинации высоких препятствий. Полоса препятствий включает в себя вертикальный цилиндрический столб и два уступа с вертикальными стенками. Уступы соединены на уровне опорных площадок узким брусом. Один из уступов стоит вплотную к столбу. Рассмотрены различные маневры в зависимости от соотношения высоты столба и уступа. При движении по брусу средние ноги используются в качестве маховика для стабилизации на этапах потери статической устойчивости. Решена также задача о залезании на вертикально стоящий прямой угол (угол дома). Стопы робота не оборудованы вакуумными присосками или другими специальными устройствами, движения строятся в предположении, что используются только силы сухого трения в точках опоры. Представлены некоторые результаты трехмерного компьютерного моделирования полной динамики робота.

Введение. Шестиногие шагающие машины могут обеспечить достаточный запас статической устойчивости на всех стадиях движения по горизонтальной плоскости [1]. Разработки макетов таких машин были направлены на исследование возможности движения по опорной поверхности небольшого наклона со сравнительно малыми неровностями. Указанный тип поверхностей позволяет сохранять горизонтальную ориентацию корпуса робота [2-5]. Шагающие машины с сочлененным корпусом, так же как машины, способные совершать прыжки [1, 6-8], позволяют отказаться от требования, чтобы неровности опоры были малы. При этом приемлемая высота препятствий оказывается сравнимой с максимальной высотой машины. Преодолеть ограничения на высоту препятствий в принципе удастся при использовании шагающих машин с вакуумными присосками в стопах [9, 10]. Эти машины способны двигаться по вертикальным стенам, и им необязательно обеспечивать статическую устойчивость. Вместе с тем они нуждаются в достаточно сложных устройствах для создания необходимого уровня вакуума в присосках.

Очевидно, что в некоторых случаях шагающие машины имеют принципиальную возможность двигаться вдоль вертикальных поверхностей значительной высоты, используя только кулоновские силы трения в точках опоры. В наиболее трудных ситуациях при таком движении возникает необходимость преодоления веса робота посредством только сил трения. В качестве примера опорной поверхности указанного типа может служить вертикальный цилиндрический столб подходящего диаметра. Чтобы на него забраться, робот должен сжать столб и тем самым создать достаточную силу трения. Наличие шести ног облегчает задачу сжатия столба без потери равновесия, поскольку робот может использовать симметричную следовую последовательность. В [11] представлены методы построения движения робота при перемещении с горизонтальной поверхности на вертикальный столб, движении вдоль столба, залезании на его вершину, при спуске и слезании со столба.

Способность робота передвигаться по сложной местности можно выработать, последовательно обучая его преодолевать как изолированные препятствия, так и их разумные

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (04-01-00065, 04-01-00105), программы «Ведущие научные школы» (НШ - 1835.2003.01).

комбинации. Такой подход широко применяется для тренировок альпинистов, пожарных, спасателей и в других прикладных видах спорта. В [12] предложен метод формирования движения при залезании на высокий уступ с использованием стоящего рядом с ним вертикального столба. Высота уступа столь велика, что как изолированное препятствие он оказывается для робота непреодолимым. Вместе с тем способность робота карабкаться на столб и далее на его вершину решает проблему преодоления указанной комбинации препятствий. В данной работе представлены различные варианты алгоритма построения движения шестиногого робота в зависимости от сочетания высот столба и уступа. Обратное движение с уступа на столб и переход на лежащую внизу опорную поверхность может быть получен путем обращения времени в описываемых ниже алгоритмах формирования программного движения.

Построен алгоритм перехода с уступа на уступ по узкому горизонтальному брусу. Кроме того, решена задача о залезании на вертикальный прямой угол. Движение оказалось возможным построить при коэффициенте трения 1.1.

1. Постановка задачи. Шагающий робот состоит из корпуса в форме параллелепипеда с размерами a – боковая сторона (длина), b – передний или задний край (ширина), c – высота. К боковым сторонам корпуса прикреплены шесть одинаковых ног симметрично по три с каждой стороны корпуса. Точки крепления расположены равномерно вдоль сторон. Каждая нога имеет два звена: бедро l_1 и голень l_2 . Корпус и звенья ног имеют конечные объем и массу и находятся под действием силы тяжести, так что робот представляет собой динамическую систему с 24 степенями свободы. В исходной позиции робот стоит на горизонтальной плоскости перед комбинацией препятствий в виде высокого уступа и столба (рис. 1). Столб представляет собой прямой круговой цилиндр радиуса r , сверху имеет горизонтальную круговую площадку и стоит вплотную к уступу.

Соотношения размеров робота и столба имеют вид

$$a : b : c : l_1 : l_2 : r = 1 : 0.5 : 0.1 : 0.5 : 0.33 : 0.4.$$

Предполагается, что робот имеет электромеханические приводы в шарнирах и располагает информацией о геометрии препятствий, о своем положении относительно препятствий, о шарнирных углах и угловых скоростях. Он может соприкоснуться с опорой только стопами ног. В точках соприкосновения стоп с опорной поверхностью возникают силы сухого трения с коэффициентом трения, равным единице (резина по бетону), причем опорная поверхность освобождающая. Допускается проскальзывание стоп по опоре. В случае отрыва стопы от опорной поверхности робот может упасть.

Уступ имеет вертикальные стенки и его высота столь велика, что робот не может взобраться на уступ без помощи столба. Робот имеет возможность забраться на уступ, используя столб в качестве вспомогательного средства. При этом должны отсутствовать взаимные пересечения ног, и движение корпуса робота должно быть по возможности комфортабельным.

Весь процесс движения состоит из двух крупных маневров: залезание на уступ посредством столба и переход по брусу с одного уступа на другой. Поскольку маневры имеют самостоятельное значение и могут быть использованы независимо друг от друга, рассмотрим их отдельно.

Реализация требуемого движения. Для решения поставленной задачи используются методы сервоуправления [13]. Желаемое движение робота формируется как сервосвязь, которую робот должен реализовать, задавая управляющие напряжения на обмотках электродвигателя. Сервосвязи формируются как заданные законы изменения шарнирных углов. В соответствии со следовым расписанием некоторые ноги должны быть в состоянии опоры, а некоторые — в состоянии переноса. Программные (задаваемые как сервосвязь) шарнирные углы однозначно определены требуемым движением корпуса и стоп ног относительно корпуса. Эти углы находятся из следующих соотношений [1]:

$$\begin{aligned}
r_{xi} &= x_i - p_{xi} = [(-1)^i l_1 \sin \beta_i - l_2 \sin(\beta_i + \gamma_i)] \sin \alpha_i, \\
r_{yi} &= y_i - p_{yi} = [(-1)^i l_1 \sin \beta_i - l_2 \sin(\beta_i + \gamma_i)] \cos \alpha_i, \\
r_{zi} &= z_i - p_{zi} = [(-1)^{i+1} l_1 \cos \beta_i + l_2 \cos(\beta_i + \gamma_i)],
\end{aligned}$$

где (x_i, y_i, z_i) — координаты i -й стопы, (p_{xi}, p_{yi}, p_{zi}) — координаты точки крепления i -й ноги в осях координат, связанных с корпусом. Формулы для нахождения $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ имеют вид

$$\text{Arccos}(x) = \begin{cases} 0, & x > 1, \\ \arccos x, & -1 \leq x \leq 1, \\ \pi, & x < -1, \end{cases} \quad \text{Arctg}(y, x) = \begin{cases} 0, & x > 0, \\ \arctg \frac{y}{x} + \begin{cases} \pi, & x < 0, y \geq 0, \\ -\pi, & x < 0, y < 0, \end{cases} & x \neq 0, \\ \pi/2, & y > 0, \\ 0, & y = 0, \\ -\pi/2, & y < 0, \end{cases} \quad x = 0,$$

$$\alpha_i = \begin{cases} -\text{Arctg}((-1)^{i+1} r_{xi}, (-1)^{i+1} r_{yi}), & (-1)^i r_{yi} < 0, \\ \text{Arctg}((-1)^{i+1} r_{xi}, (-1)^i r_{yi}), & (-1)^i r_{yi} \geq 0, \end{cases}$$

$$\beta'_i = \text{Arccos}((-1)^{i+1} r_{zi} / r_i) + (-1)^i \text{Arccos}((l_1^2 + r_i^2 - l_2^2) / (2l_1 r_i)),$$

$$\beta_i = \begin{cases} 2\pi - \beta'_i, & (-1)^i r_{yi} < 0, \\ \beta'_i, & (-1)^i r_{yi} \geq 0, \end{cases}$$

$$\gamma_i = (1 - (-1)^i) \pi / 2 + (-1)^i \text{Arccos}((l_1^2 + l_2^2 - r_i^2) / (2l_1 l_2)),$$

где r_i — модуль вектора $\mathbf{r}_i = (r_{xi}, r_{yi}, r_{zi})$. Функция $\text{Arctg}(y, x)$ введена для того, чтобы вырождение α_i при $r_{yi} = 0$ можно было непрерывно преодолеть при зафиксированном значении этого угла. Переход через нулевое значение r_{yi} соответствует движению, при котором стопа заносится под корпус. Такие переносы потребуются при движении по узкому брусу (разд. 2), когда ширина следовой колеи будет меньше ширины корпуса.

Как правило, реализовавшиеся при движении робота значения шарнирных углов отличаются от программных значений. Переходный процесс для ликвидации рассогласований осуществляется посредством PD-регулятора, определяющего синтез закона управления роботом по формулам

$$M = U - c_e \dot{\phi}, \quad U_0 = -\chi_1 (\phi - \phi_0) + \chi_2 \dot{\phi}, \quad U = \begin{cases} \text{sign}(U_0) U_{\max}, & |U_0| > U_{\max}, \\ U_0, & |U_0| \leq U_{\max}, \end{cases}$$

где M — силовой момент на валу двигателя, U — момент из-за электрического напряжения на обмотках, U_{\max} — максимально допустимое напряжение, χ_1, χ_2 — коэффициенты усиления, обеспечивающие быстроту и качество переходного процесса, c_e — коэффициент самоиндукции, $\phi_0 = \phi_0(t)$ — программное (требуемое) значение какого-нибудь шарнирного угла, $\phi, \dot{\phi}$ — реализовавшиеся в процессе движения робота значения соответствующих шарнирных угла и угловой скорости. Таким образом, управление обеспечивается электрическим напряжением с насыщением, что вносит дополнительные помехи при исполнении движения. Коэффициенты χ_1, χ_2 выбираются таким образом, чтобы в ходе переходного процесса ликвидировалось возникающее рассогласование реального и программного движений экспоненциально быстро и без перерегулирования.

Задаваемое электрическое напряжение обеспечивает асимптотический переход к требуемому движению ног относительно корпуса и делает это движение аттрактором в пространстве относительных состояний. Стопы ног, находящихся в фазе опоры, будут непо-

движными относительно опорной поверхности. В результате этого возникнет реальное движение корпуса. Стопы ног, находящихся в фазе переноса, будут двигаться по направлению к новым точкам опоры. Таким образом будет обеспечиваться движение робота, близкое с необходимой точностью к программному и устойчивое по отношению к возмущениям в соответствии с общими принципами сервоуправления [13].

Взаимодействие с опорной поверхностью учитывает возможную деформацию грунта. Реакция поверхности выражается формулами:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_\tau + \mathbf{N}, \quad \mathbf{F}' = c_n(\mathbf{r}_T - \mathbf{r}_C) - d_n \varepsilon \mathbf{v}_C, \quad \mathbf{N} = \mathbf{n}(\mathbf{F}' \cdot \mathbf{n}), \quad \mathbf{F}'_\tau = \mathbf{F}' - \mathbf{N}$$

$$\mathbf{F}_\tau = \begin{cases} \mathbf{F}'_\tau, & \text{если } \frac{F'_\tau}{N} < k_f, \\ \mathbf{F}'_\tau \frac{N k_f}{F'_\tau}, & \text{если } \frac{F'_\tau}{N} \geq k_f, \end{cases}$$

здесь \mathbf{F}_τ — касательная составляющая реакции поверхности, \mathbf{N} — ее нормальная составляющая, \mathbf{F}' — сила вязко-упругого взаимодействия, c_n — коэффициент упругой части взаимодействия, \mathbf{r}_T — радиус-вектор начальной точки взаимодействия стопы с грунтом, \mathbf{r}_C — реализовавшееся положение стопы в результате взаимодействия, d_n — постоянный коэффициент, ε — положительная величина углубления стопы в опору, k_f — коэффициент кулоновского трения. Произведение $d_n \varepsilon$ представляет собой коэффициент вязкого трения, пропорциональный величине углубления стопы. Это исключает возникновение скачков силы вязко-упругого взаимодействия при пересечении стопой границы опорной поверхности. Выражение для \mathbf{F}_τ учитывает тот факт, что сила реакции опоры не может выходить за пределы конуса трения. Другими словами, при моделировании динамики робота, стопа может начать скользить вдоль опоры, а робот может сорваться и упасть.

Компьютерная модель робота рассчитывает его закон движения в трехмерной среде, образованной заданными препятствиями и опорными поверхностями с учетом кинематических, динамических и геометрических ограничений. Выражения для управляющих электрических напряжений и сил взаимодействия стоп ног аппарата с опорой вместе с уравнениями динамики робота как системы абсолютно твердых тел с 24 степенями свободы, автоматически получаемых средствами комплекса Универсальный механизм [14], замыкают эту модель. Результаты компьютерного экспериментирования с указанной моделью представляются в виде стилизованного отображения на экран монитора последовательных положений робота в окружающей его среде с препятствиями. В результате этого оказывается возможным контролировать качество реализации закона программного движения робота, посылаемого на вход алгоритма управления.

Программное движение робота формируется посредством представления его конфигурации в пространстве в зависимости от скалярного параметра $t > 0$ (в частном случае, t — время движения).

Переносы ног осуществляются адаптивно в соответствии с модифицируемыми в зависимости от ситуации шаговыми циклами (рис. 2). В процессе переноса стопы ног принадлежат плоскостям $C'_i x'_i y'_i$, причем

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\rho}_i &= \mathbf{r}_i(t_2) - \mathbf{r}_i(t_1), \quad C'_i x'_i \parallel \boldsymbol{\rho}_i, \quad C'_i y'_i \parallel \boldsymbol{\rho}_i \times (\mathbf{e}_n \times \boldsymbol{\rho}_i), \quad \mathbf{r}_{ci} = (\mathbf{r}_i(t_1) + \mathbf{r}_i(t_2))/2, \\ x'_i &= -d_x \cos \varphi, \quad d_x = \rho_i / 2, \quad y'_i = (d_y + y_s) \sin \varphi - y_s, \quad \varphi = \varphi(t), \end{aligned}$$

где $\mathbf{r}_i(t_1)$ — радиус-вектор положения стопы в начале фазы переноса (точка A на рис. 2), когда $t = t_1$, $\mathbf{r}_i(t_2)$ — радиус-вектор положения стопы в конце фазы переноса (точка B на рис. 2), когда $t = t_2$, \mathbf{e}_n — единичный вектор, задающий ориентацию плоскости фазового цикла в пространстве.

Таким образом, стопа, будучи в фазе переноса, движется по части эллипса в плоскости, ориентация которой в пространства определена векторами \mathbf{e}_n и \mathbf{p}_i . Прямолинейный отрезок между точками A и B соответствует фазе опоры.

Программное движение для преодоления какого-нибудь препятствия состоит из последовательности этапов, каждый из которых имеет самостоятельную ценность, как типовой элемент, могущий оказаться полезным при преодолении других препятствий. Сначала рассмотрим типовые этапы в той последовательности, в которой они встречаются при залезании шагающего аппарата на вершину вертикального столба.

Переход на столб с горизонтальной поверхностью. В исходной позиции робот стоит перед столбом, его корпус горизонтален, а стопы его ног расположены симметрично по бокам корпуса в положении, соответствующем началу движения передними ногами в режиме походки галоп. Походка галоп выбрана как наиболее удобная для симметричного сжатия столба парами ног при опоре робота о столб. Пусть $O\xi\eta\zeta$ — абсолютная система координат с началом O в центре нижнего основания столба. Ось $O\eta$ направлена в сторону, обратную направлению приближения корпуса робота к столбу. Ось $O\zeta$ направлена вертикально вверх. Ось $O\xi$ образует с указанными осями правую тройку. Движение корпуса задается так, что его передний край перемещается вертикально вверх: $\zeta_f = v't + h_0$, $\eta_f = d$, где ζ_f — вертикальная координата переднего края робота, h_0 — высота корпуса робота над горизонтальной опорной поверхностью перед началом маневра, v' — постоянный параметр, η_f — горизонтальная координата передней части робота, параметр $d > r$ (r — радиус столба) задает расстояние от центра корпуса до оси столба по окончании маневра. Задний край корпуса робота перемещается горизонтально по направлению к столбу, так что $\eta_r = d + \sqrt{a^2 - (v')^2 t^2}$, $\zeta_r = h_0$, где η_r , ζ_r — соответственно горизонтальная и вертикальная координаты заднего края корпуса робота. Стопы ног попарно переносятся на диаметрально противоположные образующие столба. Радиус-векторы точек постановки имеют вид

$$\mathbf{r}_i(t_k) = ((-1)^i x_f, 0, h_0 + h_k), \quad k = 1, 3, 4, \quad i = \begin{cases} 5, 6, & k = 1, \\ 3, 4, & k = 3, \\ 1, 2, & k = 4, \end{cases} \quad h_k = \begin{cases} a - 5x^*, & k = 1, \\ a/2 - 4x^*, & k = 3, \\ -3x^*, & k = 4, \end{cases}$$

где $x_f = r - \varepsilon$, k — номер этапа, $t_k = t_{k-1} + t^*$ (t_0 соответствует началу маневра), x^* — абсцисса точки B на рис. 2.

На втором этапе, чтобы обеспечить принадлежность точек постановки задних ног множеству достижимых положений стопы в процессе одного переноса, задние ноги переносятся на плоскости вдоль оси $O\eta$ противоположно ее направлению (то есть вперед). Разность ξ -овых компонент $r_{\xi i}(t_2) - r_{\xi i}(t_1) = -2x^*$, $i = 1, 2$.

Таким образом, сначала пара передних ног переносится на столб, затем задние ноги переносятся вперед на плоскости, и потом последовательно на столб переносятся средние (рис. 3) и задние ноги. Слагаемые h_k выбраны так, что в результате стопы оказываются в исходной позиции походки галоп, сдвинутой по отношению к корпусу вниз на $4x^*$. После трех последовательных переносов пар ног вверх положение стоп приводится в соответствие с положением корпуса, после чего робот начинает движение вдоль столба походкой галоп.

Залезание на вертикальный угол. Рассмотрим теперь задачу о залезании с горизонтальной плоскости на вертикальный двугранный угол, имеющий раствор $\pi/2$. Робот должен, находясь в начальный момент времени на горизонтальной плоскости, переместиться на угол, охватив его симметрично относительно биссектральной плоскости угла с двух сторон ногами, а затем продолжить движение вверх. Общий рисунок движения, как и при

залезании на вертикальный столб, определен походкой галоп. В случае с вертикальным углом задача осложнена тем, что, как следует из анализа распределения реакций в точках опоры, она не может быть решена при коэффициенте трения, меньшем или равном 1. Вместе с тем результаты компьютерного моделирования показывают, что при законе движения, описываемом ниже, коэффициента трения 1.1 оказывается достаточно для выполнения поставленной двигательной задачи.

Алгоритм залезания робота на угол по-прежнему выполняется в несколько этапов. Уточним использованные выше обозначения: для этапа с номером n обозначим t_{n-1} , t_n — моменты начала и конца этапа соответственно, $t_{n+1} = t_n + t^*$, t_0 — момент начала маневра. Обозначим также $\mathbf{r}_i(t_k) = (r_{\xi_j}(t_k), r_{\eta_i}(t_k), r_{\zeta_i}(t_k))$, $\mathbf{p}_i(t_k) = (p_{\xi_j}(t_k), p_{\eta_i}(t_k), p_{\zeta_i}(t_k))$ абсолютные радиус-векторы стоп и точек крепления i -ой ноги в момент времени t_k соответственно.

В начальный момент времени t_0 корпус ориентирован вдоль оси $O\eta_1$:

$$\mathbf{p}_i(t_0) = ((-1)^i b/2, \eta_f + a \lfloor (6-i)/2 \rfloor / 2, \zeta_f).$$

Здесь и далее $\lfloor \cdot \rfloor$ — целая часть числа, заключенного в скобки, $\xi_f = 0$, η_f , ζ_f — абсолютные координаты передней точки корпуса робота. Ноги находятся в исходной позиции походки галоп:

$$\mathbf{r}_i(t_0) = \begin{cases} 1, & i = 5, 6, \\ (-1)^i x_f, p_{\eta_i}(t_0) + x^*, & i = 3, 4, 0 \\ 0, & i = 1, 2, \end{cases}$$

Движение корпуса, как и при залезании на вертикальный столб, строится так, что точка переднего края корпуса движется вертикально вверх, а точка заднего края совершает вынужденное горизонтальное движение. Пусть $\tau = t - t_0$. Тогда закон движения передней точки корпуса для первого, второго и третьего этапов выражается формулой $\zeta_f = \zeta_f(t_0) + \zeta_s$ где:

$$\zeta_s = \begin{cases} \zeta'_s, & \zeta'_s < a, \\ a, & \zeta'_s \geq a, \end{cases} \quad \zeta'_s = v_s \frac{x^*}{t^*} \begin{cases} \tau, & 0 < \tau \leq 1.5t^*, \\ 1.5t^*, & 1.5t^* < \tau < 2t^*, \\ \tau - 0.5t^*, & \tau \geq 2t^*, \end{cases} \quad \eta_s = \sqrt{a^2 - \zeta_s^2}. \quad (1.1)$$

Этап 1: ($0 \leq \tau < t^*$). Безразмерный коэффициент v_s задает скорость движения корпуса.

В расчетах было принято значение $v_s = 4.4$. Этап 2 соответствует времени $t^* \leq \tau < 2t^*$. Видим, что вторую половину второго этапа корпус неподвижен, а на третьем этапе движение корпуса продолжается.

Закон движения точек крепления ног на этапах 1-3 имеет вид

$$\mathbf{p}_i(t) = (p_{\xi_j}(t_{n-1}), p_{\eta_6}(t_{n-1}) + \eta_s \lfloor (6-i)/2 \rfloor / 2, p_{\zeta_1} + \zeta_s \lfloor (i-1)/2 \rfloor / 2).$$

Передние ноги на первом этапе переносятся на опорный двугранный угол, радиус-векторы их точек постановки имеют вид:

$$\mathbf{r}_i(t_1) = ((-1)^i x_f, 0, \zeta_2), \quad i = 5, 6,$$

где $\zeta_2 = \zeta_f(t_0) + a - 5x^*$.

Этап 2: ($t^* \leq \tau < 2t^*$). Передний край корпуса продолжает движение вверх, как было описано выше, до момента времени $t_0 + 1.5t^*$.

Задние ноги переносятся вперед на горизонтальную плоскость.

$$\mathbf{r}_i(t_2) = (r_{\xi_j}(t_1), r_{\eta_i}(t_1) - 4.75x^*, r_{\zeta_i}(t_1)), \quad i = 1, 2.$$

Этап 3. Движение корпуса продолжается в соответствии с формулой (1.1). Средние ноги переносятся на угол в точки опоры (рис. 4).

$$\mathbf{r}_i(t_3) = ((-1)^i x_f, 0, \zeta_1), \quad i = 3, 4,$$

где $\zeta_1 = \zeta_2 - 0.7a + x^*$. Исходные параметры движения выбираются так, чтобы было $\zeta_1 > 0$ и чтобы соответствующие точки опоры располагались как можно ниже на угле, но находились в пределах досягаемости средних ног.

Этап 4. К моменту начала этого этапа корпус уже пришел в вертикальное положение. Передние ноги переносятся вверх в точки опоры

$$\mathbf{r}_i(t_4) = (r_{\zeta_i}(t_3), r_{\eta_i}(t_3) + 9x^*, r_{\zeta_i}(t_3)), \quad i = 5, 6.$$

Этим достигается увеличение плеча между средними и передними точками опоры для возможности переноса задних ног.

Этап 5. Данный этап оказывается наиболее трудным с точки зрения сохранения равновесия. Для его подготовки скорость движения корпуса выбирается таким образом, чтобы к моменту начала пятого этапа корпус оказался в вертикальном положении, задние ноги стояли в исходной позиции на горизонтальной плоскости в достаточно близком к опорному углу положении, передние и средние стопы были установлены на гранях угла в точки, существенно удаленные друг от друга по высоте (рис. 5). Тем самым создается достаточно большое плечо для компенсации момента силы тяжести реакциями опоры.

Задние ноги переносятся на угол в точки опоры

$$\mathbf{r}_i(t_5) = ((-1)^i x_f, 0, \zeta_0), \quad i = 1, 2.$$

где $\zeta_0 = \zeta_f(t_0) - 3x^*$.

На этапах 1-4 и 6-8 оси ординат шаговых циклов параллельны оси $O\xi$, оси ординат шаговых циклов на этапе 5 задаются единичными направляющими векторами

$$\mathbf{e}_n = ((-1)^i, 0, 0.9) / \sqrt{1.81}.$$

На этапах 6-8 робот переводится в начальную позицию для движения по углу вверх. На каждом из этапов осуществляется выравнивание положения корпуса относительно угла по формуле

$$p_{\eta_i}(t) = [\eta_f - p_{\eta_i}(t_{k-1})](t - t_{k-1}) / t^* + p_{\eta_i}(t_{k-1})$$

одновременно с движением корпуса вверх:

$$p_{\zeta_i}(t) = x^*(t - t_{k-1}) / t^* + p_{\zeta_i}(t_{k-1}).$$

Этап 6. Осуществляется перенос средних ног в точки опоры с аппликатами $r_{\zeta_i}(t_6) = r_{\zeta_5}(t_5) - a/2 - 5x^*$, $i = 3, 4$.

Этапы 7, 8. На седьмом этапе переносятся передние ноги, на восьмом задние:

$$r_{\zeta_i}(t_n) = r_{\zeta_i}(t_{n-1}) + 2x^*, \quad i = \begin{cases} 5, 6, & n = 7, \\ 1, 2, & n = 8. \end{cases}$$

По окончании восьмого этапа движение осуществляется вверх модифицированной походкой галоп (рис. 6). Расписание переносов передних и задних ног остается таким же, как и в стандартной походке галоп. Средние ноги переносятся в два раза чаще так, чтобы их точки опоры оказались вблизи точек опоры очередной переносимой пары ног. За счет этого уменьшается нагрузка на ноги, находящиеся в опоре.

Залезание робота на вершину столба представляет собой трудный маневр из-за малости верхней опорной площадки. Он начинается, когда передний край корпуса достигает высоты $h - x^*$, где h — высота столба. Реализовавшаяся к этому моменту в результате движения по столбу позиция робота перестраивается в исходную позицию походки галоп, если в такой перестройке есть необходимость. В момент начала маневра t_0 имеем

$$\zeta_c(t_0) = h - x^* - a/2, \quad \mathbf{r}_i(t_0) = (\xi_i(t_0), \eta_i(t_0), \zeta_i(t_0)) = \begin{pmatrix} \zeta_c + a/2 - x^*, & i = 5, 6, \\ (-1)^i x_f, 0, & \zeta_c, & i = 3, 4, \\ \zeta_c - a/2 + x^*, & i = 1, 2, \end{pmatrix}$$

где ζ_C — аппликата центра корпуса.

На первых трех этапах производится подготовка к повороту корпуса в горизонтальное положение над вершиной. Стопы передних ног устанавливаются ниже верхней кромки столба на небольшое расстояние 4ϵ , задние смещаются ближе к корпусу, средние — дальше. Такое расположение точек опоры обеспечит уменьшение необходимого для совершения поворота силового момента. Сдвиг 4ϵ обусловлен тем, что на границе вершины неоднозначна внешняя нормаль к поверхности. Компоненты радиус-векторов точек постановки имеют вид

$$\begin{aligned} \eta_i(t_1) &= 0, & \xi_i(t_1) &= (-1)^i x_f, & \zeta_i(t_1) &= h - 4\epsilon, & i &= 5, 6, \\ \eta_j(t_2) &= -0.37r, & \xi_j(t_2) &= (-1)^j \sqrt{(x_f)^2 - [\eta_j(t_2)]^2}, & \zeta_j(t_2) &= \zeta_j(t_0) + 2.1(2x^*), & j &= 3, 4, \\ \eta_k(t_3) &= 0.59r, & \xi_k(t_3) &= (-1)^k \sqrt{(x_f)^2 - [\eta_k(t_3)]^2}, & \zeta_k(t_3) &= \zeta_k(t_0) + 2.85(2x^*), & k &= 1, 2. \end{aligned}$$

При $t_0 \leq t < t_3$ корпус перемещается вверх так, что его центр достигает верхней кромки, то есть $\zeta_C(t_3) = h$.

После этого траектория движения центра корпуса выбирается в виде эллипса, а сам корпус ориентируется по касательной к эллипсу. Поворот в горизонтальное положение осуществляется за один этап $t_3 \leq t < t_4$, он сопровождается переносом передних ног в точки опоры на вершине. Формулы, определяющие траекторию центра C в абсолютной системе координат, имеют вид

$$\xi_C = 0, \quad \eta_C = d \cos \tau, \quad \zeta_C = h + 0.67h_0 \sin \tau, \quad \tau = \frac{\pi}{2(t^*)^3} (t - t_3)^3.$$

Степень 3 в выражении для τ обусловлена тем, что при начале маневра скорость и ускорение корпуса отсутствуют. Абсолютные координаты точек крепления имеют вид

$$\mathbf{p}_i(t) = ((-1)^i b/2, \eta_C - p_{xi} \sin \tau, \zeta_C + p_{xi} \cos \tau).$$

Далее при $t_4 \leq t < t_7$ осуществляется перенос на вершину средних и задних ног. Компоненты радиус-векторов точек постановки, включая точки постановки передних ног при описанном повороте, имеют вид

$$\begin{aligned} \xi_i(t_4) &= (-1)^i 0.625r, & \eta_i(t_4) &= -\sqrt{r'^2 - [\xi_i(t_4)]^2}, & \zeta_i(t_4) &= h, & i &= 5, 6, \\ \xi_j(t_5) &= (-1)^j r', & \eta_j(t_5) &= 0.175r, & \zeta_j(t_5) &= h, & j &= 3, 4, \\ \xi_k(t_6) &= (-1)^k 0.625r, & \eta_k(t_6) &= \sqrt{r'^2 - [\xi_k(t_6)]^2}, & \zeta_k(t_6) &= h, & k &= 1, 2, \\ \xi_n(t_7) &= \xi_n(t_6), & \eta_n(t_7) &= 0, & \zeta_n(t_7) &= h, & n &= 3, 4. \end{aligned}$$

Здесь $r' = 0.875r$ предохраняет стопы от попадания на край верхней площадки, значение $\eta_j(t_5)$ позволяет сохранить достаточный запас устойчивости при переносе задних ног на вершину столба. На шестом этапе, во время переноса задних ног на вершину, корпус поднимается до уровня $h + 1.25h_0$, причем начинается подъем в момент времени $t_5 + t^*/8$. Это, в сочетании со значением $\eta_j(t_5)$, позволяет избежать во время переноса пересечения задних и средних ног. Перенос средних ног на седьмом этапе обеспечивает финальную симметричную позицию робота на вершине столба. Ноги, перенос которых не производится на каждом из этапов, поддерживаются в опорном положении.

Весь маневр проиллюстрирован на рис. 7. Цифрами в кружочках обозначены номера стоп ног, находящихся в соответствующей точке. Дуги, соединяющие две последовательные точки положения стоп, изображают траектории переноса стоп. Показаны последовательные положения только ног с четными номерами. Ноги с нечетными номерами совершают аналогичные движения в соответствии с походкой галоп. Индексы при цифрах в кружочках обозначают номер этапа (0 соответствует начальной позиции робота). Аналогично C_i обозначают последовательные положения центра корпуса.

Маневр перехода с вершины столба на уступ представляет собой еще один типовой элемент движения. Сложность его зависит от соотношения высот столба и уступа. На рис. 8 изображен процесс перехода на уступ, когда столб оказывается выше уступа на величину $0.6a$. Обозначения совпадают с принятыми для рис. 7. Переход на уступ осуществляется с наклоном корпуса параллельно траектории центра масс корпуса на участке C_7, C_{12} . Сначала корпус приподнимается и отводится назад, чтобы обеспечить статическую устойчивость при переносе передних ног и освободить их от возможности пересечения со средними ногами. Затем передние ноги выносятся вперед без опоры о столб. Робот приседает, передние ноги опираются о столб в точках, соответствующих третьему этапу. После этого корпус наклоняется в сторону уступа таким образом, что его передний край остается неподвижным, а задний поднимается из-за того, что задние и средние ноги распрямляются должным образом. Далее корпус движется по направлению к уступу вниз, как бы скользя вдоль линии C_7, C_{12} , и это движение сопровождается соответствующими переносами ног, как показано на рисунке. Когда все ноги будут перенесены на уступ, задний край корпуса опустится, робот примет горизонтальное положение, а затем после ряда перестановок ног и подъема корпуса перейдет к позиции для движения по уступу походкой трешки.

На рис. 9 показан маневр перехода на уступ в случае, когда высота уступа больше, чем высота столба, на $0.35a$. Высота уступа в данном случае ограничена из-за того, что коленные шарниры робота могут соприкоснуться с опорной поверхностью, что не допускается принятой постановкой задачи. В данном случае маневр осуществляется без наклона корпуса. Сначала корпус поднимается на требуемую высоту и одновременно отодвигается назад для обеспечения достаточного запаса статической устойчивости, а уже затем осуществляет перемещение корпуса в сторону уступа, сопровождаемое необходимыми переносами ног.

Наконец, рассмотрим вариант, когда высота столба значительно больше, чем высота уступа, например, на высоту корпуса робота. В этом случае роботу нет необходимости ползти вверх до вершины столба. После того, как нижний край корпуса окажется выше уступа, робот может осуществить движение боком поперек вертикальных образующих столба так, чтобы его корпус оказался над уступом (рис. 10). Затем робот слезает на уступ задом наперед и оказывается ориентированным своей передней частью к уступу. Далее ему требуется выполнить разворот на 180° на уступе, чтобы продолжать движение в направлении от столба. В силу симметрии расположения ног на корпусе сползание робота на уступ задом наперед вполне аналогично уже отработанной операции перехода робота со столба на горизонтальную поверхность в прямом направлении.

Пусть t_0 — момент начала поперечного движения. Номер этапа n , соответствующего текущему моменту времени t , вычисляется по формулам

$$n' = \lfloor t/t^* \rfloor + 1, \quad g = \lfloor ((n' - (n' - 1) \bmod 2) - 1) / 2 \rfloor, \quad n = \lfloor (n' - 1) / 2 \rfloor + 1, \quad t := t - 2gt^* - t_0,$$

где функция «mod» вычисляет остаток от деления. Таким образом, n принимает значения 1, 2.

Пусть $\sigma = \pi/6$ — полярный угол продвижения центра робота поперек поверхности столба за время, равное $2t^*$. Его вершина лежит на оси столба.

На каждом из этапов

$$\tau = 0.5\sigma(t - (n-1)t^*)/t^* + 0.5(2g + (n-1))\sigma, \\ \mathbf{p}_i(t) = (-d \sin \tau + p_{yi} \cos \tau, d \cos \tau + p_{yi} \sin \tau, p_{\zeta_i}(t_0)),$$

где $p_{\zeta_i}(t_0)$ — ζ -овая компонента $\mathbf{p}_i(t_0)$.

Стопы переносятся тройками, в соответствии с походкой трешки:

$$\mathbf{r}_i(t_2) = (\xi_i(t_1) \cos \sigma - \eta_i(t_1) \sin \sigma, \xi_i(t_1) \sin \sigma + \eta_i(t_1) \cos \sigma, \zeta_i(t_1)), \quad i = \begin{cases} 1, 4, 5, & n = 1, \\ 2, 3, 6, & n = 2, \end{cases}$$

вторая тройка поддерживается в опоре:

$$k_d = (r - \varepsilon) / \sqrt{\xi_i(t_1)^2 + \eta_i(t_1)^2}, \quad \mathbf{r}_i(t) = (k_d \xi_i(t_1), k_d \eta_i(t_1), \zeta_i(t_1)), \quad i = \begin{cases} 1, 4, 5, & n = 2, \\ 2, 3, 6, & n = 1. \end{cases}$$

Вектора \mathbf{e}_n , задающие ориентацию шаговых циклов, находятся в зависимости от τ следующим образом:

$$\Gamma = \{\tau / (2\pi)\} 2\pi, \quad \mathbf{e}_n = \begin{cases} ((-1)^i, 0, 0), & \Gamma < \pi/2 - \sigma/2, \\ (0, (-1)^i, 0), & \Gamma < \pi - \sigma/2, \\ (0, (-1)^{i+1}, 0), & \Gamma < 2\pi - \sigma/2, \\ ((-1)^i, 0, 0), & \Gamma \geq 2\pi - \sigma/2, \end{cases}$$

где «{ }» дробная часть числа.

При окончательном формировании программного движения робота описанные выше этапы преодоления препятствий, будучи отработаны каждый по отдельности, должны быть состыкованы так, чтобы получился достаточно гладкий программный закон движения корпуса. Наилучшее отслеживание получается, когда отсутствуют скачки первых производных программного движения. Указанная стыковка занимает некоторый интервал изменения параметра t и осуществляется при всяком изменении режима движения корпуса. Например, при переходе от состояния покоя к равномерному движению, при изменении ориентации корпуса и т.д.

Пусть, например, при $t_0 \leq t < t_1$ η -овая координата центра корпуса η_C изменяется линейно от значения η_{C0} до η_{C1} . Вариант с добавленной состыковкой выглядит следующим образом:

$$\eta_C = (1 - \lambda)\eta_{C0} + \lambda\eta_{C1},$$

$$\begin{aligned} \lambda &= w(t - t_0)^2 / 2, \quad \dot{\lambda} = w(t - t_0), & t_0 \leq t < t_0 + \sigma, \\ \lambda &= w\sigma^2 / 2 + w\sigma(t - t_0 - \sigma), \quad \dot{\lambda} = w\sigma, & t_0 + \sigma \leq t < \tilde{t}_1 - \sigma, \\ \lambda &= w\sigma^2 / 2 + w\sigma(t - t_0 - \sigma) - w(t - \tilde{t}_1 + \sigma)^2 / 2, \quad \dot{\lambda} = w\sigma - w(t - \tilde{t}_1 + \sigma), & \tilde{t}_1 - \sigma \leq t < \tilde{t}_1, \\ \lambda &= 1, \quad \dot{\lambda} = 0, & \tilde{t}_1 \leq t < t_1, \end{aligned}$$

где $\tilde{t}_1 = t_0 + 0.98t^*$, $\sigma = t^* / 4$, $w = [\sigma(t^* - \sigma)]^{-1}$. Таким образом, λ изменяется от 0 до 1 при $t_0 \leq t < t_1$ со сглаживанием вблизи границ полуинтервала: $\dot{\lambda}$ линейно выходит на константу в начале этапа и линейно сходит с нее до нуля в конце (рис. 11).

2. Переход по брусу на другой уступ. Маневр осуществляется в 4 стадии: подход по исходному уступу к его границе походкой трешки с использованием широкой следовой колеи; переход на узкую следовую колею и в исходную позицию для движения по брусу; движение по брусу на другой уступ; переход на нем в стандартную позицию походки «трешки» для движения по широкой колее.

Два уступа и брус представляют собой три параллелепипеда (рис. 12). Введем обозначения для габаритов препятствий: a_h, b_h, c_h , и бруса: a_b, b_b, c_b . Абсолютные координаты их центров имеют вид: $(0, 0, c_h / 2)$ для уступа, с которого начинается движение (назовем его первым); $(0, -b_b / 2 - b_h / 2, c_h - c_b / 2)$ для бруса; $(0, -b_h - b_b, c_h / 2)$ для уступа, до которого нужно дойти (назовем его вторым).

Построение движения. Кроме уже упоминавшейся необходимости преодолевать вырождение шарнирных углов при переходе на узкую следовую колею, движение по ней имеет еще одну особенность: при перемещении стопы вперед колено должно перемещаться назад, иначе происходит взаимное пересечение ног из-за больших углов поворота плоскостей ног.

Опишем стадии, из которых состоит маневр.

2.1. Подход к границе первого уступа осуществляется трешками, по широкой следовой колее $(-1)^i x_f$.

2.2. Переход на узкую следовую колею и в исходную позицию для движения по брусу осуществляется за 7 этапов.

2.2.1. На этом этапе корпус приводится в состояние покоя после окончания предыдущей стадии. Переносы ног не производятся.

2.2.2. Корпус поднимается вертикально вверх на $0.1a$ относительно исходной позиции для предотвращения в дальнейшем взаимного пересечения ног.

2.2.3, 2.2.4. Тройки стоп переносятся таким образом, чтобы плоскости ног в конце переносов были перпендикулярны продольной оси корпуса ($\alpha_i = 0$), т.е.

а) абсолютная ордината точки постановки i -ой ноги должна совпадать с абсолютной ординатой точки крепления на момент начала переноса;

б) сохраняется широкая следовая колея.

Ниже приведены последовательные (для моментов времени t_n) абсолютные радиус-векторы точек постановки ног.

$$\mathbf{r}_i(t_n) = \begin{cases} ((-1)^i x_f, p_{\eta_i}(t_{n-1}), c_h), & i = \begin{cases} 2, 3, 6, & n = 3, \\ 1, 4, 5, & n = 4, \end{cases} \\ \mathbf{r}_i(t_{n-1}), & i = \begin{cases} 1, 4, 5, & n = 3, \\ 2, 3, 6, & n = 4. \end{cases} \end{cases}$$

2.2.5, 2.2.6. Аналогично предыдущим двум этапам стопы переносятся на узкую следовую колею, $r_{\xi_i}(t_n) = (-1)^i x_b a_b / 2$, $x_b < 1$. Стопы перемещаются под корпус в строго вертикальных плоскостях.

2.2.7. Средние ноги распрямляются в боковых направлениях так чтобы $\beta_3 = \beta_4 = \pi/2$, $\gamma_3 = 0$, $\gamma_4 = \pi$.

$$\mathbf{r}_i(t_7) = \begin{cases} (p_{\xi_i} + (-1)^i (b/2 + l_1 + l_2), p_{\eta_i}, p_{\zeta_i}), & i = 3, 4, \\ \mathbf{r}_i(t_6), & i = 1, 2, 5, 6. \end{cases}$$

Запас $b/2$ в выражении для первой компоненты введен для гарантированного и быстрого распрямления ног. На этом и последующих этапах, вплоть до окончания движения по брусу полагается $\alpha_3 = \alpha_4 = 0$.

2.3. Движение по брусу организовано таким образом, что корпус перемещается вперед только на этапах совместного стояния передних и задних ног. Ноги переносятся в режиме диагональной походки парами (1, 6) и (2, 5). В начальный момент времени движения по брусу проекция центра масс на поверхность бруса находится в точке пересечения отрезков, соединяющих пары стоп (1, 6) и (2, 5). Пара (1, 6) переносится вперед, в опоре остаются только две ноги, и статическая устойчивость отсутствует. После постановки этой пары ног корпус передвигается так, чтобы его центр достиг точки пересечения отрезка, соединяющего точки постановки пары (1, 6) и продольной оси бруса. Далее переносится вперед пара (2, 5) в точки опоры, симметричные для точек постановки (1, 6). Далее весь процесс повторяется, начиная с пары (2, 5).

Формулы для расчета координат точек постановки для пары (1, 6) имеют вид

$$\mathbf{r}_i(t_k) = ((-1)^i x_b a_b / 2, p_{\eta_i}(t_{k-1}) - 4d_x, c_h), \quad i = 1, 6.$$

В соответствии со сказанным, после переноса пары (1, 6) на этапе совместного стояния передней и задней пар ног центр корпуса переносится в точку

$$\mathbf{r}_0(t_{10}) = (0, r_{\eta_6}(t_8) - r_{\xi_6}(t_8)(r_{\eta_1}(t_8) - r_{\eta_6}(t_8))/(r_{\xi_1}(t_8) - r_{\xi_6}(t_8)), r_{\zeta_0}(t_8)),$$

здесь t_8 , t_{10} соответствуют моментам начала и окончания переноса корпуса.

2.4. Когда все четыре стопы робота оказываются на втором уступе, выполняется действия, соответствующие стадии 2.2 в обратном порядке.

Стабилизация движения при нарушении статической устойчивости. Стабилизация вертикального положения корпуса осуществляется за счет согласованного движения средних ног по углу β . Стабилизирующий момент M_3^β для угла β_3 вычисляется по формуле

$$M_3^\beta = -(c_3\dot{\xi}_c + c_4\ddot{\xi}_c)/2 - M_g, \quad M_g = (m_1 + m_2)g \frac{3l_1 + l_2}{4} \sin \beta_3,$$

где $\xi_c, \dot{\xi}_c$ — соответственно величина отклонения центра масс робота от оси бруса и производная по времени от этой величины, M_g — момент силы тяжести третьей ноги относительно ее точки крепления к корпусу, g — ускорение свободного падения. Движение четвертой ноги относительно корпуса кососимметрично движению третьей. Соответствующий управляющий момент задается по формуле

$$M_4^\beta = c_1(\chi_1(\beta_4 - \beta_3) + \chi_2\dot{\beta}_4) - c_2\dot{\beta}_4,$$

где коэффициенты совпадают с принятыми в работе [12].

Программные значения углов $\gamma_3 = 0$, $\gamma_4 = \pi$ соответствуют распрямленным ногам.

Для того, чтобы 3 и 4 ноги не совершали кругового движения относительно корпуса, на этапе совместного стояния передних и задних ног осуществляется возврат средних ног в соответствии с формулой

$$M_3^\beta = c_5(\chi_1(\beta_3 - \pi/2) + \chi_2\dot{\beta}_3) - c_2\dot{\beta}_3 - M_g.$$

При этом четвертая нога по-прежнему кососимметрично отслеживает движение третьей.

На рис. 13 представлены фрагменты компьютерного моделирования динамики робота при движении по брусу. Робот сохраняет равновесие в процессе всего движения. При этом размах колебаний средних ног остается в разумных пределах. Стопы средних ног не задевают опорную поверхность. В том случае, когда реактивного момента средних ног окажется недостаточно, с целью стабилизации неустойчивого положения робота может использоваться изображенный на рис. 13 маховик [15]. Преимущество использования маховика в том, угловое положение маховика при стабилизации не имеет значения, что несколько упрощает задачу сохранения равновесия робота.

3. Компьютерное моделирование. Конкретные параметры компьютерной среды совпадают с принятыми в работе [12]. Расчеты [14, 16] показали, что для реализации требуемого движения во всех описанных случаях преодоления препятствий требуются вполне доступные для современных электроприводов шарнирные моменты. На рис. 14 представлены графики шарнирных моментов средней ноги при движении поперек столба (походка трешки) и сплзания с него задом наперед. В качестве масштабного коэффициента выбрана величина 75,2 Нм, приблизительно равная моменту силы тяжести аппарата относительно оси Оξ. Кружками отмечен момент по углу β , квадратиками — момент по углу γ и ромбиками — момент по углу α . Видим, что наибольшие значения принимает момент по углу β , а наименьшие — момент по углу α .

4. Выводы. Результаты компьютерного моделирования, представленные в настоящей статье, получены с помощью специально сконструированной виртуальной среды, позволяющей экспериментировать с моделью динамики робота аналогично тому, как это можно делать в натуральных экспериментах. В частности:

1. Показано существование комфортабельного решения задачи о преодолении сложной комбинации препятствий в виде столба и высокого уступа с использованием сил кулоновского трения с практически реализуемым коэффициентом трения, равным 1.

2. Сложность маневров, выполняемых для решения задачи, и сама возможность ее решения существенно зависят как от геометрических характеристик робота, так и отношения размеров препятствий и робота.

3. В задаче залезания при помощи сил сухого трения шестиногого робота на угол, имеющий раcтвор $\pi/2$ показано существование движения, решающего задачу при коэффициенте трения 1.1.

4. В задаче о ходьбе шестиногого робота по узкому горизонтальному брусу построено управление маховыми движениями средних ног, позволяющее стабилизировать положение робота на этапах потери статической устойчивости без нарушения кинематических и конструктивных ограничений.

5. Представлены результаты моделирования динамики робота при реализации им указанных маневров, свидетельствующие о принципиальной практической реализуемости построенного движения.

Список литературы

1. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
2. Pugh D.R., Ribble E.A., Vohnout V.J., Bihari T.E., Walliser T.M., Patterson M.R., Waldron K.J. Technical Description of the Adaptive Suspension Vehicle. *International Journal of Robotics Research*, vol. 9, No. 2, 1990, pp.24-42.
3. Гурфинкель В.С., Гурфинкель Е.В., Девянин Е.А., Ефремов Е.В., Жихарев Д.Н., Ленский А.В., Шнейдер А.Ю., Штильман Л.Г. Макет шестиногого аппарата с супервизорным управлением. Отчет ИМ МГУ, 1978, № 2036.
4. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Донцов В.Е., Герхен-Губанов Г.В., Веселов В.А., Кузнецов В.Г. Лабораторный макет интегрального шагающего робота. — Тр. VII Всесоюзного совещания по проблемам управления. Минск, 1977.
5. Mcghee R.B., Orin D.R., Pugh D.R. and Patterson M.R. A Hierarchically-Structured System for Computer Control of a Hexapod Walking Machine. *Theory and Practice of Robots and Manipulators, Proc. of RoManSy-84 Symposium*, ed. by Morecki et al. Hermes Publishing Co. London, 1985.
6. Ilg W., Albie J., Berns K. Learning of Posture Control Mechanisms for the Four-Legged Walking Machine BISAM // *Proc. Third Internat. Conf. CLAWAR-2000*. Madrid, Spain, 2000.
7. Wong H.C., Orin D.E. Control of a Quadruped Standing Jump and Running Jump Over Irregular Terrain Obstacles // *Autonomous Robots*. 1995. V. 1.
8. De Man H., Lefeber D., Vermeulen J. Design and Control of a One-Legged Robot Hopping on Irregular Terrain // *Proc. Euromech 375: Biology and Technology of Walking*. Munich, Germany, 1998.
9. Nishi A., Wakasugi Y., Watanabe K. Design of a robot capable of moving on a vertical Wall // *Advanced Robotics*. 1986. V. 1. № 1.
10. Gradetsky V., Kalinichenko S., Kravchuk L. et al. Stability Motion Problem for Wall Climbing Robot with Transition Possibilities // *Proc. Third Internat. Conf. CLAWAR-2000*. Madrid, Spain, 2000.
11. Golubev Yu.F., Korianov V.V. Motion design for six-legged robot overcoming the vertical column by means of friction forces // *Proc. 6-th Internat. Conf. CLAWAR-2003*. Catania, Italy, 2003.
12. Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Построение движений инсектоморфного робота, преодолевающего комбинацию препятствий с помощью сил кулоновского трения. *Известия РАН, ТИСУ*, 2005, № 3, с.143-155.
13. Голубев Ю.Ф. Механические системы с сервосвязями. *ПММ*, т.65, вып.2, с.211-224, 2001.
14. <http://www.umlab.ru>

15. Безнос А.В., Гришин А.А., Ленский А.В., Охоцимский Д.Е., Формальский А.М. Управление при помощи маховика маятником с неподвижной точкой подвеса. Известия РАН, ТИСУ, 2004, № 1.
16. Pogorelov D.Yu. On numerical methods of modeling large multibody systems // Mech. and Mash. Theory. 1999. V. 34. № 5.

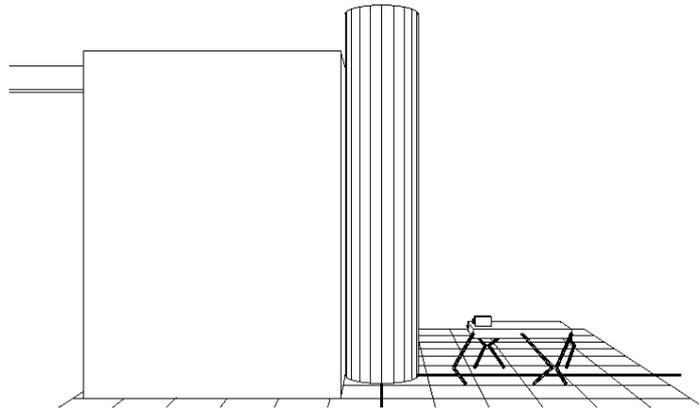


Рис. 1. Исходная позиция робота

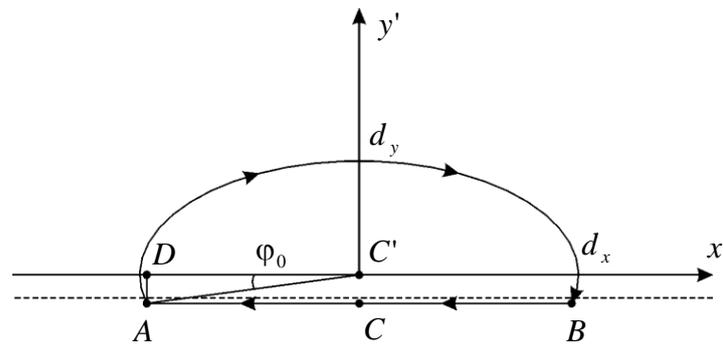


Рис. 2. Шаговый цикл

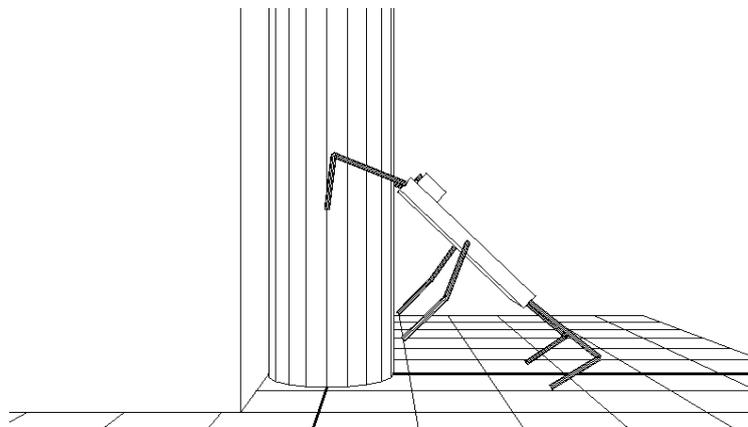


Рис. 3. Перенос средних ног на столб

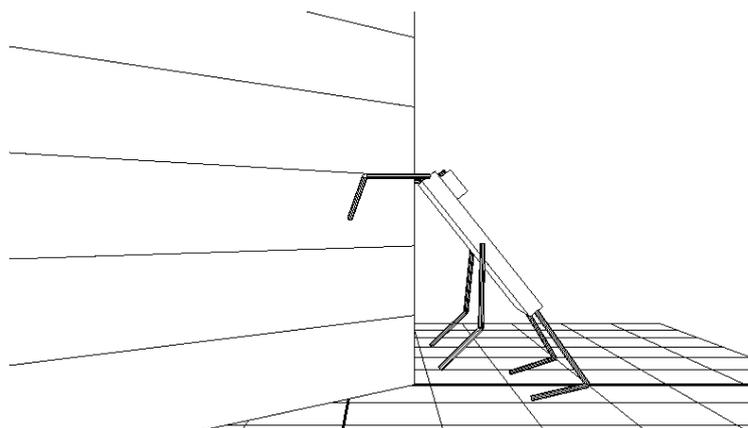


Рис. 4. Этап 3, перенос средних ног на угол

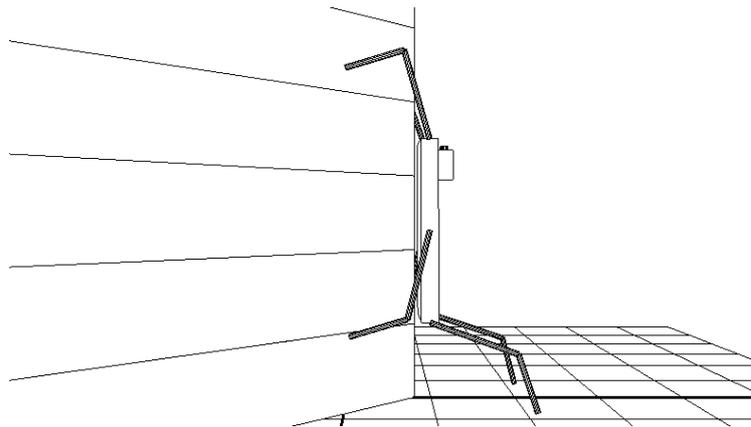


Рис. 5. Этап 5, начальная позиция

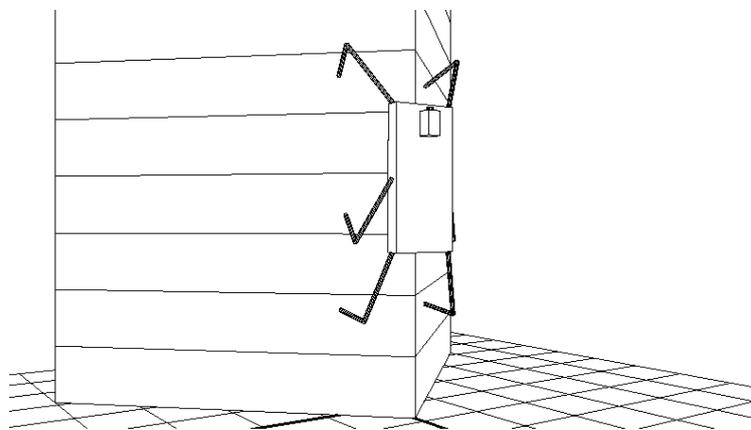


Рис. 6. Движение по углу вверх

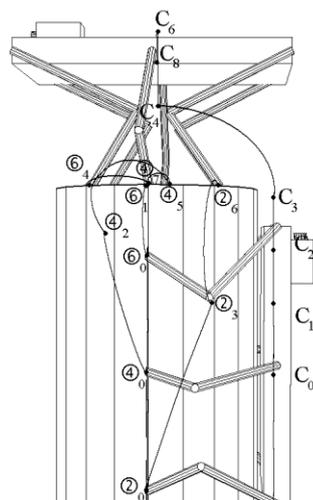


Рис. 7. Маневр залезания на вершину столба

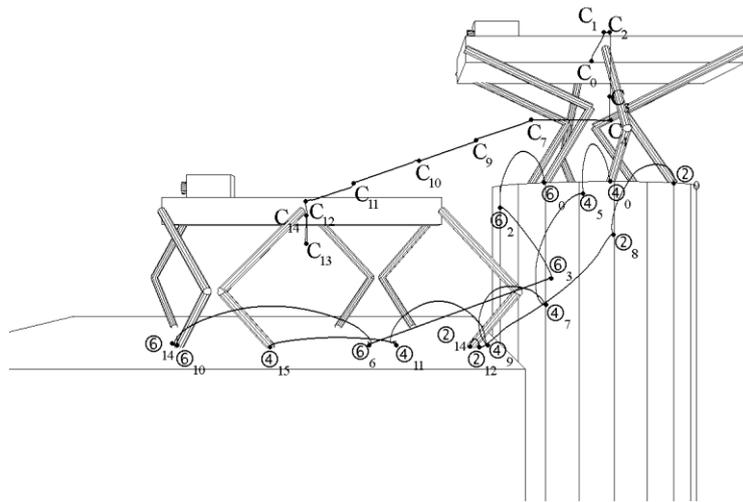


Рис. 8. Маневр перехода со столба на уступ с наклоном корпуса

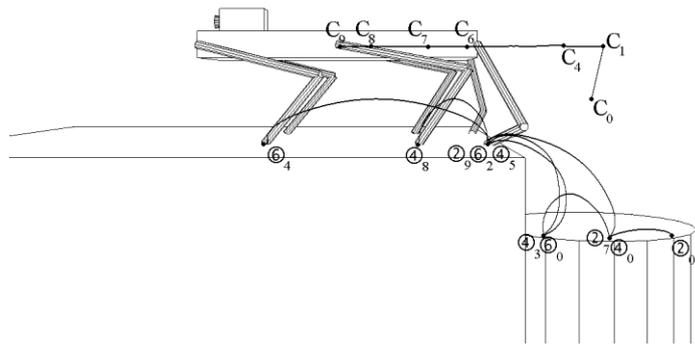


Рис. 9. Маневр перехода со столба на более высокий уступ

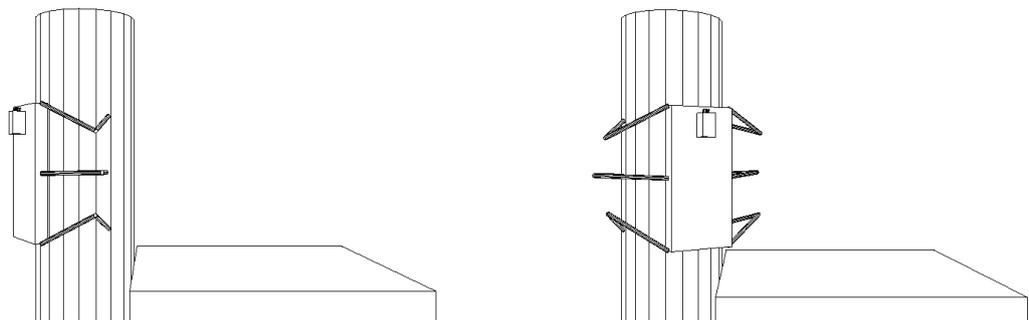


Рис. 10. Поперечное движение

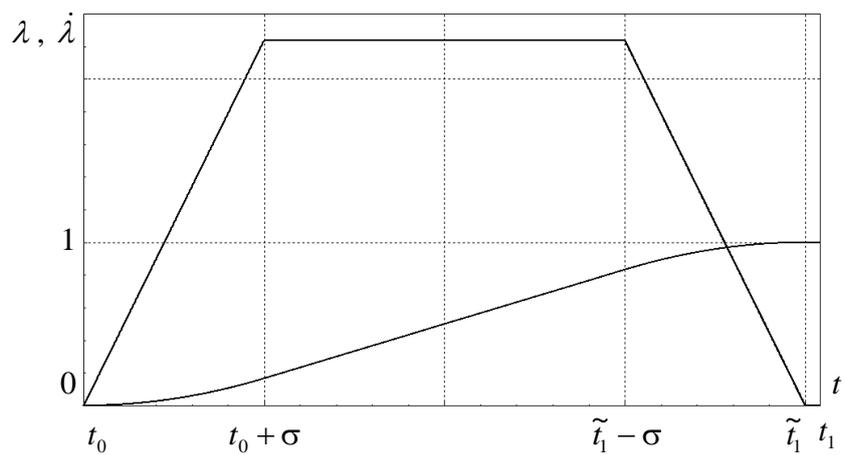


Рис. 11. Зависимость коэффициентов λ , $\dot{\lambda}$ от времени.

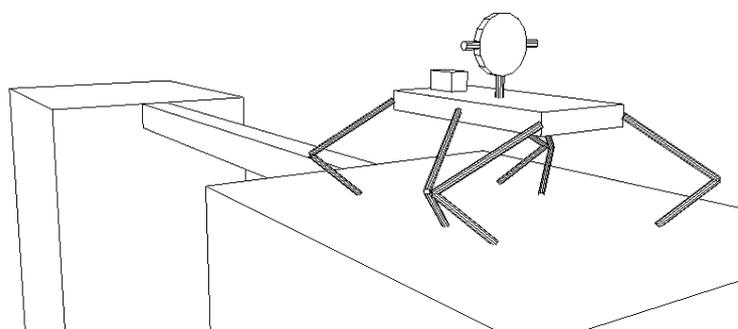


Рис. 12. Подход по уступу к брусу

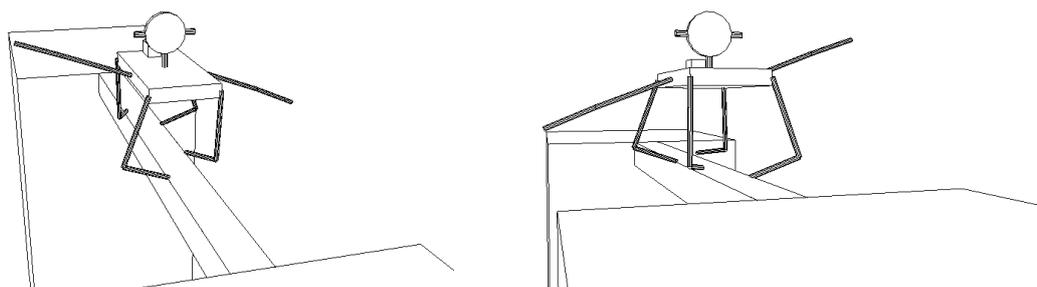


Рис. 13. Движение по брусу

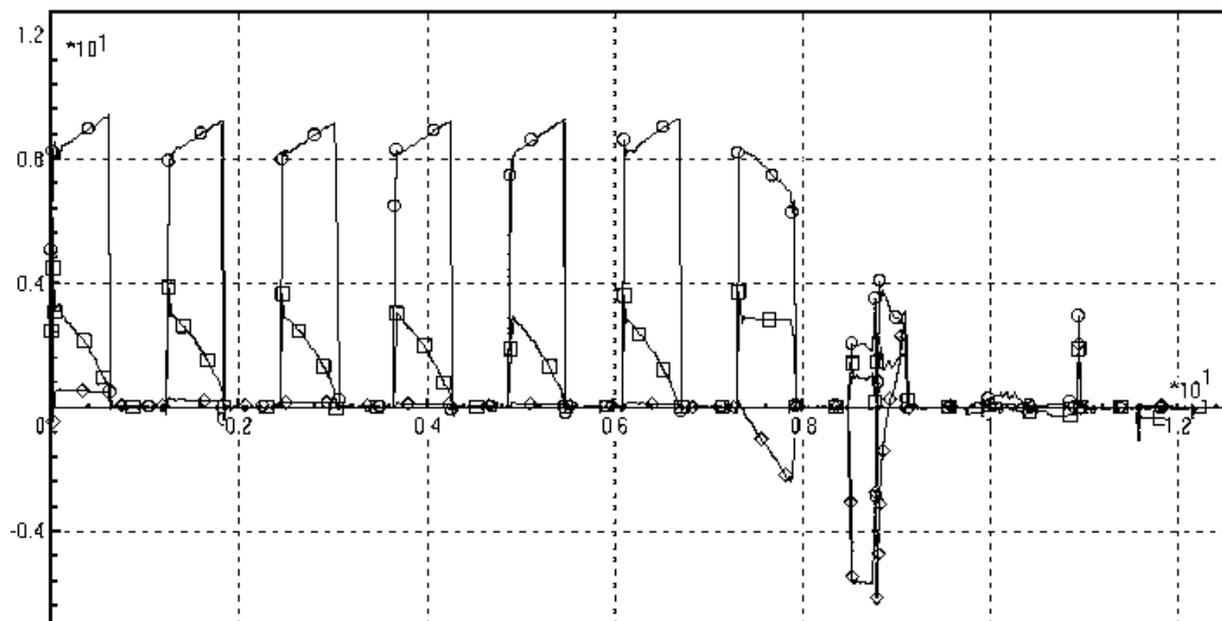


Рис. 14. Шарнирные моменты средней ноги при поперечном движении

Computer investigation of dynamics and motion control of the electro-mechanic climbing robot. Yu.F. Golubev, V.V. Korianov.

The problem on overcoming by six-legged insectomorphic robot of the standalone high obstacles and their combinations is investigated. The line of obstacles includes the vertical cylindrical column and two shelves with the vertical walls. The shelves are connected on the level of the supporting plates by the narrow beam. One of the shelves stands right up to the column. The different maneuvers depending on the combination of the heights of the shelf and the column are analyzed. During the motion on the beam the middle legs are used as a flywheel for stabilization on the phases when the static stability is lost. The problem on climbing to the vertical right angle (corner of a house) is investigated as well. The robot's feet are not equipped by the vacuum suckers or by the others special devices, construction of motions made with the assumption that there is a Coulomb friction only at the supporting points. Some results of the 3D computer simulation of the full robot's dynamics are presented.

Голубев Юрий Филиппович, 1941 г.р., д.ф-м.н., проф. кафедры теоретической механики и мехатроники механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Домашний адрес: 129010, г. Москва, Проспект мира 38, кв. 37. Р.т. 250-78-77.

Корянов Виктор Владимирович, 1979 г.р., аспирант механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Домашний адрес: 119234, Москва, Воробьевы горы, ГЗ МГУ, корп. Б, комн. 1564. Р.т. 250-79-87.