

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ДВУНОГОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

Хусаинов Рамиль Расимович¹, Климчик Александр Сергеевич¹, Магид Евгений
Аркадьевич²

¹ Университет Иннополис, Иннополис, r.khusainov, a.klimchik @innopolis.ru

² Казанский федеральный университет, Казань, magid@it.kfu.ru

Аннотация

В данной работе рассмотрена задача оптимизации параметров траекторий движения звеньев педипуляторов двуногого шагающего робота (ДШР). С этой целью разработана математическая модель процесса перемещения ДШР по ровной поверхности, осуществляющая учет массово-геометрических параметров звеньев педипулятора робота и параметров, определяющих траектории движения звеньев и критерии равновесия. Предложена методика оптимизации параметров движения ДШР для модели линейного обратного маятника по критериям максимальной скорости и энергоэффективности движения с сохранением равновесия, включающая в себя учет максимальных углов поворота, моментов сил и мощности приводов в суставах робота, а также критерий сохранения равновесия робота и непроскальзывания. Результаты расчётов для робота AR-601M показывают, что внедрение метода оптимизации параметров шага робота способствует уменьшению потребления энергии при движении ДШР и повышает скорость ходьбы. Также предложенная методика позволяет оценить необходимые характеристики приводов для осуществления движения с заданной скоростью на стадии проектирования.

Ключевые слова: робототехнические системы, двуногий шагающий робот, оптимизация траектории

OPTIMIZATION OF THE MOTION PARAMETERS IN BIPEDAL ROBOT WALKING

Khusainov R R¹, Klimchik A S¹, Magid E A²

¹ Innopolis University, Innopolis, r.khusainov, a.klimchik @innopolis.ru

² Kazan State University, Kazan, magid@it.kfu.ru

Abstract

The paper discusses optimization of trajectory parameters for bipedal robots. For this purpose, a mathematical model has been developed for robot bipedal walking on a flat surface, taking into account mass-geometric parameters of the robot pedipulator links and parameters that determine paths of the links and equilibrium criteria. A technique is proposed for optimizing locomotion parameters of bipedal walking with a linear inverted pendulum model according to the criteria for maximum speed and energy efficiency of movement while maintaining balance, which takes into account constraints in the robot joints. The results of calculations for AR-601M robot show that our method for robot step parameters optimization helps to reduce energy consumption

during the robot motion and increases the walking speed. In addition, the proposed method allows to evaluate at the design stage the required characteristics of the robot drives in order to guarantee robot locomotion with a given speed.

Keywords: robotic systems, bipedal walking, trajectory optimization

Введение

В настоящее время для мировой науки разработка двуногих шагающих роботов (ДШР) является одним из приоритетных научно-технических направлений исследований. ДШР являются единственным универсальным типом робототехнических систем, которые одинаково хорошо способны выполнять многочисленные задачи. Перемещение ДШР с сохранением равновесия при одновременной высокой энергоэффективности становится их критически важным свойством.

Большинство алгоритмов для стабильной походки двуногого робота выбирают движение суставов ног, которые определяют движение перемещаемой ноги, без учета оптимальности траектории. В данной статье рассмотрена задача оптимизации параметров траектории движений робота с учетом различных ограничений, минимизации энергопотребления и максимизации скорости движения.

Оптимизация параметров шага

Задача оценки оптимальных параметров шага представляет большой интерес с точки зрения энергоэффективности и скорости походки с учетом кинематических и силовых ограничений, налагаемых на суставы робота [1-6].

В задаче оптимизации для упрощения и ускорения расчетов используется модель робота с пятью звеньями в сагиттальной и тремя звеньями во фронтальной плоскости (рисунок 1). Начало системы координат лежит в точке опоры стопы робота. Положение робота задается координатами точки бедра (x_h, y_h, z_h) и перемещаемой стопы робота (x_f, y_f, z_f) , показанными на рисунке. Предполагается, что туловище робота сохраняет вертикальную ориентацию во время движения.

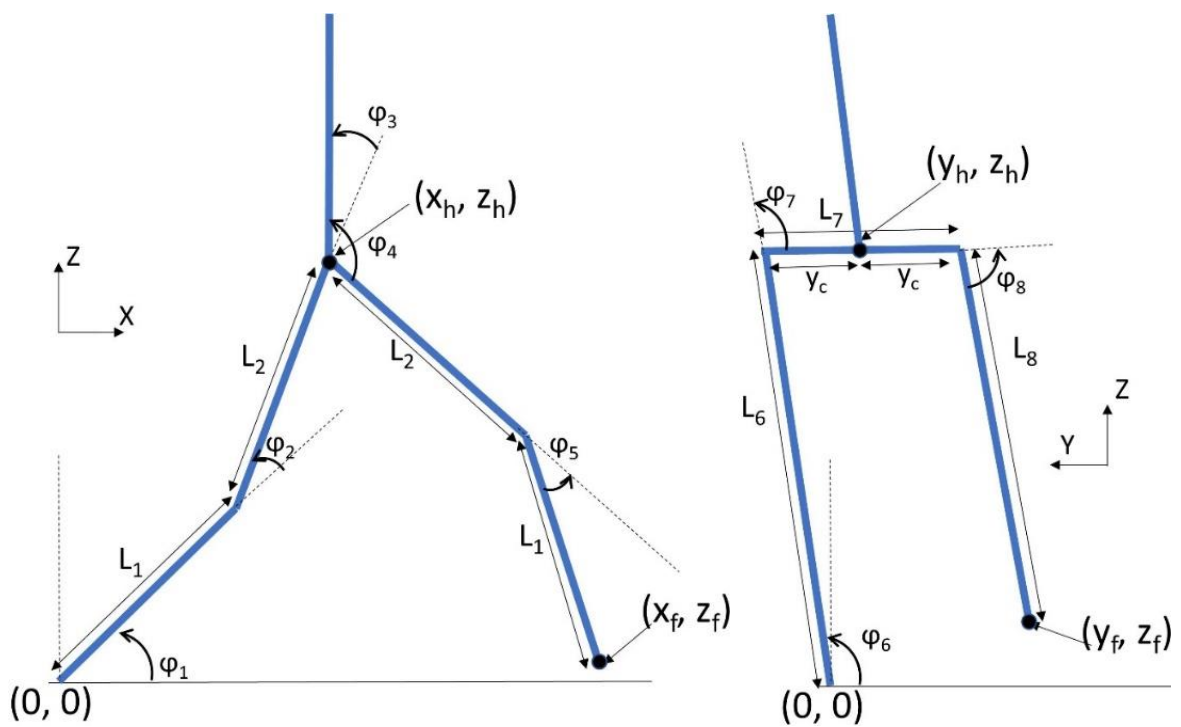


Рисунок 1. Пятизвенная и трехзвенная модели робота в сагиттальной и фронтальной плоскостях с обозначенными точками бедра и стопы.

При движении туловище сохраняет вертикальное положение. Поэтому, зная относительное расположение центра масс и точки бедра и задав траекторию движения центра, можно однозначно определить траекторию движения точки бедра. Расчеты, произведенные на реальном роботе, показывают, что положение центра масс лежит очень близко к точке тазобедренного сустава. Поэтому можно сделать допущение, что положение центра масс робота и точки на тазобедренном суставе, показанной на рисунке 1, совпадают. При этом высота движения тазобедренного сустава z_h равна высоте движения центра масс робота за вычитанием высоты стопы.

Траектория движения центра масс x_{CoM} в задаче оптимизации состоит из трех фаз. Первая, длительностью t_0 , и последняя представляют собой равномерное движение со скоростью V_1 в фазе опоры на две ноги и равномерное движение со скоростью V_2 в фазе, когда центр масс робота лежит в площади опоры стопы [7]. Движения центра масс вдоль оси X и Y задаются как:

$$\begin{aligned}
x_{CoM} &= -0.5L + V_1 t \text{ ЕСЛИ } t < t_0 \\
x_{CoM} &= C_1 e^{w_x(t-t_0)} + C_2 e^{-w_x(t-t_0)} + \frac{d}{w_x^2}, w_x = \sqrt{\frac{g}{\alpha z_0}}, \text{ ЕСЛИ } t \leq t_0 + t_1 \\
x_{CoM} &= -d + V_2(t - t_0 - t_1) \text{ ЕСЛИ } t_0 + t_1 < t < 0.5T \\
y_{CoM} &= -y_0 + V_{y0} t \text{ ЕСЛИ } t < t_0 \\
y_{CoM} &= C_3 e^{w_y(t-t_0)} + C_4 e^{-w_y(t-t_0)} + \frac{s}{w_y^2}, w_y = \sqrt{\frac{g}{\beta z_0}}, \text{ ЕСЛИ } t \leq T - t_0 \\
y_{CoM} &= -y_0 - V_{y0}(t - T) \text{ ЕСЛИ } t > T - t_0
\end{aligned} \tag{1}$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned}
C_1 + C_2 + \frac{d}{w_x^2} &= -0.5L + V_1 t_0 \\
V_1 &= w_x(C_1 - C_2) \\
C_1 e^{w_x t_1} + C_2 e^{-w_x t_1} + \frac{d}{w_x^2} &= -d \\
V_2(0.5T - t_0 - t_1) &= d \\
V_2 &= w_x(C_1 e^{w_x t_1} - C_2 e^{-w_x t_1}) \\
C_3 + C_4 + \frac{s}{w_y^2} &= -y_0 + V_{y0} t_0 \\
C_3 e^{w_y(1-\gamma)T} + C_4 e^{-w_y(1-\gamma)T} + \frac{s}{w_y^2} &= -y_0 + V_{y0} t_0
\end{aligned} \tag{2}$$

где $\alpha z_0, \beta z_0$ - виртуальная высота движения центра масс в сагиттальной и фронтальной плоскостях, d, s - соответственно длина и ширина разрешенной области ТНМ, L - длина шага, T - время шага, y_0, V_{y0} - начальное положение и скорость центра масс во фронтальной плоскости. Движение перемещаемой стопы задается уравнениями:

$$\begin{aligned}
x_f &= -L \text{ ЕСЛИ } t < t_0 \\
x_f &= -L \cos\left(\frac{\pi}{T - \gamma T}(t - t_0)\right) \text{ ЕСЛИ } t \leq T - t_0 \\
x_f &= L \text{ ЕСЛИ } t > T - t_0
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
z_f &= 0 \text{ ЕСЛИ } t < t_0 \\
z_f &= 0.5h \left(1 - \cos \left(2 \frac{\pi}{T - \gamma T} (t - t_0) \right) \right) \text{ ЕСЛИ } t \leq T - t_0 \\
z_f &= 0 \text{ ЕСЛИ } t > T - t_0
\end{aligned} \tag{4}$$

где h – максимальная высота подъема стопы, γ - длительность фазы опоры на одну ногу.

Зная положение бедра и перемещаемой стопы, можно найти углы между звеньями робота $\varphi_{1...8}$. Для этого рассмотрим сначала в сагиттальной плоскости по отдельности опорную и перемещаемую ногу, каждая из которых является двухзвенным плоским манипулятором, для которого обратная задача кинематики решается с использованием геометрического подхода [8]. Для опорной ноги получим:

$$\begin{aligned}
\varphi_2 &= \arccos \left(\frac{x_h^2 + z_h^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right) \\
\varphi_1 &= \text{atan2}(z_h, x_h) - \text{atan2}(L_2 \sin \varphi_2, L_1 + L_2 \cos \varphi_2)
\end{aligned} \tag{5}$$

Аналогично для перемещаемой ноги:

$$\begin{aligned}
\varphi_5 &= -\arccos \left(\frac{(x_f - x_h)^2 + (z_f - z_h)^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right) \\
\varphi_4 &= -\frac{\pi}{2} + \left(\text{atan2}(z_f - z_h, x_f - x_h) - \text{atan2}(L_1 \sin \varphi_5, L_2 + L_1 \cos \varphi_5) \right)
\end{aligned} \tag{6}$$

Угол φ_3 находим из условия вертикальности туловища $\varphi_3 = \frac{\pi}{2} - \varphi_1 - \varphi_2$.

Для фронтальной плоскости из условия вертикальности туловища и с учетом расстояние между ногами $2y_c$ следует:

$$\begin{aligned}
\varphi_6 &= \frac{\pi}{2} + \text{atan2}(y_c + y_h, z_h) \\
\varphi_7 &= -\varphi_6 \\
\varphi_8 &= -\frac{\pi}{2} - \text{atan2}(y_f - y_h + y_c, z_h - z_f)
\end{aligned} \tag{7}$$

Длины звеньев голени и бедра во фронтальной плоскости можно выразить через углы как $L_6 = \frac{z_h}{\sin \varphi_6}$, $L_8 = \frac{z_f - z_h}{\sin \varphi_8}$. Отметим, что при этом, если

$L_6 > L_1 + L_2$ или $L_8 > L_1 + L_2$, то это означает невозможность конфигурации при данных координатах бедра и стопы.

Для расчета моментов в суставах помимо углов необходимо знать угловые скорости и угловые ускорения в суставах. Для сагиттальной плоскости их можно найти, используя выражения для угловых скоростей и ускорений в суставах манипулятора, выраженные через Якобиан:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1} \dot{\mathbf{X}} \\ \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{b} \\ \mathbf{b} &= \dot{\mathbf{X}} - \frac{d}{dt} \mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}\end{aligned}\quad (8)$$

где $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ - якобиан манипулятора, \mathbf{X} – вектор координат конечного звена манипулятора, где для опорной стопы $\mathbf{X} = [x_h, z_h]^T$, $\mathbf{q} = [\varphi_1, \varphi_2]^T$. Выразив координаты точки бедра через углы φ_1, φ_2 и посчитав частные производные, найдем Якобиан:

$$\mathbf{J}(\varphi_1, \varphi_2) = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \varphi_1 - L_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) & -L_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \\ L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & L_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \end{bmatrix}\quad (9)$$

и производную Якобиана по времени:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{J}(\varphi_1, \varphi_2) = \begin{bmatrix} -L_1 \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1 - L_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) & -L_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \\ -L_1 \sin \varphi_1 \dot{\varphi}_1 - L_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) & -L_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \end{bmatrix}\quad (10)$$

Для перемещаемой ноги имеем $\mathbf{X} = [x_f - x_h, z_f - z_h]^T$, $\mathbf{q} = [\varphi_4, \varphi_5]^T$, Якобиан:

$$\mathbf{J}(\varphi_4, \varphi_5) = \begin{bmatrix} -L_2 \cos \varphi_4 - L_1 \cos(\varphi_4 + \varphi_5) & -L_1 \cos(\varphi_4 + \varphi_5) \\ -L_2 \sin \varphi_4 - L_1 \sin(\varphi_4 + \varphi_5) & -L_1 \sin(\varphi_4 + \varphi_5) \end{bmatrix}\quad (11)$$

и производную Якобиана:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{J}(\varphi_4, \varphi_5) = \begin{bmatrix} L_2 \sin \varphi_4 \dot{\varphi}_4 + L_1 \sin(\varphi_4 + \varphi_5)(\dot{\varphi}_4 + \dot{\varphi}_5) & L_1 \sin(\varphi_4 + \varphi_5)(\dot{\varphi}_4 + \dot{\varphi}_5) \\ -L_2 \cos \varphi_4 \dot{\varphi}_4 - L_1 \cos(\varphi_4 + \varphi_5)(\dot{\varphi}_4 + \dot{\varphi}_5) & -L_1 \cos(\varphi_4 + \varphi_5)(\dot{\varphi}_4 + \dot{\varphi}_5) \end{bmatrix}\quad (12)$$

Во фронтальной плоскости угловые скорости и ускорения получим напрямую, продифференцировав уравнения (7):

$$\begin{aligned}
\dot{\phi}_6 &= -\dot{\phi}_7 = \frac{z_h \dot{y}_h}{z_h^2 + (y_c + y_h)^2} \\
\ddot{\phi}_6 &= -\ddot{\phi}_7 = \frac{z_h \ddot{y}_h (z_h^2 + (y_c + y_h)^2) - 2z_h \dot{y}_h^2 (y_c + y_h)}{(z_h^2 + (y_c + y_h)^2)^2} \\
\dot{\phi}_8 &= \frac{(z_h - z_f) \dot{y}_h - (y_f - y_h + y_c) \dot{z}_f}{(z_h - z_f)^2 + (y_f - y_h + y_c)^2} \\
\ddot{\phi}_8 &= \frac{ad - bc}{d^2} \\
a &= (z_h - z_f) \ddot{y}_h - (y_f - y_h + y_c) \ddot{z}_f \\
b &= (z_h - z_f) \dot{y}_h - (y_f - y_h + y_c) \dot{z}_f \\
c &= -2((z_h - z_f) \dot{z}_f + (y_f - y_h + y_c) \dot{y}_h) \\
d &= (z_h - z_f)^2 + (y_f - y_h + y_c)^2
\end{aligned} \tag{13}$$

Моменты в суставах находятся с использованием функции обратной динамики в сагиттальной и фронтальной плоскостях. Для решения задачи в фазе опоры на обе ноги необходимо оценить силы реакции на переносимую ногу. Для этого применяется эвристический метод, предложенный в [9]. Суть метода заключается в распределении вертикальных компонент сил между двумя ногами пропорционально расположению центра масс относительно центров стоп робота.

Подчеркнем, что использование метода Ньютона-Эйлера позволяет, помимо моментов, найти вертикальную и горизонтальную силы реакции опоры, что позволяет рассчитать положение точки нулевого момента (ТНМ) [10] и проверить условие проскальзывания робота.

Механическая мощность в суставе выражается как произведение момента сил на угловую скорость $W = T\dot{\phi}$. Отметим, что в случае, если направления угловой скорости и момента не совпадают, то мощность становится отрицательной, то есть привод тормозится, совершая отрицательную работу. В нашей задаче оптимизации будем считать, что вся энергия сервопривода переходит в механическую энергию. Иными словами, нет потерь ни в моменте, ни в мощности при передаче энергии с сервопривода на сустав. Такое допущение можно сделать исходя из того, что тепловые

потери в сервоприводе значительно меньше проделанной сервоприводами механической работы, а значения моментов сил трения в редукторе значительно меньше по сравнению с моментами сервоприводов.

Удельное энергопотребление выражается как отношение энергозатрат на шаг к длине шага $J = \frac{E}{L}$. Энергозатрата шага определяется суммой энергозатрат каждого сервопривода, которые находятся интегрированием мощности по времени:

$$E = \sum_{i=1}^8 \int_0^T |W_i| dt \quad (14)$$

Отметим, что значение мощности берется по модулю, так как энергозатраты сервопривода происходят как при разгоне, так и торможении сустава. Задача нахождения оптимальных параметров шага формируется следующим образом:

Необходимо найти такие параметры шага L (длина шага), T (время шага), γ (длительность фазы опоры на одну ногу), η (область разрешенного положения ТНМ [11]), H (высота движения бедра) и h (высота подъема перемещаемой ноги), которые:

- 1) максимизируют скорость движения L/T ;
- 2) минимизируют удельное энергопотребление J ;

и при этом выполняются следующие условия:

- а) углы суставов лежат в допустимом диапазоне;
- б) абсолютные значения моментов в суставах T не превышают максимального значения для данного сустава;
- в) абсолютные значения мощности в суставах W не превышают максимального значения для данного сустава;

- г) выполняется условие непроскальзывания $\left| \frac{F_x}{F_z} \right| \leq \mu, \left| \frac{F_y}{F_z} \right| \leq \mu$, где

F_x, F_y, F_z - компоненты силы реакции опоры, μ - коэффициент трения;

д) ТНМ, рассчитанный как $p_x = \frac{T_y}{F_z}, p_x = \frac{T_x}{F_z}$, где T_x, T_y - горизонтальные

моменты в точке опоры, лежит в пределах площади опоры стопы во время движения в фазе опоры на одну ногу.

На рисунке 2 представлен алгоритм нахождения оптимальных параметров движения робота. На первом этапе инициализируются параметры шага. На втором этапе временной интервал $[0, (1-\gamma)T]$ дискретизируется с шагом Δt и для каждого момента времени t^k находятся положения бедра и стопы согласно (1). Далее с помощью уравнений (5), (6), (7) находятся углы суставов в каждый момент времени. После того, как найдены углы, происходит проверка на диапазон разрешенных углов в каждом суставе. Если условия выполняются, то на следующем этапе происходит расчет угловых скоростей и ускорений в суставах и решение обратной задачи динамики для нахождения моментов сил и силы реакции опоры. После чего последовательно проверяются условия непроскальзывания и критерий ТНМ. На следующем этапе идет проверка моментов и далее проверка абсолютного значения мощности в каждом суставе. При выполнении всех условий рассчитывается скорость движения $V = L/T$ и удельное энергопотребление

$$J = \frac{E}{L} = \frac{\sum_{i=1}^8 \sum_{k=0}^N |W_i^k \Delta t|}{L}.$$

Предложенный алгоритм позволяет проанализировать результаты для различных наборов параметров шага и выбрать наиболее оптимальные с точки зрения скорости или энергоэффективности движения.

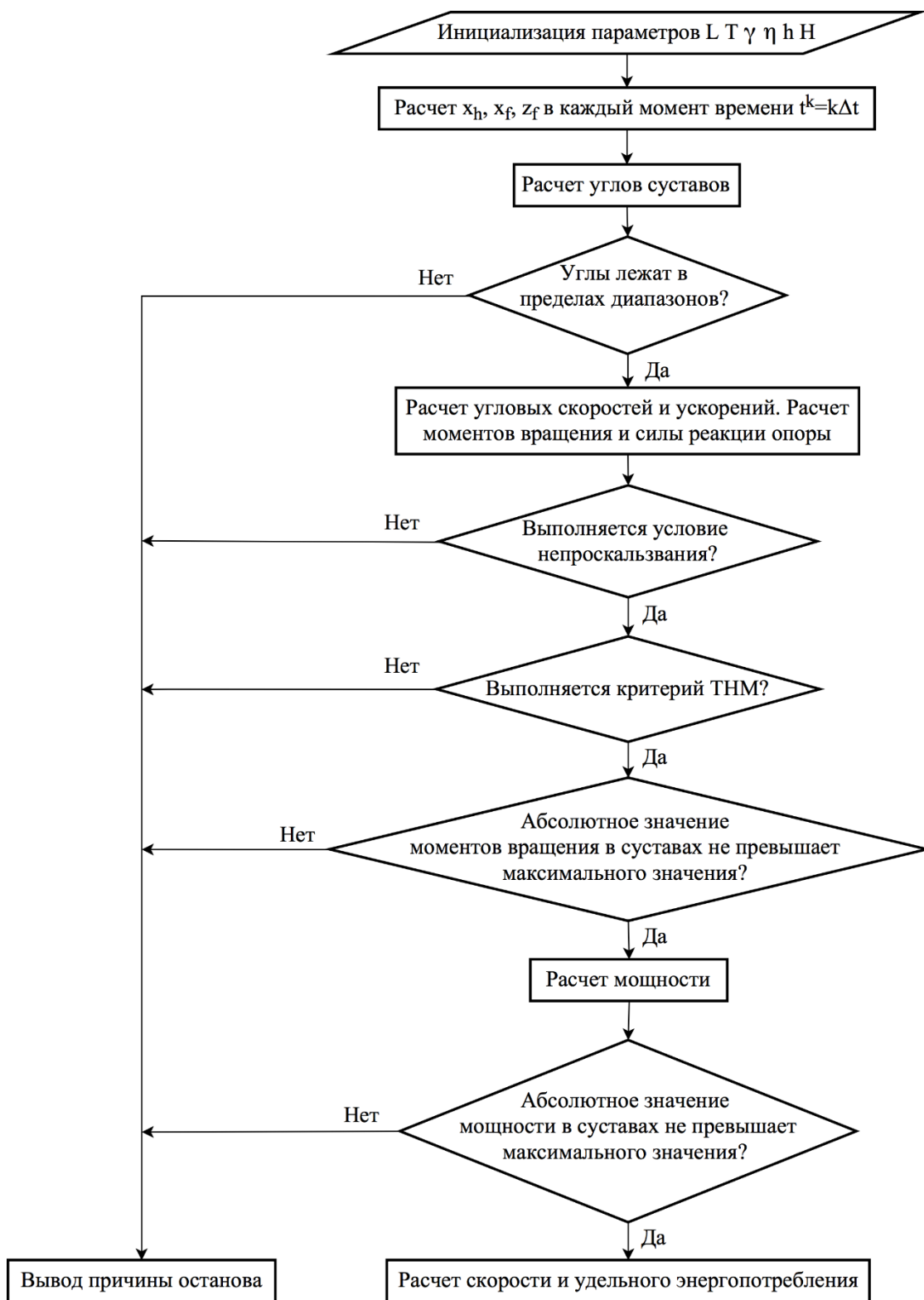


Рисунок 2. Блок-схема расчета оптимальных параметров движения робота

Результаты

Поиск оптимальных параметров шага производился согласно схеме на рисунке 2. В дополнении к расчету скорости и удельного энергопотребления для каждой конфигурации была оценена стабильность движения с точки

зрения сохранения равновесия в фазе опоры на одну ногу с использованием среднеквадратичных отклонений ТНМ S_x , S_y от заданных величин. Параметры шага варьировались в следующих интервалах: длина шага L от 5 до 45 см с шагом 1 см, время шага T от 0.2 до 3 сек с шагом 0.1 сек, параметр γ принимал значения 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, параметр η значения 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, высота движения центра масс H значения 0.5, 0.55, 0.6, 0.65 м, высота поднятия ноги h значения 2 и 4 см. Время дискретизации расчета бралось равным 0.001 сек. Параметры модели, а также диапазон допустимых углов и максимальные мощности в приводах брались из спецификации робота [12]. Максимальный момент в суставе равнялся 30% от максимального момента привода робота. Разрешенная область положения ТНМ бралась равной площади стопы и была равна 21 x 14 см. Коэффициент трения между стопой робота и поверхностью брался равным 0.5.

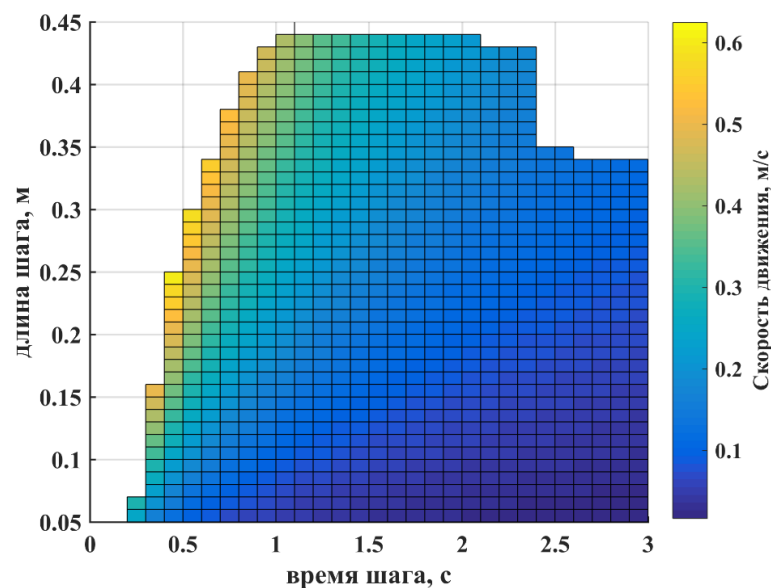


Рисунок 3. Карта допустимых комбинаций длины и времени шага

На рисунке 3 представлена карта возможных скоростей для разной длины и времени выполнения одного шага, которая была получена в среде Matlab путем перебора различных возможных с точки зрения кинематики и динамики параметров шага. Максимальная скорость шага, равная 0.63 м/сек, достигалась при длине шага 0.25 м и времени выполнения шага 0.4 сек. При этом параметр γ равнялся нулю, η равнялось 0.25, высота движения центра

масс равнялась 0.55 м, высота подъема ноги 2 см. Дальнейшее увеличение скорости путем уменьшения времени шага или увеличения длины шага ограничивается максимальным моментом в 60 Н*м и мощностью в 90 Вт привода опорной стопы в сагиттальной плоскости, а также максимальным значением x координаты ТНМ, равным 10.5 см. При этом изменение других параметров шага на такой скорости, например, высоты поднятия переносимой ноги, также влечет за собой достижение критических значений этих величин. Отметим, что важны лишь ограничения в сагиттальной плоскости, в которой происходит основное движение робота, потому что во фронтальной плоскости звенья двигаются с меньшей амплитудой и, соответственно, с меньшей нагрузкой в суставах. Также следует отметить, что при времени шага от одной до двух секунд при длине шага 0.45 м достигается ограничение по моменту в стопе опорной ноги в сагиттальной плоскости. При времени больше 2.5 секунд уже при длине шага 0.35 м достигается ограничение в угле сустава бедра во фронтальной плоскости в 11° .

На рисунке 4 изображена временная зависимость моментов сил в суставах сагиттальной плоскости при движении на максимальной скорости. Название суставов даны в соответствии с таблицей 1. Для привода стопы критический момент равнялся 60 Н*м, для приводов колен 220 Н*м, для приводов бедра 250 Н*м. За исключением сустава опорной стопы (LAnklePitch) в сагиттальной плоскости, моменты в суставах существенно меньше предельных значений. Это объясняется двумя факторами: относительно слабыми моторами в стопе по сравнению с коленом и бедром и высокой нагрузкой на сустав при движении. Отметим важность учета максимальных моментов в суставах нижних конечностей на стадии проектирования робота [13]. Рваный характер графиков обусловлен разрывами в значениях ускорения траектории бедра при параметрах $\gamma > 0$ или $\eta > 0$.

Таблица 1. Характеристики приводов педипуляторов

	Макс. момент, Н*м	Суммарная мощность, Вт
HipYaw (Вращение бедра)	819	150
HipRoll (Боковое качание бедра)	819	150
HipPitch (Фронтальное качание бедра)	819	150
KneePitch (Колено)	707	300
AnklePitch (Фронтальный наклон стопы)	196	90
AnkleRoll (Боковой наклон стопы)	196	90

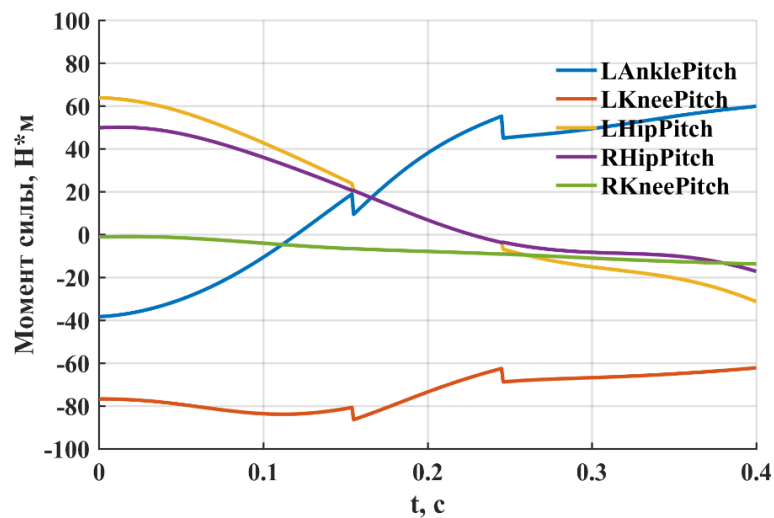


Рисунок 4. Временная зависимость на интервале в один шаг моментов сил в суставах сагиттальной плоскости при максимальной скорости движения

На рисунке 5 приведена временная зависимость мощности в суставах сагиттальной плоскости на интервале в один шаг. Согласно таблице 1 для стопы максимальная мощность бралась равной 90 Вт, для колена 300 Вт, для бедра 150 Вт. Заметим, что здесь, как и в случае с моментами сил, наиболее близко к максимальным значениям мощности приближаются значения в суставе стопы в сагиттальной плоскости. Быстрый перенос ноги при шаге также сказывается на развиваемой мощности сустава бедра переносимой ноги (RHipPitch), мощность которого достигает 110 Вт. Зависимость мощности от времени также имеет рваный характер, что связано с разрывами в профиле ускорения центра масс робота.

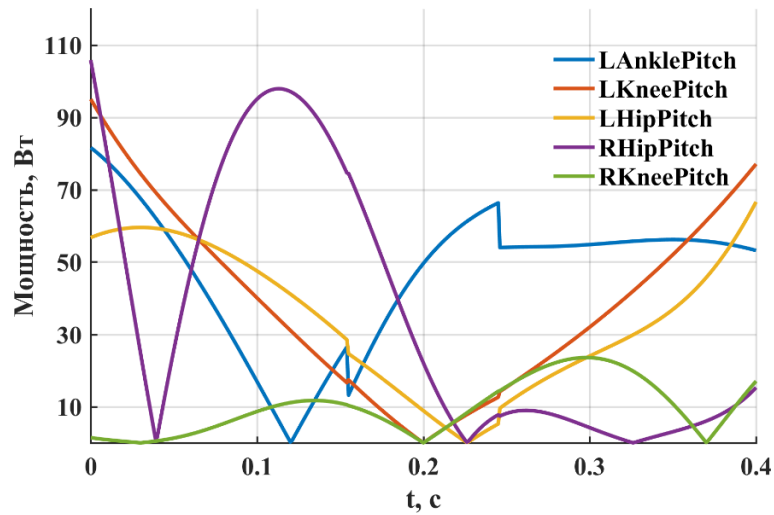


Рисунок 5. Временная зависимость мощности в суставах сагиттальной плоскости при максимальной скорости движения

На рисунке 6 представлена карта минимального удельного энергопотребления в зависимости от длины и времени шага, которая была получена в среде Matlab путем перебора различных возможных с точки зрения кинематики и динамики параметров шага. Минимальное значение в 171 Дж/м достигается при длине шага 0.17 м, времени шага 0.7 сек, $\gamma = 0$, $\eta = 0$, высоте центра масс 0.65 и высоте подъема ноги 2 см. Отметим, что лучшая энергоэффективность достигается при движении центра масс на максимальной высоте.

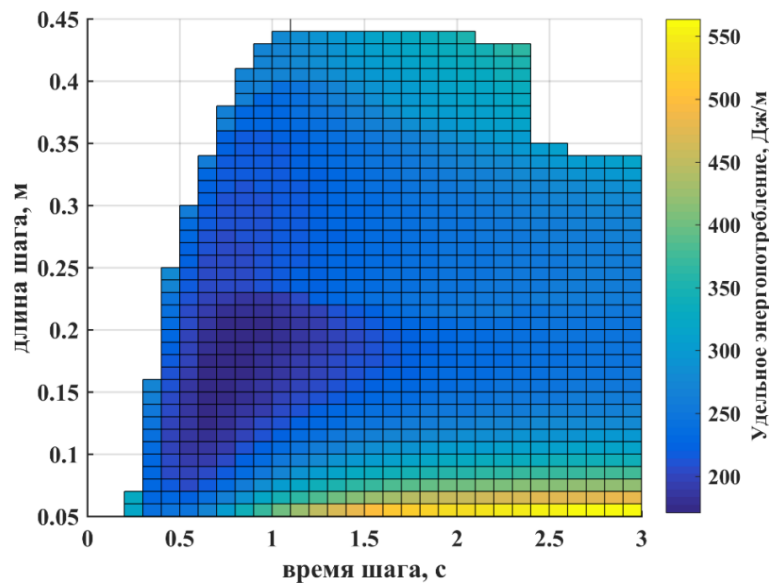


Рисунок 6. Карта минимального удельного энергопотребления в зависимости от длины и времени шага.

Параметры γ , η , H и h также оказывают существенное влияние на динамику системы. Результаты расчетов показывают, что с точки зрения скорости и энергоэффективности фаза опоры на две ноги является лишней, а область разрешенной ТНМ при расчете траектории необходимо расширить на четверть длины стопы для снижения максимальных нагрузок на приводы, то есть $\gamma=0$ и $\eta=0.25$. С ростом высоты движения центра масс снижается максимальная скорость, однако возрастает энергоэффективность и стабильность движения. Увеличение высоты поднятия переносимой ноги с 2 до 4 сантиметров увеличивает энергозатраты на 15% и снижает максимальную скорость на 4%.

Заключение

В работе произведен расчет оптимальных параметров шага, которые максимизируют скорость движения ДШР и минимизируют энергопотребление при кинематических и динамических ограничениях в суставах. Теоретическая оценка максимальной скорости для робота AR-601M дала результат в 0.63 м/с при длине шага 0.25 м и времени шага 0.4 сек. Ограничивающими дальнейшее увеличение скорости факторами являются максимальный момент и мощность сустава вращения стопы в сагиттальной плоскости. Максимальная энергоэффективность движения робота достигалась при длине шага 0.17 м и времени шага 0.7 сек.

Несмотря на преимущества данного метода, такие как возможность оценки наиболее уязвимых узлов робота на стадии проектирования и оценки максимальной скорости движения, предлагаемый метод оптимизации траектории движения имеет несколько очевидных ограничений, и наиболее значимыми из них являются то, что метод позволяет оценить лишь номинальные траектории движения звеньев робота без учета возможностей системы управления движениями звеньев робота, а также то, что движение туловища робота происходит на постоянной высоте с занулением скорости стопы в момент соприкосновения с опорной поверхностью, что априори не является эффективным человекоподобным движением. Первая проблема

решается построением качественных систем управления движениями звеньев робота. Вторая проблема требует конструктивных изменений робота, таких как использование приводов с внутренней податливостью, способных смягчить удар при постановке ноги. В дальнейшем планируется расширить предлагаемую методику оптимизации параметров траекторий движения ДШР для случая приводов с переменной жесткостью.

Список литературы

1. Khusainov R., Klimchik A., Magid E. Swing leg trajectory optimization for a humanoid robot locomotion // Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2016 13th International Conference on, 2016.
2. Kim B.-H. Optimal foot trajectory planning of bipedal robots based on a measure of falling // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2012. – Т. 9.
3. Sadedel M., Yousefi-koma A., Khadiv M. Offline path planning, dynamic modeling and gait optimization of a 2D humanoid robot // Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2014 Second RSI/ISM International Conference on, 2014. – С. 131-136.
4. Горобцов А.С., Андреев А.Е., Тарасов П.С., Скориков А.В., Карцов С.К. Синтез устойчивых квазистатических режимов шагания антропоморфного робота // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 6 (185). С. 75-76.
5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Parameter optimization for exoskeleton control system using sobol sequences // ROMANSY 21-Robot Design, Dynamics and ControlSpringer, 2016. – С. 361-368.
6. Hubicki C. M., Hereid A., Grey M. X., Thomaz A. L., Ames A. D. Work those arms: Toward dynamic and stable humanoid walking that optimizes full-body motion // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016. – С. 1552-1559.
7. Khusainov R., Afanasyev I., Sabirova L., Magid E. Bipedal robot locomotion modelling with virtual height inverted pendulum and preview control

- approaches in Simulink environment // Journal of robotics networking and artificial life. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 182-187.
8. Ali M. A., Park H. A., Lee C. S. G. Closed-form inverse kinematic joint solution for humanoid robots // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, 2010. – С. 704-709.
 9. Kajita S., Morisawa M., Miura K., Nakaoka S. i., Harada K., Kaneko K., Kanehiro F., Yokoi K. Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on IEEE, 2010. – С. 4489-4496.
 10. Vukobratović M., Stepanenko J. On the stability of anthropomorphic systems // Mathematical biosciences. – 1972. – Т. 15, № 1-2. – С. 1-37.
 11. Hyeok-Ki S., Byung Kook K. Energy-Efficient Gait Planning and Control for Biped Robots Utilizing Vertical Body Motion and Allowable ZMP Region // Industrial Electronics, IEEE Transactions on. – 2015. – Т. 62, № 4. – С. 2277-2286.
 12. Хусаинов Р.Р., Климчик. А.С., Магид Е.А., Сагитов А.Г. Управление движением человекоподобного робота на основе операционной системы ROS // Труды XI Международной Четаевской конференции, посвященной 115-летию со дня рождения Н.Г. Четаева и памяти академика АН РТ Т.К. Сиразетдинова. 2017. – 2017. – С. 161-168.
 13. Павлюк Н., Ронжин А. Конструктивные решения нижних конечностей для антропоморфного робота антарес // Экстремальная робототехника. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 422-427.

Хусаинов Рамиль Расимович, научный сотрудник Лаборатории мехатроники, управления и прототипирования, Университет Иннополис

Климчик Александр Сергеевич, PhD, руководитель Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис

Магид Евгений Аркадьевич, PhD, профессор кафедры интеллектуальной робототехники ИТИС, Казанский Федеральный Университет