

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ЭКЗОСКЕЛЕТОМ ЧЕЛОВЕКА

*Гарсия Р.Б., Меркурьев И.В., Сайпулаев Г.Р., Сайпулаев М.Р.
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

Ключевые слова: экзоскелет, математическая модель, оптимальное управление, динамика, стабилизация, численное моделирование.

Аннотация. В рамках данной работы ставится задача построения математической модели трехзвенного экзоскелета с симметричным движением ног. Используется конструкция экзоскелета с равными длинами звеньев и допущение об отсутствии проскальзывания точек контакта ног с опорной поверхностью. С помощью формализма Лагранжа построена математическая модель нелинейной динамики трехзвенного экзоскелета. Проведена линеаризация уравнений динамики в окрестности программного движения. Продемонстрирована приводимость линеаризованной модели к стандартной форме Коши. Решена линейно-квадратичная задача нахождения управления оптимального по энергозатратам и отклонениям с целью стабилизации вертикального положения экзоскелета. Проведено численное моделирование движения экзоскелета при рассмотрении частного случая движения – стабилизации вертикального положения. По результатам моделирования подтверждена эффективность и работоспособность предложенного управления. Полученное оптимальное управление движениями звеньев экзоскелета позволяет уменьшить энергозатраты, требуемые для осуществления движения, по сравнению с программным управлением.

DEVELOPMENT OF CONTROL ALGORITHMS FOR THE ACTIVE HUMAN EXOSKELETON

*Garcia R.B., Merkurjev I.V., Saypulaev G.R., Saypulaev M.R.
National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow*

Keywords: exoskeleton, mathematical model, optimal control, dynamics, stabilization, numerical simulation.

Abstract. In this paper, we present the task of development a mathematical model of a three-link exoskeleton with symmetrical leg movement. The design of the exoskeleton with equal lengths of links and the assumption that there is no slippage of the points of contact of the legs with the supporting surface is used. Using the Lagrange formalism, a mathematical model of the nonlinear dynamics of a three-link exoskeleton is constructed. The linearization of the equations of dynamics near the program motion is carried out. The reducibility of the linearized model to the standard Cauchy form is demonstrated. The linear-quadratic problem of finding the optimal control in terms of energy consumption and deviations was solved in order to stabilize the vertical position of the exoskeleton. Numerical modeling of the exoskeleton movement was carried out for a particular case of movement - stabilization of the vertical position. Based on the simulation results, the effectiveness and efficiency of the proposed control was confirmed. The obtained optimal control of the movements of the exoskeleton links makes it possible to reduce the energy consumption required for the implementation of the movement, in comparison with programm control.

Введение

Исследование механики экзоскелетов и управление движением антропоморфных роботов является актуальным из-за их широкого применения в различных сферах человеческой деятельности: на производстве (энергетическом машиностроении) [1], в бытовых [2] и медицинских [3] приложениях. Теоретические основы для разработки механических частей экзоскелетов и построению систем управления ими заложены в монографиях [4-7].

Так, например, в монографии [4] обсуждаются вопросы моделирования движения двуногого шагающего робота при различных фазах движения (одноопорной и двухопорной фазы движений) и описанию проблем, связанные с ритмикой, энергетикой, стабилизацией и управлением двуногой ходьбой. А в монографии [6] изучается проблема импульсного управления ходьбой пяти и семизвенных моделей антропоморфных роботов (двуногих шагающих аппаратов).

Во многих практических приложениях при построении систем управления экзоскелетами важным является математическое моделирование плоского движения звеньев экзоскелетов [8]. Так, например, при решении задачи вертикализации пациентов с использованием экзоскелетов зачастую используется модель симметричного движения ног, для которой динамика экзоскелета описывается системой трех дифференциальных уравнений второго порядка [9, 10].

Алгоритмы формирования управления играют существенную роль в экзоскелетах, носимых человеком. Эти алгоритмы должны обеспечить безопасное для пользователя использование экзоскелета при выполнении программных движений звеньев системы. Зачастую используются следующие алгоритмы управления: программное управление [10]; управление в виде обратной связи (ПИД регулятора) [11]; управления с выполнением концепции точки нулевого момента (zero moment point) [9].

В рамках данной работы ставится задача построения математической модели трехзвенного экзоскелета с симметричным движением ног (см. рис. 1). Используется конструкция экзоскелета с равными длинами звеньев и допущение об отсутствии проскальзывания точек контакта ног с опорной поверхностью.

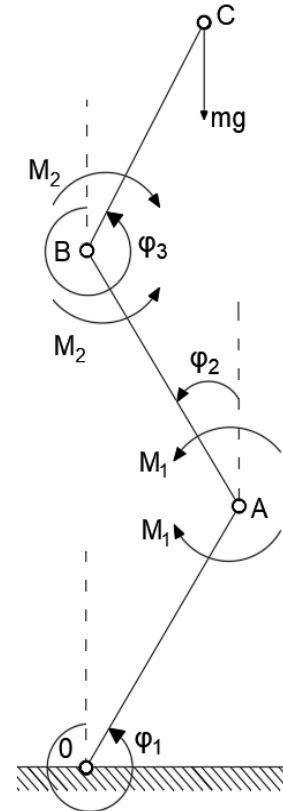


Рис. 1. Трехзвенная модель экзоскелета нижних конечностей человека

Материалы и методы исследований. Для построения математической модели экзоскелета воспользуемся формализмом Лагранжа. Уравнения динамики экзоскелета записываются в форме уравнения Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_i} = Q_i, \quad (i=1,2,3), \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы; Q_i – обобщенные силы; φ_i – угол поворота i -го звена экзоскелета, отсчитываемый от местной вертикали в направлении против часовой стрелки.

В рамках работы принимаются следующие допущения:

- рассматривается движение экзоскелета в сагиттальной плоскости;
- длины звеньев экзоскелета имеют длину l и массу m ;
- центры масс звеньев экзоскелета расположены в геометрических центрах звеньев, а их моменты инерции относительно центра равны J ;
- точки контакта экзоскелета с опорной поверхностью не проскальзывают;
- активными силовыми факторами считаются управляющие моменты M_1 , M_2 , создаваемые приводами в шарнирах, и сила тяжести mg , действующая на корпус экзоскелета.

С учетом указанных допущений кинетическая энергия системы имеет вид:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} J \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{8} ml^2 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} ml^2 \left(\dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{4} \dot{\varphi}_2^2 + \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right) + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}_3^2 + \\ &+ \frac{1}{2} ml^2 \left(\dot{\varphi}_1^2 + \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{4} \dot{\varphi}_3^2 + 2\dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) + \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left(J + \frac{9}{4} ml^2 \right) \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} \left(J + \frac{5}{4} ml^2 \right) \dot{\varphi}_2^2 + \frac{3}{2} ml^2 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{1}{2} \left(J + \frac{1}{4} ml^2 \right) \dot{\varphi}_3^2 + \\ &+ \frac{1}{2} ml^2 \left(\dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) + \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Для нахождения обобщенных сил используем выражение для мощности N_a^p активных сил на возможных скоростях:

$$N_a^p = -M_1\dot{\varphi}_1^p + M_1\dot{\varphi}_2^p + M_2\dot{\varphi}_2^p - M_2\dot{\varphi}_3^p - mgl\left(-\dot{\varphi}_1^p \sin \varphi_1 - \dot{\varphi}_2^p \sin \varphi_2 - \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3^p \sin \varphi_3\right) - mgl\left(-\dot{\varphi}_1^p \sin \varphi_1 - \frac{1}{2}\dot{\varphi}_2^p \sin \varphi_2\right) - mgl\left(-\frac{1}{2}\dot{\varphi}_1^p \sin \varphi_1\right), \quad (3)$$

где верхний индекс « p » указывает на возможные значения угловых скоростей.

Обобщенные силы получаем, как коэффициенты при возможных скоростях $\dot{\varphi}_1^p, \dot{\varphi}_2^p, \dot{\varphi}_3^p$ в выражении мощности активных сил (3), в виде:

$$Q_1 = -M_1 + \frac{5}{2}mgl \sin \varphi_1, \quad Q_2 = M_1 + M_2 + \frac{3}{2}mgl \sin \varphi_2, \quad Q_3 = -M_2 + \frac{1}{2}mgl \sin \varphi_3. \quad (4)$$

Вычисляя производные, входящие в уравнения Лагранжа (1), с учетом выражений для кинетической энергии (2) и обобщенных сил (4), получим:

$$\begin{aligned} & \left(J + \frac{9}{4}ml^2\right)\ddot{\varphi}_1 + \frac{3}{2}ml^2\left(\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\right) + \\ & + \frac{1}{2}ml^2\left(\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) + \dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_3)\right) = \frac{5}{2}mgl \sin \varphi_1 - M_1, \\ & \left(J + \frac{5}{4}ml^2\right)\ddot{\varphi}_2 + \frac{3}{2}ml^2\left(\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\right) + \\ & + \frac{1}{2}ml^2\left(\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + \dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)\right) = \frac{3}{2}mgl \sin \varphi_2 + M_1 + M_2, \\ & \left(J + \frac{1}{4}ml^2\right)\ddot{\varphi}_3 + \frac{1}{2}ml^2\left(\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) - \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_3)\right) + \\ & + \frac{1}{2}ml^2\left(\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) - \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)\right) = \frac{1}{2}mgl \sin \varphi_3 - M_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Для уменьшения количества параметров модели введем обозначения: $j = \frac{J}{ml^2}$ – безразмерный приведенный момент инерции звеньев; $\omega = \sqrt{g/l}$ – параметр конструкции экзоскелета, сходный с собственной частота колебаний математического маятника длиной l , $u_i = \frac{M_i}{ml^2}$ – приведенные управляющие моменты. С учетом введенных обозначений уравнения динамики экзоскелета можно представить в виде:

$$\begin{aligned} & \left(j + \frac{9}{4}\right)\ddot{\varphi}_1 + \frac{3}{2}\left(\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\right) + \\ & + \frac{1}{2}\left(\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) + \dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_3)\right) = \frac{5}{2}\omega^2 \sin \varphi_1 - u_1, \\ & \left(j + \frac{5}{4}\right)\ddot{\varphi}_2 + \frac{3}{2}\left(\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\right) + \\ & + \frac{1}{2}\left(\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + \dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)\right) = \frac{3}{2}\omega^2 \sin \varphi_2 + u_1 + u_2, \\ & \left(j + \frac{1}{4}\right)\ddot{\varphi}_3 + \frac{1}{2}\left(\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) - \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_3)\right) + \\ & + \frac{1}{2}\left(\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) - \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)\right) = \frac{1}{2}\omega^2 \sin \varphi_3 - u_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Рассмотрим в качестве программного движения – стабилизацию вертикального положения звеньев экзоскелета. При этом программные (желаемые) значения углов поворота звеньев будут равны $\varphi_i^d(t) = 0$. Здесь верхний индекс «d» – указывает на программное движение.

Для применения методов теории оптимального управления линейными системами проведем линеаризацию уравнений (6) на указанном программном движении. Для этого заменим тригонометрические функции, входящие в уравнения динамики (6), их разложениями в ряд Маклорена с точностью до линейных слагаемых, а также отбросим нелинейные слагаемые вида $\varphi_i \dot{\varphi}_j^2$ ($i, j = 1, 2, 3$), поскольку указанные слагаемые на рассматриваемом программном движении будут пренебрежимо малы.

В результате получим:

$$\begin{aligned} \left(j + \frac{9}{4}\right) \ddot{\varphi}_1 + \frac{3}{2} \ddot{\varphi}_2 + \frac{1}{2} \ddot{\varphi}_3 &= \frac{5}{2} \omega^2 \varphi_1 - u_1, \\ \frac{3}{2} \ddot{\varphi}_1 + \left(j + \frac{5}{4}\right) \ddot{\varphi}_2 + \frac{1}{2} \ddot{\varphi}_3 &= \frac{3}{2} \omega^2 \varphi_2 + u_1 + u_2, \\ \frac{1}{2} \ddot{\varphi}_1 + \frac{1}{2} \ddot{\varphi}_2 + \left(j + \frac{1}{4}\right) \ddot{\varphi}_3 &= \frac{1}{2} \omega^2 \varphi_3 - u_2. \end{aligned} \quad (7)$$

В матричной форме система уравнений в виде:

$$\mathbf{F} \begin{pmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{\varphi}_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \omega^2 \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

Здесь $\mathbf{F} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 4j+9 & 6 & 2 \\ 6 & 4j+5 & 2 \\ 2 & 2 & 4j+1 \end{bmatrix}$ – матрица коэффициентов при старших

производных. Отметим, что система уравнений (7) приводится к форме Коши, поскольку определитель матрицы \mathbf{F} является положительным для любых положительных значений j ,

$$\text{т.е. } \det(\mathbf{F}) = \frac{1}{64} (1 + 60j + 240j^2 + 64j^3) > 0.$$

Рассмотрим случай, когда звенья экзоскелета с достаточной точностью можно смоделировать однородным стержнем. Значения параметров математической модели в этом случае будут следующими [8]:

$$J = \frac{1}{12} ml^2, \quad l = 0.392 \text{ м} \quad \text{или} \quad j = \frac{1}{12}, \quad \omega = 5 \text{ с}^{-1}. \quad (9)$$

Запишем систему уравнений (8) в форме Коши для модели экзоскелета с параметрами (9):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_4, \\ \dot{x}_2 &= x_5, \\ \dot{x}_3 &= x_6, \\ \dot{x}_4 &= \frac{2625}{26} x_1 - \frac{2025}{26} x_2 + \frac{225}{26} x_3 - \frac{48}{13} u_1 - \frac{36}{13} u_2, \\ \dot{x}_5 &= -\frac{3375}{26} x_1 + \frac{4275}{26} x_2 - \frac{1125}{26} x_3 + \frac{84}{13} u_1 + \frac{102}{13} u_2, \\ \dot{x}_6 &= \frac{1125}{26} x_1 - \frac{3375}{26} x_2 + \frac{2325}{26} x_3 - \frac{54}{13} u_1 - \frac{138}{13} u_2. \end{aligned} \quad (10)$$

или в матричной форме:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (11)$$

Здесь использованы следующие обозначения для матриц и векторов:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{26} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 26 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 26 \\ 2625 & -2025 & 225 & 0 & 0 & 0 \\ -3375 & 4275 & -1125 & 0 & 0 & 0 \\ 1125 & -3375 & 2325 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \frac{1}{13} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -48 & -36 \\ 84 & 102 \\ -54 & -138 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6)^T = (\varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \ \dot{\varphi}_1 \ \dot{\varphi}_2 \ \dot{\varphi}_3)^T, \quad (12)$$

$$\mathbf{u} = (u_1 \ u_2)^T.$$

Далее построим оптимальное по энергозатратам и отклонениям управление для стабилизации вертикального положения. В качестве критерия оптимальности примем:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \rightarrow \min, \quad (13)$$

где $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T > 0$, $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T \geq 0$ – постоянные матричные коэффициенты.

Вектор управлений формируется в виде обратной связи:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}, \quad (14)$$

где \mathbf{K} – оптимальный коэффициент усиления, вычисляемый по известной формуле:

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}. \quad (15)$$

Здесь матрица $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T \geq 0$ удовлетворяет алгебраическому уравнению Рикатти:

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0. \quad (16)$$

При рассмотрении задачи управления оптимального по энергозатратам матричные коэффициенты \mathbf{Q} и \mathbf{R} примем равными: $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0,05 & 0 \\ 0 & 0,05 \end{bmatrix}$ и $\mathbf{Q} = \text{diag}(10,10,10,50,50,50)$ – диагональная матрица.

Для решения уравнения Рикатти (16) можно воспользоваться математическим пакетом *Wolfram Mathematica* (команда *RiccatiSolve*).

По результатам расчета получены оптимальные коэффициенты усиления:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -1885,11 & -1121,98 & -386,83 & -490,90 & -335,66 & -136,56 \\ 712,97 & 457,29 & 125,31 & 182,71 & 147,34 & 24,55 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Результаты. Результаты численного моделирования динамики экзоскелета при стабилизации вертикального положения звеньев экзоскелета представлены на рисунках 2 и 3.

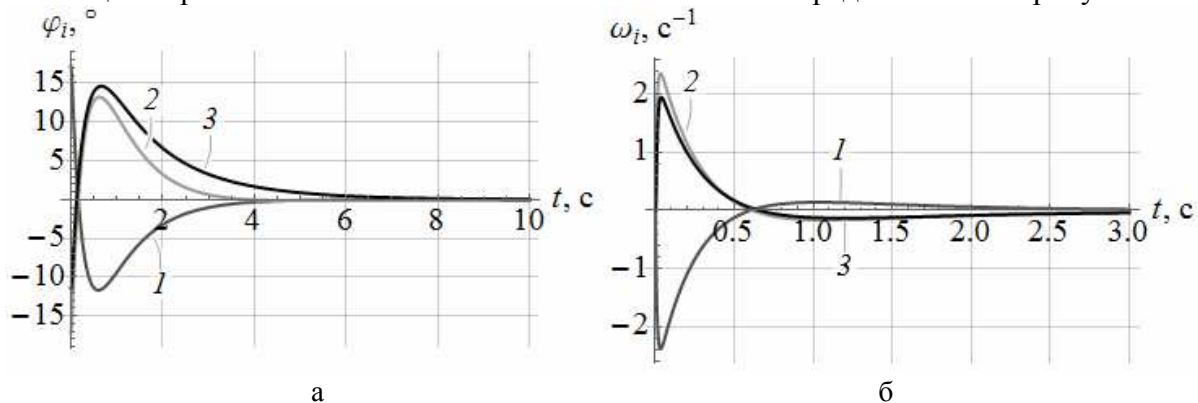


Рис. 2. Зависимости углов поворота φ_i и угловых скоростей $\omega_i = \dot{\varphi}_i$ звеньев экзоскелета: «1» – для звена *OA*; «2» – для звена *AB*; «3» – для звена *BC*

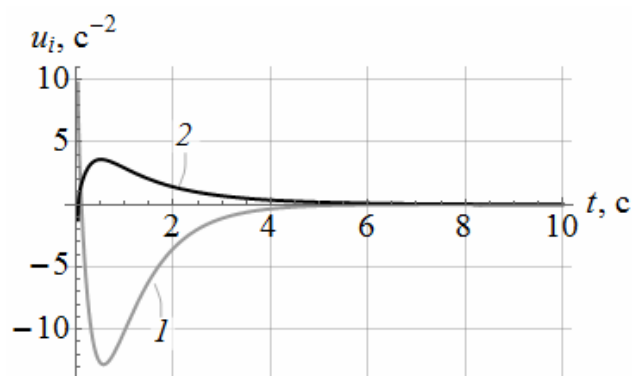


Рис. 3. Зависимости управляющих воздействий от времени:
1 – для воздействия u_1 ; 2 – для воздействия u_2

Выводы. По полученным зависимостям видно, что разработанное оптимальное управление обеспечивает стабилизацию вертикального положения звеньев экзоскелета. Оптимальное управление звеньями экзоскелета позволяет уменьшить энергозатраты, требуемые для осуществления движения, по сравнению с программным управлением, предложенным в работе [10].

Заключение

В данной работе с помощью формализма Лагранжа построена математическая модель нелинейной динамики трехзвенного экзоскелета. Проведена линеаризация уравнений динамики в окрестности программного движения. Решена линейно-квадратичная задача нахождения управления оптимального по энергозатратам и отклонениям с целью стабилизации вертикального положения экзоскелета. Проведено численное моделирование движения экзоскелета при рассмотрении стабилизации вертикального положения. По результатам моделирования подтверждена эффективность и работоспособность предложенного управления. Полученное оптимальное управление движениями звеньев экзоскелета позволяет уменьшить энергозатраты, требуемые для осуществления движения, по сравнению с программным управлением.

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта «Разработка аппаратно-программного комплекса для дистанционного управления движением робототехнической системы» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022-2024 гг.»

Список литературы

1. De Looze M.P., Bosch T., Krause F., Stadler K.S., O'Sullivan L. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load // *Ergonomics*. 2015, vol. 59, no. 5, pp. 1-11. doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988.
2. Попова А.А., Хижнякова М.С., Гаврилова Ю.В. Роботизированная техника: поколенческий аспект использования в повседневной жизни // *Социально-гуманитарные знания*. – 2022. – №5. – С. 19-25.
3. Мосоян М.С., Федоров Д.А. Современная робототехника в медицине // *Трансляционная медицина*. – 2020. – Т. 7., №5. – С. 91-108. – doi.org/10.18705/2311-4495-2020-7-5-91-108.
4. Белецкий В.В. Двухногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. – М.: Наука, 1984. – 286 с.
5. Смольников Б.А. Проблемы механики и оптимизации роботов. – М.: Наука, 1991. – 231 с.
6. Формальский А.М. Перемещение антропоморфных механизмов. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 368 с.
7. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 232 с.
8. Математическое моделирование движений человека в норме и при некоторых видах патологии / Под ред. И.В. Новожилова, П.А. Кручинина. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 64 с.
9. Savin S.I., Yatsun S.F., Yatsun A.S., Panovko G.Y. Simulation of exoskeleton sit-to-stand movement // *Journal of machinery manufacture and reliability*. 2016, vol. 45, no. 3, pp. 206-210.
10. Saypulaev M.R., Zuev Y.Y., Saypulaev G.R. Development of the lower extremity exoskeleton dynamics model using in the task of the patient verticalization // *Journal of Physics: Conferences Series*. 2021, vol. 2096, p. 012042. doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012042.

11. Сайпулаев Г.Р., Сайпулаев М.Р., Меркурьев И.В., Адамов Б.И., Гарсиа Б.Р. Применение блока инерциальных датчиков для оценивания положения и управления движением экзоскелета нижних конечностей // *Advanced Engineering Research*. – 2022. – Т. 22, №3. – С. 204-213. – doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-204-213.

References

- De Looze M.P., Bosch T., Krause F., Stadler K.S., O’Sullivan L. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load // *Ergonomics*. 2015, vol. 59, no. 5, pp. 1-11. doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988.
- Popova A.A., Khizhnyakova M.S., Gavrilova Yu.V. Robotic technology: generational aspect of use in everyday life // *Social and humanitarian knowledge*. 2022, no. 5, pp. 19-25.
- Mosoyan M.S., Fedorov D.A. Modern robotics in medicine // *Translational medicine*. 2020, vol. 7, no. 5, pp. 91-108. doi.org/10.18705/2311-4495-2020-7-5-91-108.
- Belesky V.V. Bipedal walking: model problems of dynamics and control. – M.: Science, 1984. – 286 p.
- Smolnikov B.A. Problems of mechanics and optimization of robots. – M.: Science, 1984. – 231 p.
- Formalsky A.M. Movement of anthropomorphic mechanisms. – M.: Science, 1982. – 368 p.
- Formalsky A.M. Motion Control of Unstable Objects. – M.: FIZMATLIT, 2012. – 232 p.
- Mathematical modeling of human movements in normal conditions and in some types of pathology / Edited by I.V. Novozhilov, P.A. Kruchinina. – M.: Publ. house MSU, 2005. – 64 p.
- Savin S.I., Yatsun S.F., Yatsun A.S., Panovko G.Y. Simulation of exoskeleton sit-to-stand movement // *Journal of machinery manufacture and reliability*. 2016, vol. 45, no. 3, pp. 206-210.
- Saypulaev M.R., Zuev Y.Y., Saypulaev G.R. Development of the lower extremity exoskeleton dynamics model using in the task of the patient verticalization // *Journal of Physics: Conferences Series*. 2021, vol. 2096, p. 012042. doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012042.
- Saypulaev G.R., Saypulaev M.R., Merkuryev I.V., Adamov B.I., Garcia B.R. Application of an inertial sensor unit for position estimation and motion control of the lower-extremity powered exoskeleton // *Advanced Engineering Research*. 2022 vol. 22, no. 3, pp. 204-213. doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-204-213.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Гарсия Бельо Ройлан – аспирант	Garcia Bello Roilan – postgraduate student
Меркурьев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Merkuryev Igor Vladimirovich – doctor of technical science, professor, head of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
Сайпулаев Гасан Русланович – аспирант, ассистент кафедры Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Saypulaev Gasan Ruslanovich – postgraduate student, assistant of Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
Сайпулаев Муса Русланович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Saypulaev Musa Ruslanovich – candidate of technical sciences, senior lecturer of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
saypulaevgr@mail.ru	

Получена 27.03.2023