

# Расчет и конструирование машин

УДК 621.01

DOI 10.18698/0536-1044-2017-3-4-11

## Решение задач кинематики и динамики для трехопорного колесно-шагающего робота

**А.В. Антонов<sup>1</sup>, С.А. Воротников<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ИМАШ им. А.А. Благодравова РАН, 101990, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Solving Kinematic and Dynamic Problems for a Three-Point Wheel-Legged Robot

**A.V. Antonov<sup>1</sup>, S.A. Vorotnikov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Machine Science named after A.A. Blagoravov of the Russian Academy of Sciences, 101990, Moscow, Russian Federation, Maly Kharitonyevsky Pereulok, Bldg. 4<sup>2</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: ant.ant.rk@gmail.com, vorotn@bmstu.ru



Рассмотрена кинематическая схема трехопорного колесно-шагающего робота, а также его конструкция, построенная в среде SolidWorks. Показаны возможные способы перемещения робота и кратко описан алгоритм его движения в режиме ходьбы. Составлены уравнения, описывающие решение прямой и обратной позиционных задач, с использованием матриц перехода, построенных по правилам Денавита–Хартенберга. На основе уравнений Ньютона–Эйлера и упруговязкой модели взаимодействия ног робота с опорной поверхностью выведены выражения для решения обратной задачи динамики при движении робота в режиме ходьбы. Выполнено математическое моделирование составленных уравнений в среде MATLAB с использованием пакета SimMechanics. Получены и проанализированы результаты моделирования, характеризующие решение обратной позиционной задачи в виде значений обобщенных координат и решение обратной задачи динамики в виде моментов нагрузки в шарнирах робота при известных геометрических и масс-инерционных параметрах робота и заданном алгоритме движения.

**Ключевые слова:** трехопорный колесно-шагающий робот, прямая позиционная задача, обратная позиционная задача, обратная задача динамики, обобщенные координаты, моменты нагрузки.



A kinematic diagram and design of a three-point wheel-legged robot built in SolidWorks are presented in this paper. The robot's possible motion techniques are outlined and the algorithm of motion in the walking mode is briefly described. Equations characterizing solutions for forward and inverse kinematic problems using transfer matrices built utilizing the Denavit–Hartenberg rules are formulated. Based on Newton–Euler equations and viscoelastic contact model between the robot's legs and the ground, equations for solving inverse dynamic problems are obtained that describe the robot's movement in the walking mode. Mathematical modeling of these equations in MATLAB using SimMechanics is performed.

The modeling results, characterizing the solution of the inverse kinematic problem in terms of generalized coordinates and the solution of the inverse dynamic problem in terms of load torques in robot's joints with known geometric and mass–inertia parameters and a given motion algorithm, are obtained and analyzed.

**Keywords:** three-point wheel-legged robot, forward kinematics problem, inverse kinematics problem, inverse dynamics problem, generalized coordinates, load torques.

В современном мире мобильные роботы с колесным типом шасси находят широкое применение. Использование колес для движения обеспечивает таким техническим средствам высокую маневренность, простоту конструкции и способов управления. В свою очередь, шагающие роботы [1] имеют более высокую проходимость, но при этом обладают сложной конструкцией и системой управления, а также невысокой скоростью движения. Совместное использование колес и ног позволяет учесть преимущества и частично компенсировать недостатки двух указанных способов движения. Примерами колесно-шагающих машин являются аппарат, разработанный ОАО «ВНИИтранс-маш» [2], робот ATHLETE [3], аппарат ALDURO [4], гибридный робот [5] и ряд других технических решений [6, 7].

Несмотря на то, что для устойчивого перемещения на колесах достаточно трех точек контакта с поверхностью, большинство колесно-шагающих роботов имеют не меньше четырех колес. Это можно объяснить сложностью осуществления устойчивого перемещения на трех опорных точках. Примером трехногого шагающего робота может служить робот STriDER [8], но его конструкция не позволяет дополнительно использовать колеса для движения в режиме езды.

**Постановка задачи и исходные данные.** Рассмотрим трехопорный колесно-шагающий робот, модель которого, построенная в среде 3D-моделирования SolidWorks, представлена на рис. 1. Ноги робота связаны с его платформой вращательными шарнирами, и каждая нога с помощью еще других шарниров образует плоский двухзвенный механизм. К концам ног также присоединены колеса, левое и правое из которых являются управляемыми, а заднее — пассивным. Таким образом, кинематическая схема робота представляет собой механизм с девятью вращательными шарнирами.

Конструкция и система управления робота позволяют ему выполнять движения трех типов: езда, ходьба и прыжки [9]. Езда использует

ся при движении по поверхностям с незначительными неровностями. В случае появления на пути робота препятствия, которое невозможно преодолеть в режиме езды (например, канавы, имеющей ширину больше, чем диаметр колеса), робот может применить режим ходьбы или прыжков для его преодоления.

Рассмотрим режим ходьбы робота. При таком типе движения колеса робота затормаживаются, а уравнения его кинематики и динамики в состоянии, когда все три ноги находятся в контакте с опорной поверхностью, во многом схожи с соответствующими уравнениями для параллельных механизмов [10, 11].

Алгоритм движения робота в режиме ходьбы заключается в поочередных отрывах и переносах его ног [9]: сохраняя две из них в контакте с опорной поверхностью, третьей ногой робот совершает толчок и после ее отрыва от поверхности переносит ногу в направлении своего пути. После достижения контакта происходит подготовка к перемещению аналогичным образом следующей ноги и т. д.

Цель работы — изложение решения прямой и обратной позиционных задач и обратной зада-

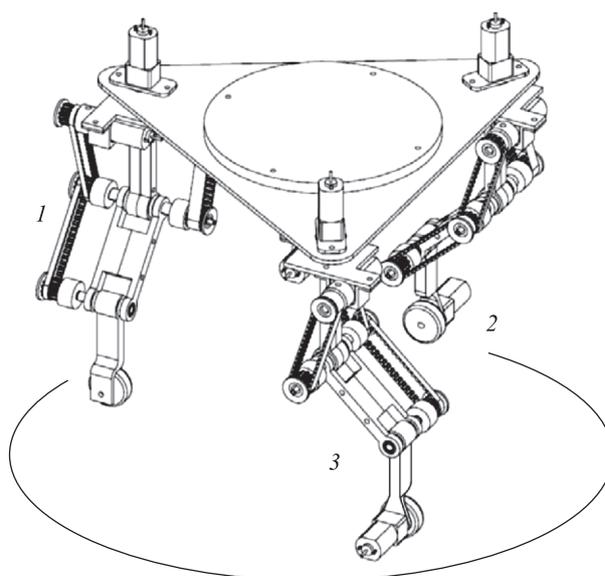


Рис. 1. Модель трехопорного колесно-шагающего робота:

1 — задняя нога; 2 — левая нога; 3 — правая нога

чи динамики на основе кинематической схемы, известных геометрических и масс-инерционных параметров робота и описанного выше алгоритма его движения в режиме ходьбы.

**Решение прямой задачи кинематики о положении.** Положение и ориентацию робота в пространстве можно определить, связав с ним систему координат, начало отсчета которой  $O_{pl}$  расположено в центре треугольной платформы (рис. 2), ось  $z_{pl}$  перпендикулярна плоскости платформы, а ось  $x_{pl}$  перпендикулярна передней кромке платформы.

Положение и ориентацию этой системы координат относительно некоей глобальной неподвижной системы координат можно задать с помощью матрицы перехода [12]

$$\mathbf{A}_{pl} = \begin{pmatrix} & x_{pl} \\ \mathbf{R}(\varphi, \theta, \psi) & y_{pl} \\ & z_{pl} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Здесь  $(x_{pl} \ y_{pl} \ z_{pl})^T$  — вектор, определяющий положение начала отсчета  $O_{pl}$  относительно глобальной системы координат;  $\varphi, \theta, \psi$  — углы Эйлера [12];  $\mathbf{R}(\varphi, \theta, \psi)$  — матрица поворота, которая определяет ориентацию системы координат, связанной с платформой [12]:

$$\mathbf{R}(\varphi, \theta, \psi) = \mathbf{R}_z(\varphi) \mathbf{R}_y'(\theta) \mathbf{R}_x''(\psi),$$

где

$$\mathbf{R}_z(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{R}_y'(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix};$$

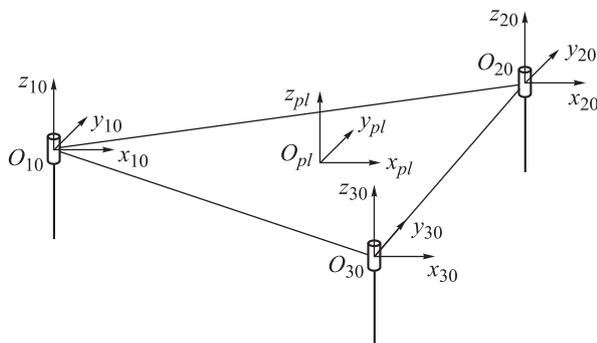


Рис. 2. Системы координат, связанные с платформой робота

$$\mathbf{R}_{x''}(\psi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}.$$

Также с платформой связаны еще три системы координат (см. рис. 2), имеющие аналогичную ориентацию. Положение начала отсчета  $O_{i0}$  относительно системы координат, находящейся в центре платформы, будет определяться вектором  $(x_i \ y_i \ z_i)^T$ , где  $i$  — номер ноги: 1 — задней, 2 — левой, 3 — правой. Переход от систем координат  $O_{i0}$  к системе координат  $O_{pl}$  можно осуществить за счет преобразования:

$$\mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i \\ 0 & 1 & 0 & y_i \\ 0 & 0 & 1 & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Введем системы координат, связанные со звеньями ног робота. Поскольку ноги робота имеют одинаковую кинематическую схему, рассмотрим построение систем координат на примере правой ноги. Положения и ориентации систем координат, связанных со звеньями ног робота (рис. 3), определяются согласно правилам Денавита-Хартенберга [12]. Номера звеньев  $j$  отсчитываются от платформы: 1 — верхнее звено, 2 — среднее звено, 3 — нижнее звено.

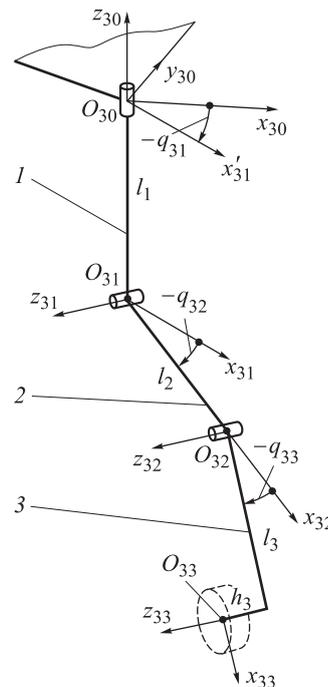


Рис. 3. Системы координат, связанные с правой ногой робота

Зная параметры Денавита–Хартенберга, можно составить матрицы перехода между звеньями. Матрица перехода от системы координат  $j$ -го звена к системе координат  $(j - 1)$ -го звена для  $i$ -й ноги имеет вид [12]

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{ij} & -\sin \theta_{ij} \cos \alpha_{ij} & \sin \theta_{ij} \sin \alpha_{ij} & a_{ij} \cos \theta_{ij} \\ \sin \theta_{ij} & \cos \theta_{ij} \cos \alpha_{ij} & -\cos \theta_{ij} \sin \alpha_{ij} & a_{ij} \sin \theta_{ij} \\ 0 & \sin \alpha_{ij} & \cos \alpha_{ij} & d_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Составив все необходимые матрицы, можно получить положение и ориентацию конца каждой из ног, перемножив соответствующие матрицы. Матрица перехода от системы координат конца  $i$ -й ноги к глобальной системе координат определяется выражением

$$T_{gl}^i = A_{pl} A_i \prod_{j=1}^3 A_{ij}.$$

**Решение обратной задачи кинематики о положении.** Входными величинами для решения обратной задачи кинематики о положении (ОЗП) являются расстояние  $s_{12}$  между центрами систем координат задней и левой ног и расстояние  $s_{13}$  между центрами систем координат задней и правой ног (рис. 4). При этом системы координат выбирают иным способом: расчи-

тывают координаты концов левой и правой ног относительно конца задней ноги.

Рассмотрим решение ОЗП на примере задней и правой ног. Дополнительно введем «мнимый» вращательный шарнир с осью  $z_0$ , параллельной оси  $z_1$ , и обобщенную координату  $q_1$  (см. рис. 4). Для определения обобщенной координаты  $q_1$  необходимо решить уравнение

$$y_{O_7}(q_1, \dots, q_7) = 0.$$

Фактически это означает, что координата конца правой ноги будет лежать в плоскости  $O_0x_0z_0$ . Получим решение этого уравнения в виде

$$q_1 = f(q_2, \dots, q_7).$$

Тогда расстояние между концами ног

$$s_{13} = s_{13}(q_2, \dots, q_7). \tag{1}$$

Уравнение (1) имеет шесть неизвестных параметров:  $q_2, \dots, q_7$ .

Дальнейшее решение ОЗП состоит в следующем. На каждом этапе движения решают уравнение (1), при этом пять координат задают постоянными ( $q = \text{const}$ ) либо изменяемыми по известным законам ( $q = \dot{q}(t)$ ), а последнюю определяют из уравнения (1). Порядок заданных и рассчитываемых координат соответствует алгоритму ходьбы [9].

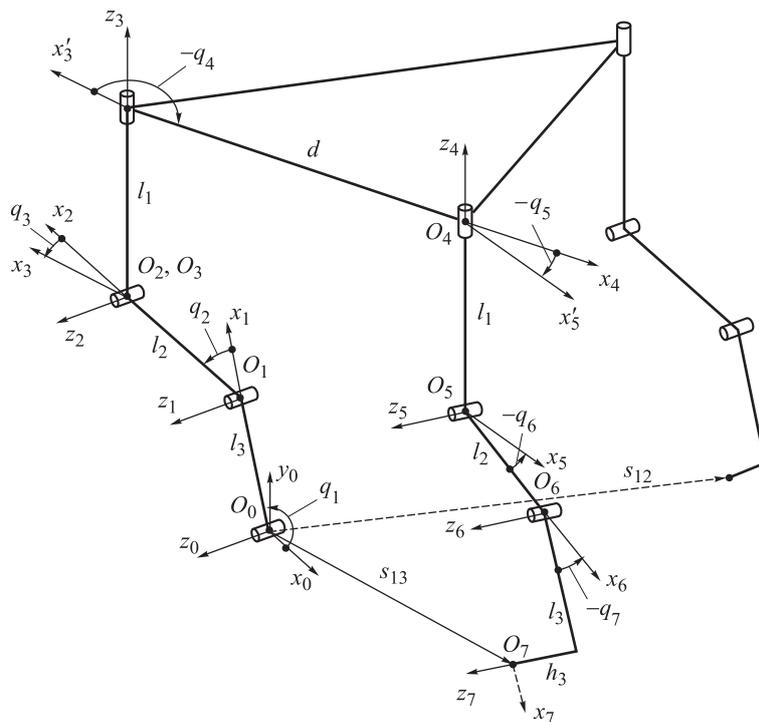


Рис. 4. Расположение систем координат при решении ОЗП на примере задней и правой ног

**Решение обратной задачи динамики.** Динамика робота включает в себя динамику его ног и платформы, а также модель взаимодействия с опорной поверхностью. Динамику ноги робота удобно описать с помощью уравнений Ньютона–Эйлера.

Сначала запишем кинематические соотношения в связанных со звеньями системах координат [12]:

$$\begin{aligned}\omega_i &= \mathbf{R}_{i-1,i}^T (\omega_{i-1} + \mathbf{z}_0 \dot{q}_i); \\ \varepsilon_i &= \mathbf{R}_{i-1,i}^T (\varepsilon_{i-1} + \mathbf{z}_0 \ddot{q}_i + \omega_{i-1} \times \mathbf{z}_0 \dot{q}_i); \\ \mathbf{v}_i &= \mathbf{R}_{i-1,i}^T \mathbf{v}_{i-1} + \omega_i \times \mathbf{p}_{i-1,i}; \\ \mathbf{a}_i &= \mathbf{R}_{i-1,i}^T \mathbf{a}_{i-1} + \omega_i \times (\omega_i \times \mathbf{p}_{i-1,i}) + \varepsilon_i \times \mathbf{p}_{i-1,i}; \\ a_{Ci} &= a_i + \omega_i \times (\omega_i \times \mathbf{p}_{Ci}) + \varepsilon_i \times \mathbf{p}_{Ci},\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\omega_i$  и  $\omega_{i-1}$  — угловые скорости вращения системы координат, связанные с  $i$ -м и  $(i-1)$ -м звеньями;  $i$  — номер звена ноги, считая от платформы,  $i = 1, 2, 3$ ;  $\mathbf{R}_{i-1,i}$  — матрица поворота системы координат, связанной с  $i$ -м звеном, относительно системы координат, связанной с  $(i-1)$ -м звеном;  $\mathbf{z}_0 = (0 \ 0 \ 1)^T$ ;  $\dot{q}_i$  и  $\ddot{q}_i$  — угловая скорость и ускорение вращения  $i$ -го звена относительно системы координат, связанной с  $(i-1)$ -м звеном (обобщенные скорость и ускорение);  $\varepsilon_i$  — угловое ускорение вращения системы координат, связанной с  $i$ -м звеном;  $\mathbf{v}_i$  и  $\mathbf{v}_{i-1}$  — линейные скорости движения системы координат, связанные с  $i$ -м и  $(i-1)$ -м звеньями;  $\mathbf{p}_{i-1,i}$  — вектор положения системы координат, связанной с  $i$ -м звеном, относительно системы координат, связанной с  $(i-1)$ -м звеном;  $a_i$  — линейное ускорение движения системы координат, связанной с  $i$ -м звеном;  $a_{Ci}$  — линейное ускорение центра масс  $i$ -го звена;  $\mathbf{p}_{Ci}$  — вектор положения центра масс  $i$ -го звена относительно системы координат, связанной с этим звеном.

Для платформы можно записать аналогичные уравнения. При неподвижной опорной поверхности  $\omega_{-1} = \varepsilon_{-1} = \mathbf{v}_{-1} = \mathbf{0}$ ;  $\mathbf{a}_{-1} = -\mathbf{g}$ , где  $\mathbf{g}$  — вектор ускорения свободного падения. Такой выбор  $\mathbf{a}_{-1}$  позволяет не учитывать вес звеньев ног и платформы робота при составлении уравнений динамики, что значительно упрощает вычисления.

Уравнения Ньютона–Эйлера для  $i$ -го звена ноги робота в связанной с этим звеном системой координат [13] имеют следующий вид:

$$F_{Ci} = m_i a_{Ci}; \quad (3)$$

$$M_{Ci} = \mathbf{J}_{Ci} \varepsilon_i + \omega_i \times \mathbf{J}_{Ci} \omega_i,$$

где  $F_{Ci}$  — сумма всех внешних сил, действующих на  $i$ -е звено;  $m_i$  — масса  $i$ -го звена;  $M_{Ci}$  — сумма всех внешних моментов, действующих на  $i$ -е звено, относительно центра масс этого звена;  $\mathbf{J}_{Ci}$  — тензор инерции  $i$ -го звена относительно центра масс этого звена и в осях связанной со звеном системы координат.

Далее получим уравнения для сил и моментов, действующих в шарнирах ноги. Уравнения также запишем в связанных со звеньями ноги робота системах координат [13]:

$$F_{i-1,i} = F_{Ci} + R_{i,i+1} F_{i,i+1}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned}M_{i-1,i} &= M_{Ci} + R_{i,i+1} M_{i,i+1} + p_{i-1,i} \times R_{i,i+1} F_{i,i+1} + \\ &+ (p_{i-1,i} + p_{Ci}) \times F_{Ci};\end{aligned}\quad (5)$$

$$\tau_i = \mathbf{M}_{i-1,i}^T \mathbf{z}_{i-1}, \quad (6)$$

где  $F_{i-1,i}$  и  $M_{i-1,i}$  — сила и момент, действующие на  $i$ -е звено со стороны  $(i-1)$ -го звена;  $R_{i,i+1}$  — матрица поворота системы координат, связанной с  $(i+1)$ -м звеном, относительно системы координат, связанной с  $i$ -м звеном;  $F_{i,i+1}$  и  $M_{i,i+1}$  — сила и момент, действующие на  $(i+1)$ -е звено со стороны  $i$ -го звена;  $\tau_i$  — момент, развиваемый приводом и приводящий в движение  $i$ -е звено;  $\mathbf{z}_{i-1}$  — единичный вектор, направленный вдоль оси  $z$  системы координат, связанной с  $(i-1)$ -м звеном.

Для платформы существуют выражения, аналогичные формулам (4) и (5), в которых левые части равенств будут равны нулю. Тогда с учетом выражений, аналогичных соотношениям (2) и (3), можно рассчитать положение и ориентацию платформы в пространстве. Уравнение (6) позволяет определить моменты нагрузки, которые должны быть обеспечены приводами сочленений робота для осуществления заданного движения. Таким образом, уравнение (6) представляет собой решение обратной задачи динамики.

При решении уравнений (4) и (5) необходимо знать силы, действующие на ноги робота со стороны опорной поверхности. Для расчета этих сил используем модель упруговязкой поверхности [14]. Алгоритм расчета силы взаимодействия ноги робота с опорной поверхностью можно представить в виде следующего псевдокода [14]:

$$\begin{aligned} &\text{if } z > 0 \quad \mathbf{F} = (0 \quad 0 \quad 0)^T; \\ &\text{else } F_x = -c_1 \dot{x}; \quad F_y = -c_2 \dot{y}; \\ &F_z = -c_1 \dot{z} - kz; \quad \mathbf{F} = (F_x \quad F_y \quad F_z)^T, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{F} = (F_x \quad F_y \quad F_z)^T$  — вектор силы, действующей со стороны опорной поверхности на ногу робота;  $z$  — высота опорной точки ноги робота относительно опорной поверхности;  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ ,  $\dot{z}$  — проекции скорости движения опорной точки ноги робота на оси глобальной неподвижной системы координат;  $c_1$ ,  $c_2$  — коэффициенты вязкого трения;  $k$  — коэффициент упругости.

Методика определения коэффициентов вязкого трения и упругости подробно описана в работе [14].

**Результаты моделирования.** В качестве инструмента моделирования использована среда MATLAB и ее специальный пакет SimMechanics, являющийся простым и эффективным средством моделирования, позволяющим решить составленные выше кинематические и динамические уравнения, не вводя их вручную в явном виде. Особенности построения модели приведены в работах [15, 16]. Результаты решения обратной позиционной задачи в виде законов изменения обобщенных координат в шарнирах

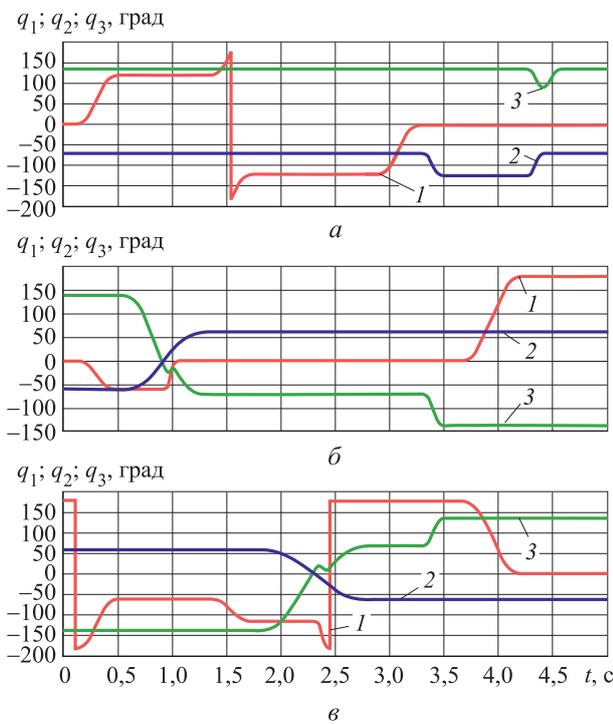


Рис. 5. Зависимости обобщенных координат  $q_1$  (1),  $q_2$  (2),  $q_3$  (3) от времени  $t$  для задней (а), левой (б) и правой (в) ног робота

робота и обратной задачи динамики в виде моментов нагрузки в шарнирах ног робота, развиваемых при выполнении движения по разработанному алгоритму ходьбы, на примере левой ноги приведены на рис. 5, 6. Геометрические и масс-инерционные параметры для модели приняты на основе параметров модели робота, построенной в среде SolidWorks.

Как видно из рис. 5, общее время цикла движения составляет около 4,6 с, а среднее время переноса каждой из ног в новую точку опоры — примерно 0,2 с. При этом резкие изменения обобщенной координаты  $q_1$  связаны с особенностями вычислений в пакете MATLAB: областью определения угловых величин является отрезок  $[-180^\circ, +180^\circ]$ . Таким образом, большая часть времени, затрачиваемого на перемещение робота, уходит на подготовку к переносам ног.

Из рис. 6 следует, что в момент времени  $t_1 \approx 0,8$  с возникает резкое изменение момента нагрузки во всех шарнирах, обусловленное отрывом ноги робота от опорной поверхности. В момент времени  $t_2 \approx 1,1$  с также происходит скачкообразное изменение момента во всех шарнирах, вызванное «приземлением» левой

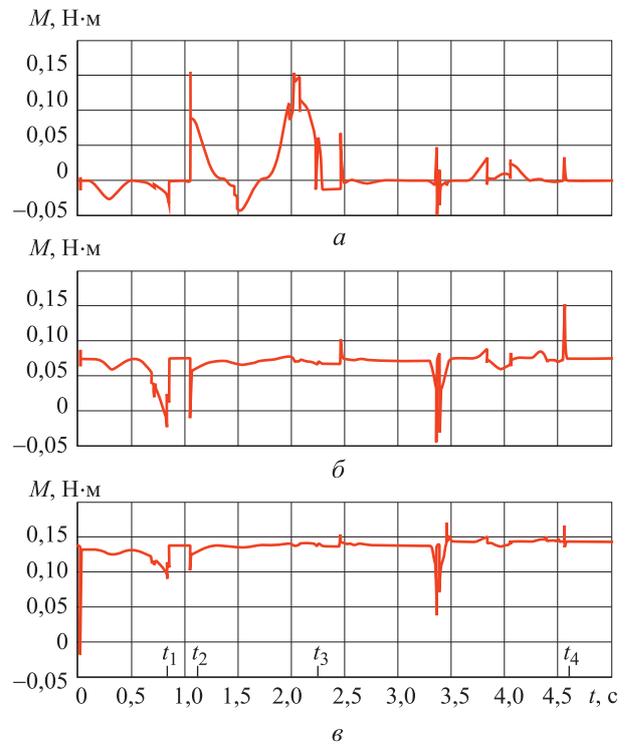


Рис. 6. Зависимости момента нагрузки  $M$  в шарнирах левой ноги робота при выполнении движения, определяемого координатами  $q_1$  (а),  $q_2$  (б) и  $q_3$  (в), от времени  $t$

ноги. Аналогичные скачки моментов нагрузки возникают в моменты времени  $t_3 \approx 2,3$  с и  $t_4 \approx 4,5$  с, когда происходят отрывы и приземления правой и задней ног соответственно. Однако воздействие при этом передается (через корпус робота) также и на левую ногу.

## Выводы

1. Рассмотрен трехопорный колесно-шагающий робот. Приведена его кинематическая схема, кратко описан алгоритм ходьбы.

2. Предложена методика решения прямой и обратной позиционных задач, а также обратной задачи динамики, включающей динамику ног робота, динамику платформы и модель взаимодействия ног робота с опорной поверхностью.

3. Проведено моделирование составленных кинематических и динамических соотношений в среде MATLAB с использованием пакета SimMechanics.

4. Проанализированы результаты моделирования, характеризующие решения обратной позиционной задачи и обратной задачи динамики.

## Литература

- [1] Павловский В.Е. *О разработках шагающих машин*. Москва, Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2013. 32 с.
- [2] *Колесные планетоходы ВНИИТМ*. URL: <http://www.enlight.ru/post/6055/vniitm.pdf> (дата обращения 19 ноября 2016).
- [3] *ATHLETE (All-Terrain, Hex-Limbed, Extra-Terrestrial Explorer)*. URL: [http://www.nasa.gov/pdf/390539main\\_Athlete%20Fact%20Sheet.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/390539main_Athlete%20Fact%20Sheet.pdf) (дата обращения 19 ноября 2016).
- [4] Muller G., Schneider M., Hiller M. Modeling, simulation, and model-based control of the walking machine ALDURO. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, vol. 5, no. 2, pp. 142–152.
- [5] Ottaviano E., Vorotnikov S., Ceccarelli M., Kurenev P. Design Improvements and Control of a Hybrid Walking Robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, vol. 59, is. 2, pp. 128–141.
- [6] Gronowicz A., Szrek J. Idea of a quadruped wheel-legged robot. *Archive of Mechanical Engineering*, 2009, vol. 56, is. 3, pp. 253–278.
- [7] Szrek J., Wojtowicz P. Idea of wheel-legged robot and its control system design. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 2010, vol. 58, is. 1, pp. 43–50.
- [8] Heaston J., Hong D., Morazzani I., Ren P., Goldman G. STriDER: Self-Excited Tripedal Dynamic Experimental Robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, article no. 4209509, pp. 2776–2777.
- [9] Антонов А.В., Воротников С.А., Выборнов Н.А. Система управления трехопорным колесно-шагающим роботом. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*, 2016, № 2, с. 58–69.
- [10] Glazunov V.A., Kheylo S.V. *Dynamics and control of planar, translational, and spherical parallel manipulators (Book Chapter)*. *Dynamic Balancing of Mechanisms and Synthesizing of Parallel Robots*, Springer, 2016, pp. 365–403.
- [11] Glazunov V., Nosova N., Ceccarelli M. Kinematics of a 6 DOFs Manipulator with a Interchangeable Translation and Rotation Motions. *Recent Advances in Mechanism Design for Robotics*. *Proceedings of the 3rd IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics*, Springer International Publishing Switzerland, 2015, pp. 407–416.
- [12] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. *Основы управления манипуляционными роботами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.
- [13] Craig J.J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson, 2004. 408 p.
- [14] Villumsen S. *Modelling and control of a six-legged mobile robot*. Master's thesis. Aalborg University, Aalborg, 2010. 216 p.
- [15] *SimMechanics 2. User's Guide*. The MathWorks, Natick, 2007. 840 p.
- [16] Silva M. Multi-legged walking robot modelling in MATLAB/SimMechanics and its simulation. *8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, 2013, pp. 226–231.

## References

- [1] Pavlovskii V.E. *O razrabotkakh shagaiushchikh mashin* [On the development of walking machines]. Moscow, Preprinty IPM im. M.V. Keldysha, 2013. 32 p.

- [2] *Kolesnye planetokhody VNIITM* [Wheeled planetary Rovers VNIITM]. Available at: <http://www.enlight.ru/post/6055/vniitm.pdf> (accessed 19 November 2016).
- [3] *ATHLETE (All-Terrain, Hex-Limbed, Extra-Terrestrial Explorer)*. Available at: [http://www.nasa.gov/pdf/390539main\\_Athlete%20Fact%20Sheet.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/390539main_Athlete%20Fact%20Sheet.pdf) (accessed 19 November 2016).
- [4] Muller G., Schneider M., Hiller M. Modeling, simulation, and mod-el-based control of the walking machine ALDURO. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, vol. 5, no. 2, pp. 142–152.
- [5] Ottaviano E., Vorotnikov S., Ceccarelli M., Kurenev P. Design Improvements and Control of a Hybrid Walking Robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, vol. 59, is. 2, pp. 128–141.
- [6] Gronowicz A., Szrek J. Idea of a quadruped wheel-legged robot. *Archive of Mechanical Engineering*, 2009, vol. 56, is. 3, pp. 253–278.
- [7] Szrek J., Wojtowicz P. Idea of wheel-legged robot and its control system design. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 2010, vol. 58, is. 1, pp. 43–50.
- [8] Heaston J., Hong D., Morazzani I., Ren P., Goldman G. STriDER: Self-Excited Tripedal Dynamic Experimental Robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, article no. 4209509, pp. 2776–2777.
- [9] Antonov A.V., Vorotnikov S.A., Vybornov N.A. Sistema upravleniia trekhopornym kolesno-shagaiushchim robotom [The control system of a three-point wheel-legged robot]. *Pri-kaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian journal management and high technologies]. 2016, no. 2, pp. 58–69.
- [10] Glazunov V.A., Kheylo S.V. *Dynamics and control of planar, translational, and spherical parallel manipulators (Book Chapter)*. *Dynamic Balancing of Mechanisms and Synthesizing of Parallel Robots*, Springer, 2016, pp. 365–403.
- [11] Glazunov V., Nosova N., Ceccarelli M. Kinematics of a 6 DOFs Manipulator with a Inter-changeable Translation and Rotation Motions. Recent Advances in Mechanism Design for Robotics. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics*, Springer International Publishing Switzerland, 2015, pp. 407–416.
- [12] Zenkevich S.L., Iushchenko A.S. *Osnovy upravleniia manipuliatsionnymi robotami* [Basic control of manipulation robots]. Moscow, Bauman Press, 2004. 480 p.
- [13] Craig J.J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson, 2004. 408 p.
- [14] Villumsen S. *Modeling and control of a six-legged mobile robot*. Master's thesis. Aalborg University, Aalborg, 2010. 216 p.
- [15] *SimMechanics 2. User's Guide*. The MathWorks, Natick, 2007. 840 p.
- [16] Silva M. Multi-legged walking robot modelling in MATLAB/SimMechanics and its simulation. *8<sup>th</sup> EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, 2013, pp. 226–231.

Статья поступила в редакцию 09.01.2017

## Информация об авторах

**АНТОНОВ Антон Вадимович** (Москва) — аспирант. ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН (101990, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: ant.ant.rk@gmail.com).

**ВОРОТНИКОВ Сергей Анатольевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vorotn@bmsu.ru).

## Information about the authors

**ANTONOV Anton Vadimovich** (Moscow) — Postgraduate. Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (101990, Moscow, Russian Federation, Maly Kharitonyevsky Pereulok, Bldg. 4, e-mail: ant.ant.rk@gmail.com).

**VOROTNIKOV Sergey Anatolievich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Robotics and Mechatronics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vorotn@bmsu.ru).