# Моделирование динамики подвесок колесных роботов в системах виртуального окружения\*

Е. В. Страшнов, М. А. Торгашев

Федеральное государственное учреждение "Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук", г. Москва, Россия

Аннотация. Одним из важных и актуальных направлений исследований является имитационное моделирование в масштабе реального времени движения колесных роботов в системах виртуального окружения. Рассматриваемая проблема приводит к постановке задачи моделирования динамики подвесок колес с учетом влияния рессор, электроприводов и т.д. В настоящей работе для решения этой задачи был задействован метод последовательных импульсов, предназначенный для моделирования динамики системы шарнирно связанных тел, с помощью которой описываются основные типы независимых подвесок колес. Предлагаемое решение основано на последовательном вычислении импульсов, которые обеспечивают выполнение ограничений, накладываемых на координаты и скорости тел. Разработанные методы и подходы моделирования динамики подвесок колесных роботов были реализованы в имитационно-тренажерном комплексе, созданном в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН и предназначенном для обучения навыкам управления виртуальными роботами.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, колесный робот, подвеска, рессора, метод последовательных импульсов, система виртуального окружения.

DOI 10.14357/20718632190203

### Введение

В тренажерных комплексах и системах виртуального окружения часто необходимо моделировать движение мобильных колесных роботов. В таких роботах колеса крепятся к корпусу с помощью подвески, представляющей собой совокупность соединенных шарнирами деталей, узлов и механизмов. Роль подвески состоит в том, чтобы передать на корпус робота силы и моменты, возникающие при контакте колеса с поверхностью. От этого, в свою очередь, зависит поведение колесного робота при совершении им маневров (разгоне, торможении и повороте), наезде на препятствие, движении по неровному рельефу и т.д. Рассматриваемая

задача сводится к моделированию динамики систем шарнирно связанных тел с учетом влияния упругих элементов (рессор), электроприводов ведущих колес и взаимодействия колеса с поверхностью. Однако проблема состоит в том, что имитационное моделирование движения колесных роботов должно осуществляться в режиме реального времени (не меньше 25 кадров в секунду, т.е. время расчета одного кадра не должно превышать 40 мс). Поэтому создание новых технологий, методов и алгоритмов для моделирования динамики подвесок колесных роботов в масштабе реального времени является важным и актуальным направлением исследований.

<sup>\*</sup>Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00387

Среди существующих решений для реализации динамики колесных роботов выделяются два подхода. Первый подход состоит в том, что колесный робот моделируется как единое целое, а действие подвесок заменяется математическими моделями для вычисления сил и моментов, которые непосредственно (без действия подвески) передаются на корпус робота. Примером служат публикации [1-3], в которых задействована упруго-вязкая модель рессоры. Однако с применением такого подхода обеспечивается недостаточная точность и качество моделирования. Второй подход заключается в том, что составные части робота описываются в виде системы шарнирно связанных тел и силовых элементов. В этом случае, как правило, используются сторонние программные комплекавтоматизированного моделирования динамики систем тел такие, как «Универсальный механизм» [4] и ADAMS [5]. В работах [6-10] применение этих систем было рассмотрено на примерах моделирования колесных транспортных средств. Проблема такого подхода заключается в том, что для общего случая движения колесного робота по сложному рельефу обеспечение режима реального времени является затруднительным. Это связано с тем, что формулировка динамики колесных роботов приводит к так называемой жесткой системе дифференциальных уравнений [11], для решения которой требуются вычислительно затратные неявные методы численного интегрирования. Другая проблема состоит в том, что некоторые подвески имеют структуру замкнутой кинематической цепи, для обработки которой вводятся шарниры специального типа [8], что также сказывается на скорости вычислений.

В работе рассматриваются основные типы независимых подвесок, т.е. таких, в которых колеса одной поперечной оси не имеют жесткой связи. Моделирование динамики подвесок осуществляется с применением ранее разработанного итерационного метода последовательных импульсов [12-16], с помощью которого реализуются кинематические связи в шарнирах, ход подвески, динамика рессоры и электропривода. Идея этого метода показывается здесь на примере голономных ограничений (в виде уравнений), накладываемых на координаты и скорости тел, выполнение которых осуществляется последовательно для каждого ограничения путем вычисления и применения импульсов. Апробация предложенных методов и подходов проводилась в имитационнотренажерном комплексе, разработанном в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, и показала их адекватность для моделирования динамики виртуальных колесных роботов.

## 1. Модели подвесок колесных роботов

Здесь мы будем рассматривать следующие типы независимых подвесок: с качающимися полуосями, на продольных рычагах, на двойных поперечных и продольных рычагах, свечная и Макферсона (на направляющих стойках). Опишем модели этих подвесок с учетом типа рессоры, представляющей собой пружину с амортизатором (пружинная модель рессоры). Структуру подвесок будем описывать с помощью графа, узлами которого являются звенья колесного робота, а ребрами – шарниры. В этом графе упругий элемент (рессора) будем изображать ломаной линией, соединяющей узлы. Отметим, что для простоты здесь мы приводим схемы подвесок без учета поворотного механизма колеса от рулевой тяги.

В подвеске с качающимися полуосями (Рис. 1) рычаг (полуось) крепится к корпусу робота с помощью осевого шарнира. Движение этой подвески осуществляется в плоскости поперечного сечения робота и определяется углом  $\varphi$  поворота рычага относительно корпуса таким образом, что колесо в процессе движения будет всегда перпендикулярно своей полуоси. Колесо, в свою очередь, крепится к рычагу с помощью

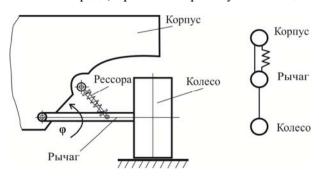


Рис. 1. Схема подвески с качающимися полуосями

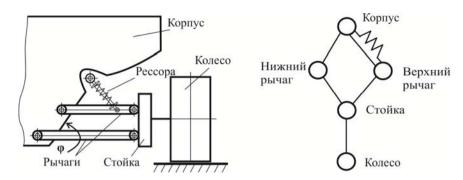


Рис. 2. Схема подвески на двойных поперечных рычагах

осевого шарнира. Поперечная рессора соединяет корпус робота с рычагом подвески. Подвеска на продольных рычагах определяется аналогичным образом, но ее движение осуществляется в продольной плоскости робота.

Схематическое описание и структура подвески на двойных поперечных рычагах представлена на Рис. 2. В ней используются два поперечных рычага, внутренние концы которых крепятся с помощью осевых шарниров к корпусу робота, а внешние концы подсоединены к стойке колеса, образуя тем самым параллелограмм. Колесо крепится к стойке с помощью осевого шарнира. Рессора в рассматриваемой модели соединяет корпус робота с верхним рычагом подвески. Движение этой подвески осуществляется в поперечной плоскости робота и определяется углом  $\varphi$  поворота нижнего рычага относительно корпуса. Аналогичным образом устроена подвеска на двойных продольных рычагах.

В свечной подвеске (Рис. 3) стойка скользит вверх-вниз по направляющей, жестко прикрепленной к корпусу робота. Данное соединение описывается как линейный шарнир, соединяющий стойку подвески с корпусом. Рессора в этой модели соединяет корпус робота со стойкой подвески. В свою очередь колесо крепится

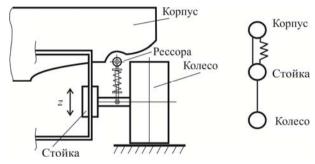


Рис. 3. Схема свечной подвески

к стойке с помощью осевого шарнира. Движение свечной подвески определяется положением *z* стойки относительно направляющей.

Подвеска Макферсона (Рис. 4) сочетает в себе свойства двух подвесок: свечной и на поперечных рычагах. В этой подвеске используется рычаг, внутренний конец которого крепится с помощью осевого шарнира к корпусу робота, а внешний — к ступице колеса. Амортизаторная стойка, которая также выполняет функцию рессоры, соединена с корпусом робота через осевой шарнир, а со ступицей колеса — через линейный шарнир. Колесо вращается относительно ступицы посредством осевого шарнира. Движение этой подвески определяется углом  $\varphi$  поворота рычага относительно корпуса.

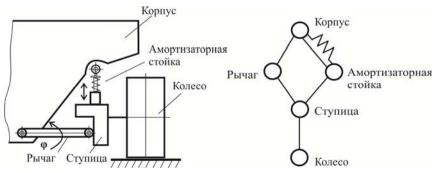


Рис. 4. Схема подвески Макферсона

Динамику приведенных моделей подвесок будем реализовывать с помощью метода последовательных импульсов.

# 2. Моделирование динамики подвесок методом последовательных импульсов

Динамика подвесок колесных роботов формулируется в виде задачи моделирования динамики шарнирно связанных твердых тел. Для решения этой задачи воспользуемся ранее разработанным методом последовательных импульсов [12]. Сначала опишем идею этого метода на примере ограничений, задаваемых в виде уравнений, а затем покажем, как моделировать ограничения на ход подвески, динамику рессоры и электропривода.

Пусть имеется система из K шарнирно связанных твердых тел. Эти тела можно рассматривать как свободные, а шарнирные связи заменить набором из N ограничений относительно координат тел, задаваемых вектором  $\mathbf{X}$  размерности  $S^*K$  (S — число координат, требуемых для описания положения и ориентации тела):

$$\mathbf{G}(\mathbf{X}) = \mathbf{0} \ . \tag{1}$$

Дифференцируя (1) по времени t, получим

$$\dot{\mathbf{G}} = \mathbf{J}\mathbf{V} = \mathbf{0}\,,\tag{2}$$

где V — вектор скоростей (линейных и угловых) системы тел размерности 6K, J — матрица Якоби размерности N на 6K.

В данной работе задействован импульсный подход для моделирования динамики систем тел. Поэтому, для того чтобы обеспечить выполнение ограничений (2), необходимо вычислить импульс  $\mathbf{p}_c$  размерности N, определяемый следующим образом [17]:

$$\mathbf{p}_c = \mathbf{J}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\lambda} \,, \tag{3}$$

где  $\lambda$  — вектор размерности N неизвестных значений импульсов.

Движение твердого тела определяется уравнениями Ньютона-Эйлера [18]. Для K тел эти уравнения образуют систему

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_c, \tag{4}$$

где 
$$\mathbf{M} = diag\{\mathbf{M}_1,...,\mathbf{M}_K\}$$
,  $\mathbf{M}_k = diag\{m_k \mathbf{E}_3, \mathbf{I}_k\}$ ,  $k = \overline{\mathbf{I},K}$  — блочно-диагональная матрица масс

размерности 6K на 6K;  $m_k$  — масса k-го тела;  $\mathbf{E}_3$  — единичная матрица 3 на 3;  $\mathbf{I}_k$  — матрица (тензор) инерции k-го тела размерности 3 на 3;  $\mathbf{F}$  — сумма всех внешних сил и моментов, действующих на тела в системе;  $\mathbf{F}_c$  — сумма всех сил и моментов, обеспечивающих ограничения (2).

Воспользуемся полунеявным методом Эйлера [19] для интегрирования дифференциальных уравнений (4). Выбирая шаг моделирования  $\Delta t$ , после учета импульса  $\mathbf{p}_c = \mathbf{F}_c \Delta t = \mathbf{J}^T \lambda$  из (3) преобразуем уравнения (4) к виду

$$\mathbf{V}(t + \Delta t) = \mathbf{V}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{p}_{f} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda},$$

где  $\mathbf{p}_f = \mathbf{F} \Delta t$  — импульс всех внешних сил и моментов.

Подставляя полученное выражение для скорости  $V(t + \Delta t)$  в (2), получим систему линейных уравнений относительно неизвестных  $\lambda$ :

$$\mathbf{A}\lambda = \mathbf{b}$$
,  $\mathbf{A} = \mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^{\mathrm{T}}$ ,  $\mathbf{b} = -\mathbf{J}\mathbf{V}(t) - \mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{p}_{f}$ . (5)

В итерационном методе последовательных импульсов ограничения (2) обрабатываются независимо друг от друга. Тогда система уравнений (5) преобразуется к уравнениям относительно изменений импульсов  $\Delta \lambda_{s,i}$ :

$$a_{i}\Delta\lambda_{s,i} = b'_{s,i}, \ a_{i} = A_{ii},$$
  
$$b'_{s,i} = -\mathbf{J}_{i}\mathbf{V}'(t+\Delta t) - \mathbf{J}_{i}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{p}_{f}, \ i = \overline{1,N},$$
 (6)

где s – номер итерации,  $\mathbf{V}'(t+\Delta t)$  – вектор скоростей системы тел после применения предыдущих импульсов.

Метод последовательных импульсов [12] заключается в итерационном решении уравнений (6) для каждого ограничения, где искомые импульсы  $\lambda$  в задаче (5) выражаются через вы-

числяемые 
$$\Delta \lambda_s$$
 как  $\lambda = \sum_{s=1}^M \Delta \lambda_s$ , где  $M$  – количе-

ство проведенных итераций. Такой подход эквивалентен итерационному методу Гаусса-Зейделя [20, с. 102] для решения системы уравнений (5) и вычисление импульсов осуществляется до тех пор, пока не будет выполнен один из критериев окончания. Предлагаемое решение позволяет обеспечить выполнение только ограничений (2) относительно скоростей тел, в то время как ограничения (1) относительно координат тел в процессе моделирования будут

нарушаться. Поэтому, для обеспечения ограничений (1) применяется стабилизация на основе метода раздельных импульсов, с основными положениями которого можно ознакомиться в работе [12, с. 55].

Моделирование динамики подвесок включает в себя формирование и обеспечение ограничений на кинематические связи в шарнирах, ход подвески, динамику рессоры и электропривода, если колесо является управляемым. Рассмотренные ранее подвески состоят из тел, соединенных между собой осевыми и линейными шарнирами, что приводит к ограничениям (1) и (2). С выводом и обработкой этих ограничений можно ознакомиться в публикации [12, с. 56]. Здесь мы покажем, как осуществляется моделирование хода подвески, рессоры и электропривода ведущего колеса с помощью задания ограничений специального вида.

При движении робота вертикальное положение z его колеса ограничено ходом подвески. Это соответствует ограничениям

$$z_{\min} \le z \le z_{\max}$$
,

где  $z_{\min} \le 0$  и  $z_{\max} \ge 0$  — минимальное и максимальное смещение колеса относительно его нейтрального положения.

Чтобы обеспечить эти ограничения, в подвесках с рычагами (качающиеся полуоси, двойные поперечные и продольные рычаги, Макферсона) задаются эквивалентные ограничения на угол поворота  $\varphi$  нижнего рычага. Из соотношения для синуса угла прямоугольного треугольника получим следующую аппроксимацию этих ограничений

$$\arcsin\left(\frac{z_{\min}}{l}\right) \le \varphi \le \arcsin\left(\frac{z_{\max}}{l}\right),\tag{7}$$

где l — расстояние от центра колеса до шарнира рычага.

Неравенства (7) задают ограничения на относительное движение в шарнире и могут быть представлены в общем виде  $G_l \ge 0$ . В работе [13] доказывается, что для реализации таких ограничений требуется обеспечить условия  $\dot{G}_l \ge 0$ ,  $\lambda_l \ge 0$  и  $\dot{G}_l \lambda_l = 0$ . Для этого в методе последовательных импульсов решение  $\lambda_l$  проецируется на множество, заданное этими условиями.

Рессора представляет собой упругий элемент, который описывается поступательной или вращательной моделью пружины с демпфером. Для обеспечения свойства устойчивости моделирования динамики системы тел с рессорой в данной работе рассматривается ранее разработанный метод мягких ограничений [16]. Этот метод заключается в том, что силовая модель пружины заменяется ограничением, полученным из неявной схемы интегрирования дифференциальных уравнений движения тел:

$$\dot{G}_s + \frac{\beta}{\Delta t} G_s + \gamma \lambda = 0,$$

где положение  $G_s=0$  соответствует недеформированному состоянию пружины;  $\beta$  и  $\gamma$  – коэффициенты мягкого ограничения, вычисленные на основе параметров пружины.

Управление колесным роботом осуществляется с помощью электроприводов, установленных на его ведущих колесах. Для реализации динамики электроприводов в методе последовательных импульсов вводится [15] специальное ограниче-

ние 
$$\alpha - \frac{\alpha_m}{r} = 0$$
, связывающее угол поворота дви-

гателя  $\alpha_{\scriptscriptstyle m}$  с углом поворота в шарнире  $\alpha$  , которое эквивалентно ограничению

$$G_m = \sin\left(\alpha - \frac{\alpha_m}{r}\right) = 0$$
,

где r — передаточное число редуктора.

Дифференцируя это соотношение по времени, получим ограничение  $\dot{G}_m=0$  относительно скорости поворота двигателя  $\omega_m$  и скоростей тел, соединяемых шарниром с электроприводом. Вывод соотношений для импульса, обеспечивающего это ограничение, базируется на применении модели динамики электродвигателя в виде дифференциального уравнения [15]:

$$I_{m}\dot{\omega}_{m} = \tau_{m} + \tau_{c}, \ \tau_{m} = M_{s}(U - \frac{\omega_{m}}{\omega_{colle}}), \tag{8}$$

где  $I_{\scriptscriptstyle m} = \frac{M_{\scriptscriptstyle S} t_{\scriptscriptstyle m}}{\omega_{\scriptscriptstyle idle}}$  — момент инерции якоря двига-

теля;  $M_s$  — пусковой момент двигателя;  $t_m$  — электромеханическая постоянная времени;  $\omega_{idle}$  — скорость холостого хода двигателя;  $\tau_m$  — кру-

тящий момент двигателя;  $\tau_c$  — момент нагрузки на двигатель.

Применяя к (8) полунеявную схему Эйлера и переходя от сил и моментов к импульсам, получим соотношение для определения новой скорости поворота двигателя через импульс. Это соотношение затем подставляется в ограничение  $\dot{G}_m = 0$ , из которого выводится уравнение для импульса.

### 3. Результаты моделирования

Предложенные в статье подходы и методы моделирования динамики подвесок колесных роботов были реализованы в рамках программного комплекса виртуального окружения, разработанного в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. В этом комплексе виртуальные модели колесных роботов создаются в системе трехмерного моделирования 3ds Max с помощью специально разработанного набора конструктора ИЗ (электрических дополнительных элементов двигателей, колес, шарниров и т.д.).

На Рис. 5 показана 3D модель колесного робота КРТ-100М с тележкой, в которой колеса его передней части крепятся к корпусу с помощью подвесок на двойных поперечных рычагах, а колеса тележки - с помощью свечной подвески. Для создания подвесок колес был разработан специальный конструктор объекта колеса, содержащий свиток параметров, в который входит тип подвески, ограничения на ход подвески, параметры рессоры и электропривода для ведущего колеса. При выборе конкретного типа подвески автоматически создается соответствующий набор костей (bones в системе 3ds Max). В этом случае иерархия подвески колеса представляет собой набор костей, задающих шарниры, и звеньев, присоединенные к этим костям. В свитке параметров рессоры также выбираются объекты, которые она соединяет. Для пружинной модели рессоры, один объект привязывается к корпусу робота, а другой – к звену подвески, как, например, сделано для колес тележки робота КРТ-100М. В свою очередь, для торсионной модели рессоры зада-

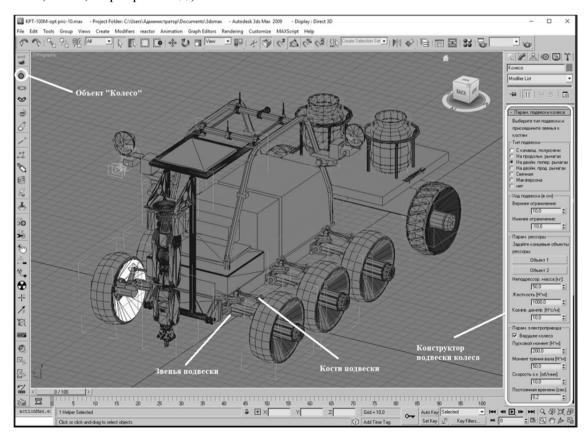


Рис. 5. Трехмерная модель робота КРТ-100M с тележкой в системе 3ds Max

ется только шарнир подвески, где она находится (колеса подвески на двойных поперечных рычагах для робота КРТ-100 M).

Созданные модели колесных роботов экспортируются в программный комплекс, который состоит из подсистем управления, динамики и визуализации. Управление роботом в этом комплексе осуществляется с помощью виртуального пульта. Алгоритм работы пульта определяется функциональной схемой управления, в которой элементы пульта и исполнительные устройства (например, электроприводы колес) задаются в виде блоков, связанных друг с другом. Подсистема управления отвечает за расчет этой схемы. На каждом шаге моделирования воздействия оператора на элементы пульта управления передаются функциональной схеме, в которой выполняется расчет напряжений, подаваемых на электроприводы ведущих колес робота. Вычисленные напряжения передаются в подсистему динамики, в которой реализуется расчет новых координат (положения и ориентации) объектов. Затем полученные координаты объектов пересылаются в подсистему визуализации, которая осуществляет рендеринг виртуальной сцены и роботов в масштабе реального времени.

Апробация созданных подходов и методов моделирования динамики подвесок колес проводилась в рамках этого программного комплекса на примере управления движением колесного робота КРТ-100М с тележкой. Для этого была создана виртуальная сцена со сложным рельефом, содержащая различные препятствия. При моделировании контактного взаимодействия колеса c объектами использована упрощенная модель, в которой вычисляется только одна точка контакта. На рис. 6 показано положение робота в виртуальной сцене при наезде его правых колес на препятствие. Из рисунка видно, что правые колеса приподнимаются, а левые опускаются, тем самым наклоняя корпус робота. Полученные результаты показывают, что предложенные в статье методы и подходы позволяют адекватно моделировать динамику подвесок колесных роботов в системах виртуального окружения.

### Заключение

В работе была рассмотрена задача моделирования динамики подвесок колесных роботов в системах виртуального окружения. Приведены модели основных типов независимых подвесок, применяемых в роботах. Для моделирования динамики подвесок был задействован итеративный метод последовательных импульсов, с помощью которого реализованы кинематические связи в подвесках, ограничения на ход подвески, динамика рессоры на основе метода мягких ограничений и динамика электропривода с применением его паспортных параметров. Преимуществом предложенного подхода является его универсальность, простота моделей и обеспечение устойчивости моделирования при любых параметрах жесткости рессоры. К недостаткам можно отнести понижение качества моделирования при уменьшении количества итераций метода. В дальнейшем предполагается развитие методов и подходов моделирования контактного взаимодействия колеса со сложным рельефом и объектами виртуального окружения.

## Литература

- 1. Наумов В.Н., Машков К.Ю., Котиев Г.О. и др. Метод математического моделирования прямолинейного движения роботизированных транспортных средств по деформируемому грунту // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012, № 11. С. 57-64.
- Михайлюк М.В., Трушин А.М. Моделирование динамики колес в виртуальных сценах // Труды НИИСИ РАН. 2012. Т. 2 № 1. С. 47-53.
- Котиев Г.О., Дьяков А.С. Метод разработки ходовых систем высокоподвижных безэкипажных наземных транспортных средств // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2016. Т. 174 № 1. С. 186–197.
- http://www.universalmechanism.com (дата обращения 18.04.2019).
- https://www.mscsoftware.com/product/adams (дата обращения 18.04.2019).
- Blundell M. and Harty D. The multibody systems approach to vehicle dynamics. New York, NY, USA: Elsevier Science and Technology Books, 2004. 518 p.
- Rill G. Road vehicle dynamics: fundamentals and modeling. CRC Press, 2011. 331 p.
- Алисейчик А.П., Павловский В.Е. Модель и динамические оценки управляемости и комфортабельности движения многоколесного мобильного робота // М.: Проблемы управления. 2013. № 1. С 70-78.

- 9. Горелов В.А., Комиссаров А.И., Мирошниченко А.В. Моделирование колесного транспортного средства 8×8 в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел // Международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг". 2015. С. 221-225.
- Горелов В.А., Комиссаров А.И., Косицын Б.Б. Исследование движения автомобиля в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел // Журнал автомобильных инженеров. 2016.
  Т. 96 № 1. С. 18-23.
- 11. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
- 12. Михайлюк М.В., Страшнов Е.В. Моделирование системы связанных тел методом последовательных импульсов // Труды НИИСИ РАН. 2014. Т. 4 № 2. С. 52-60.
- 13. Михайлюк М.В., Страшнов Е.В. Моделирование ограничений на относительное движение шарнирно связанных тел // Издательство "Новые технологии", Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16 № 10. С. 678 685.
- 14. Михайлюк М.В., Страшнов Е.В. Моделирование динамики системы связанных тел с учетом трения в

- шарнирах. // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 1. С. 108-124.
- 15. Страшнов Е.В., Торгашев М.А. Моделирование динамики электроприводов виртуальных роботов в имитационно-тренажерных комплексах // Издательство "Новые технологии", Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17 № 11. С. 762-768.
- 16. Страшнов Е.В., Торгашев М.А., Тимохин П.Ю. Моделирование пружин в системах виртуального окружения с помощью метода мягких ограничений // Информационные технологии и вычислительные системы. 2017. № 3. С. 70-78.
- 17. Shabana Ahmed A. Computational dynamics, Third edition, John Wiley & Sons Inc., 2010. 528 p.
- Garstenauer H. A unified framework for rigid body dynamics, Johannes Kepler University Linz, Tech. Rep., Mar. 2006. 136 p.
- 19. Catto E. Iterative dynamics with temporal coherence, In Game Developer Conference. 2005. pp. 1-24.
- Stepien J. Physics-based animation of articulated rigid body systems for virtual environments. Gliwice, 2013. 183 p.

Страшнов Евгений Владимирович. Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научноисследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), г. Москва, Россия. Научный сотрудник. Количество печатных работ: 20. Область научных интересов: вычислительная динамика, системы виртуального окружения, компьютерная графика. E-mail: strashnov\_evg@mail.ru.

**Торгашев Михаил Александрович.** Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научноисследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), г. Москва, Россия. Заведующий сектором, кандидат физико-математических наук. Количество печатных работ: 48. Область научных интересов: распределенные вычисления, компьютерная графика, распознавание образов, обработка сигналов, системы виртуального окружения. E-mail: mtorg@mail.ru

# Suspension dynamics simulation of wheeled robots in virtual environment systems

E.V. Strashnov, M.A. Torgashev

Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences" (SRISA RAS), Moscow, Russia

**Abstract.** One of the important and relevant areas of research is a real time simulation modeling of the wheeled robots motion in virtual environment systems. This problem leads to the wheel suspension dynamics simulation taking into account the influence of leaf springs, electric motors, etc. In this paper, the sequential impulses method for simulation of articulated bodies system is used, in which the system describes the main types of independent wheel suspensions. The proposed solution is based on the sequential impulses computation that ensure the constraints imposed on the coordinates and velocities of bodies. The developed methods and approaches for suspension dynamics simulation of wheeled robots were implemented in training complex that was created in SRISA RAS and was designed to train virtual robots control skills.

**Keywords:** simulation modeling, wheeled robot, suspension, leaf spring, sequential impulses method, virtual environment system.

**DOI** 10.14357/20718632190203

### References

- Naumov, V.N., Mashkov, K.Yu., Kotiev, G.O, and etc. 2012. Metod matematicheskogo modelirovaniya pryamolinejnogo dvizheniya robotizirovannyh transportnyh sredstv po deformiruemomu gruntu [The method of mathematical modeling of the rectilinear movement of robotic vehicles on deformable soil] Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii [Engineering Journal: Science and Innovation] 11:57-64.
- Mihaylyuk, M.V., and Trushin, A.M. 2012. Modelirovanie dinamiki koles v virtual'nyh scenah [Modeling the dynamics of the wheels in virtual scenes] Trudy NIISI RAN [Proceedings of SRISA RAS] 2(1):47-53.
- Kotiev, G.O., and Diakov, A.S. 2016. Metod razrabotki hodovyh sistem vysokopodvizhnyh bezehkipazhnyh nazemnyh transportnyh sredstv [Method of developing high-mobility suspension systems of unmanned ground vehicles] Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of the Southern Federal University. Technical science] 174(1):186-197.
- Universal Mechanism (UM). Available at: http://www.universalmechanism.com (accessed April 18, 2019).
- Adams. Available at: https://www.mscsoftware.com/ product/adams (accessed April 18, 2019).
- Blundell M., and Harty D. 2004. The multibody systems approach to vehicle dynamics. New York, NY, USA: Elsevier Science and Technology Books. 518 p.
- Rill G. 2011. Road vehicle dynamics: fundamentals and modeling. CRC Press. 331 p.
- Alisejchik, A.P., and Pavlovskij, V.E. 2013. Model' i dinamicheskie ocenki upravlyaemosti i komfortabel'nosti dvizheniya mnogokolesnogo mobil'nogo robota [Model and dynamic assessment of the controllability and comfort of movement of a multi-wheeled mobile robot] Problemy upravleniya [Control Sciences] 1:70-78.
- Gorelov, V.A., Komissarov, A.I., and Miroshnichenko, A.V. 2015. Modelirovanie kolesnogo transportnogo sredstva 8×8 v programmnom komplekse avtomatizirovannogo analiza dinamiki sistem tel [8×8 wheeled vehicle modeling in a multibody dynamics simulation software] Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya "Prom-Inzhiniring" [International Conference on Industrial Engineering] 221-225.
- Gorelov, V.A., Komissarov, A.I., and Kosicyn, B.B.
  2016. Issledovanie dvizheniya avtomobilya v pro-

- grammnom komplekse avtomatizirovannogo modelirovaniya dinamiki sistem tel [Study of the car movement in the software complex of automated modeling dynamics of bodies] ZHurnal avtomobil'nyh inzhenerov [Journal of Automotive Engineers] 96(1):18-23.
- 11. Samarskij, A.A., and Gulin, A.V. 1989. Chislennye metody [Numerical methods] Moscow: Science. 432 p.
- Mihajlyuk, M.V., and Strashnov, E.V. 2014. Modelirovanie sistemy svyazannyh tel metodom posledovatel'nyh impul'sov [Simulation of articulated multibody system using sequential impulses method] Trudy NIISI RAN [Proceedings of SRISA RAS] 4(2):52-60.
- Mihaylyuk, M.V., and Strashnov, E.V. 2015. Modelirovanie ogranichenij na otnositel'noe dvizhenie sharnirno svyazannyh tel [Simulation of restrictions for the relative motion articulated rigid bodies in virtual environment systems] Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie [Mechatronics, Automation, Control] 16(10):678-685.
- Mihaylyuk, M.V., and Strashnov, E.V. 2016. Modelirovanie dinamiki sistemy svyazannyh tel s uchetom treniya v sharnirah [Simulation of articulated rigid bodies with joint friction] Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana [Science and Education of BMSTU] 1:108-124.
- Strashnov, E.V., and Torgashev, M.A. 2016. Modelirovanie dinamiki ehlektroprivodov virtual'nyh robotov v imitacionno-trenazhernyh kompleksah [Simulation of the actuator dynamics of the virtual robots in the training complexes] Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie [Mechatronics, Automation, Control] 17(11):762-768.
- 16. Strashnov, E.V., Torgashev, M.A., and Timokhin, P.Yu. 2017. Modelirovanie pruzhin v sistemah virtual'nogo okruzheniya s pomoshch'yu metoda myagkih ogranichenij [Simulation of springs with soft constraints method in virtual environment systems] Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy [Journal of Information Technologies and Computing Systems] 3:70-78.
- 17. Shabana Ahmed A. 2010. Computational dynamics, 3rd edition, John Wiley & Sons Inc. 528 p.
- Garstenauer H. 2006. A unified framework for rigid body dynamics, Johannes Kepler University Linz, Tech. Rep. 136 p.
- Catto E. 2005. Iterative dynamics with temporal coherence, In Game Developer Conference. 1-24.
- Stepien J. 2013. Physics-based animation of articulated rigid body systems for virtual environments. Gliwice. 183 p.

Strashnov E.V. Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", 36/1 Nakhimovskiy Av., Moscow, 117218, Russia, e-mail: strashnov\_evg@mail.ru

**Torgashev M.A.** Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", 36/1 Nakhimovskiy Av., Moscow, 117218, Russia, e-mail: mtorg@mail.ru