



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 73 за 2023 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

В.А. Карташев, Т. Цзян

Модель движения колесного аппарата по неровной поверхности

Статья доступна по лицензии
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Карташев В.А., Цзян Т. Модель движения колесного аппарата по неровной поверхности // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2023. № 73. 14 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2023-73>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2023-73>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Российской Академии наук

В.А. КАРТАШЕВ, Т. ЦЗЯН

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНОГО АППАРАТА
ПО НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Москва, 2023

В.А. Карташев, Т. Цзян

Модель движения колесного аппарата по неровной поверхности

В работе описывается двумерная модель движения колесного напланетного аппарата.

Особенностью модели является вычисление точного положения аппарата на поверхности, учет взаимодействия с ней колес и возможность осуществления моделирования в масштабе реального времени.

Модель позволяет исследовать геометрическую и динамическую проходимость колесного аппарата с целью определения размеров элементов подвески и коэффициентов сцепления колес с грунтом, которые обеспечивают необходимые условия преодоления заданного рельефа поверхности.

Ключевые слова: виртуальная модель, колесный исследовательский аппарат, геометрическая проходимость, динамическая проходимость.

V.A. Kartashev, T. Jiang

Simulation model of wheel planet rover motion through uneven surface

The paper deals with two-dimensional model of wheeled planetary vehicle motion. The main features of the model are calculation of the vehicle position with high accuracy, interaction between wheels and surface and the possibility of real-time modeling.

The model allows to investigate the geometric and dynamic patency of the wheeled vehicle in order to determine dimensions of the suspension elements and friction coefficients of the wheels to the ground, which provide the necessary conditions for overcoming a given surface relief.

Key words: simulation model, wheel planet vehicle, geometry patency, dynamic patency

Оглавление

Введение	3
1. Кинематическая схема колесного аппарата	4
2. Модель рельефа	6
3. Положение аппарата на поверхности.....	7
4. Взаимодействие колес с поверхностью	9
5. Управление и необходимые условия реализуемости движения	10
6. Исследование проходимости рельефа.....	11
Результаты.....	13
Список литературы.....	14

Введение

В настоящее время несколько стран уже осуществили или планируют осуществить доставку на Луну автономных транспортных средств. С увеличением объема исследований, выполняемых такими аппаратами, и накоплением опыта управления ими неизбежно будет расти сложность выполняемых миссий.

Подготовка планируемых миссий требует предварительного исследования возможностей напланетных транспортных аппаратов на математических моделях [1-8].

Одним из направлений моделирования является использование виртуальных моделей. Такие модели позволяют исследовать необходимые условия проходимости напланетных аппаратов по местности со сложным рельефом.

В научно-технической литературе представлены два подхода к созданию виртуальных моделей.

Первый состоит в построении геометрических образов колесного транспортного средства и окружающей среды, которые они занимают в соответствующие моменты времени [9]. Графические ускорители делают возможным получение качественных изображений в масштабе реального времени.

Точность вычисления положения транспортного средства обычно ограничивается визуальным сходством с реальным движением. Например, в тренажерах [10,11] и компьютерных играх колебания транспортного средства не связаны с неровностями поверхности.

Взаимодействие аппаратов с внешней средой часто осуществляется в таких моделях путем использования упрощенных моделей [12].

Точность моделирования, получаемая в описываемых моделях, неприемлема при проектировании мобильного аппарата.

Второй способ моделирования основан на интегрировании уравнений движения [13]. Он обеспечивает вычисление положения моделируемого аппарата и сил, которые на него действуют, с достаточно высокой точностью.

Для того чтобы ошибка интегрирования не накапливалась слишком быстро, шаг интегрирования выбирают достаточно малым, например меньше 0.1 с. Интегрирование уравнений обычно осуществляется методом Рунге-Кутты третьего порядка, в котором выполняются 3 промежуточных подшага. В результате объем вычислений оказывается достаточно большим, что не позволяет выполнять моделирование в масштабе реального времени.

В настоящей работе описывается способ построения виртуальной модели транспортного средства, который обеспечивает точное определение положения колесного аппарата в пространстве и точек контакта колес с поверхностью. Точное решение задачи геометрического моделирования делает возможным моделирование с большим шагом по времени без быстрого накопления ошибок

во времени. Разработанная геометрическая модель движения может использоваться для исследования геометрической проходимости рельефа, при котором исключается контакт элементов конструкции аппарата с поверхностью.

Условия проходимости рельефа поверхности, которые связаны с взаимодействием колес с поверхностью, учитываются путем проверки отсутствия проскальзывания колес в соответствии с законом кулонова трения. Учет в модели движения взаимодействия аппарата с окружающей средой делает возможным исследование динамической проходимости заданного рельефа и определение необходимого коэффициента сцепления колес с грунтом.

Программная реализация разработанной виртуальной модели колесного аппарата осуществляет визуализацию его движения и получаемых в результате моделирования данных в масштабе реального времени.

1. Кинематическая схема колесного аппарата

Исследуемый аппарат состоит из прямоугольного корпуса, снабженного 2-мя независимыми шарнирными подвесками (рис. 1). Центр масс корпуса O совпадает с его геометрическим центром.

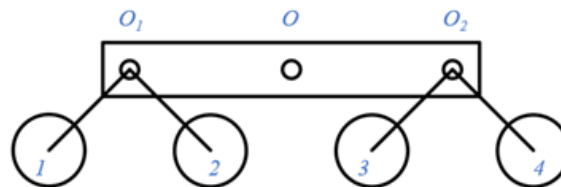


Рис. 1

Оси шарниров обозначены через O_1 и O_2 . Шарниры могут свободно поворачиваться на произвольный угол.

Каждая подвеска содержит по 2 тяги, угол между которыми постоянен. Вокруг своих осей они поворачиваются как единое целое. Длины тяг одинаковы.

На концах тяг находятся оси колес. Нумерация колес показана на рис. 1.

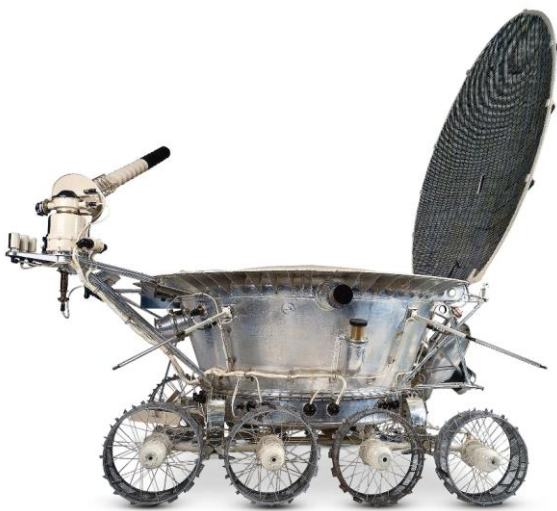
Каждое колесо снабжено электромотором. Предполагается, что скорость колес регулируется таким образом, чтобы при движении они проскальзывали.

Крепление колес к осям осуществляется с помощью упругих элементов. Упругость подвески позволяет избежать статической неопределенности в распределении реакций опоры и делает возможным их вычисление при моделировании движения.

Предполагается также, что упругость подвески одинакова во всех направлениях. Это означает, что матрица упругости пропорциональна единичной матрице.

Используемая в работе кинематическая схема аппарата имеет общие элементы с кинематической схемой советских луноходов (рис. 2а) [14], лунным ровером Китая Yutu (рис. 3а) [15] и марсоходами США Curiosity и Opportunity (рис. 3б) [16].

Луноходы опирались на 4 пары колес, по 2 пары с каждой стороны. Каждое колесо пары крепилось к общей оси с помощью рычага. Рычаги соединялись с осью через торсионы (рис. 2б).



а) Луноход-1



б) Подвеска колес

Рис. 2

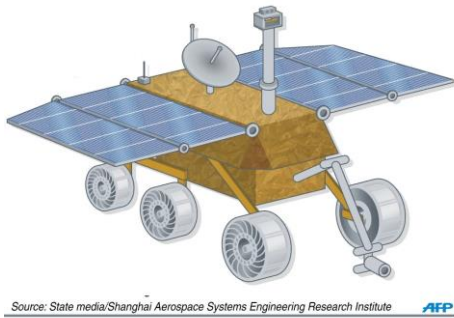
Достаточно большая подвижность торсионной подвески способствовала обеспечению контакта всех колес с поверхностью Луны при движении по неровной поверхности. Вывешивание колес уменьшает возможности транспортного средства по преодолению препятствий ввиду того, что не все колеса принимают участие в создании тягового усилия.

Поворот рычага вокруг оси подвески ограничивается специальным устройством. Ограничения не позволяют осям колес занять такое положение, при котором обод колеса находится на расстоянии меньше заданной величины от вертикали, проходящей через ось подвески. Конструкция ограничивающего устройства делает невозможным касание соседних колес при движении лунохода по достаточно глубоким неровностям.

В результате оказывается, что расстояние между осями вращения соседних колес изменяется в достаточно ограниченном интервале. Это обстоятельство делает возможным использование в качестве первого приближения результатов моделирования положения лунохода, которое определяется с помощью разработанного в работе алгоритма для подвески с неизменным расстоянием между осями колес.

Кинематическая схемы подвески колес лунного ровера Yutu аналогична принятой в работе. Положение переднего колеса фиксировано. Задние 2 колеса соединены с корпусом рычагами, угол между которым постоянен.

Конструкции марсоходов Opportunity и Curiosity одинаковы. С каждой стороны аппаратов находятся по 3 колеса.



Source: State media/Shanghai Aerospace Systems Engineering Research Institute AFP

а) Лунный ровер Yutu



б) Марсоход Curiosity

Рис. 3

Рычажная подвеска является составной. Угол между рычагами, на которых крепятся последние два колеса, не изменяется. Ось подвески этих колес соединена рычагом с рычагом, на котором крепится первое колесо. Угол между этими рычагами является постоянным.

Постоянство углов между рычагами делает возможным вычислять положение марсохода при движении по неровному рельефу с использованием алгоритма, который подобен разработанному в настоящей работе.

2. Модель рельефа

Рельеф поверхности, по которому передвигается колесный аппарат, представляется ломаной линией. Она задается своими узлами. Представление рельефа в виде ломаной позволяет получить как крупные, так и мелкие образования на поверхности.

Задание линии поверхности осуществляется с помощью разработанного редактора. На рис. 4 показан вид интерфейса редактора на экране компьютера.

Команды редактора позволяют добавлять узлы ломаной линии, показывать заданную линию, читать и сохранять массив узловых точек в виде файла.

Органы управления представляют собой кнопки. На рисунке они пронумерованы от 1 до 7.

Кнопка 1 используется для того, чтобы считать узлы ломаной, которые ранее были сохранены в файле. Нажатие кнопки 7 позволяет сохранить введенную ломаную.

Кнопки 2 и 3 используются для перемещения курсора по горизонтали в точку ломаной линии, положение которой предполагается изменить.

Нажатие кнопки 4 позволяет создать новый узел ломаной и переместить его вверх или вниз, влево или вправо с помощью соответствующих специальных кнопок на клавиатуре.

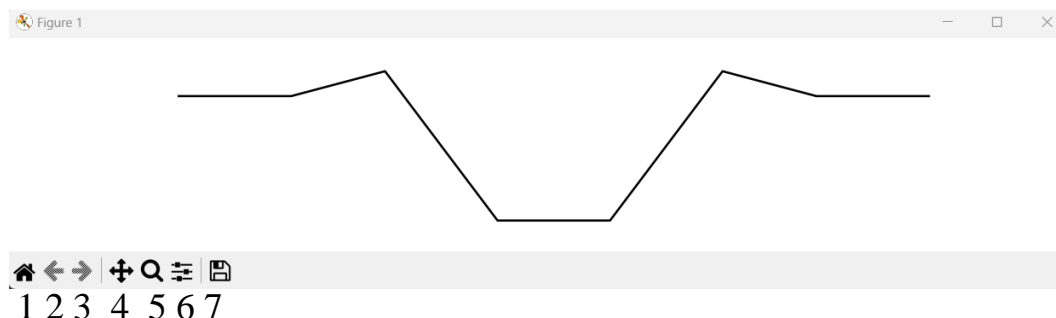


Рис. 4

Кнопка 5 изменяет масштаб рисунка. Кнопка 6 используется для настройки параметров редактора. Можно указать минимальный шаг задания узлов ломаной и скорость перемещения маркеров.

3. Положение аппарата на поверхности

Центр катящегося колеса при своем движении замечает линию, которая в каждой точке удалена от поверхности на величину, равную радиусу R . Линия центра состоит из прямолинейных участков и участков, которые являются дугами окружности радиуса R .

На рис. 5 поверхность представлена ломаной с вершинами в точках A_i , i – номер узла ломаной.

Через B_i обозначены отрезки линии центра колеса, на которых находится центр при качении колеса по отрезку $A_i A_{i+1}$. B_i параллелен $A_i A_{i+1}$ и смещен относительно него на радиус R . Левую вершину B_i обозначим через Bl_i , правую – через Br_i .

Если узел A_i лежит выше отрезка $A_{i-1} A_{i+1}$, то линия центра колеса является дугой окружности радиуса R . Левым концом дуги является точка Br_i , правым концом – точка Bl_{i+1} .

Если узел A_i лежит ниже отрезка $A_{i-1} A_{i+1}$, то линия центра колеса представляет собой угол. Вершина угла является точкой пересечения прямых, которые удалены на величину R от обеих сторон угла $A_i A_{i+1}$. Отрезок B_i параллелен $A_i A_{i+1}$.

Для того чтобы обеспечить общность представления данных о линии центра колеса в виде последовательности отрезков $Bl_i Br_{i+1}$ и дуг, в случае если вершина A_i лежит ниже отрезка $A_{i-1} A_{i+1}$, принимается, что дуга вырождается в точку. Таким образом, в представлении линии центра этому случаю соответствует равенство $Bl_i = Br_{i+1}$.

Для определения положения подвески ровера на поверхности применяется следующий алгоритм. Задается положение центра заднего колеса. Расстояние между центрами колес подвески постоянно, поэтому центр

переднего колеса находится из системы двух уравнений. Одно из них – квадратичное уравнение окружности радиуса R относительно центра заднего колеса.

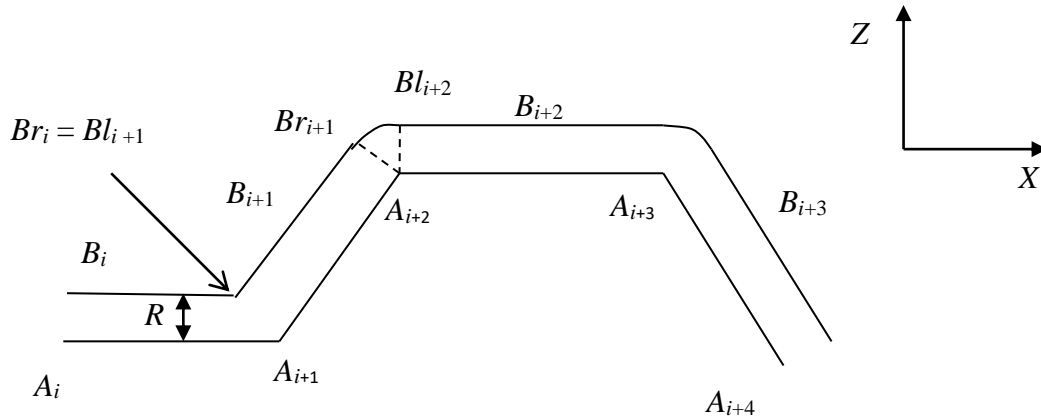


Рис. 5

Если искомый центр лежит на прямолинейном участке линии центров, то второе уравнение является линейным уравнением прямой. Если центр лежит на дуге, то вторым уравнением является квадратичное уравнение окружности радиуса R с центром в вершине ломаной. Это уравнение с помощью первого уравнения сводится к линейному.

Алгоритм определения центра второго колеса последовательно решает систему уравнений для участков линии центров, находящихся правее от того, на котором находится центр первого колеса.

После того как положение центра второго колеса первой подвески найдено, вычисляются координаты ее оси. Затем определяется положение оси второй подвески. При этом учитывается, что расстояние между осями L постоянно. Задача решается с помощью итерационного алгоритма, в котором в начальный момент времени оси подвесок совпадают.

Для этого заднее колесо второй подвески смещается на некоторое расстояние вперед и определяется положение оси второй подвески. Если расстояние меньше L , то центр второго колеса смещается вперед. В противном случае центр смещается назад.

После того как найдено положение осей подвесок, вычисляются координаты центра масс корпуса, его ориентация и координаты точек контакта с поверхностью.

Следует заметить, что все эти величины являются функциями от положения центра колеса с номером 1. В силу того, что оно однозначно определяется положением точки его контакта с поверхностью, можно заключить, что они также являются функциями положения точки контакта колеса аппарата с номером 1.

Если при движении аппарата его колеса не проскальзывают, то скорость вращения каждого колеса, которое отвечает такому движению, может быть

вычислена из скорости вращения первого колеса. В моделирующем алгоритме скорость вращения колес вычисляется по величине пути, проходимого точкой контакта с поверхностью за единицу времени.

4. Взаимодействие колес с поверхностью

После того как проведены кинематические расчеты, осуществляется моделирование динамики движения аппарата.

Движение аппарата подчиняется действию силы тяжести и сил реакций N_i опорной поверхности, в точках контакта колес. В сделанном предположении, что вся масса аппарата сосредоточена в корпусе, силы реакции удовлетворяют системе уравнений:

$$\Sigma N_i + P = mW ; \quad (1)$$

$$\Sigma R_i \times N_i = J\varepsilon ; \quad (2)$$

$$N_i = A_i \Delta_i ; \quad (3)$$

$$\delta + \alpha \times R_i + R_c + R_i + \Delta_i = surf_i. \quad (4)$$

Здесь P – сила тяжести, W – ускорение центра масс, m – масса корпуса, ε – вращательное ускорение корпуса, J – матрица моментов инерции, R_c – радиус-вектор центра корпуса в абсолютной системе координат, R_i – радиус-вектор, проведенный из центра корпуса в точку контакта колеса с поверхностью, A_i – тензоры упругости колеса, Δ_i – упругие смещения колес, A_i – тензоры упругости, $surf_i$ – координаты точки контакта в абсолютной системе координат, δ – вектор упругого смещения центра масс, α – угол поворота корпуса, вызванный деформацией колес.

Уравнения (1) и (2) являются уравнениями сил и моментов, действующих на ровер. Равенство (3) связывает упругое смещение колеса и силу реакции опоры. Выражение (4) учитывает неподвижность точки опоры при упругой деформации колес.

Δ_i , δ и α пренебрежимо малы по сравнению с размерами колесного аппарата.

Ускорение центра масс W и вращательное ускорение ε вычисляются из изменения координат центра масс и углов наклона корпуса во времени.

Система уравнений (1) – (4) содержит 19 линейных уравнений с 19 неизвестными: N_i , Δ_i , δ , α . Она имеет единственное решение относительно сил реакций опоры.

Уравнения динамики можно упростить, если учесть, что аппараты для исследования Луны и планет движутся с достаточно малой скоростью. Этим условиям удовлетворяют все инопланетные аппараты, которые использовались для исследования до настоящего времени.

Следует заметить, что все инопланетные исследовательские аппараты перемещаются по поверхности с малой скоростью.

Например, конструкция приводов Лунохода-1 (СССР) позволяла ему двигаться либо со скоростью 0.2 м/с, либо 0.6 м/с, что составляет 0.8 км/ч и 2 км/ч соответственно.

Луноход КНР Yutu мог перемещаться со скоростью 5 см/с (0.2 км/ч).

Скорость движения марсоходов США Curiosity и Opportunity по поверхности Марса не превышала 4 см/с (0.16 км/ч). Марсоход США Sojourner двигался со скоростью всего 1 см/с (0.04 км/ч).

Весьма малая скорость перемещения исследовательских аппаратов позволяет отказаться от учета линейных и угловых ускорений в уравнениях динамики, перейдя к уравнениям квазистатики. Использование уравнений квазистатики уменьшает объем вычислений и ускоряет моделирование.

В выполненной работе проводилось сравнение результатов моделирования с учетом сил инерции и с использованием уравнений квазистатики. Результаты моделирования показывают, что при скорости движения аппарата менее 0.5 м/с различия в распределении сил реакций незначительны.

5. Управление и необходимые условия реализуемости движения

Управление численной моделью колесного аппарата состоит в задании угловых скоростей колес, при которых они движутся без проскальзывания. Трение скольжения существенно меньше трения покоя, поэтому если проскальзывание колес отсутствует, то приводы ровера способны обеспечить большее тяговое усилие. Соответственно, увеличивается способность преодолевать сложные препятствия.

С этой целью скорости вращения выбираются такими, чтобы путь, проходимый точкой опоры колеса, соответствовал перемещению точки опоры первого колеса.

Рассматриваемое управление реализуемо только в случае, если конструкция колеса обеспечивает достаточный коэффициент сцепления с поверхностью. Потребная величина коэффициента трения покоя $k_{\text{п}}$ для всех колес должна удовлетворять условию

$$|N_{i\parallel}| < k_{\text{п}} |N_{i\perp}|. \quad (5)$$

Здесь $|N_{i\parallel}|$ – касательная составляющая силы реакции опоры, $|N_{i\perp}|$ – нормальная составляющая. Предполагается, что коэффициент трения поверхности одинаков для всех колес.

Если при движении по сложной поверхности для всех колес выполняется условие (5), то движение с выбранным способом управления реализуемо. Если в некоторый момент времени условие (5) нарушается, то такое движение реализовать нельзя. Это означает, что аппарат неспособен преодолеть препятствие, используя выбранный способ управления.

При проскальзывании колеса горизонтальная составляющая реакции опоры удовлетворяет условию

$$|N_{i||}| = k_{\text{ск}} |N_{i\perp}|, \quad (6)$$

$k_{\text{ск}}$ – коэффициент трения скольжения.

Коэффициенты трения покоя и скольжения связаны соотношением $k_{\text{ск}} \ll k_{\text{п}}$. Для того чтобы учесть это обстоятельство, используется следующий алгоритм.

Для тех колес, для которых нарушается условие (5), в уравнения динамики (1) - (4) добавляется равенство (6).

В полученном решении для всех колес проверяется условие (5). Если, кроме обнаруженных ранее, условию (5) не удовлетворяют какие-либо еще колеса, то в уравнения динамики для них добавляют равенства (6).

Алгоритм завершает работу, либо если обнаружено, что все колеса скользят, либо если для всех оставшихся колес выполняется условие отсутствия проскальзывания (5).

6. Исследование проходимости рельефа

Разработанная виртуальная модель движения исследовательского напланетного колесного аппарата может использоваться как для исследования проходимости поверхности со сложным рельефом, так и определения конструктивных параметров аппарата, которые обеспечивают требуемую проходимость.

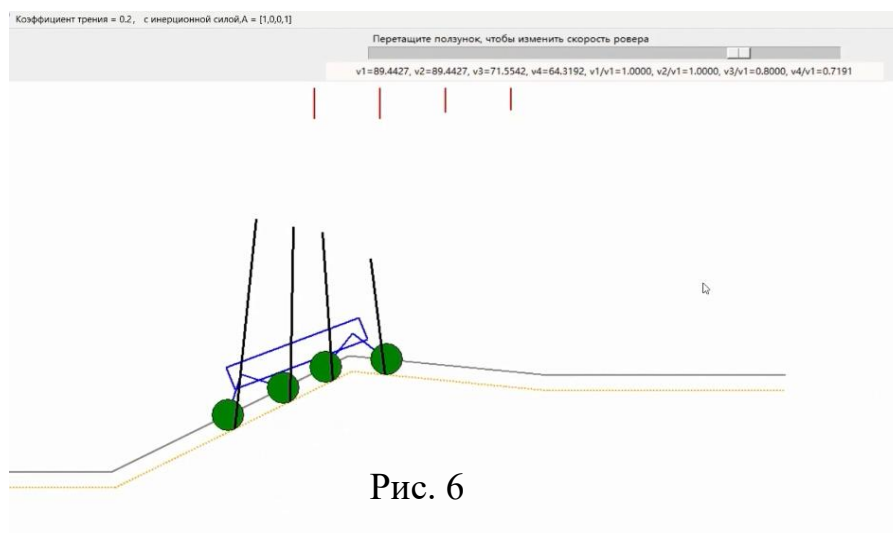


Рис. 6

Геометрическая проходимость определяет возможность перемещения аппарата без касания поверхности элементами его конструкции. Это достигается выбором кинематической схемы подвески, формы и размеров элементов конструкции аппарата.

Динамическая проходимость определяет достаточность тяговых усилий приводов аппарата для перемещения по заданному рельефу поверхности.

Необходимым условием для этого является отсутствие проскальзывания колес ввиду того, что это обеспечивает наибольшее тяговое усилие.

Проскальзывание колес определяется достаточной величиной коэффициента сцепления колес с грунтом. Его величина зависит от конструкции поверхности колес и наличия специальных приспособлений – грунтозацепов.

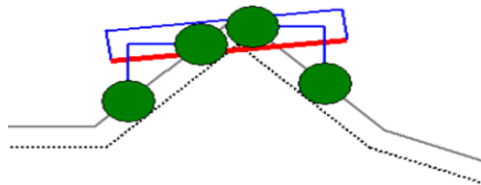


Рис. 7

Для решения перечисленных задач по результатам моделирования выполняется визуализация движения аппарата. На мониторе компьютера отображаются рельеф поверхности и положение аппарата на нем.

Для того чтобы сделать возможным исследование условий проскальзывания, в точках контакта колес изображаются силы реакции опоры в виде отрезков. Направление отрезка указывает направление силы реакции опоры. Величина реакции пропорциональна длине отрезка.

Если сила реакции находится в конусе трения, то колесо и отрезок, который указывает величину и направление реакции опоры, изображаются зеленым цветом. Если сила реакции находится вне конуса трения, то они

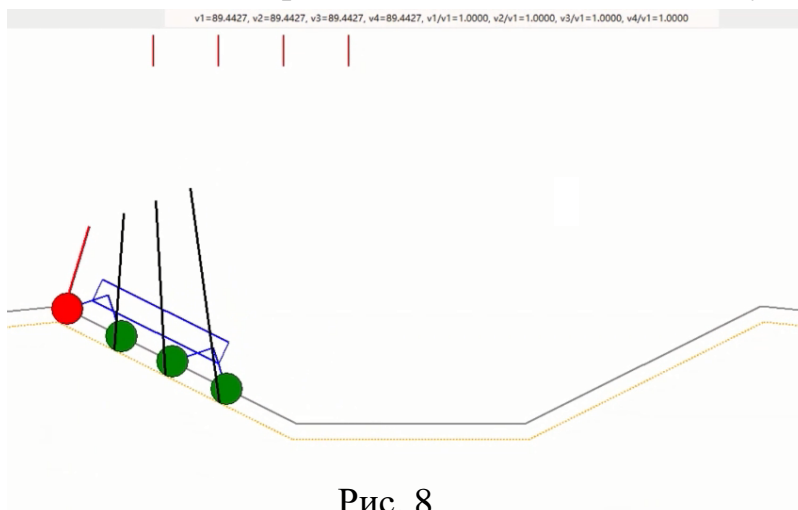


Рис. 8.

рисуются красным цветом.

Рельеф поверхности показан желтым цветом. Черным цветом отмечена линия центров колес.

В верхней части рисунка приведены значения коэффициента трения колес и абсолютные и относительные скорости колес, которые необходимы для того, чтобы при движении они не скользили. Относительные значения скоростей отображаются также в виде красных отрезков в верхней части рисунка.

Скорость движения аппарата задается установкой рукоятки движка.

Рассмотрим различные случаи движения аппарата по поверхности со сложным рельефом, которые показаны на рис. 7-9.

На рис. 7 пунктиром представлен рельеф поверхности, который исследуемый аппарат не способен преодолеть. Сплошной линией представлена линия центра колес. Сторона корпуса, которую пересекает линия поверхности, выделена красным цветом.

На рис. 8 приведен случай, когда только одно из колес проскальзывает. Оно выделено красным цветом. Движение по выбранному рельефу возможно ввиду того, что силы реакции опоры остальных колес лежат в конусах трения. Поэтому они изображены зеленым цветом.

На рис. 9 все колеса проскальзывают. Рисунок позволяет сделать вывод о том, что коэффициент сцепления колес недостаточен для того, чтобы

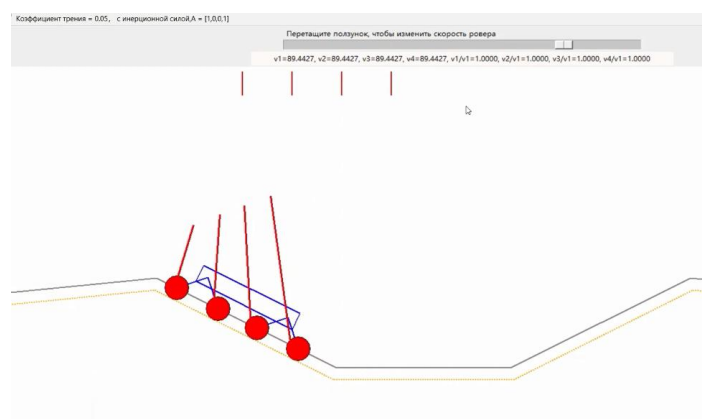


Рис. 9

обеспечить безопасное движение аппарата по поверхности. При неуправляемом скольжении аппарат может занять такое положение на поверхности, при котором тяговых возможностей приводов окажется недостаточно, чтобы переместиться в безопасное место.

Результаты

Разработанная численная модель движения лунного ровера предназначена для исследования движения в вертикальной плоскости. Она включает модели рельефа поверхности, кинематики и динамики движения ровера.

Модель обеспечивает моделирование движения в масштабе реального времени. Реализовано управление, которое обеспечивает максимальное тяговое усилие и проверку реализуемости движения при заданном коэффициенте сцепления колес с грунтом.

Проведенные численные эксперименты показали пригодность выбранных решений для исследования условий проходимости лунного ровера по поверхности со сложным рельефом.

Список литературы

1. Ding, L., Deng, Z., Gao, H., Nagatani, K., & Yoshida, K. (2010). Planetary rovers' wheel-soil interaction mechanics: new challenges and applications for wheeled mobile robots. *Intelligent Service Robotics*, 4(1), 17-38. DOI:10.1007/s11370-010-0080-5.
2. Kubota, T., Kuroda, Y., Kunii, Y., & Nakatani, I. (2003). Small, light-weight rover "Micro5" for lunar exploration. *Acta Astronautica*, 52(2-6), 447-453. DOI:10.1016/s0094-5765(02)00187-x.
3. JIA Y, SUN Z Z, ZHENG Y, et al. Review of planetary rover technology development[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(5): 419-427.
4. JU X W, WANG Y, FU C L, et al. Analysis of key rover technology[J]. *Space International*, 2020, 7: 23-26.
5. Zhang Peng. Synthesis of mobile moon rover system configuration and prototype development of ALR principle[D]; Harbin Institute of Technology, 2010.
6. Zhao Zhiping. new lunar rover mobility system related technology and experimental research[D]; Harbin Institute of Technology, 2010.
7. Yu Xinsheng. Eight-wheeled passive articulated lunar rover research, trajectory planning and motion control[D]; Harbin Institute of Technology; 2009.
8. Yu Xinsheng; Gao Haibo; Deng Zongquan. Various kinematic modeling methods and analysis of a new eight-wheeled moon rover[J] // *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*; 2009, 04.
9. Анимация в 3ds Max. Движение автомобиля.
<https://www.youtube.com/watch?v=93SUIbhWbVg>
10. Э.И. Ясюкович. Имитационное моделирование курсового движения легкового автомобиля // *Вестник Белорусско-российского университета*. 2022. № 3(76). DOI: 10.53078/20778481_2022_3_108.
11. С.В. Иванников, Г.Л. Родионов, А.С. Сидоренко. О построении математической модели движения автомобиля // *Труды МАИ*. 2005.
12. В.В. Лянденбургский, Ю.В. Родионов, Ю.А. Пылайкин, Г.И. Шаронов, И.Е. Ильина. Тренажер для обучения курсантов вождению автомобиля и контроля корректирующих действий инструктора. Патент РФ на полезную модель RU 152219 U1 от 15.07.2014.
13. А.А. Радионов, А.Д. Чернышев. Математическая модель движения автомобиля // *Инновационный транспорт*, № 4(18), 2015. С. 69-73.
14. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Луноход-1>
15. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Yutu>.
16. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Кьюриосити>