

ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА И СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Е.С. Зуев

ewg.zuev@yandex.ru

SPIN-код: 5890-3222

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена проблема обеспечения автономного движения гусеничного мобильного робота среднего класса. Выполнен анализ существующих математических моделей движения мобильных роботов с учетом опорной поверхности. Показана пространственная модель движения гусеничного мобильного робота, модель плоско-параллельного движения, учитывающая буксование гусениц обоих бортов, модель неравномерного поворота а также математическая модель, описывающая отдельно прямолинейное движение и поворот. Проводится анализ методик определения свойств опорной поверхности для автономного гусеничного мобильного робота тяжелого класса. На основании проведенных исследований сделаны выводы о применимости предложенных математических моделей и методик определения свойств опорной поверхности на практике. Разработаны этапы для моделирования адаптивного регулятора движения мобильного робота.

Ключевые слова

Мобильный робот, математическая модель, опорная проходимость, гусеничный движитель, робототехнический комплекс, автономное движение, адаптивный регулятор, грунт

Поступила в редакцию 21.05.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Автономные мобильные гусеничные машины и роботы находят широкое применение как в промышленной, так и в непромышленной сфере. Гусеничный движитель машины и робота представляет собой средство передвижения по поверхности, где затруднено движение колесных и шагающих транспортных средств. Характер использования гусеничной машины, ее движитель, особенности процесса поворота и другие параметры делают ее в корне отличающейся от колесной машины. Мобильный гусеничный робот превосходит роботы с другими движителями по таким критериям качества, как проходимость и скорость. Автономные мобильные роботы применяют в первую очередь там, где жизнедеятельность человека затруднена или вообще невозможна.

Анализ современных публикаций и сетевых источников показывает, что исследованиями по планированию и управлению движением мобильных роботов занимаются многие ученые. Однако не все задачи еще решены [1].

Постановка задачи. В данной статье ставится задача разработки адаптивного регулятора движения автономного гусеничного робототехнического комплекса (РТК) тяжелого класса в недетерминированных условиях. Для решения этой задачи необходимо разработать систему обеспечения опорной проходимости. Первым этапом создания такой системы является построение математической модели поведения гусеничного робота в различных грунтовых условиях, т. е. решение прямой и обратной задач динамики; вторым этапом — выбор способа определения опорной поверхности и набора входных параметров для адаптивного регулятора.

Математическая модель динамики РТК. Для создания математической модели был проведен обзор литературы. В процессе анализа литературных источников стало ясно, что при построении математической модели поведения гусеничных роботов как объекта управления возникают значительные трудности. Во-первых, гусеничный робот — это сложная механическая система, состоящая из большого числа механически связанных подсистем (корпус и навесное оборудование, гусеничный или колесный движитель с подсистемой трансмиссии, подсистема подрессоривания и т. п.). Во-вторых, движение гусеничного робота часто происходит на пересеченной местности, изобилующей различными препятствиями: подъемами и спусками, косогорами и оврагами; в этих условиях математические модели должны учитывать перемещение гусеничного робота в трехмерном пространстве. В-третьих, при движении гусеничного робота возникают такие эффекты, как буксование и юз, связанные с деформацией грунта. Рассмотрим основные особенности математических моделей гусеничных роботов.

В рамках модели, предложенной в [2], движение РТК представляется в виде пространственного движения твердого тела, мгновенное состояние которого оценивается векторами скорости поступательного движения центра масс \mathbf{V}

$$\mathbf{V} = V_x \mathbf{i} + V_y \mathbf{j} + V_z \mathbf{k}$$

и угловой скорости вращения относительно центра масс $\mathbf{\Omega}$

$$\mathbf{\Omega} = \omega_x \mathbf{i} + \omega_y \mathbf{j} + \omega_z \mathbf{k}.$$

В данной модели используются три различные системы координат (рис. 1):

- неподвижная система координат $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ предназначена для описания заданных дорожно-грунтовых условий движения, причем ее начало совпадает с базовой точкой рельефа;

- подвижная система координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ перемещается с центром масс, причем ее начало совпадает с центром масс, а оси $O_1 X_1, O_1 Y_1, O_1 Z_1$ параллельны соответствующим осям системы координат $O_2 X_2 Y_2 Z_2$;

- связанная система координат $OXYZ$ используется для математического описания динамики движения, причем ее центр O всегда совпадает с центром масс, а оси OX, OY, OZ совпадают с главными центральными осями инерции РТК.

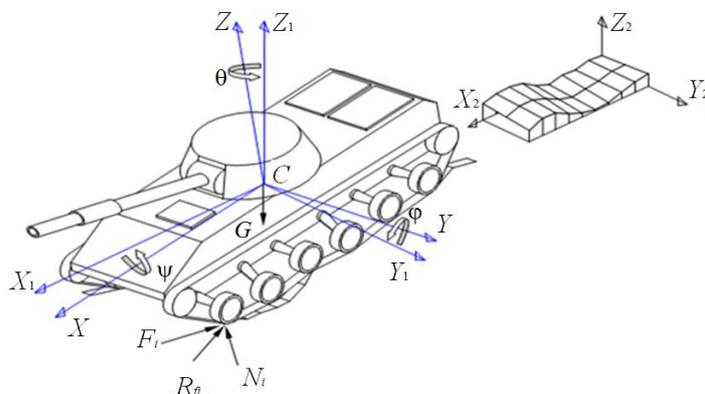


Рис. 1. Системы координат, необходимые для описания движения гусеничного РТК

Заметим, что форма уравнений динамики движения РТК, записанных в подвижной системе координат, достаточно удобна для последующего математического моделирования при достаточно полном отражении процессов взаимодействия движущегося тела и внешней среды.

Положение РТК в пространстве в любой момент времени определяется взаимным расположением подвижной и связанной систем координат, которые можно описать с помощью углов Эйлера — Крылова [3]: θ — угол рыскания, ψ — угол дифферента, ϕ — угол крена.

В целом отметим, что рассмотренная модель динамики РТК является алгоритмически достаточно сложной, позволяет моделировать пространственное движение РТК с учетом как трехмерного профиля поверхности передвижения, так и реальных характеристик сопротивления и сцепления грунта. Однако эту модель из-за ее сложности трудно использовать на начальном этапе работы при отладке модели, нацеленной на отработку заданных траекторий при различной опорной поверхности с использованием адаптивного регулятора. Вследствие необходимости использования теории неголономных механических систем для дальнейшей разработки системы управления и базового набора команд настолько сложная система является неудобной, поэтому была предложена достаточно простая модель плоскопараллельного движения робота.

Модель плоскопараллельного движения РТК. В учебном пособии [4] была рассмотрена сравнительно простая модель плоско-параллельного движения РТК, удобная при построении и исследовании основных алгоритмов исполнительного уровня системы автоматического управления движением (САУД).

Уравнения динамики плоскопараллельного движения робота:

$$m(\dot{V} + v\omega) = \sum F_x; \quad m(V\omega - \dot{v}) = \sum F_y; \quad J_z \dot{\omega} = \sum M_z,$$

где m — масса РТК; \dot{V}_x, V_x — ускорение и скорость РТК в направлении продольной оси Ox соответственно; v, \dot{v} — боковая скорость и ускорение центра масс РТК соответственно; $\omega, \dot{\omega}$ — угловая скорость и ускорение центра масс от-

носителем вертикальной оси OZ соответственно; J_z — момент инерции робота относительно вертикальной оси OZ , проходящей через центр масс; $\sum F_x, \sum F_y$ — суммы проекций на подвижные координатные оси всех внешних сил, действующих на РТК со стороны дороги; $\sum M_z$ — сумма моментов внешних сил, действующих на МРК со стороны дороги, относительно вертикальной оси OZ .

Данная модель динамики РТК является достаточно общей, поскольку она описывает два важнейших режима движения робота: прямолинейное движение, в том числе на подъеме и спуске, а также режим поворота робота.

Например, полагая $v = 0, \sum F_y = 0, \sum M_x = 0$, получаем уравнение прямолинейного движения МРК [3, 5]:

$$m\ddot{x} = P - G(\sin \gamma + f \cos \gamma),$$

где \ddot{x} — ускорение центра масс РТК; P — сила тяги; G — сила тяжести РТК; γ — угол подъема (спуска); f — коэффициент сопротивления качению.

Аналогично можно записать уравнение динамики поворота гусеничного робота [6].

Уравнения динамики плоскопараллельного движения робота дополним уравнениями кинематики, в которых будут присутствовать слагаемые, учитывающие явление буксования гусениц обоих бортов робота:

$$\dot{x} = V \cos \alpha - v \sin \alpha - \frac{\cos \alpha}{2}(V_n + V_p); \quad \dot{y} = V \sin \alpha + v \cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{2}(V_n + V_p);$$

$$\dot{\alpha} = \omega + \frac{1}{2h}(V_n - V_p).$$

Здесь \dot{x}, \dot{y} — скорость центра масс РТК; α — угол между продольной осью РТК и выбранной осью неподвижной системы координат; V_n, V_p — скорость буксования левой и правой гусеницы соответственно.

Модель движения РТК, учитывающая буксование и юз гусениц. Для полного описания динамики движения РТК необходимо вывести значения сил и моментов, действующих на него. В [7] уравнения движения центра масс РТК представлены для двух случаев: прямолинейного движения и поворота.

Рассмотрим уравнения движения для случая прямолинейного движения на подъеме с сопротивлением на крюке:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}(P - f_c G - R_{кр}),$$

где f_c — коэффициент сопротивления движению; $R_{кр}$ — сопротивление на крюке.

Для решения данного уравнения была использована теорема об изменении кинетической энергии системы в дифференциальной форме:

$$dT = dW_1 + dW_2 + dW_3,$$

где dT — дифференциал кинетической энергии РТК; dW_1 — элементарная работа движущих сил (двигателя); dW_2 — элементарная работа движущих силы тяжести; dW_3 — элементарная работа всех сил сопротивления движению;

В итоге получено следующее уравнения движения центра масс:

$$\ddot{x} = \frac{1}{\delta m} \left(\frac{270 N_d \eta_T}{v} - f_c G - R_{кр} \right).$$

Здесь δ — коэффициент условного приращения массы РТК (коэффициент учёта вращающихся масс); N_d — свободная мощность, поступающая от двигателя в трансмиссию РТК; η_T — общее КПД трансмиссии.

Наиболее общим случаем движения является неравномерный поворот, описанный в [7].

Неравномерный поворот РТК. Характер неравномерного поворота зависит от следующих факторов: внешних сил сопротивления движению, сил тяг на гусеницах, веса РТК и момента инерции РТК относительно вертикальной оси (проходящей через центр тяжести). Рассмотрим случай неравномерного поворота РТК на горизонтальном участке местности (рис. 2).

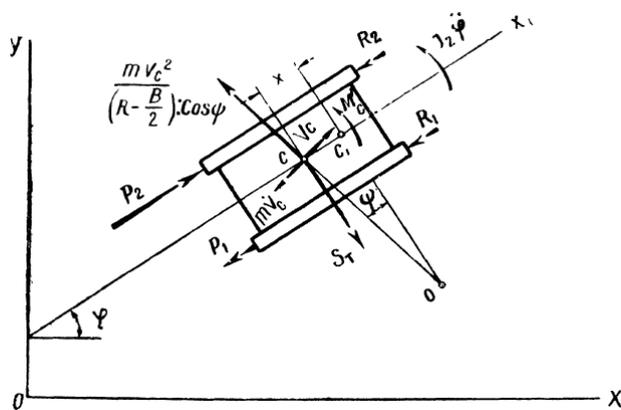


Рис. 2. Схема неравномерного поворота РТК

Уравнения движения РТК в неподвижных координатах в соответствии со схемой будут иметь следующий вид:

$$\sum X = -m\ddot{x} + (P_2 - P_1 - R_2 - R_1) \cos \varphi + S_T \sin \varphi = 0;$$

$$\sum Y = -m\ddot{y} + (P_2 - P_1 - R_2 - R_1) \sin \varphi + S_T \cos \varphi = 0;$$

$$\sum M = -I_z \ddot{\varphi} - M_c + (P_2 + P_1 - R_2 + R_1) \frac{B}{2} = 0.$$

Здесь $m\ddot{x}$ — проекция силы инерции на ось x ; $m\ddot{y}$ — проекция силы инерции на ось y ; P_1 — сила торможения отстающей гусеницы; P_2 — сила тяги забегающей гусеницы; R_1 — сопротивление поступательному движению отстающей гусеницы; R_2 — сопротивление поступательному движению забегающей гусеницы; S_T — результирующая поперечная сила; M_c — момент сопротивления повороту; B — расстояние между центрами гусениц.

уравнения дифференциальных связей:

$$\frac{\omega_{в.к2} + \omega_{в.к1}}{2} r_{в.к} = \dot{\varphi};$$

$$\frac{\omega_{в.к2} + \omega_{в.к1}}{2} r_{в.к} = v_{сх} = \dot{x} \cos \varphi + \dot{y} \sin \varphi,$$

где $\omega_{в.к1}$ — угловая скорость ведущего колеса отстающей гусеницы; $\omega_{в.к2}$ — угловая скорость ведущего колеса забегающей гусеницы; $v_{сх}$ — составляющая скорости v_c по продольной оси РТК x_1 ; $r_{в.к}$ — радиус ведущего колеса.

Перейдем от неподвижных координат к подвижным в системе координат, связанной с центром масс РТК (рис. 3).

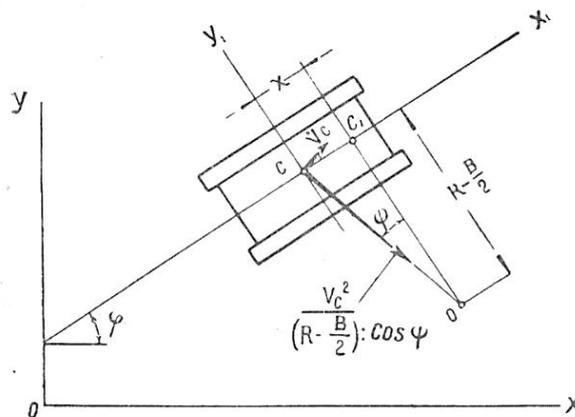


Рис. 3. Схема поворота в подвижных координатах

Уравнения движения РТК в подвижных координатах имеют вид

$$\sum X_1 = -m\ddot{x}_1 + P_2 - P_1 - R_2 - R_1 = 0;$$

$$\sum Y_2 = -m\ddot{y}_1 - S_T;$$

$$\sum M = -I_z \ddot{\varphi} - M_c + (P_2 - P_1) \frac{B}{2} = 0.$$

Для полного решения задачи также приведено решение уравнения кинетической энергии РТК. Отсюда можно определить значение скорости:

$$\ddot{v}_{cx} = \frac{1}{\delta_{\pi} m} \left[P_{д.п} - P_1(1 - \eta_p) \frac{R - B}{R - B/2} - R_{\pi} \right] = \ddot{x}_1;$$

$$\ddot{\phi} = \frac{\dot{v}_{cx}}{R - B/2}.$$

Здесь η_p — КПД цепи механизмов от отстающей гусеницы до забегающей; $P_{д.п}$ — сила тяги по двигателю; δ_{π} — коэффициент учета вращающихся масс при повороте; R_{π} — сопротивление движению при повороте.

На основе представленных уравнений, описывающих динамику движения РТК, решают прямую задачу системы автономного управления движением (САУД).

Обзор методик определения свойств грунта. Следующим этапом в разработке адаптивного регулятора для автономного движения гусеничного робота является выбор методики определения опорной поверхности. Наиболее развитым является метод, предложенный WES (Waterways Experiment Station — гидротехническая научно-исследовательская база инженерного корпуса армии США, Виксбург, Миссисипи) для оценки проходимости военных разведывательных транспортных средств. В основе методики лежит применение специального устройства — пенетрометра. С помощью этого устройства получают параметр грунта, который получил название конусного индекса (Cone Index). В отечественной практике примером может служить пенетрационная установка ПРОП, которая была установлена на самоходных аппаратах «Луноход-1» и «Луноход-2» [8].

Еще одной методикой определения параметров грунта является применение специального устройства, которое называется беваметром [9, 10]. В отличие от методики с применением пенетрометра согласно этой методике осуществляются измерения двух типов. В одном из них в грунт вдавливаются площадка и строится зависимость силы вдавливания от глубины погружения. По результатам измерений можно вычислить погружение движителя транспортного средства (ТС) и определить сопротивление движению. Во втором измерении площадку перемещают по касательной к грунту, имитируя скольжение движителя по опорному основанию, и получают зависимость касательного напряжения от перемещения. На основе этих данных можно оценить тягово-сцепные свойства ТС: зависимость тягового усилия от буксования, а также максимально возможное тяговое усилие на заданном грунте.

Помимо вышеописанных «классических» устройств разными авторами [11] в разное время были предприняты попытки создать альтернативные измерительные приборы. Все они действуют по одному и тому же принципу: в грунт погружают наконечник, после чего его проворачивают. Затем вычисляют различные параметры: CI («конусный индекс»), угол внутреннего трения, коэффициент трения металл – грунт, адгезию грунта, связность грунта, напряжения среза.

В [12] была предпринята попытка разработать методику косвенного определения параметров грунта, в частности CI («конусного индекса»). В этой работе авторы получают зависимость CI от глубины колеи и буксования колес трактора (рис. 4):

$$CI = 2,6265 \frac{P_z \left(1 - \frac{\delta}{h}\right)^{3/2}}{bd^{2/5}} \left(\frac{s}{z^3}\right)^{1/5},$$

где z — глубина погружения; P_z — вертикальная нагрузка на колесо; b — ширина колеса; d — диаметр колеса, δ — вертикальный прогиб шины; h — высота профиля шины; CI — конический индекс грунта, s — коэффициент буксования колеса; N — число проходов колес.

Глубину погружения определяют с помощью лазерных датчиков, установленных перед колесом и за ним.

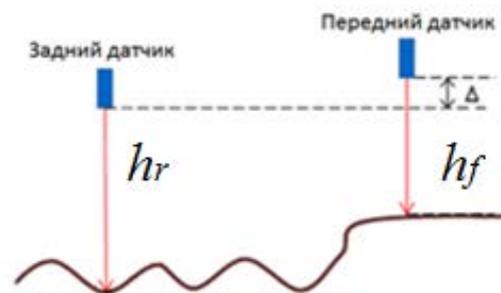


Рис. 4. Расположение датчиков для определения глубины колеи

Буксование характеризуется отношением реально пройденного пути к теоретическому. В проведенных авторами данной статьи экспериментах реально пройденный путь замеряли рулеткой, а теоретический вычисляли как произведение числа оборотов колеса на длину окружности катящегося колеса (паспортные данные шины).

Также существует иной подход определения типа грунта без специальных устройств [13]. При этом допускается использование набора различного рода датчиков, устанавливаемых на базовое шасси, которые можно дублировать и легко менять в случае выхода из строя.

В основе методики определения типа грунта лежат две идеи: использование «типовых маршрутов», «прощупывание» грунта. Машина выполняет типовые геометрические фигуры (рис. 5) на полигоне в условиях конкретной местности на грунте нескольких распространенных типов (например, пяти). Тензометрические датчики фиксируют динамические воздействия на движитель ТС со стороны грунта (продольная R_x и поперечная R_y силы, крутящий момент M_k , буксование S_k). Эти данные обрабатываются и заносятся в базу данных.

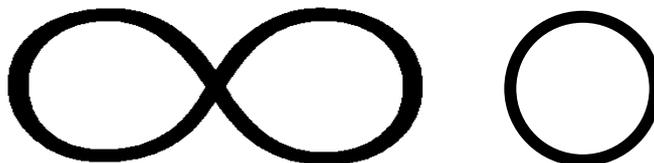


Рис. 5. Пример типового маршрута

При «прощупывании» момент подается не на все колеса ТС, а, например, только на передние (задние) или правые (левые), а для гусеничного РТК — на правый или левый борт. Установленные на машине тензометрические датчики также фиксируют динамические воздействия на движитель ТС со стороны грунта (продольная R_x и поперечная R_y силы). Эти данные обрабатываются и заносятся в базу данных.

Испытания проводят несколько раз для повышения точности замеров. В результате в базе данных машины формируются усредненные сведения о различных типах грунта.

Распознавание опорных поверхностей по данным комплексированной системы технического зрения [14]. Для получения экспериментальных данных и проверки разработанных алгоритмов и программ совместной обработки данных от сенсоров различной физической природы создан действующий макет комплексированной СТЗ (рис. 6), закрепленный на подвижном объекте.

Данный метод использования комплексированной СТЗ и алгоритмы обработки комплексированных изображений для дистанционного определения характеристик опорной поверхности и распознавания объектов успешно работают только в конкретных условиях внешней среды, для которых правильно выбраны эталонные признаки и весовые коэффициенты, определяющие степень влияния измеренных признаков на итоговую вероятность. При других условиях внешней среды вектор настройки эталонных признаков и весовых коэффициентов необходимо подобрать заново. Задача подбора нового вектора настройки, наилучшим образом соответствующего новым условиям внешней среды, не является тривиальной и ее решение достаточно трудоемко.

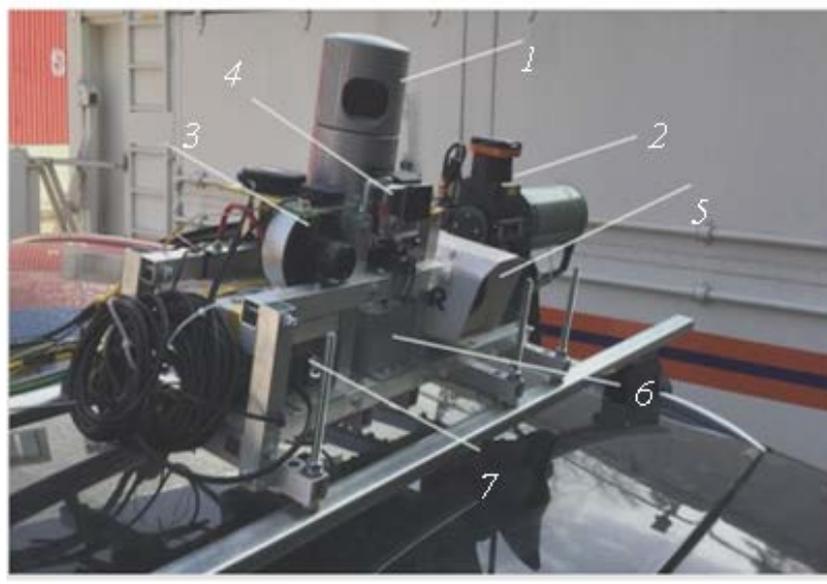


Рис. 6. Макет комплексированной СТЗ:

1 — сканирующий 3D-лазерный дальномер HDL-32E; 2 — сканирующий 2D-лазерный дальномер Hokuyo UTM-30LX на опорно-поворотном устройстве; 3 — телевизионная камера Arecont Vision AV2115DN; 4 — телевизионная камера GoPro Hero 4; 5 — тепловизионная камера FLIR SR-19; 6 — интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система Ком-панав-2МТ; 7—устройства сопряжения с ЭВМ

Заключение. В данной статье был проведен анализ существующих математических моделей движения гусеничных роботов, которые позволяют учесть динамическое влияние грунта на гусеничный движитель. При анализе различных методик определения свойств грунта установлено, что выбор конкретной методики зависит скорее от особенностей транспортного средства, для которого решается общая задача автономного движения, а также от задач, которые оно будет выполнять при эксплуатации. В случае проектирования автономного движения гусеничного РТК тяжелого класса наиболее перспективным является использование комплексированной СТЗ. В дальнейших работах планируется создание базы данных опорных поверхностей и параметров регулятора с использованием методов нечеткой логики (Fuzzy Logic) или нейронных сетей (Neural Networks) для нахождения взаимосвязей между опорной поверхностью и параметрами регулятора.

Литература

- [1] Амин Н.М. Управление движением гусеничных мобильных роботов в недетерминированных условиях. Автореф. ... дисс. канд. тех. наук. Новочеркасск, ЮФУ, 2016.
- [2] Носков В.П., Рубцов В.И., Рубцов И.В. Математические модели движения и системы технического зрения мобильных робототехнических комплексов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.

- [3] Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М., Машиностроение, 1975.
- [4] Машков К.Ю., Рубцов В.И., Рубцов И.В. Состав и характеристики мобильных роботов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [5] Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Комплексное поддрессирование высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
- [6] Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность – машина. М., Машиностроение, 1973.
- [7] Никитин А.О., Сергеев Л.В. Теория танка. М., Изд-во академии БТВ, 1962.
- [8] ГОСТ 19912-2001. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. М., Изд-во стандартов, 2001.
- [9] Garciano L.O., Upadhyaya S.K., Jones R.A. Measurement of soil parameters useful in predicting tractive ability. *J. Terramechanics*, 2010, vol. 47, no. 5, pp. 295–305.
DOI: 10.1016/j.jterra.2010.07.002
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022489810000583>
- [10] Wills B. The design and development of a hydraulic bevameter. *J. Terramechanics*, 1964, vol. 1, no. 1, pp. 91–97. DOI: 10.1016/0022-4898(64)90125-9
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022489864901259>
- [11] Upadhyaya S.K., Wulfsohn D., Mehlschau J. An instrumented device to obtain traction related parameters. *J. Terramechanics*, 1993, vol. 30, no. 1, pp. 1–20. DOI: 10.1016/0022-4898(93)90027-U
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002248989390027U>
- [12] Nama J.S., Park Y.J., Kim K.U. Determination of rating cone index using wheel sinkage and slip. *J. Terramechanics*, 2010, vol. 47, no. 4, pp. 243–248.
DOI: 10.1016/j.jterra.2010.02.002
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022489810000054>
- [13] Машков К.Ю., Рубцов В.И., Штифанов Н.В. Автоматическая система обеспечения опорной проходимости мобильного робота. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, вып. Специальная робототехника, с. 95–106.
- [14] Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В. и др. Распознавание объектов и типов опорной поверхности по данным комплексированной системы технического зрения. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2016, № 2(175), с. 127–139.

Зуев Евгений Сергеевич — студент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Рубцов Василий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

SELECTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE MOBILE ROBOT MOTION AND THE METHOD FOR DETERMINING THE GROUND CONTACTING AREA

E.S. Zuev

ewg.zuev@yandex.ru

SPIN-code: 5890-3222

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This article considers the problem of providing autonomous movement of a middle class tracked mobile robot. The analysis of the existing mathematical models of the mobile robots movement is given taking into account the ground contacting area. The paper contains a spatial model of a mobile caterpillar robot motion and a model of plane-parallel motion, which takes into account the slip of both sides' tracks, a model of uneven rotation, and a mathematical model describing a separate rectilinear motion and rotation. The analysis is carried out for methods of determining the properties of the ground contacting area for the autonomous tracked mobile robot of a heavy class. Based on the conducted research, conclusions were drawn about the applicability of the proposed mathematical models and methods for determining the properties of the ground contacting area in practice. The authors developed stages for modeling an adaptive motion controller of a mobile robot.

Keywords

Mobile robot, mathematical model, flotation, tracked propulsion, robotic complex, autonomous movement, adaptive controller, soil

Received 21.05.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Amin N.M. Upravlenie dvizheniem gusenichnykh mobil'nykh robotov v nedeterminirovannykh usloviyakh. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Control on movements of mobile robot crawler in non-deterministic conditions. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, SFEDU Publ., 2016 (in Russ.).
- [2] Noskov V.P., Rubtsov V.I., Rubtsov I.V. Matematicheskie modeli dvizheniya i sistemy tekhnicheskogo zreniya mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov [Mathematical movement models and machine vision systems of mobile robotic complexes]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015 (in Russ.).
- [3] Zabavnikov N.A. Osnovy teorii transportnykh gusenichnykh mashin [Theory fundamentals of transport tracked vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975 (in Russ.).
- [4] Mashkov K.Yu., Rubtsov V.I., Rubtsov I.V. Sostav i kharakteristiki mobil'nykh robotov [Construction and functions of mobile robots]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014 (in Russ.).
- [5] Kotiev G.O., Sarach E.B. Kompleksnoe podressorivanie vysokopodvizhnykh dvukhzvennykh gusenichnykh mashin [Complex cushioning of high-mobility two-unit tracked vehicles]. Bauman MSTU Publ., 2010 (in Russ.).

- [6] Bekker M.G. Introduction to terrain-vehicle systems. The University of Michigan Press, 1969. (Russ. ed.: Vvedenie v teoriyu sistem mestnost' – mashina. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973.)
- [7] Nikitin A.O., Sergeev L.V. Teoriya tanka [Tank theory]. Moscow, Izd-vo akademii BTV Publ., 1962 (in Russ.).
- [8] GOST 19912-2001. Grunty. Metody polevykh ispytaniy staticheskim i dinamicheskim zondirovaniem [State standard 19912-2001. Soils. Field test methods by static and dynamic sounding]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2001 (in Russ.).
- [9] Garciano L.O., Upadhyaya S.K., Jones R.A. Measurement of soil parameters useful in predicting tractive ability. *J. Terramechanics*, 2010, vol. 47, no. 5, pp. 295–305. DOI: 10.1016/j.jterra.2010.07.002
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022489810000583>
- [10] Wills B. The design and development of a hydraulic bevameter. *J. Terramechanics*, 1964, vol. 1, no. 1, pp. 91–97. DOI: 10.1016/0022-4898(64)90125-9
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022489864901259>
- [11] Upadhyaya S.K., Wulfsohn D., Mehlschau J. An instrumented device to obtain traction related parameters. *J. Terramechanics*, 1993, vol. 30, no. 1, pp. 1–20. DOI: 10.1016/0022-4898(93)90027-U
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002248989390027U>
- [12] Nama J.S., Park Y.J., Kim K.U. Determination of rating cone index using wheel sinkage and slip. *J. Terramechanics*, 2010, vol. 47, no. 4, pp. 243–248. DOI: 10.1016/j.jterra.2010.02.002
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022489810000054>
- [13] Mashkov K.Yu., Rubtsov V.I., Shtifanov N.V. Automatic system to provide the supporting trafficability of mobile robot. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostroyeniya*. [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2012, vyp. Spetsial'naya robototekhnika [iss. Special robotics], pp. 95–106 (in Russ.).
- [14] Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., et al. Object detection and ground type classification with combined computer vision system. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, no. 2(175), pp. 127–139 (in Russ.).

Zuev E.S. — Student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Rubtsov V.I., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.