

Моделирование взаимодействия мобильного робота и опорного основания с помощью алгоритмов пересечения многогранников

© А.А. Стадухин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Выдвинуто предложение представлять элементы транспортной машины и профиль грунта в виде многогранников и исследовать их пересечение с применением известных алгоритмов — GJK (Gilbert–Johnson–Keerthi), EPA (Expanding Polytope Algorithm) и CA (Clipping Algorithms), так как при моделировании взаимодействия ходовой части транспортной машины с опорным основанием исследователи часто оставляют без внимания геометрические формы контактирующего элемента и профиля грунта, исследуя «точечный контакт». Приведены краткие описания алгоритмов и их адаптация для рассматриваемого применения. Показан способ разбивки трассы на выпуклые многогранники, необходимый для работы алгоритмов. Продемонстрированы результаты моделирования простой механической системы в среде MATLAB. Приведен пример моделирования движения мобильного робота с колесно-шагающей ходовой частью по лестнице. Перечислены основные трудности применения рассматриваемого способа моделирования.

Ключевые слова: транспорт, робот, опорное основание, моделирование, MATLAB, GJK, EPA.

Введение. Многие существующие имитационные компьютерные модели, предназначенные для исследования движения транспортной машины по недеформируемому твердому опорному основанию [1, 2, 3], используют так называемый *точечный контакт*. В этом случае силы взаимодействия с грунтом либо вычисляют по вертикальной координате контактирующего с грунтом элемента машины, либо находят по площади сектора окружности колеса, отсекаемого плоским опорным основанием. Используя подобный подход, невозможно учесть взаимодействие с опорным основанием сложного профиля (имеющим ступени, ямы, углы подъема 90° или больше). Кроме того, остаются невыясненными вопросы контакта с грунтом корпусных деталей машины, навесного оборудования, торцов колес, затруднено исследование машин с нетрадиционными движителями.

Если заранее выбрать на транспортной машине значительное количество точек, которые будут в модели взаимодействовать с опорным основанием, то появится возможность решить часть указанных проблем. Таким образом выполнена имитационная модель, предложенная в статье [4]. Опорное основание транспортной машины в ней рассматривается как функция поверхности $z(x, y)$. Для вершин транс-

сы-функции были посчитаны нормали, вдоль которых вычислялись проникновение в грунт.

В той же статье [4] описаны недостатки предлагаемого метода — сложность моделирования движения по профилю опорного основания с сильными изгибами, вычисление только контактов типа вершина — плоскость и необходимость выбора большего количества точек для контакта.

Настоящая статья посвящена решению таких трудностей путем представления геометрии трассы и транспортной машины в виде многогранников и использования существующих алгоритмов для анализа их пересечений. Это позволит определять точки контакта (точка К на рис. 1), направление и глубину проникновения многогранников (вектор \vec{r}_{pnt} на рис. 1) в ходе моделирования. Назовем нахождение точек контакта и векторов проникновения многогранников *разрешением контакта*.

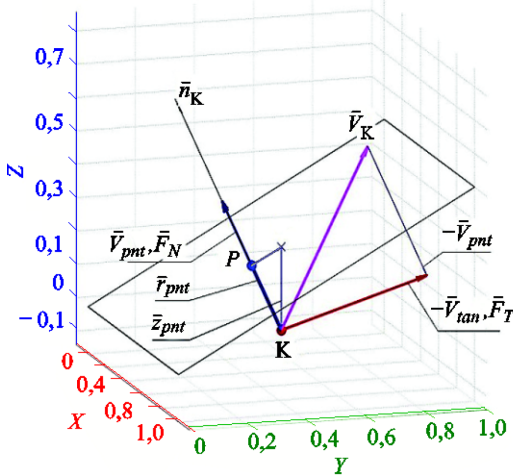


Рис. 1. Схема определения сил взаимодействия машины и опорного основания

Таким образом, после разрешения контакта для каждой точки появится возможность найти следующие показатели:

- нормальные реакции \vec{F}_N , воспринимающие вес машины;
- касательные силы \vec{F}_T , обусловленные тягой машины и сопротивлением движению;
- момент от суммарной силы взаимодействия с опорным основанием.

Нормальные реакции \vec{F}_N вычисляют по глубине \vec{r}_{pnt} и скорости проникновения \vec{v}_{pnt} в опорное основание. Касательные силы \vec{F}_T

находят по касательной скорости \bar{v}_{tan} , нормальной силе и коэффициенту трения, т. е.

$$\bar{v}_{tan} = \bar{v}_K - \bar{v}_{pnt}; \quad \bar{F}_N = f(\bar{r}_{pnt}, \bar{v}_{pnt}); \quad \bar{F}_T = f(\bar{v}_{tan}, \bar{F}_N);$$

где \bar{v}_K — скорость точки контакта.

Однако для адекватного разрешения контакта прежде всего необходимо определить факт пересечения геометрии грунта и транспортной машины. Для решения этой задачи наиболее подходит алгоритм GJK (Gilbert–Johnson–Keerthi).

Алгоритм GJK (Gilbert–Johnson–Keerthi). В конце 1980-х гг. разработан алгоритм GJK, предназначенный для эффективного анализа пересечения многогранников и нахождения расстояния между ними. С тех пор видоизмененные версии алгоритма применяются в различных приложениях — от компьютерных игр до систем моделирования [5, 6]. В Интернете доступно множество описаний GJK и примеров его реализации [7].

Приведем только основные положения алгоритма. Итак, для пары выпуклых многогранников можно построить так называемое *конфигурационное пространство препятствий* — CSO (Configure Space Obstacle, по терминологии его разработчиков), представляющее собой массив вершин. Координаты вершин CSO вычисляют как разность координаты каждой вершины первого и каждой вершины второго многогранника. После чего можно утверждать, что выпуклые многогранники пересекутся только в том случае, когда составленная из внешних вершин CSO фигура будет содержать начало координат (рис. 2).

Для многогранников на рис. 2, имеющих шесть и восемь вершин, пространство CSO состоит из 48 вершин, поэтому в процессе работы алгоритма полностью CSO нельзя вычислить. Вместо этого ищут простейшую геометрическую фигуру — симплекс (в трехмерном случае — тетраэдр $ABCD$ на рис. 3), содержащую начало координат (точка O). Обычно для построения тетраэдра используют так называемую *вспомогательную функцию* (support function), которая находит самую дальнюю вершину CSO в заданном направлении. С помощью этой функции случайно выбранную в CSO точку последовательно развивают до линии, треугольника, тетраэдра, всякий раз выбирая направление на начало координат.

Если по итогам работы алгоритма GJK удастся построить симплекс, содержащий начало координат, то можно сделать вывод о пересечении многогранников. В противном случае, находят вектор расстояния между ними — от ближайшего треугольника симплекса до начала координат. В настоящей работе алгоритм GJK используется только для определения факта пересечения, хотя часто его применяют и для нахождения прочих параметров контакта [5].

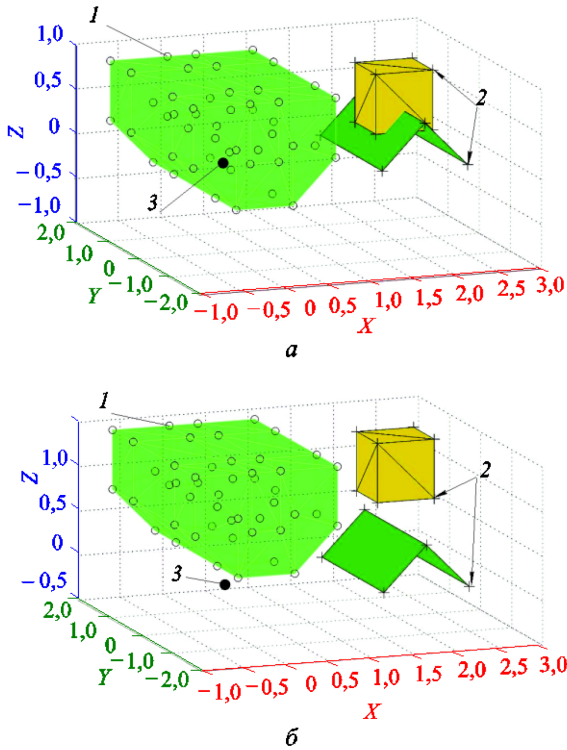


Рис. 2. Анализ пересечения многогранников CSO:
 а — пересечение многогранников; б — отсутствие пересечения;
 1 — вершины CSO; 2 — вершины многогранников; 3 — начало координат

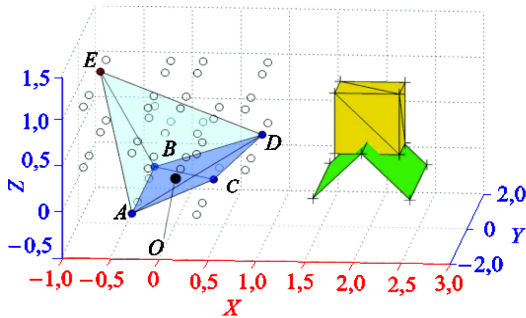


Рис. 3. Анализ пересечения многогранников

GJK позволяет использовать данные предыдущих расчетов: на каждом шаге интегрирования модели можно начинать анализ с симплекса предыдущего шага. Это признано одним из хороших его качеств. Во многих случаях такой симплекс будет содержать начало координат для нового положения многогранников.

При обнаружении пересечения многогранников глубину и направление их проникновения часто находят с помощью алгоритма EPA (Expanding Polytope Algorithm, или алгоритм расширяющегося многогранника).

Алгоритм EPA (Expanding Polytope Algorithm). Суть EPA состоит в получении фигуры, состоящей только из внешних вершин CSO и содержащей начало координат (ABCDE на рис. 3). Предлагается [4] использовать в качестве начальной фигуры симплекс, полученный по итогам работы GJK. Затем необходимо попытаться удалить ближайшую к началу координат сторону (ABD) и добавить к фигуре с помощью *вспомогательной функции* новую, как можно более дальнюю вершину E . Операцию повторяют, пока не будет получена вершина, уже имеющаяся в фигуре EPA. Расстояние от ближайшей стороны фигуры (ABC на рис. 3) до начала координат (по нормали) называют вектором проникновения многогранников \bar{r}_{pnt} .

Определение контактных точек. Зная направление взаимного проникновения многогранников, можно найти точки их контакта. Обычно для этого применяют алгоритм обрезки (Clipping Algorithm [7]). Реализация алгоритма для модели, рассматриваемой в данной статье, была выполнена в ниже следующей последовательности.

1. Нахождение крайних в направлении контакта точек многогранников.

2. Поиск на обоих многогранниках треугольников, содержащих крайние точки и имеющих нормали, самые близкие к направлению контакта \bar{r}_{pnt} . Плоскость «наиболее перпендикулярного» треугольника называется набегающей (incident plane [7], 1 на рис. 4), плоскость другого многогранника — опорной (reference plane [7], 2 на рис. 4). Считается, что точки контакта находятся на опорной плоскости.

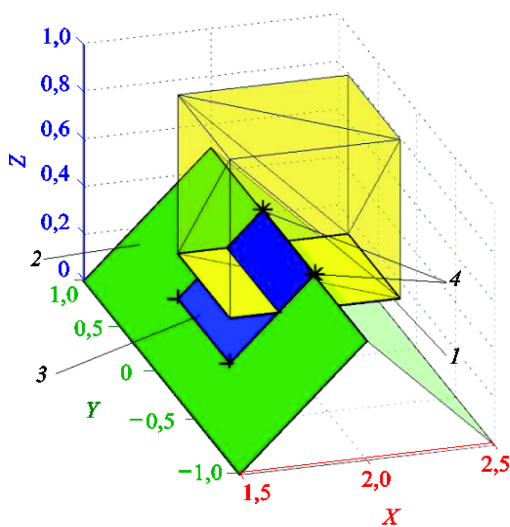


Рис. 4. Поиск точек контакта:

1 — набегающая плоскость; 2 — опорная плоскость; 3 — пересечение проекций многоугольников; 4 — контактные точки

3. Создание на набегающей и опорной плоскостях многоугольников 1 и 2 сторон соответствующих многогранников (см. рис. 4), на опорной плоскости — двухмерной системы координат. Проецирование на нее полученных многоугольников, выполняемое в направлении пересечения многогранников $\vec{r}_{\text{пр}}$.

4. Получение многоугольника 3 — продукта пересечения проекций многоугольников 1 и 2 .

5. Вычисление трехмерных координат вершин многоугольника 3 : находящиеся выше набегающей плоскости являются точками контакта, а их расстояния до набегающей плоскости — глубинами проникновения.

Следовательно, зная точки контакта, глубину и направление проникновения, можно рассчитать силы и моменты взаимодействия с опорным основанием, как указано выше. Однако описанные выше алгоритмы предназначены для работы исключительно с выпуклой геометрией. Если взаимодействующие с грунтом детали транспортной машины легко представить в упрощенном виде как выпуклые многогранники, то трассы почти всегда будут иметь важные для задачи моделирования вогнутые участки. Обычный подход в таких случаях — это разбиение невыпуклой геометрии на выпуклые многогранники.

Разбиение трассы на выпуклые многогранники. В общем случае задача разбивки довольно сложна даже для двухмерных моделей [8]. Однако в рассматриваемом здесь случае трасса принимается как неподвижный объект, в котором отсутствуют самопересечения и отверстия. Это позволяет разбить трассу на выпуклые многогранники до начала моделирования с помощью простого алгоритма. Алгоритм такой работы приведен ниже.

1. Представление трассы в виде массива треугольников (триангуляция). Вычисление нормалей каждого треугольника.

2. Выбор произвольного треугольника. Расчет скалярных произведений его нормали и сторон соседних треугольников, не являющихся общими. Если скалярное произведение меньше или равно нулю, то считается, что треугольники образуют выпуклый объект. Исключение их из массива трассы и сохранение в новом массиве — выпуклой фигуре.

3. Анализ необработанных треугольников до тех пор, пока таковых не останется.

Результаты работы алгоритма для двух трасс представлены на рис. 5 и 6. Для наглядности многогранники разнесены в пространстве.

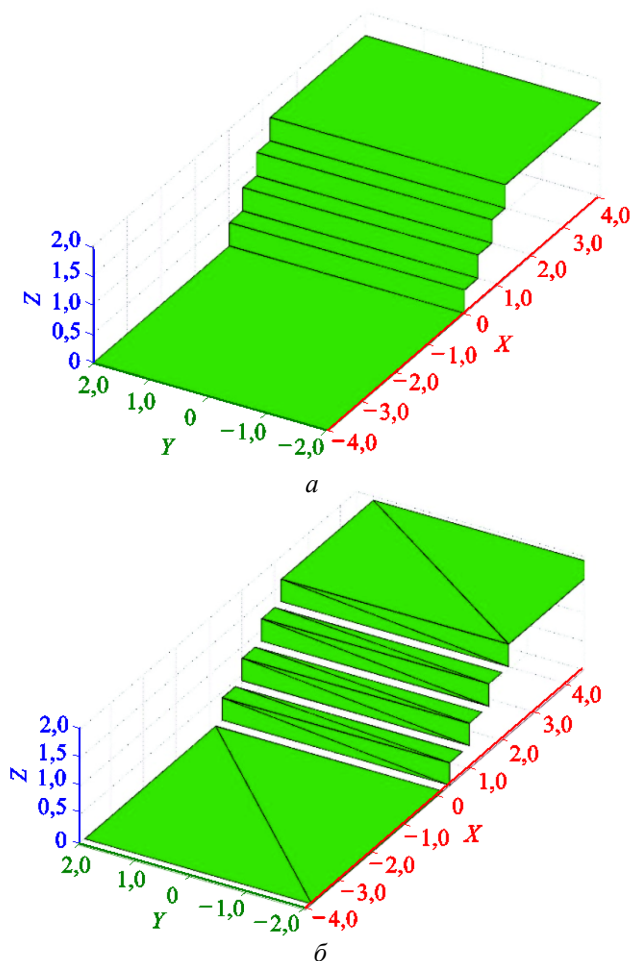


Рис. 5. Обработка трассы «ступени»: *a* — исходная трасса; *б* — массив выпуклых многогранников

Следует обратить внимание на то, что трассы, имеющие плавные вогнутые участки (например, синусоидальный профиль грунта на рис. 6), описанный алгоритм разобьет на достаточно большое количество многогранников, что негативно скажется на производительности модели. В данном случае эффективнее использовать подход, описанный в статье [4]. Тем не менее можно улучшить производительность, анализируя только многогранники, центры которых удалены менее чем на половину суммы их габаритов (этот метод применен в описываемой далее модели).

Краткое описание реализации имитационной компьютерной модели. Для реализации в имитационной компьютерной модели уравнений динамики масс, преобразования координат и расчета шарниров использованы блоки Simulink/Simscape/SimMechanics из MATLAB R2013b. Данные объектов моделирования и трассы созданы

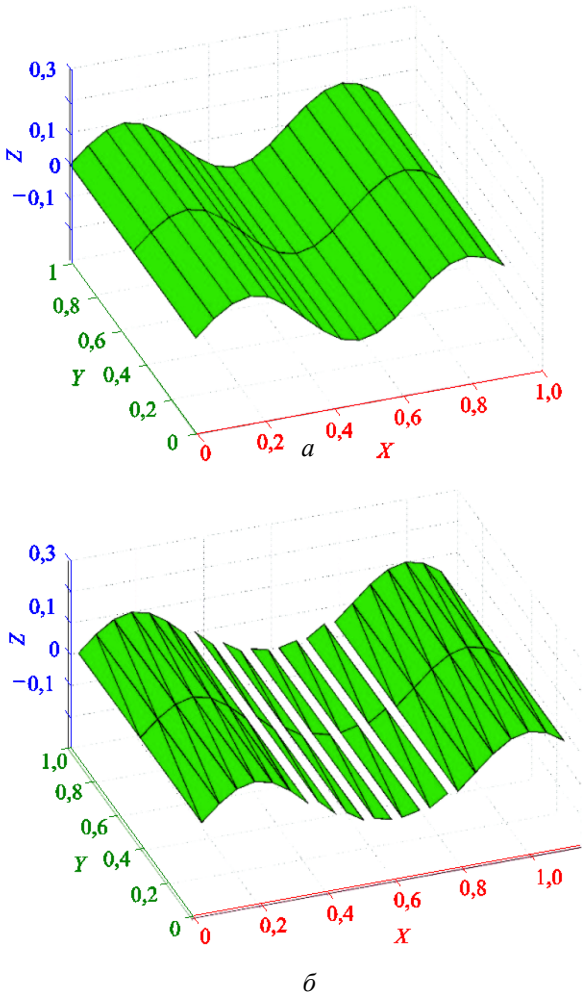


Рис. 6. Обработка трассы «синусоида»:
a — исходная трасса; *б* — массив выпуклых многогранников

и обработаны, по возможности, до начала моделирования. Алгоритмы GJK/EPA/Clipping вследствие сложности выполнены в виде *S*-функции (Simulink level 2 *S*-function). Триангуляция трасс и объектов для отображения графики выполнена с помощью функции `surf2patch` и класса `delaunayTriangulation`. Поиск разности многоугольников для алгоритма обрезки произведен посредством удобной, но, к сожалению, очень медленной функции `polybool`.

Общий принцип работы *S*-функции анализа контакта следующий:

- 1) на вход подают абсолютную координату, скорость, матрицу поворота и угловую скорость объекта — элементы машины;
- 2) осуществляется поиск многогранников трассы, с которыми возможен контакт;

- 3) с помощью алгоритма GJK определяют наличие пересечения с многогранниками;
- 4) в случае пересечения алгоритмом ЕРА вычисляют вектор проникновения;
- 5) определение точек контакта алгоритмом обрезки;
- 6) вычисление силы и момента, действующих на тело, и их ввод в модель.

В целом реализация модели на этом этапе обладает высокой стабильностью вычислений, однако содержит решения, снижающие производительность.

Для качественной проверки адекватности разработанной имитационной компьютерной модели была составлена механическая система (рис. 7). Тело в форме параллелепипеда скатывается вниз по ступеням, испытывая различные виды контакта (грани, плоскости, вершины). На рис. 7 обозначены характерные положения, точки, траектория и векторы сил контакта.

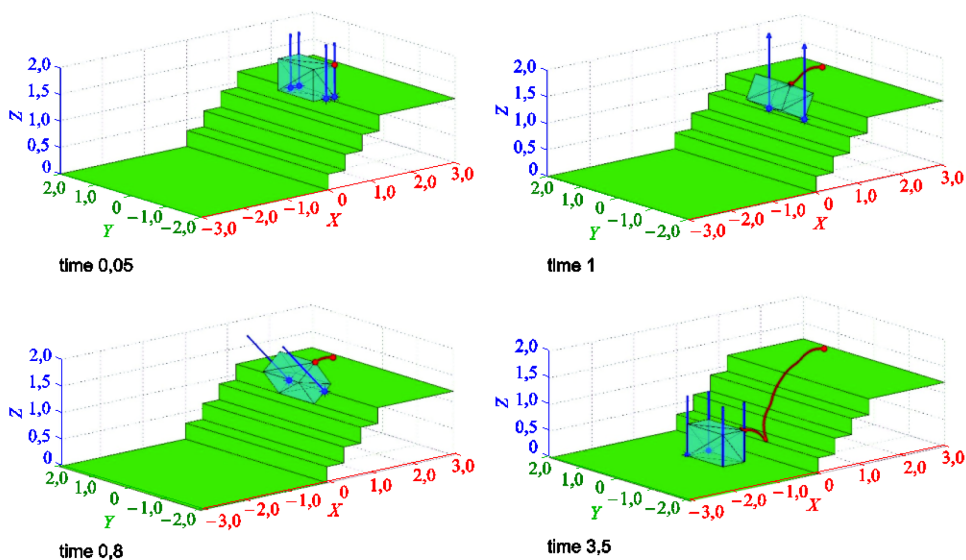


Рис. 7. Работа модели «ящик на ступенях»

Разработанная модель демонстрирует правдоподобное поведение объектов на трассах сложного профиля, что дает возможность перейти к моделированию транспортной машины.

Моделирование транспортной машины с колесно-шагающим движителем. Интенсивное развитие робототехники вызывает у исследователей интерес к необычным движителям. Так, в некоторых условиях (например, в пределах города) может быть эффективен колесно-шагающий трехкатковый движитель. Несмотря на существова-

ние действующих и даже коммерческих образцов машин с такой ходовой частью, имитационное моделирование их движения является актуальной задачей [9].

На рис. 8 представлена схема колесно-шагающего движителя. Его конструкцию можно описать как планетарный механизм. Солнечное колесо механизма связано с валом электродвигателя, сцепленные сателлиты приводят в движение катки, вместо зацепления сателлитов с коронным колесом выступает контакт катков с грунтом. Водило может свободно вращаться относительно корпуса машины. Осуществление движения за счет вращения катков соответствует режиму качения. Водило в этом случае неподвижно или незначительно качается, повторяя профиль грунта. Увеличение момента сопротивления на катках (например, при упоре в стену) вынуждает вращаться водило и весь планетарный механизм в целом, что соответствует режиму шагания.

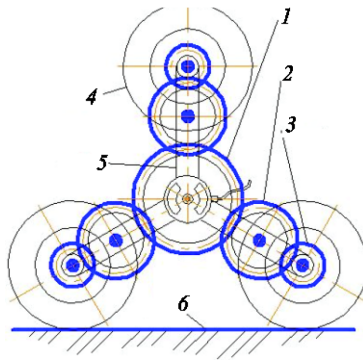


Рис. 8. Схема колесно-шагающего движителя: 1 — солнечная шестерня (ведущая); 2 — сцепленный сателлит; 3 — сателлит, приводящий колесо; 4 — колесо; 5 — водило; 6 — опорное основание

Модель машины с колесно-шагающим движителем была выполнена в виде набора выпуклых многогранников, связанных соответствующими шарнирами и передаточными отношениями (рис. 9). На рис. 10 представлен вариант прохождения машиной трассы со ступенями.

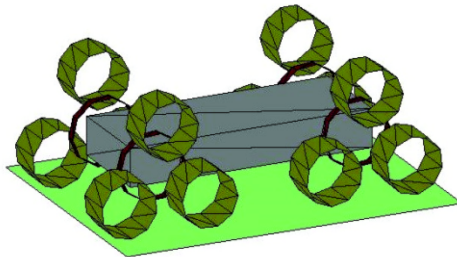


Рис. 9. Модель машины с колесно-шагающим движителем

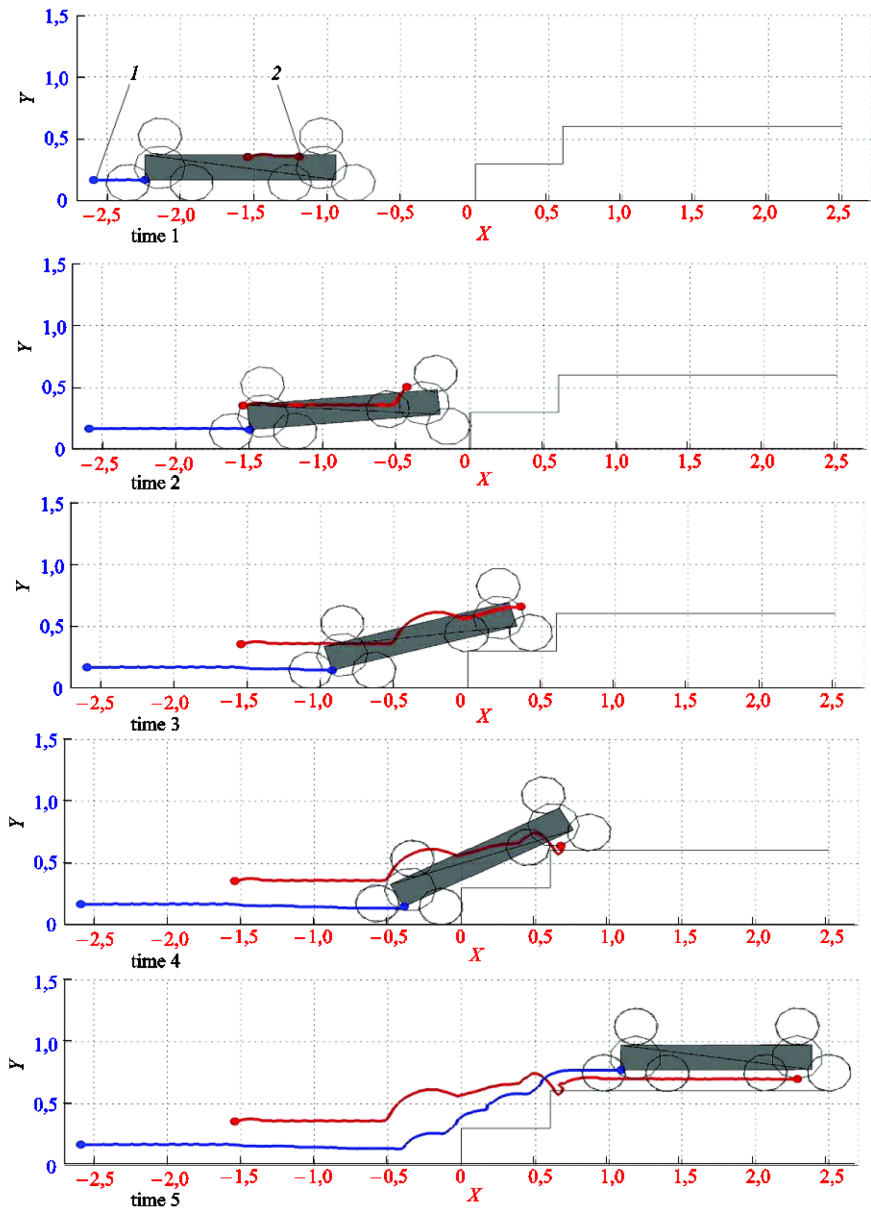


Рис. 10. Моделирование движения мобильного робота по трассе:

1 — траектория точки корпуса; 2 — траектория точки на переднем правом водиле

Ниже показаны графики угловых скоростей колеса относительно водила (рис. 11, кривая 1) и водила относительно корпуса машины (рис. 11, кривая 2) для переднего правого движителя. Видно, что прохождение трассы началось с режима качения до упора в ступень передними движителями. Затем последовал режим шагания (зона, заштрихованная на рис. 11) и снова качения после преодоления препятствия передними движителями.

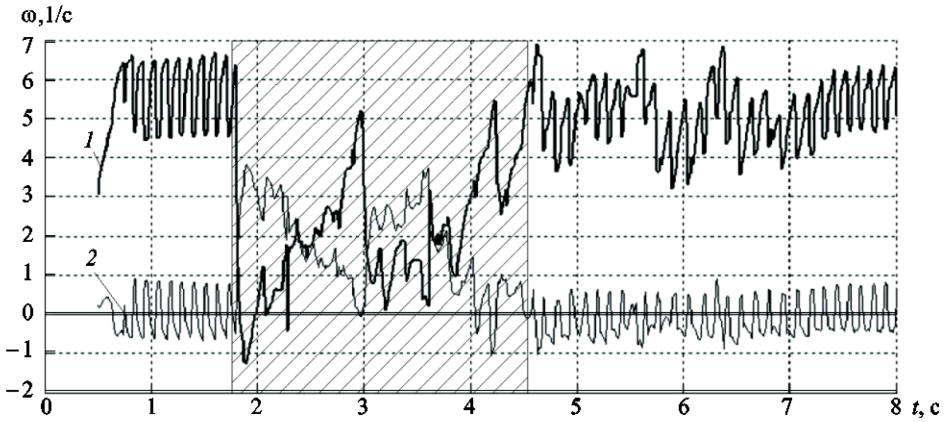


Рис. 11. Запись угловой скорости для переднего правого движителя:
1 — угловая скорость колеса; 2 — угловая скорость водила

Моделирование подтвердило способность машины с колесно-шагающим движителем преодолевать крупные препятствия определенного профиля. Однако в процессе подбора размеров и передаточных чисел механизма движителя обозначились его известные серьезные недостатки. Так, при недостаточной массе, избыточной тяге или неправильно подобранных передаточных числах шестерен движитель может перейти в режим шагания на ровной площадке. В случае же недостаточного сцепления катков с грунтом или слишком большой массы машины шагание не начнется даже при упоре в стенку. Поэтому часто в механизме предусматривают возможность торможения водила на корпус и блокировку водила с приводной солнечной шестерней.

Заключение. Применение алгоритмов для проведения анализа пересечения многоугольников GJK, EPA и CA, а также средств моделирования MATLAB/Simulink позволило создать компьютерную имитационную модель движения транспортной машины по трассе сложного профиля. Трасса может содержать вертикальные или обладающие отрицательным уклоном стенки. Объект моделирования должен состоять из набора выпуклых многогранников. В целом модель позволяет проводить анализ профильной проходимости и тяговооруженности транспортных машин, в том числе с нетрадиционными движителями.

Предложенный метод позволяет реализовать сложные методы расчета сил взаимодействия с опорным основанием, разработанные для моделирования «контакта в точке» (например, как в работах [10, 11]).

К сожалению, с помощью разработанной модели невозможно исследование гибкой гусеницы транспортной машины. Кроме того, на результат моделирования может влиять представление плавных фигур (например, цилиндрического или торообразного колеса) в виде

многогранников с ограниченным количеством вершин. Так, рассмотренная машина имеет колеса в виде десятигранных призм, а не цилиндров. Именно этим вызваны высокочастотные колебания угловых скоростей на рис 11. Уменьшить колебания можно, увеличив число вершин, но, конечно, ухудшив производительность модели.

Все это делает описанный в статье способ моделирования контакта наиболее подходящим для исследования взаимодействия с опорным основанием корпусных деталей, манипуляторов, лыж, аутригеров и в несколько меньшей степени — колес.

Для моделирования движения по трассе колес, опорных катков и гусеничного обвода можно быть эффективно представить их в виде набора дуг и отрезков (полилиний), как это сделано в симуляторе RobSim [12]. Похожий принцип используется и в математических моделях, описанных в работе [13].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дядченко М.Г. *Исследование влияния системы поддресоривания боевых гусеничных машин на работоспособность специального оборудования*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ, 1997, 118 с.
- [2] Дядченко М.Г., Котиев Г.О., Наумов В.Н. *Основы расчета систем поддресоривания гусеничных машин на ЭВМ*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 52 с.
- [3] Сарач Е.Б., Стадухин А.А. Математическая модель гусеничного обвода. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2011 вып. 11. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/245694.html>
- [4] Стадухин А.А. Моделирование контакта транспортной машины и опорного основания как функции вертикальной координаты. *Тр. НАМИ*, 2015, вып. 262, с. 65–75.
- [5] *Bullet Physics Library. Real-Time Physics Simulation*. URL: <http://bulletphysics.org/wordpress/>
- [6] Xiaoyun Deng. *Robot workcell modeling and collision detection with Matlab robotics toolbox*. Master of Science Thesis. Tampere University of Technology, 2012.
- [7] *Java collision detection and physics engine. dyn4j. Tag: Collision Detection*. URL: <http://www.dyn4j.org/tag/collisiondetection/>
- [8] Ермолин Е.Н. *Методы определения и разрешения столкновений на полигональных моделях*. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, 2011, 155 с.
- [9] Дьяков А.С., Рязанцев В.И., Анкинович Г.Г. Решение задач профильной проходимости робототехнического комплекса с колесно-шагающим движителем с помощью математического моделирования. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2014 вып. 12. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/747961.html>
- [10] Зеленов В.В., Сарач Е.Б., Смирнов И.А. Повышение устойчивости импульсных систем на колесном шасси при работе на деформируемых грунтах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-10-411
- [11] 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, вып. 11. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-11-467

- [12] Универсальный механизм. *Моделирование динамики механических систем*. URL: <http://www.universalmechanism.com/index/download/realtimetrackedvehicles.pdf>
- [13] Котиев Г.О., Сарач Е.Б. *Комплексное подрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 184 с.

Статья поступила в редакцию 24.10.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Стадухин А.А. Моделирование взаимодействия мобильного робота и опорного основания с помощью алгоритмов пересечения многогранников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1561>

Стадухин Антон Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: ant.m9@ya.ru

Simulating the interaction between a mobile robot and a supporting surface with the help of polygon intersection algorithms

© A.A. Stadukhin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

When simulating the interaction between vehicle chassis and supporting surfaces, researchers often disregard geometrical shapes of the contacting element and the ground profile, studying “point contact” only. This article suggests representing machine elements and ground profile as polygons and studying their intersection by employing well-known algorithms — GJK (Gilbert–Johnson–Keerthi), EPA (Expanding Polytope Algorithm) and CA (Clipping Algorithms). We supply a short description of the algorithms and explain how to adapt them to the application under consideration. We show a technique for splitting the path into convex polygons, required for algorithm operation. We demonstrate the results of simulating a simple mechanical system in the MATLAB environment. As an example, we provide a simulation of a mobile robot with a roller walker chassis climbing stairs. We specify the primary difficulties concerning the application of the simulation technique discussed.

Keywords: transportation, robot, supporting surface, simulation, MATLAB, GJK, EPA.

REFERENCES

- [1] Dyadchenko M.G. *Issledovanie vliyaniya sistemy podressorivaniya boevykh gusenichnykh mashin na rabotosposobnost spetsialnogo oborudovaniya*: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Investigating the effect of military track-laying vehicle suspension systems on the operation of specialised equipment. Cand. eng. sci. diss.]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1997, 118 p.
- [2] Dyadchenko M.G., Kotiev G.O., Naumov V.N. *Osnovy rascheta sistem podressorivaniya gusenichnykh mashin na EVM* [Foundations of digital computing of suspension system parameters for track-laying vehicles]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2002, 52 p.
- [3] Sarach E.B., Stadukhin A.A. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie – Science and Education: Scientific Journal*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/245694.html>
- [4] Stadukhin A.A. Modelirovanie kontakta transportnoy mashiny i opornogo osnovaniya kak funktsii vertikalnoy koordinaty [Simulating the contact between a vehicle and a supporting surface as a function of the vertical coordinate]. *Trudy NAMI* [Proc. of the Central research and development automobile and engine institute NAMI], 2015, no. 262, pp. 65–75.
- [5] *Bullet Physics Library*. 2015. Available at: <http://bulletphysics.org/wordpress/>
- [6] Xiaoyun Deng. *Robot workcell modeling and collision detection with Matlab robotics toolbox*. Master of Science Thesis. Tampere University of Technology, 2012.
- [7] *Java collision detection and physics engine*. 2015. Available at: <http://www.dyn4j.org/tag/collisiondetection/>
- [8] Ermolin E.N. *Metody opredeleniya i razresheniya stolknoveniy na poligonalnykh modelyakh*. Dis.... kand. fiz.-mat. nauk [Methods of collision detection and solving in polygonal models. Cand. phys.-math. sci. diss.].

Novosibirsk, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 2011, 155 p.

- [9] Dyakov A.S., Ryazantsev V.I., Ankinovich G.G. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie — Science and Education: Scientific Journal*, 2014, no. 12. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/747961.html>
- [10] Zelenov V.V., Sarach E.B., Smirnov I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-10-411
- [11] Naumov V.N., Mashkov K.Yu., Kotiev G.O. et al. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 11. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-11-467
- [12] *Universalnyy mekhanizm. Modelirovanie dinamiki mekhanicheskikh sistem* [Universal mechanism. Simulating dynamics in mechanical systems]. 2016. Available at: <http://www.universalmechanism.com/index/download/realtimetrackedvehicles.pdf>
- [13] Kotiev G.O., Sarach E.B. *Kompleksnoe podressorivanie vysokopodvizhnykh dvukhzvennykh gusenichnykh mashin* [Integrated suspension for highly mobile double-link track-laying vehicles]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2010, 184 p.

Stadukhin A.A., Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Multi-purpose Track-laying Vehicles and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: ant.m9@ya.ru