

УДК 519.71, 531.32, 62-529, 629, 623.1/7:623.41

ПЛАНИРОВАНИЕ ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНЫМ БТС НА ОСНОВЕ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ, ЗАДАВАЕМОЙ ОПЕРАТОРОМ

А.В. Леонард (*alex-leonard@yandex.ru*)

Е.С. Брискин (*dtm@vstu.ru*)

И.А. Горбов (*gorbovigor34@yandex.ru*)

Волгоградский государственный технический
университет, Волгоград

Аннотация. В статье рассматривается вопрос разработки алгоритма для синтеза законов движения системой планирования беспилотного транспортного средства (БТС) при обходе препятствия. Синтез законов движения базируется на использовании интегрального критерия – целевой функции в виде линейной свертки частных показателей с весовыми коэффициентами, которая отражает проектируемую специфику работы БТС.¹

Ключевые слова: локальное планирование движения БТС, вариационное исчисление, база знаний робота, недетерминированная среда

Введение

При планировании своего движения, робот должен:

1. Иметь возможность получать от оператора *цель своего движения*;
2. Быть способным *оценить состояние окружающей среды*, в которой он находится, что достигается за счет использования необходимого числа сенсоров (датчиков) [Юревич и др., 2007], интегрированных в систему управления;
3. В соответствии с целью своего движения и состоянием окружающей среды самостоятельно осуществить *планирование движения* на основе, заложенной в его бортовой или удаленной части системы управления, базы знаний (алгоритмов) [Михайлов и др., 2016].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-38-60086 мол_a_дк, № 17-01-00675).

В этом смысле можно говорить об интеллектуализации транспортного средства, как о способности им самостоятельно перемещаться [Lin Rui et. al., 2009], [Darintsev et. al., 2007], [Hiroshi Koyasu et. al., 2006], [Eiji Uchibe et. al., 2000] в не детерминированной среде.

На сегодняшний день исследования по *планированию движения* роботов ведутся многими научными коллективами. Предлагаются различные методы: на основе графов видимости, диаграмм Вронского, неинформированный поиск, эвристический поиск, Алгоритм Lifelong Planning A*, Visibility PRM, Vertex Enhancement, Нить Ариадны, Rapidly-Exploring random trees, RRT и др. Но аналитический обзор литературных источников порядка 300-сот наименований [Казаков и др., 2016] (в том числе по запросам в отечественной наукометрической базе elibrary) показывает, что предлагаемые методы ориентированы на синтез пути следования робота в детерминированной (не детерминированной) среде, а вопрос реализации этих траекторий по существу не затрагивается. Иными словами в этих методах (сэмплирования, дискретизации пространства сцены) задача планирования движения в лучшем случае сводится к постановке оптимизационной задачи с целевой функцией, но эта функция во многих работах соответствует минимальной длине маршрута и (или) максимальной удаленности перемещаемого объекта от препятствий. А формирующиеся траектории, на основе этих методов, за исключением методов гравитирующих сил (потенциальных полей) [Khatib, 1986], представляют собой кусочные функции с разрывами первого рода. Что на практике, даже если законы движения будут сформированы другими подходами, - проблематично реализуемо [Мартыненко, 2005] или потребует дополнительных мер по сглаживанию маршрута [Лавренов и др., 2016]. Поэтому задача комплексного планирования движения: совместного формирования законов движения и изначально гладкой траектории, огибающей препятствия, является актуальной задачей и обладает определенной новизной.

В данной работе авторы *ставят задачу: разработать метод оптимального планирования законов движения БТС для обхода протяженных статичных препятствий в заранее недетерминированной среде, если робот моделируется материальной точкой на плоскости.*

1. Теоретическая проработка метода

Формирование начальной базы знания БТС. Действия оператора:

1. Выбирает одну из возможных целевых функций [Васильев, 2012], [Жога и др., 2010], [Statnikov et. al., 1995] - критерий, отражающий будущую специфику поведения робота при обходе препятствия из пункта старта в пункт назначения:

$$I = k_1 \int_0^{\tau} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) dt - k_2 \int_0^{\tau} (\sqrt{x^2 + y^2} - R) dt + k_3 \int_0^{\tau} (\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2) dt \rightarrow \min \quad (1)$$

где x, y – координаты; $\dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}$ – линейные скорости и ускорения в декартовой системе координат центра масс (характерной точки корпуса); R – расстояние от начала системы координат до границы препятствия, моделируемого на плоскости окружностью; τ – времени следования из пункта старта в пункт назначения характерной точки корпуса; $k_{1(2,3)}$ – весовые коэффициенты, отражающие значимость частных показателей.

По критерию (1) робот должен быть способен минимизировать квадрат скорости, квадрат ускорения и максимизировать расстояние до препятствия [Казаков и др., 2016], [Лавренов и др., 2016] в каждый момент времени синтезируемого движения.

Задается условиями экстремума соответствующего порядка в виде уравнений Эйлера – Пуассона [Охоцимский и др., 1957], [Брискин и др., 2011], [Briskin et. al., 2014a], [Ловейкин и др., 2014]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{x}} \right) = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{y}} \right) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $\Phi = k_1 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) - k_2 (\sqrt{x^2 + y^2} - R) + k_3 (\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2)$.

Осуществляет преобразования:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial x} &= -k_2 (x^2 + y^2)^{-0.5} x; & \frac{\partial \Phi}{\partial y} &= -k_2 (x^2 + y^2)^{-0.5} y; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} &= 2k_1 \dot{x}; & \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}} &= 2k_1 \dot{y}; & \frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{x}} &= 2k_3 \ddot{x}; & \frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{y}} &= 2k_3 \ddot{y}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} \right) &= 2k_1 \ddot{x}; & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}} \right) &= 2k_1 \ddot{y}; & & & & \\ \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{x}} \right) &= 2k_3 x^{IV}; & \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{y}} \right) &= 2k_3 y^{IV}, & & & & \end{aligned} \quad (3)$$

откуда определяются оптимальные законы движения в дифференциальной форме:

$$\left\{ x^{IV} = \frac{k_1}{k_3} \ddot{x} + \frac{k_2}{2k_3} (x^2 + y^2)^{-0.5} x; y^{IV} = \frac{k_1}{k_3} \ddot{y} + \frac{k_2}{2k_3} (x^2 + y^2)^{-0.5} y. \right. \quad (4)$$

Программирует дифференциальные уравнения (4) и методы их численного интегрирования или расчета постоянных интегрирования для

аналитической формы в системе самоуправления робота (базе знаний робота);

Задаёт возможность ввода начальных или граничных условий по четыре для каждого уравнения (4) из 16 возможных: $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{\ddot{x}}_0, \ddot{\ddot{y}}_0, x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau, \ddot{x}_\tau, \ddot{y}_\tau, \ddot{\ddot{x}}_\tau, \ddot{\ddot{y}}_\tau$ и время τ , тем самым определяя роботу *цель его движения* в недетерминированных условиях;

Кодирует алгоритм определения параметра R в зависимости от значений расстояний до поверхности препятствия, поступающих от лазерных дальномеров;

Например, для цели движения – перемещения из пункта расположения в пункт назначения: $\tau, x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau$, программирует метод выбора коэффициентов $k_{1(2,3)}$ и определения начальных параметров $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{\ddot{x}}_0, \ddot{\ddot{y}}_0$, необходимых для интегрирования уравнений (4), траектория которых не пересекает обнаруженное препятствие.

В результате предложенной последовательности действий оператора осуществляется перенос функций планирования движения в систему управления робота. Робот становится способным планировать свое движение самостоятельно.

Действия БТС в соответствии с запрограммированной базой знания:

В процессе движения БТС лазерные дальномеры с заданным интервалом времени осуществляют поиск препятствия перед роботом.

1. По заданной оператором системе уравнений (4), соответствующих целевой функции (1) и *цели движения*, например, - переместится из пункта А в пункт В: $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau$, за время τ , осуществляет построение законов движения. Если препятствие до начала движения не обнаружено, то в дифференциальных уравнениях (4): $k_2 = 0$, тогда

$$\left\{ x^{IV} = \frac{k_1}{k_3} \ddot{x}; y^{IV} = \frac{k_1}{k_3} \ddot{y} \Leftrightarrow \begin{cases} x = A_1 + A_2 t + A_3 e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}} t} + A_4 e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}} t}; \\ y = B_1 + B_2 t + B_3 e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}} t} + B_4 e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}} t} \end{cases} \quad (5)$$

В соответствии с целью движения система управления БТС должна рассчитать A_j, B_j согласно следующим системам уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0 = A_1 + A_3 + A_4; \\ x_\tau = A_1 + A_2\tau + A_3 e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau} + A_4 e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau}; \\ \dot{x}_0 = A_2 + A_3 \sqrt{\frac{k_1}{k_3}} - A_4 \sqrt{\frac{k_1}{k_3}}; \\ \dot{x}_\tau = A_2 + A_3 \sqrt{\frac{k_1}{k_3}} e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau} - \sqrt{\frac{k_1}{k_3}} A_4 e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau}; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} y_0 = B_1 + B_3 + B_4; \\ y_\tau = B_1 + B_2\tau + B_3 e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau} + B_4 e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau}; \\ \dot{y}_0 = B_2 + B_3 \sqrt{\frac{k_1}{k_3}} - B_4 \sqrt{\frac{k_1}{k_3}}; \\ \dot{y}_\tau = B_2 + B_3 \sqrt{\frac{k_1}{k_3}} e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau} - \sqrt{\frac{k_1}{k_3}} B_4 e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau}; \end{array} \right.$$

одним из методов решения системы алгебраических уравнений (например, методом Гаусса). Для более сложных критериев необходим численный поиск неизвестных констант интегрирования с использованием заданных граничных условий. Построение законов осуществляется в неподвижной системе координат, связанной с начальным положением характерной точки корпуса БТС.

2. Запускает программу практической реализации синтезированных законов движения (5) и их стабилизации.

3. В случае, если препятствие обнаружено, происходит перепланирование движения в соответствии с системой (4) ($k_2 \neq 0$), для которой определяются свои граничные условия из системы (5) путем подстановки в нее τ_1 - времени обнаружения препятствия, или путем опроса датчиков; При этом осуществляется перерасчет координат, входящих в граничные условия, так как начало неподвижной системы координат смещается в центр окружности, моделирующей препятствие. Запускается численный метод поиска $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{x}_\tau, \ddot{y}_\tau$, включающий в себя численное интегрирование уравнений (4) на интервале $0 \leq t \leq \tau - \tau_1$ и проверку отсутствия пересечения синтезируемой траекторией контуров препятствия

$$\sqrt{x^2 + y^2} - R > 0 \quad (6)$$

на каждом шаге интегрирования.

Пример численного синтеза законов движения БТС в случае изначального обнаружения препятствия проиллюстрирован на Рис. 1. Где на Рис. 1 а) представлена траектория центра масс БТС для обхода препятствия, моделируемого окружностью. Рис. 1 б) и в) отражает изменение линейных скоростей и ускорений центра масс робота во времени в проекции на неподвижные оси декартовой системы координат. Расчет проводился при $x_0 = -0.5 \text{ м}$, $y_0 = -1 \text{ м}$, $x_\tau = 0.34 \text{ м}$, $y_\tau = 0.9 \text{ м}$,

$$\tau = 4 \text{ с}, k_{1(2,3)} = 1.$$

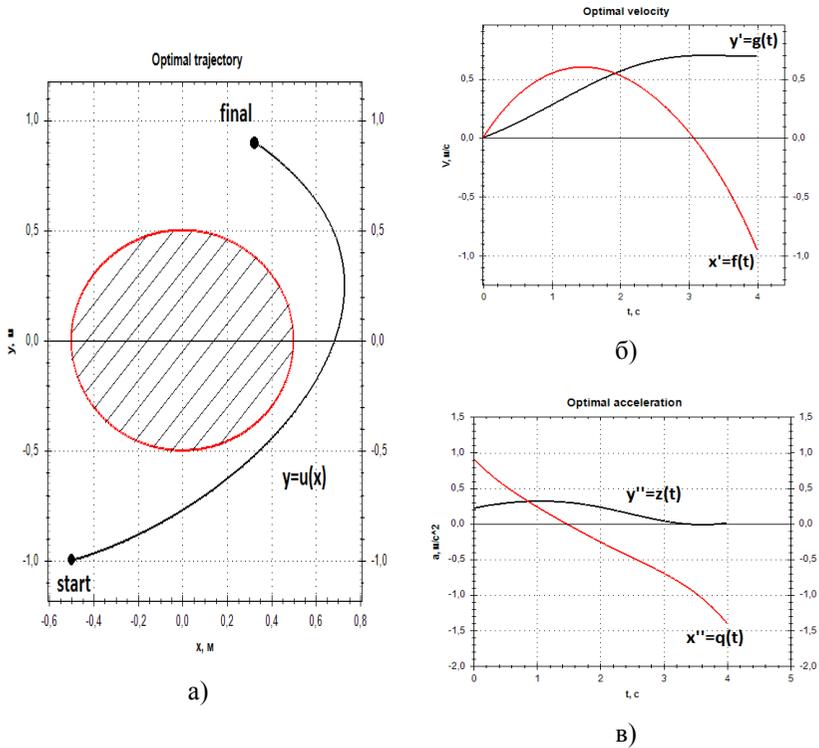


Рис. 1. Имитация работы системы планирования движения БТС

2. Некоторые аспекты практической реализации метода

Практическая отработка метода планируется на лабораторной модели БТС (Рис. 2.), которая представляет собой колесную платформу без поддресоривания с системой поворота задних колес сходной автотранспортной (наличие рулевой трапеции) и передним приводом. При этом на платформе установлена сенсорная группа, состоящая из трех лазерных дальномеров, для детектирования расстояний до поверхности препятствия. Как устройство поворота колес, так и тяговый электропривод оснащены угловыми энкодерами. Все сенсоры и датчики интегрированы с бортовой частью системы управления, реализованной на Raspberry Pi. Обмен информацией между бортовой и удаленной частями системы управления осуществляется через Wi-Fi-канал связи.



Рис. 2. Лабораторная модель БТС

Лабораторная модель обладает протяженностью в отличие от материальной точки, характеризующейся в пространстве числовыми координатами. Но представление БТС в виде материальной точки и решение задачи отсутствия столкновений корпуса робота с поверхностью препятствия совместно возможны. Для этого в центре масс робота строится окружность радиуса R_1 , полностью охватывающая корпус БТС без пересечения. При обнаружении препятствия в виде трех отраженных сигналов лазерной группы, трем точкам поверхности препятствия ставится в соответствие окружность радиуса R_2 . После чего радиусы R_1 и R_2 суммируются $R = R_1 + R_2$, а их суммарное значение используется в формулах, содержащих переменную R . Т. е. границы окружности, моделирующей препятствие, искусственно расширяются, тем самым, при выполнении условия (6), гарантируя отсутствие столкновений. Данный подход может быть использован и для планирования движения шагающих машин [Леонард, 2013], [Briskin et. al., 2014b], [Briskin et. al., 2010], [Briskin et. al., 2013], [Briskin et. al., 2003]. Необходимость в рассмотрении БТС как твердого тела (системы твердых тел, обладающих массами и моментами инерции) возникает в том случае, когда конструкция накладывает ограничения на физическую реализацию траекторий движения, а количество неизвестных силовых факторов (управляющих сил и реакций) превышает значение два. Что имеет место быть для лабораторной модели. Задача определения управляющих сил (напряжений) необходима для экспериментальной отработки движения, но представляет собой вопрос, требующий отдельного детального рассмотрения. Современный уровень развития цифровой техники, позволяет систему управления (СУ) робота разделить на две составляющие: бортовую СУ [Павловский и др., 2016] и удаленную, обменивающие между собой управляющей информацией. При

этом комплекс расчетов, связанный с планированием движения самим роботом, можно реализовывать на удаленной ЭВМ со значительной оперативной памятью, а для бортовой СУ оставить обработку сформированных управляющих сигналов.

Заключение

При построении критерия оптимальности, входящего в базу знаний робота [Леонард и др., 2015], [Леонард и др., 2017], [Брискин и др., 2016] в виде дифференциальных уравнений движения, для реального движения БТС потребуются учет конструктивных особенностей робота таких, как минимально допустимый радиус поворота или «разрешенное изменение в пространстве» вектора скорости центра масс БТС. Введение подобных частных показателей будет усложнять вид дифференциальных уравнений движения, поэтому необходимо исследовать вопрос корректной применимости численных методов при синтезе законов движения по заданным оператором граничным условиям. Следующим шагом по интеллектуализации БТС в рамках предлагаемого подхода по самопланированию движения может стать автоматизация получения дифференциальных законов движения самим БТС по заданному оператором критерию – целевой функции, которая своей структурой и набором параметров отражает специфику планируемого поведения робота. При этом специфика поведения робота, как было показано в статье, зависит от значений весовых коэффициентов, которые меняются самой машиной при изменении условий среды, а по необходимости и при синтезе законов движения.

Авторы статьи не претендуют на полноту предлагаемого метода. По мере получения новых теоретических выводов и экспериментальных результатов метод будет совершенствоваться и распространяться как на класс статических препятствий сложной конфигурации, так и на класс динамических препятствий. Что потребует использование более мощной сенсорной базы класса LIDAR.

В статье, для иллюстрации работы (Рис. 1) системы управления БТС, использовалась авторская программа, разработанная на языке Visual C++ в среде разработки Microsoft Visual Studio 2010. Предварительный расчет параметров осуществлялся в лицензионной программе MathCad Education (в рамках закупки ПО по программе подготовки кадров для ОПК инфраструктурного конкурса МИНОБРНАУКИ от 2014 г.).

Список литературы

- [Брискин и др., 2011] Брискин Е.С., Калинин Я.В. Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления – 2011. – № 2.
- [Брискин и др., 2016] Walking robot «character» as element of intelligent system / Е.С. Брискин, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов, Я.В. Калинин, А.В. Леонард, В.А. Серов, В.А. Шурыгин // Advances in Cooperative Robotics : Proceedings of the International Conference on CLAWAR 2016 (London, UK, 12-14 September 2016) / ed. by Mohammad O. Tokhi, Gurvinder S. Virk. – [Published by World Scientific Publishing Co. ; printed in Singapore, 2016]. – P. 386-394.
- [Васильев, 2012] Васильев, Е.М. Система оптимального управления подвешенным грузом // Вестник ВГТУ. – 2012. – № 1.
- [Жога и др., 2010] Жога, В.В., Гаврилов А.Е., Еременко А.В. Оптимальный закон горизонтального перемещения мобильного робота с ортогональными шагающими движителями // Известия ВОЛГТУ. – 2010. – № 8.
- [Казаков и др., 2016] Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения // Труды Института системного программирования РАН. 2016. Т. 28. № 4. С. 241-294.
- [Лавренов и др., 2016] Лавренов Р.О., Афанасьев И.М., Магид Е.А. Планирование маршрута для беспилотного наземного робота с учетом множества критериев оптимизации // Третий Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2016, 22-23 сентября 2016 г., г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия): Труды семинара. – М: Изд-во «Перо», 2016. – 184 с. С. 10-20.
- [Леонард, 2013] Леонард, А.В. Цикловый шагающий движитель с направляющими. Свойства. Управление. Пути совершенствования // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной 3 техники и информатики в технических системах". Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, – 2013. – № 8 (111).
- [Леонард и др., 2015] Леонард А.В., Горбов И.А., Калинин Я.В., Брискин Е.С. Интеллектуализация системы управления робота, моделируемого материальной точкой на плоскости // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 14 (178).
- [Леонард и др., 2017] О влиянии «характера» группы роботов на их движение / А.В. Леонард, Е.С. Брискин, И.А. Горбов // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. - Волгоград, 2017. - № 1 (196). - С. 116-120.
- [Ловейкин и др., 2014] Ловейкин В.С., Шевчук О.Г. Влияние параметров крановой тележки с гибким подвесом груза на оптимальный динамический режим движения // Вестник ХНАДУ. – 2014. – № 65-66.
- [Мартыненко, 2005] Мартыненко Ю.Г. Управление движением мобильных колёсных роботов // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11. № 8. С. 29-80.
- [Михайлов и др., 2016] Михайлов Б.Б., Назарова А.В., Ющенко А.С. Автономные мобильные роботы - навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2 (175). С. 48-67.
- [Охоцимский и др., 1957] Охоцимский, Д.Е., Энеев Т.М. Некоторые вариационные задачи, связанные с запуском искусственного спутника Земли // Успехи физических наук. – 1957.

- [Павловский и др., 2016] Павловский В.Е., Кий К.И., Орлов И.А., Алисейчик А.П. Информационная система интеллектуального беспилотного автомобиля "АВТОНИВА" // Третий Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2016, 22-23 сентября 2016 г., г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия): Труды семинара. – М: Изд-во «Перо», 2016. – 184 с. С. 88-97.
- [Юревич и др., 2007] Юревич Е.И. Интеллектуальные роботы // М.: Машиностроение, 2007.
- [Briskin et. al., 2003] Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V. Power efficiency and control algorithms of walking machine with cycle propellers // CLAWAR 2003. – 2003.
- [Briskin et. al., 2014a] Briskin E.S., Kalinin Ya. V., Maloletov A. V., Chernyshev V.V. On the energy efficiency of cyclic mechanisms // Mechanics of Solids. – 2014. – Vol. 49, No. 1.
- [Briskin et. al., 2013] Briskin E.S., Leonard A.V. Stability of translational motion of a walking machine with cyclic drives // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2013. – Vol. 52, No. 6.
- [Briskin et. al., 2014b] Briskin E.S, Shurygin V.A., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Sharonov N.G., Kalinin Ya. V., Leonard A.V., Serov V.A., Mironenko K.B., Ustinov S.A. Problems of Increasing Efficiency and Experience of Walking Machines Elaborating // ROMANSY 2014.
- [Briskin et. al., 2010] Briskin E.S., Zhoga V.V., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Kalinin Ya.V., Sharonov N.G. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application) // CLAWAR 2010. – 2010.
- [Darintsev et. al., 2007] Darintsev O. V. and Migranov A. B. Genetic Algorithms-Based Path-Planning System for the Motion of a Group of Mobile Micro-robots // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2007. – Vol. 46, No. 3.
- [Khatib, 1986] Khatib O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. International Journal of Robotics and Research, vol. 5, № 1, 1986, pp. 90–98.
- [Koyasu et. al., 2006] Hiroshi Koyasu and Jun Miura Mobile robot motion planning considering path ambiguity of moving obstacles // Intelligent Autonomous Systems. – 2006. – No. 9.
- [Rui et. al., 2009] Lin Rui, Du Zhijiang and Sun Lining Moving Object Tracking based on Mobile Robot Vision" // ICMA. – 2009.
- [Statnikov et. al., 1995] Statnikov R.B. Matusov J.B. Multicriteria Optimization and Engineering. – Springer, 1995
- [Uchibe et. al., 2000] Eiji Uchibe, Masakazu Yanase, and Minoru Asada Behavior generation for a mobile robot based on the adaptive fitness function // IAS-6. – 2000.