

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 621.865.8

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ МАНИПУЛЯЦИОННЫМ РОБОТОМ В ЗАДАЧЕ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ¹

Статья поступила в редакцию 06.04.2016, в окончательном варианте 02.06.2016.

Коротков Владислав Игоревич, студент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: vlad2.vik@mail.ru

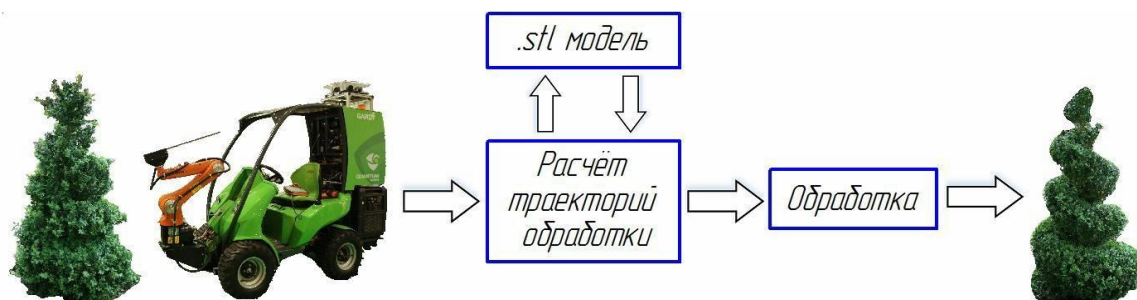
Воротников Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: vorotn@bmstu.ru

Выборнов Николай Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: do_vybornov@aspu.ru

Рассмотрена конструкция и система управления мобильным топиарным роботом, предназначенным для фигурной обработки зеленых насаждений типа «живая изгородь». В состав робота входят колесное шасси (садовый минитрактор), комплекс навигационного оборудования, 6-ти осевой промышленный манипулятор KUKAKR10 R1100 sixx, режущий инструмент – кусторез. При обработке используется трехмерная карта участка с расположенными на нем зелеными насаждениями, поверхность которых аппроксимируется заранее определенными примитивами. Предлагается метод автоматического генерирования траектории движения манипулятора для обработки зелёных насаждений, модели которых задаются параметрически. В статье дается описание алгоритма формирования траектории движения инструмента, с выбором оптимального варианта обработки и с учётом уже обработанных поверхностей. Предложенный алгоритм позволяет проводить обработку нескольких локальных растений с одной рабочей позиции робота.

Ключевые слова: топиарная обработка, манипулятор, мобильный робот, зона достижимости манипулятора, генерирование траектории, обратная задача по положению, ROS, библиотека OMPL

Графическая аннотация



ADAPTIVE PROCESSING OF GREEN PLANTING WITH A MOBILE MANIPULATOR ROBOT

Korotkov Vladislavs I., student, Bauman Moscow State Technical University, 5, 2-aya Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation, e-mail: vlad2.vik@mail.ru

Vorotnikov Sergey A., Ph.D. (Engineering), Bauman Moscow State Technical University, 5, 2-aya Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation, e-mail: vorotn@bmstu.ru

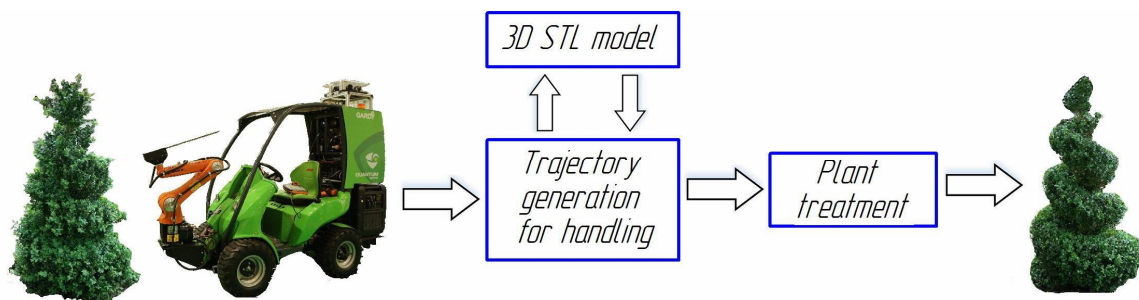
¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №16-07-01080.

Vibornov Nicholay A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Astrakhan State University, 20a Tatishchev St, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: do_vybornov@aspu.ru

The article discusses the design and control system of a topiary mobile robot for the treatment of curly green spaces such as «hedges». The robot construction includes a wheeled chassis (garden minitractor), complex navigation equipment, 6-axis industrial manipulator KUKA KR10 R1100 sixx, cutting tool - brush cutter. During plant treatment a three-dimensional map with located green spaces is used; the surface of spaces is approximated by predetermined primitives. A method of automatically generating a trajectory of movement of the manipulator for handling green areas, which are defined parametrically model is submitted. The article describes the algorithms forming toolpath, with a selection of the best machining options and taking into account the already treated surfaces. The proposed algorithm allows the processing of several local plants with one operating position.

Keywords: topiary machining, manipulator, mobile robot, manipulator reachable area, trajectory generation, inverse kinematics, ROS, OMPL-library.

Graphical annotation



Введение. На сегодняшний день существует большое количество парков, приусадебных хозяйств и дач с зелёными насаждениями, где используется фигурная обработка кустов и деревьев. Для этого существует много разнообразного инструмента: кусторезы, садовые ножницы, триммеры и т.д. Однако весь этот инструмент рассчитан на работу человека. Поэтому качество обработки принципиально зависит от уровня мастерства садовников, качества выполнения ими работ с учетом самочувствия, погодных условий, освещенности и пр. Следовательно, весьма актуальной является проблема создания средств автоматизации для фигурной обработки кустов и крон деревьев. В существующих публикациях отражены, преимущественно, средства ручного управления режущими устройствами, в т.ч. и электрифицированными. В связи с этим возникает ряд вопросов, связанных с реализацией автономных робототехнических систем, которые не в полной мере раскрыты в существующей литературе [1, 2, 4]. Поэтому целью данной статьи является разработка комплексных средств автоматизации, сводящих к минимуму участие человека в указанных выше операциях обработки.

Общая характеристика используемого подхода к решению рассматриваемой задачи. Влияние квалификации садовника может быть особенно существенным при обработке сложных фасонных поверхностей большого размера, которые, в случае их оригинальности могут рассматриваться как произведения искусства (рис. 1, а) [9]. Отметим, что по п.1 ст.1259 Гражданского кодекса РФ к объектам авторских прав относятся «произведения ... садово-паркового искусства, в том числе в виде проектов, чертежей, изображений и макетов».

Для решения указанных задач целесообразно использовать мобильные манипуляционные робототехнические средства нового типа – *топиарные роботы*. Инициатором реализации подобной идеи стала компания «Quantum systems». Данной компанией совместно с НУЦ «Робототехника» МГТУ им Н.Э. Баумана был разработан мобильный топиарный робот (МТР) «Гарди» (рис. 1, б). С правовых позиций указанные разработки можно отнести к «единым технологиям» (глава 77 Гражданского Кодекса РФ) [1].

Данный подход является оригинальным, во всяком случае, авторам не удалось найти в литературе описаний подобных разработок.



Рис. 1. Примеры топиарных форм (а), вид МТР «Гарди» (б)

Предлагаемая технология включает следующие этапы. (1) Получение точной 3D-карты рабочего участка с нанесенными на ней объектами обработки (зелеными насаждениями), существующая форма которых определяется путем 3D-сканирования. (2) Построение оптимизированной траектории перемещения МТР. (3) Механическая обработка этих объектов в режиме on-line с использованием МТР.

Отметим, что при решении задачи оптимизации траектории перемещения МТР (по критерию ее минимальной длины, времени обработки или комбинированному) приходится учитывать следующее: наличие ограждений или иных препятствий, которые МТР не может преодолеть; необходимость остановок МТР в отдельных точках траектории для выполнения обработки насаждений; влияния выбора расположения точек останова на их общее количество и пр. Таким образом, постановка задачи оптимизации траектории значительно сложнее стандартной задачи коммивояжера в открытом или закрытом вариантах. Эти вопросы авторы считают выходящими за рамки настоящей статьи.

В качестве колесного шасси МТР используется садовый трактор, на котором установлен комплекс навигационного оборудования; промышленный манипулятор KUKA KR10 R1100 sixx с шестью степенями свободы; режущий инструмент – кусторез (рис. 1, б). Кусторез не имеет собственных степеней свободы и способен выполнять резание только в том направлении, которое ему задает манипулятор. При этом предполагается, что механического усилия кустореза достаточно для обработки всех встречающихся объектов в зеленых насаждениях. Кроме того, считается, что ветровые воздействия не оказывают значимого влияния на форму зеленых насаждений в процессе их обработки.

Энергопитание МТР производится от дизель-генератора, установленного на колесном шасси. Такой подход позволяет реализовать работу МТР как в супервизорном режиме, так и в полностью автономном.

Отметим, что габариты садовых растений, как правило, значительно превышают размеры зоны досягаемости манипулятора из одного положения при его остановке. Это сильно усложняет задачу управления манипулятором и приводит к необходимости выбора нескольких точек (положений), с которых следует проводить обработку; неоднократной корректировки взаимного положения МТР и растения; учета и исключения из процесса формообразования тех фрагментов растения, которые уже были обработаны с предыдущей точки.

В данной статье описывается реализация одного из важнейших этапов работы МТР, связанного с подрезанием зеленых насаждений манипулятором с инструментом – в соответствии с требуемой формой и с учетом уже обработанных фрагментов растения.

Постановка задачи. В терминах робототехники МТР функционирует в слабо детерминированной среде, где траектория движения режущего инструмента не задается априори, а должна генерироваться автоматически, в зависимости от места расположения колесного шасси.

В условиях реального участка, МТР не может быть позиционирован точно относительно растения, подлежащего обработке [10]. Поэтому, как в супервизорном, так и в автономном режимах МТР перемещают в некоторую допустимую область в окрестности рабочей точки (рис. 2).

Таким образом, для запуска программы обработки конкретного растения манипулятор должен находиться внутри допустимой области, из которой он может «дотянуться» до растения.

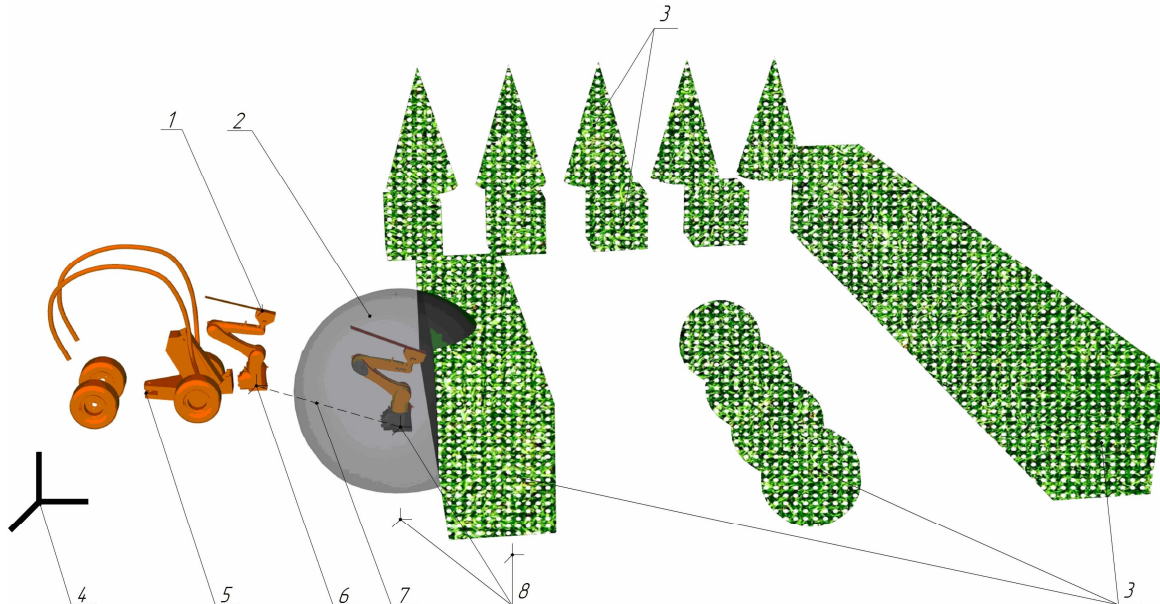


Рис. 2. Пример 3D модели рабочего участка:

1 – инструмент, 2 – зона достижимости манипулятора, 3 – растения, 4 – глобальная система координат, 5 – МТР, 6 – манипулятор, 7 – траектория перемещения манипулятора в рабочую точку, 8 – рабочие точки

Рассмотрим теперь структуру системы управления МТР (рис. 3), представляющую собой комплекс, программная часть которого разработана на языке C++. Система управления построена по иерархическому принципу, где высокоуровневые команды, типа «Выбрать участок», «Определить местоположение МТР», «Начать обработку» и др., поступают с пульта управления МТР.

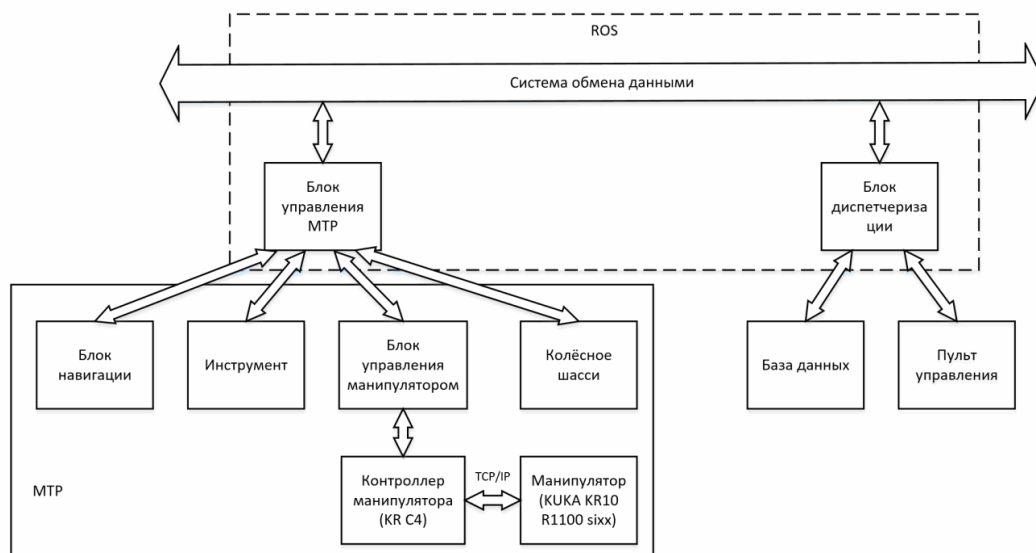


Рис. 3. Структура системы управления МТР

Блок навигации определяет положение колесного шасси и стойки манипулятора в абсолютной системе координат рабочего участка. Блок диспетчеризации обеспечивает взаимодействие блока управления МТР с базой данных, содержащей трехмерную карту участка с расположенными на нем растениями. В результате этого взаимодействия блок управления МТР формирует соответствующие

команды, которые приводят в движение колесное шасси, манипулятор или инструмент. Такая структура системы управления позволяет оператору с помощью пульта выполнить позиционирование МТР в допустимой окрестности рабочей точки и сформировать команду на обработку растения. Эта команда поступает в блок управления манипулятором, где генерируется его траектория движения. Взаимодействие между указанными блоками реализовано при помощи Фреймворка ROS [12].

Алгоритмическая реализация такого подхода средствами известных САМ-систем сопряжена со значительными трудностями, особенно при необходимости обработки нескольких растений с одной рабочей точки [13, 14, 15]. Поэтому потребовалось создание специализированного программного модуля.

Виды поверхностей растений, которые должны быть получены в результате их обработки

Растения на рабочем участке, в общем случае, могут иметь значительное разнообразие требуемых форм. Для конкретности, в рамках разрабатываемого подхода предлагается ограничить это разнообразие некоторым конечным набором форм обрабатываемых поверхностей. При этом любая поверхность разбивается на примитивы, принцип обработки которых известен.

В рамках разработанного алгоритма предлагается поверхность сложного объекта аппроксимировать следующими примитивами (рис. 4): трех- (рис. 4 а) и четырехугольными (рис. 4 б) плоскими гранями, фрагментами эллиптической поверхности (рис. 4 в), а также фрагментами поверхностей конической (рис. 4 г, д) и сферической (рис. 4 е) форм.

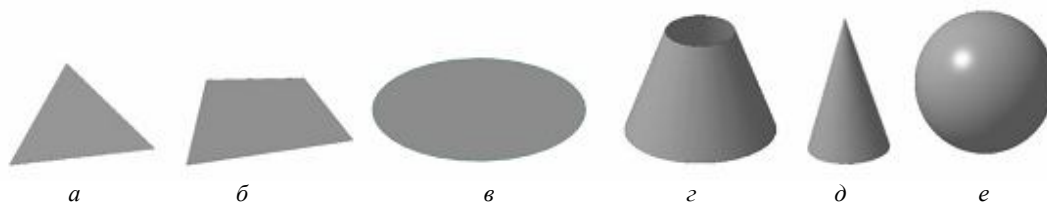


Рис. 4. Примитивы:

а – треугольная грань; б – четырехугольная грань, в – эллиптическая поверхность;
г, д – коническая поверхность, е – сферическая поверхность

Алгоритм генерирования траектории движения манипулятора. Представим алгоритм обработки растений на рабочем участке в виде последовательности следующих этапов (рис. 5) [10].

Ниже мы рассмотрим реализацию соответствующих этапов алгоритма подробнее.

А) Инициализация участка и генерирование линий обработки

Инициализация участка является предварительным этапом алгоритма. Из базы данных загружаются координаты расположения и параметры всех растений, которые необходимо подвергнуть обработке.

Затем производится аппроксимация трехмерных моделей для предполагаемых к обработке объектов некоторыми примитивами (рис. 4). Так, усеченный конус разбивается на три примитива: коническую поверхность (рис. 4 г) и два эллипса, представляющие его нижнее и верхнее основания (рис. 4 в). При этом на поверхностях примитивов генерируются *линии обработки*, по которым в дальнейшем должен будет пройти обрабатывающий инструмент.

В рамках алгоритма, для каждого вида поверхности реализована своя процедура генерирования этих линий, определяемая спецификой формы растения. Сначала, на поверхностях, соответствующих трехмерной модели растения, строятся линии обработки с заданным шагом. Затем, на них также с определенным шагом вычисляются *точки обработки*, с которыми в дальнейшем будут совмещаться точки реза инструмента. Шаг между линиями обработки и шаг между точками обработки выбираются исходя из необходимой точности формообразования растения и размеров лезвия режущего инструмента (50 мм и 5 мм, соответственно).

Рассмотрим примеры генерирования линий обработки для поверхностей различной формы (рис. 6).

- На сферической поверхности строится спираль, начиная с наивысшей точки и заканчивая нижней точкой сферы (рис. 6а).

- На поверхности четырехугольной грани между противоположными сторонами четырехугольника строится множество линий с заданным шагом (рис. 6б). Собственно, грань задается четырьмя точками вершин. Следовательно, для описания этой фигуры необходимо 12 параметров, учитывая, что каждая вершина задается тремя координатами x, y, z .

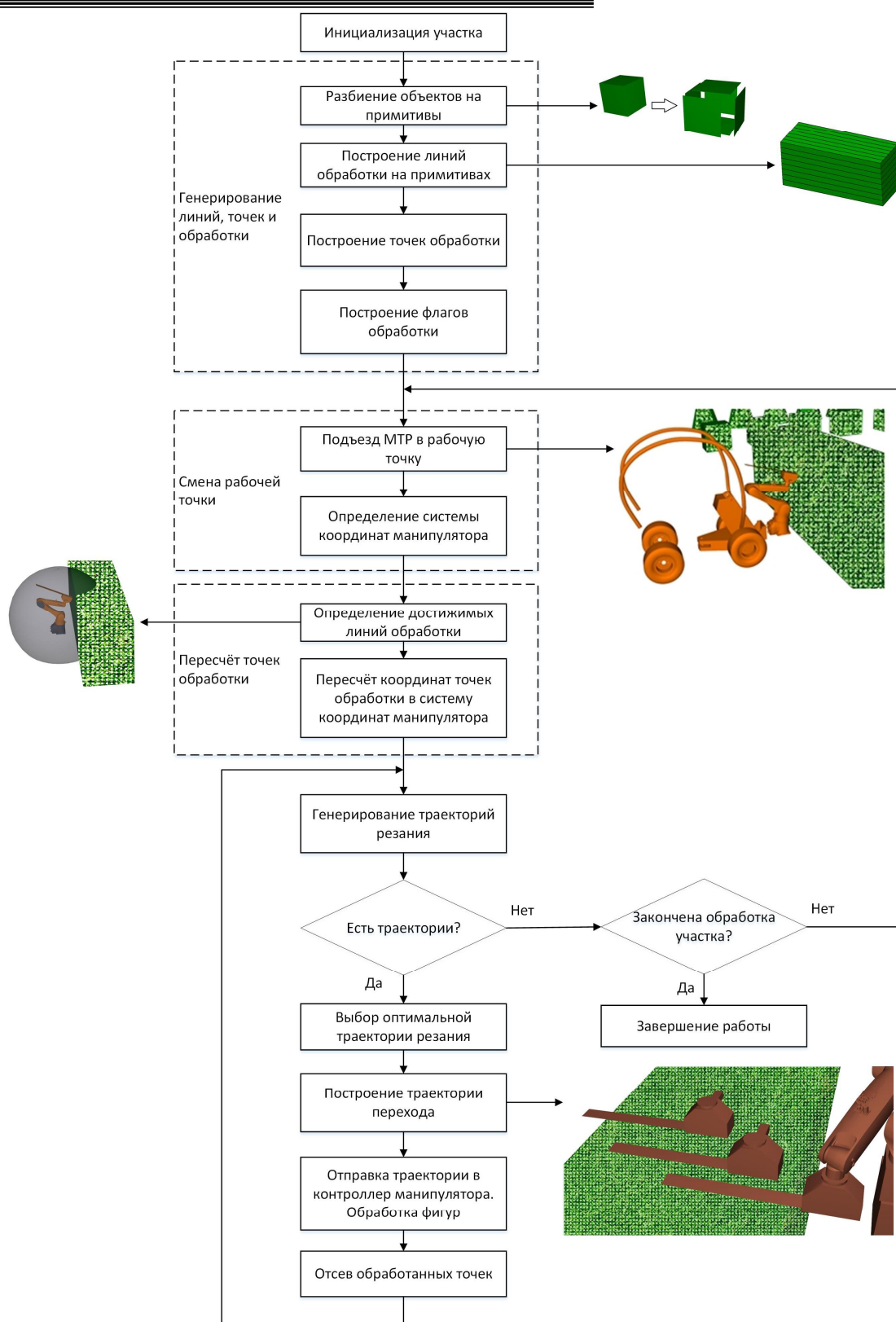


Рис. 5. Алгоритм обработки растения для достижения нужной формы его поверхности

• Принцип генерирования линий обработки для треугольной грани (рис. 6в) аналогичен описанному выше; грань задаётся тремя вершинами или 9-ю параметрами. Линии обработки строятся между самой короткой стороной и двумя другими.

• Линию обработки на конической поверхности строятся по направляющим (рис. 6г). Цилиндрическая поверхность предполагается частным случаем конической.

• Принцип генерирования линий обработки для грани эллиптической формы заключается в построении отрезков, параллельных наибольшей оси эллипса, так, чтобы начальная и конечная точки отрезков лежали на дуге эллипса (рис. 6д).

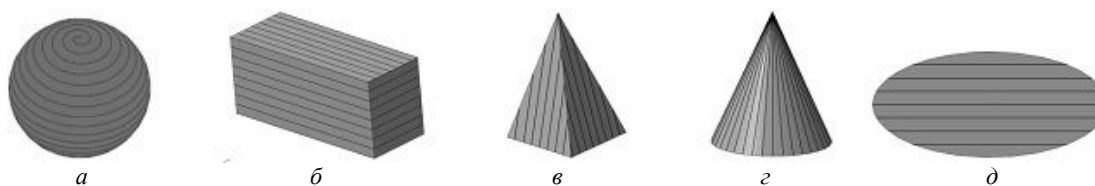


Рис. 6. Линии обработки для различных фигур:
 а – сфера, б – параллелепипед, в – треугольная пирамида, г – конус, д – эллипс

Таким образом, генерируются все линии обработки, по которым в дальнейшем пройдет режущий инструмент. Однако при этом остается открытым вопрос о достижимости всех точек обработки объекта инструментом с учетом его необходимой ориентации. Это обстоятельство требует проверки возможности обработки каждой такой точки.

Для фиксирования факта подрезания введем понятие *флагов обработки* – плоских объектов треугольной формы, прикрепленных к точкам обработки. Одна вершина флага совпадает с точкой обработки, вторая – лежит на линии обработки, на расстоянии 0.5 мм. Третья вершина находится на перпендикуляре к обрабатываемой поверхности на расстоянии 0.5 мм от точки обработки (рис. 7а).

Фиксирование факта подрезания достигается посредством проверки пересечения 3D-модели лезвия инструмента с флагом обработки.

Б) Собственно обработка объектов

Непосредственно перед резанием и после окончания генерирования линий обработки, определяется положение МТР и его манипулятора в рабочей точке относительно глобальной системы координат. Зная положение манипулятора, из линий обработки исключаются точки, не входящие в его зону достижимости, которая приблизительно аппроксимируется сферой (рис. 7б).

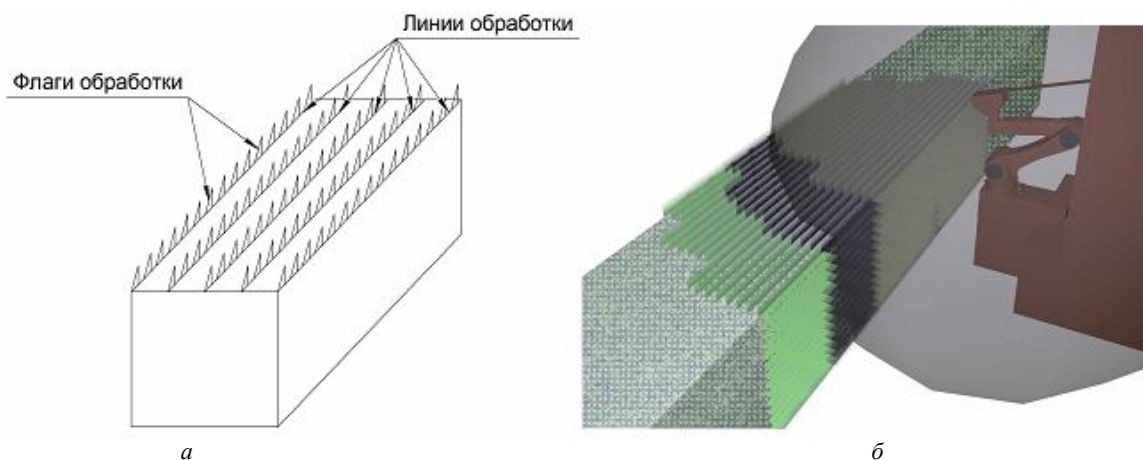


Рис. 7. а – линии обработки с флагами, б – зона достижимости манипулятора
 (цветами показаны участки обработки с разных рабочих точек)

Затем все оставшиеся точки обработки пересчитываются из системы координат участка в систему координат манипулятора. Заметим, что точки обработки, соответствующие одному положению остановки МТР, в общем случае, могут принадлежать различным растениям.

Проведенные вычисления позволяют сгенерировать допустимые траектории резания. Назовём *траекторией резания* массив векторов $\mathbf{Q}(q_i)$, представляющих собой набор обобщённых координат q_i ($i = 1, \dots, n$) манипулятора, при последовательной отработке которых, точка реза инструмента перемещается по линии обработки. Тогда, траектория резания строится решением обратной задачи по положению манипулятора [3, 6] в каждой точке обработки:

$$\begin{cases} \lambda_1(q_1, \dots, q_n) = X \\ \lambda_2(q_1, \dots, q_n) = Y \\ \lambda_3(q_1, \dots, q_n) = Z \\ \lambda_4(q_1, \dots, q_n) = A \\ \lambda_5(q_1, \dots, q_n) = B \\ \lambda_6(q_1, \dots, q_n) = C \end{cases},$$

где $\lambda_i(q_1, \dots, q_n)$ – функция, отражающая зависимость обобщённых координат от положения (X, Y, Z) и ориентации (A, B, C) точки обработки, n – количество осей манипулятора.

Таким образом, для каждой точки обработки при определённой конфигурации манипулятора и точки реза инструмента необходимо найти обобщённые координаты. При этом потенциально возможно возникновение следующих ситуаций.

1. Значения обобщённых координат выходят за допустимые пределы.
2. Обратная задача по положению не имеет решения (точка обработки не находится в зоне достижимости манипулятора).
3. Происходит столкновение инструмента и звеньев манипулятора друг с другом или с любыми другими объектами.
4. Переход между точками обработки сопровождается изменением конфигурации (т.е. обобщённых координат) манипулятора;
5. Точка обработки достижима манипулятором и в ней не происходит указанных выше коллизий.

При реализации пункта 3 используется библиотека ColDet, предназначенная для определения пересечения объектов, аппроксимированных треугольными гранями [7].

Алгоритм построения траекторий резания представлен на рисунке 8.

Каждый раз, после определения набора траекторий резания, выбирается та из них, которая позволяет обработать наибольшую площадь растения (или совокупности растений). Для этого выполняется вычисление количества задетых инструментом флагов обработки для каждой траектории резания, после чего выбирается траектория, имеющая наибольшее число таких флагов. Отсутствие задетых флагов обработки на всех траекториях резания свидетельствует о том, что обработка всех растений с текущей рабочей точки закончена, и колесному шасси необходимо переместиться в следующую рабочую точку.

После выбора соответствующей траектории резания, для безопасного перемещения режущего инструмента к ней, необходимо сгенерировать траекторию перехода. В рамках данного алгоритма эта задача решается с помощью библиотеки планирования движения OMPL, используемой в задачах мобильной, сервисной и промышленной робототехники [8] и алгоритма RRT-Connect [11].

На заключительном этапе происходит отправка координат траектории перехода и траектории резания в контроллер KRC4 манипулятора с помощью протокола TCP/IP. Отправка данных и резание растений (рис. 9) происходят параллельно, что снижает общую продолжительность обработки зеленых насаждений.

После этого обработанные точки и флаги обработки отсеиваются. Программа выполняется в цикле с момента генерирования траекторий резания и до тех пор, пока в траекториях присутствуют задетые флаги обработки (см. алгоритм на рис. 5).

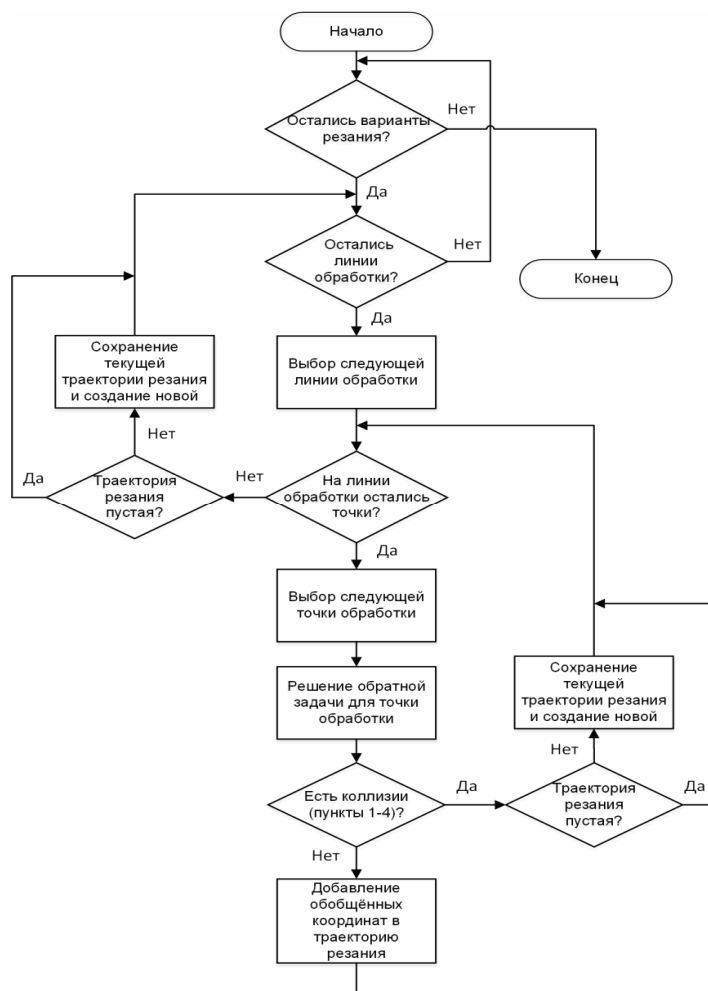


Рис. 8. Алгоритм построения траекторий резания

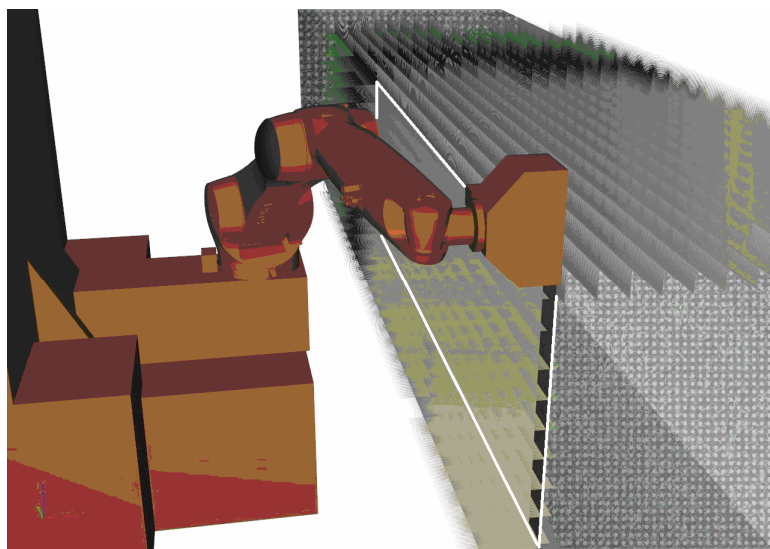


Рис. 9. Иллюстрация обработки растения. Белым прямоугольником выделен участок, обрабатываемый за текущий проход инструмента

Выводы. В статье предложен алгоритм автоматического генерирования траектории движения манипулятора для обработки параметрически задаваемых поверхностей растений сферической, конической и плоской формы режущим инструментом типа «кустореж». При генерировании траектории учитываются зона достижимости манипулятора, изменение его конфигурации и потенциальная возможность столкновений при перемещениях с корпусом МТР, грунтом и пр. Полученные траектории перемещения манипулятора с режущим инструментом ранжируются по степени предпочтительности. В результате для резания выбираются те траектории, которые позволяют захватить наибольшую площадь объектов, подлежащих обработке с одной точки останова МТР. При этом учитывается необходимость исключения обработки поверхностей, уже обработанных ранее. Проверка эффективности алгоритмов, проведенная методами имитационного моделирования [5], показала их работоспособность и эффективность. В настоящее время опытный образец МТР проходит полноценные полевые испытания.

Список литературы

1. Брумштейн Ю. М. Робототехнические системы: вопросы разработки / Ю. М. Брумштейн, М. А. Ильменский, И. В. Колесников // Интеллектуальная собственность. Авторское право и смежные права. – 2016. – № 4. – С. 49–64.
2. Брумштейн Ю. М. Анализ моделей и методов выбора оптимальных совокупностей решений для задач планирования в условиях ресурсных ограничений и рисков / Ю. М. Брумштейн, Д. А. Тарков, И. А. Дюдиков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 3. – С. 169–179.
3. Зенкевич С. Л. Управление роботами / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 91 с.
4. Королев В. А. Робототехнические устройства в растениеводстве / В. А. Королев, С. А. Суляев, С. А. Воронников, А. Н. Лучин // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции : сборник докладов. – Тамбов, 2011. – С. 42–43.
5. Лобейко В. И., Поляков С. В., Старусев А. В. Оценка качества функционирования автоматизированных систем управления на этапе их испытаний / В. И. Лобейко, С. В. Поляков, А. В. Старусев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 2. – С. 53–59.
6. Шахинпур М. Курс робототехники : пер. с англ. / М. Шахинпур. – Москва : Мир, 1990. – 528 с.
7. Библиотека для контроля пересечений 3D-объектов ColDet. – Режим доступа: <http://sourceforge.net/projects/coldet> (дата обращения 27.03.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
8. Библиотека для планирования движения OMPL. – Режим доступа: <http://ompl.kavrakilab.org/> (дата обращения 27.03.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус..
9. Живые изгороди и топиарные формы из хвойных деревьев и кустарников. – Режим доступа: <http://www.hedgegrow.ru/article/page299.php> (дата обращения 27.03.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
10. Коротков В. И. Генерирование траектории движения манипулятора мобильного робота при обработке объектов с параметрически задаваемой формой / В. И. Коротков // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2016. – № 5. – Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/839625.html> (дата обращения 20.05.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
11. Описание алгоритма RRT-Connect. – Режим доступа: <https://personalrobotics.ri.cmu.edu/files/courses/papers/Kuffner00-rrtconnect.pdf> (дата обращения 27.03.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
12. Фреймворк для программирования роботов ROS. – Режим доступа: <http://www.ros.org/> (дата обращения 27.03.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
13. САМ-система для промышленных роботов Robotmaster. – Режим доступа: <http://www.robotmaster.com/> (дата обращения 23.12.2015), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
14. САМ-система для промышленных роботов Sprut CAM Robot. – Режим доступа: <http://www.sprutcam.com/home/sprutcam-robot> (дата обращения 23.12.2015), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
15. САМ-система для промышленных роботов Delcam Power MILL Robot. – Режим доступа: <http://www.delcam.com/software/robotics/> (дата обращения 23.12.2015), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

References

1. Brumshteyn Yu.M., Ilmenskiy M. A., Kolesnikov I. V. Robototekhnicheskiye sistemy: voprosy razrabotki [Robotic systems: issues of development]. *Intellektualnaya sobstvennost. Avtorskoye pravo i smezhnyye prava* [Intellectual property. Copyright and adjacent rights], 2016, issue 4, pp. 49–64.
2. Brumshteyn Yu. M., Tarkov D. A., Dyudikov I. A. Analiz modeley i metodov vybora optimalnykh sovokupnostey resheniy dlya zadach planirovaniya v usloviyakh resursnykh ogranicheniy i riskov [Analysis of models and methods for the selection of optimal sets for the planning of the solutions in terms of resource constraints and risks]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian journal: management and high technologies], 2012, no. 3, pp. 169–179.

3. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. *Upravlenie robotami* [Robotics control], Moscow, Bauman MGTU Publ., 2000. 91 p.
4. Korolev V. A., Sulyaev S. A., Vorotnikov S. A., Luchin A. N. Robototekhnicheskie ustroystva v rastenievodstve. [Robotic devices in crop production]. *Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya resursov pri proizvodstve sel'skokhozyaystvennoy produktsii : sbornik dokladov* [Improving resource efficiency in the production of agricultural products. Proceedings], Tambov, 2011, pp. 42–43.
5. Lobeyko V. I., Polyakov S. V., Starusev A. V. Otsenka kachestva funktsionirovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya na etape ikh ispytaniy [Quality assessment of the functioning of the automated control systems at the stage of testing]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian journal: management and high technologies], 2012, no. 2, pp. 53–59.
6. Shakhinpur M. *Kurs robototekhniki* [Course of robotics], Moscow, Mir Publ., 1990. 528 p.
7. *Biblioteka dlya kontrolya peresecheniy 3D obektov ColDet* [Library to control the intersections of 3D objects ColDet]. Available at: <http://sourceforge.net/projects/coldet> (accessed 27.03.2016).
8. *Biblioteka dlya planirovaniya dvizheniya OMPL* [Library for motion planning OPML]. Available at: <http://ompl.kavrakilab.org/> (accessed 27.03.2016).
9. *Zhivye izgorodi i topiarnye formy iz khvoynykh derevev i kustarnikov* [Hedges and topiary forms from coniferous trees and shrubs]. Available at: <http://www.hedgegrow.ru/article/page299.php> (accessed 27.03.2016).
10. Korotkovs V. I. Generirovanie traektorii dvizheniya manipulyatora mobilnogo robota pri obrabotke obektov s parametricheski zadavaemoy formoy [Generating a trajectory of manipulator of a mobile robot when handling objects with parametrically defined form]. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik. MGTU im. N. E. Baumana* [Youth Science and Technology Bulletin. MSTU. Bauman], 2016, no. 5. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/839625.html> (accessed 20.05.2016).
11. *Opisanie algoritma RRT-Connect* [Description of the algorithm RRT-Connect]. Available at: <https://personalrobotics.ri.cmu.edu/files/courses/papers/Kuffner00-rrtconnect.pdf> (accessed 27.03.2016).
12. *Freyrvork dlya programmirovaniya robotov ROS* [ROS framework for programming robots]. Available at: <http://www.ros.org/> (accessed 27.03.2016).
13. *CAM-sistema dlya promyshlennykh robotov Robotmaster* [CAM-system for industrial robots Robotmaster]. Available at: <http://www.robotmaster.com/> (accessed 23.12.2015).
14. *CAM-sistema dlya promyshlennykh robotov SprutCAM Robot* [CAM-system for industrial robots Sprutcam Robot]. Available at: <http://www.sprutcam.com/home/sprutcam-robot> (accessed 23.12.2015).
15. *CAM-sistema dlya promyshlennykh robotov Delcam Power MILL Robot* [CAM-system for industrial robots Delcam Powermill Robot]. Available at: <http://www.delcam.com/software/robotics/> (accessed 23.12.2015).

УДК 621.865.8

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХОПОРНЫМ КОЛЕСНО-ШАГАЮЩИМ РОБОТОМ¹

Статья поступила в редакцию 14.04.2016, в окончательном варианте 06.06.2016.

Антонов Антон Вадимович, студент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: ant.ant.rk@gmail.com

Воротников Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: vorotn@bmstu.ru

Выборнов Николай Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: do_vybornov@aspu.ru

Описаны кинематическая схема трехопорного (трехногого) колесно-шагающего робота и конструкция макета, построенная в среде SolidWorks. Представлена многоуровневая система управления роботом, построенная по иерархическому принципу. Указаны виды возможных движений робота. Разработан алгоритм ходьбы робота по ровной поверхности, описаны фазы его движения, соответствующие разработанному алгоритму. Создана математическая модель движения робота в среде MATLAB. Проведено моделирование выбранного алгоритма движения и получены результаты, характеризующие изменение обобщенных координат в шарнирах робота; перемещение кон-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №16-07-01080.