

**Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение
«Лицей № 17»**

**Российская Федерация
г. Троицк**

**Алгоритмы обработки информации для автономной навигации и
планирования маршрута движения вспомогательной автономной модели
робота-планетохода на базе микроконтроллера Arduino UNO**

Инженерные науки в техносфере настоящего и будущего
(Прикладная механика и компьютерные технологии в автоматизации и
робототехнике)

Работа выполнена в Муниципальном бюджетном общеобразовательном учреждении «СОШ № 10» при консультации и поддержке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Автор: Захаров Егор
Челябинская область, г. Троицк,
МБОУ «Лицей № 17», класс 9

Научный руководитель:
Дергунов Максим Александрович,
Учитель технологии, информатики и
робототехники

Троицк - 2022 г.

Содержание

Аннотация	3
Введение	
Актуальность работы	6
Цель работы	8
Задачи работы.	9
Методы работы.	9
Практическая значимость результатов работы.	9
Внедрение результатов работы.	10
Достоверность и обоснованность.	10
Структура и объем проектной работы.	10
Основная часть	
История развития планетоходов.	12
Разработка модели робота-планетохода.	13
Плата Arduino Uno.	14
Заключение	
Вывод.	15

АННОТАЦИЯ

В проектной работе изложены основные итоги выполнения прикладных исследований по теме «Алгоритмы обработки информации для автономной навигации и планирования маршрута движения вспомогательной автономной модели робота-планетохода на базе микроконтроллера Arduino UNO». Главное внимание уделено совершенствованию проектно – компоновочных решений ключевых систем планетоходов нового поколения, определяющих площадь и геоморфологические свойства территорий, доступных для проведения научных исследований, а также эффективность поддержки деятельности человека на поверхности небесных тел. Доступность исследуемых поверхностей Луны и Марса в режимах автономно – автоматического и дистанционного управления прямо зависит от свойств систем передвижения и навигации. На повышение функциональных возможностей РТС также оказывает влияние бортовая манипуляционная система. В качестве лучших образцов для сравнительной оценки научно – технического уровня новых технических решений, выбраны действующие американские марсоходы «Opportunity» и «Curiosity», демонстрирующие высокие эксплуатационные характеристики, в частности, по ресурсу работы, качеству и надежности бортовых систем. Однако в части проходимости, свойства марсоходов далеки от оптимальных характеристик. Есть резервы и для существенного повышения подвижности, обобщенным параметром которой является время, затраченное на передислокацию из одного обследованного района в другой.

Повышение подвижности связано не только с проходимостью, оно требует также равноценности прямого хода и реверса по качеству решения навигационных задач.

Требуется непрерывный контроль пройденного пути и коэффициента буксования колес, применение контактных методов определения прочности грунта по трассе движения.

Итогом проекта стала разработка, на основе отечественного научно – технического задела, проектных решений в виде 3D модели РТС «Помощник

космонавта». Система передвижения; навигация; техническое зрение; манипуляционная система, колесно–гусеничный шагающий движитель, активная подвеска, механизм шагания, контейнер, планетоход.

ABSTRACT

The project paper presents the main results of the implementation of applied research on the topic "Information processing algorithms for autonomous navigation and route planning of the auxiliary autonomous model of the robot "planetohod" based on the Arduino IDE microcontroller". The main attention is paid to the improvement of design and layout solutions of key systems of new-generation planetary rovers that determine the area and geomorphological properties of territories available for scientific research, as well as the effectiveness of supporting human activity on the surface of celestial bodies. The availability of the studied surfaces of the Moon and Mars in autonomous – automatic and remote control modes directly depends on the properties of the movement and navigation systems. The on-board manipulation system also influences the increase in the functionality of the RTS.

As the best samples for a comparative assessment of the scientific and technical level of new technical solutions, the existing American rovers "Opportunity" and "Curiosity" were selected, demonstrating high operational characteristics, in particular, in terms of service life, quality and reliability of onboard systems. However, in terms of patency, the properties of the rovers are far from optimal characteristics. There are also reserves for a significant increase in mobility, the generalized parameter of which is the time spent on relocation from one surveyed area to another. Increased mobility is associated not only with cross-country ability, but also requires the equivalence of forward running and reverse in terms of the quality of solving navigation problems.

Continuous monitoring of the traveled path and the coefficient of wheel slip is required, the use of contact methods for determining the strength of the soil along the route of movement. The result of the project was the development, based on the domestic scientific and technical background, of design solutions in the form of a 3D model of the RTS "Cosmonaut's Assistant". Movement system; navigation; technical

vision; manipulation system, wheeled-tracked walking mover, active suspension, walking mechanism, container, planetary rovers.

Ключевые слова: Автоматизация процессов, Arduino, 3D прототипирование и визуализация, графический интерфейс пользователя, Microsoft Visual Studio: IDE and Code Editor for Software.

Keywords: Process automation, Arduino, 3D prototyping and visualization, graphical user interface, Microsoft Visual Studio: IDE and Code Editor for Software

Введение

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время проблема исследования планет с помощью автоматических космических аппаратов и планетоходов становится одним из приоритетных направлений развития научных программ мировых космических держав - России, США, КНР, Евросоюза и др.

К системам навигации и управления движением перспективных планетоходов выдвигаются все более высокие требования по точности автономной навигации и позиционирования планетохода в реальном режиме времени, решению задач оптимального планирования его маршрута с учетом рельефа местности и обхода препятствий.

Метод одновременной локализации и построения карты (SLAM) широко используется для решения задач навигации в подвижных роботах различного вида, в том числе и планетоходах.

Одной из главных задач метода SLAM является обработка больших объемов информационных данных, получаемых от измерительных датчиков. Поэтому исследовательская - проектная работа посвящена решению актуальной задачи обеспечения автономной навигации планетоходов, а в качестве основных направлений исследований выбраны следующие:

1) Разработка и исследование модификаций метода SLAM с использованием различных измерительных данных для решения задачи автономной навигации в реальном режиме времени.

2) Разработка алгоритмов планирования оптимальных и безопасных маршрутов движения вспомогательного планетохода.

Решению задачи навигации для наземных подвижных объектов с помощью метода SLAM посвящено значительное количество статей. Работы A.B. Rad, C. Stachniss, G. Grisetti, M.S. Bahraini, M. Bozorg, T.D. Barfoot, В.И. Ухандеева, Д.А. Барамя, М.С. Дьякова, М.М. Лаврентьева, М.И. Собченко и др. посвящены

разработке алгоритмов фильтрации на основе лазерного метода SLAM. В работах В.А. Erol, С. Forster, С. Lang, С. Pereira, Е Eade, F. Zha, G. Falcao, J.D. Tardos, M. Schworer, R. Mur-Artal, S. Feng, S. Xu, T. Wang, Z. He, Z. Zhang, А.В. Вохминцева, В.Н. Казьмина, Д.А. Барамия, М.С. Дьякова, М.И. Собченко, С.А. Пачганова и др. рассматривалась визуальная навигационная система на основе алгоритма SLAM.

Применение данного метода для решения задач автономной навигации вспомогательного планетохода пока не достаточно хорошо изучено. Данной проблематике посвящены работы следующих авторов: А. Ellery, С.Н. Tong, Е. Dupuis, Н. Ju, М. Pertile, Р. Cui, Р. Deo, Р. Sridhar, R. Giubilato, S. Chiodini, T.D. Barfoot, Y. Ma. Поэтому разработка и исследование метода SLAM для его применения в системах навигации и управления планетоходов является актуальной задачей.

Одна из наиболее важных проблем метода SLAM связана с решением задачи фильтрации. При решении задачи SLAM с помощью традиционных алгоритмов фильтрации существуют проблемы: проблема линеаризации (например, алгоритм расширенного фильтра Калмана (EKF)); проблема вычислительной сложности (например, алгоритмы сигма-точечного фильтр Калмана (UKF) и фильтра частиц (PF)). Анализ литературы показал, что решить указанные выше проблемы возможно с помощью алгоритмов, построенных на основе фильтра Гаусса.

Алгоритм GP-RTSS (Робастный сглаживающий фильтр Гаусса) позволяет получить в аналитическом виде формулу, где не требуются процедуры прогнозирования выборки модели, линеаризации и численного интегрирования.

При решении задачи позиционирования только по данным TV-камеры для визуального SLAM возникают сложности, связанные с вращательным движением подвижного объекта, его повышенной линейной скоростью движения, возможным отсутствием характерных точек сцен и т.д. Анализ литературы показал, что повысить точность и уменьшить объём вычислений возможно с помощью метода комплексной обработки информации визуальной и

инерциальной систем, входящих в состав системы управления планетохода.

Одна из важнейших проблем, требующих решения при планировании маршрута движения планетохода, заключается в том, что его траектория движения в общем случае проходящая в малоизученной обстановке на поверхности планеты обеспечивала его гарантированную безопасность. Поэтому разработка алгоритма планирования маршрута планетохода, который обеспечивал бы поиск короткой и безопасной траектории, является в настоящее время весьма актуальной задачей. На практике, при решении задач навигации планетоходов, нашел применение улучшенный алгоритм. Например, китайский луноход Юйту использует улучшенную модификацию этого алгоритма. Другим примером является американский планетоход, который для поиска маршрута использует улучшенный алгоритм A^* - Field D^* (Планировщик пути на основе интерполяции).

Результаты исследований, посвященных способам планирования маршрута на основе улучшенных алгоритмов модификаций A^* , опубликованы в статьях следующих ученых: A.A. Faulkner, A. Goktogan, A. Lavin, A. Nash, A. Stentz, A. Tompkins, C. Tovey, D. Ferguson, J.J. Biesiadecki, M. Likhachev, M.W. Maimone, M. Sakuta, P.C. Leger, P. Tompkins и др.

Анализ литературы показал, что используя алгоритм планирования траектории движения в любом направлении (ПТЛН), построенный на основе алгоритма, возможно найти более короткие маршруты движения. Поэтому для уменьшения протяженности маршрута, учета реального рельефа местности и повышения скорости вычислений, необходимо разработать и исследовать соответствующие модификации алгоритмов планетохода.

Цели проектной работы заключаются в разработке вспомогательного планетохода:

- способов решения задачи навигации в методе SLAM, которые позволят обеспечить высокую точность автономной навигации планетохода в режиме реального времени;
- алгоритма планирования траектории вспомогательного планетохода,

который позволяет определить короткий и безопасный маршрут его движения в любом направлении.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

- провести сравнительный анализ известных методов и алгоритмов SLAM, и на его основе разработать процедуру решения задачи фильтрации в методе SLAM, для повышения его точности и сокращения времени вычислений, при решении задачи навигации планетохода;

- разработать для метода SLAM, использующего измерительную информацию от лазерного дальномера - лазерный SLAM, алгоритм обработки информации, основанный на фильтре Гаусса, обеспечивающий высокую точность и сокращение времени вычислений при решении задачи навигации в режиме реального времени;

- разработать для метода SLAM, использующего измерительную информацию, получаемую от инерциальной навигационной системы и видеонавигационной системы - алгоритм комплексной обработки информации, обеспечивающий высокую точность решения задачи навигации в режиме реального времени;

- разработать алгоритм планирования безопасного маршрута движения вспомогательного планетохода в любом направлении с учетом рельефа поверхности планеты;

- провести исследование разработанных моделей и алгоритмов средствами математического моделирования и экспериментально.

Методы проектной работы. При решении задач, рассматриваемых в проектной работе, были использованы следующие методы исследований: методы математического анализа, математический аппарат дифференциальных и интегральных исчислений, математический аппарат групп Ли, моделирования Matlab, операционная система для роботов ROS, симулятор для моделирования физического облика роботов Gazebo, язык программирования C++.

Практическая значимость результатов проектной работы заключается в следующем:

- разработанные математические модели и алгоритмы позволяют увеличить скорость вычислений и повысить точность метода SLAM, что чрезвычайно важно при решении задач автономной навигации и выбора маршрута движения вспомогательного планетохода, обладающего ограниченными энергетическими и вычислительными мощностями, в режиме реального времени;

- разработанные математические модели и алгоритмы, учитывающие особенности рельефа планеты через показатель опасности, могут применяться с методом SLAM в задачах навигации и планирования маршрута движения не только для планетохода, но и для различных наземных подвижных объектов.

Внедрение результатов работы. Результаты проектных исследований и разработанное программно-алгоритмическое обеспечение были использованы в конкретном техническом проекте компании «Beijing Zhonghangzhi Technology» (КНР) по системам навигации беспилотных наземных объектов, а также в учебном процессе на кафедре «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность и обоснованность полученных теоретических и практических результатов подтверждаются четкими математическими выводами при построении алгоритмов, результатами математического моделирования и результатами реальных экспериментов, а также сравнением полученных результатов с другими данными в этой области, опубликованными в открытой печати.

Структура и объем проектной работы. Проектная работа состоит из введения, заключения и приложения.

На защиту выносятся следующие положения проектной работы:

1. Алгоритм DIS RTSS, построенный на основе системы распределенных вычислений, и его четыре модификации (DIS RTP, DIS RTGP, DIS RTB, DIS RTrB), повышающие точность обработки информации и значительно уменьшающее объем вычислений.

2. Алгоритм комплексной обработки информации VI-UKF,

получаемой от ИНС и ВНС, использующий процедуру предварительной интеграции ИНС, а также алгоритмы UKF и улучшенный фильтр Калмана с несколькими состояниями (MSCKF-2.0), который повышает точность метода визуального SLAM.

3. Алгоритм планирования траектории движения в любом направлении Lazy AT, который обеспечивает поиск кратчайшего маршрута движения подвижного объекта и уменьшает время вычислений по сравнению с известными аналогичными алгоритмами Basic Theta* и Lazy Theta*.

4. Алгоритм планирования траектории движения в любом направлении Risk Lazy AT, построенный на основе разработанного метода Lazy AT и учитывающий особенности рельефа местности поверхности планеты с помощью специального эвристического показателя опасности.

5. Результаты и методика математического моделирования в среде Matlab и ROS разработанного метода DIS RTGP-Gmapping SLAM, который повышает точность метода лазерного SLAM.

6. Результаты экспериментальных исследований метода визуального SLAM, на основе разработанного алгоритма VI-UKF, доказывающие применимость предложенных математических моделей и алгоритмических решений.

Основная часть

История развития планетоходов

Только начав изучение и освоение околоземного пространства, люди уже стремились достигнуть других планет и ближайшего к нам космического тела – Луны. Впервые поверхности Луны достигла советская автоматическая межпланетная станция (АМС) «Луна-2» 13 сентября 1959 года, в том же году АМС «Луна-3» сфотографировала её обратную сторону [1, 2]. Для подготовки к пилотируемому полёту НАСА выполнило несколько программ с АМС: «Рейнджер» (1961—1965, фотографирование поверхности), «Сервейер» (1966-1968, мягкая посадка и съёмки местности) и «Лунар орбитер» (1966-1967, детальное изображение поверхности Луны). Ставшая успешной американская программа пилотируемых полётов на Луну называлась «Аполлон». Первая в мире высадка на Луну произошла 20 июля 1969 года на корабле Аполлон-11 [1, 3].

Луна стала удачным местом для таких экспериментов, после чего стало ясно, что на тот момент для человека долгосрочные пилотируемые экспедиции на другие планеты или спутники затруднительны или невозможны, в первую очередь из-за медицинских показаний [1, 3]. В тоже время стационарным станциям для исследования была доступна очень ограниченная территория, что значительно сокращало их возможности. Поэтому чтобы исследования проходили более эффективно было решено создавать подвижные станции, т.е. роботы-планетоходы (РП) [1-5].

Первым РП стал советский «Луноход-1» (Рис. 1а), который был доставлен на поверхность Луны АМС «Луна-17» 17 ноября 1970 года [1, 3, 5]. Он предназначался для изучения особенностей лунной поверхности, радиоактивного и рентгеновского космического излучения на Луне, химического состава и свойств грунта. Позже туда были доставлены РП:2

«Луноход-2» (СССР, 1973 г.) и «Юйту» (КНР, 2013) (Рис. 1б). Поверхность Марса также активно исследовалась и исследуется с помощью

АМС [3-5]: «Фобос-2» (СССР, 1988), «Феникс» (США, 2008), «Марс-Экспресс» (ЕКА, 2003-н.в.), «Мангальян» (Индия, 2014) и РП (Рис. 2): «Соджорнер» (США, 1997), «Спирит» (США, 2004-2010), «Опортьюнити» (2004-н.в.), «Кьюриосити» (США, 2012-н.в.).

Одной из основных задач, связанных с проектированием и созданием РП, является разработка его системы управления (СУ). Для каждого нового РП СУ является в значительной части уникальной [5], поэтому для её успешной разработки необходимо иметь средства её отработки, т.е. модель РП. А так как даже в настоящее время осуществление долгосрочной пилотируемой космической экспедиции является крайне сложной задачей, то разработка и создание новых РП является весьма актуальной задачей.

На данный момент существуют различные способы связи с РП [1, 5], находящимися на других планетах или спутниках, т.е. связь РП с центром управления на Земле осуществляется через стационарную базу, или связь осуществляется напрямую. Например, у «Соджорнер» была марсианская станция «Марс Пасфайндер» (Рис. 3), а, например, для «Кьюриосити» такой станции не требуется. Каждый способ обладает как положительными свойствами, так и негативными. Первый (с базой) позволяет создать упрощенные РП, так как задачи программы распределяются между станцией и РП, например связь с Землёй. Второй (без базы) предполагает, что реализация всей миссии будет за счет использования исключительно РП, с соответствующими системами, это увеличивает шанс невыполнения миссии, так как в случае отказа системы, РП может выйти строя, но с другой стороны, так как он не связан с базой, то он может свободно передвигаться в любом направлении и на любое расстояние. __

Разработка системы управления

Перед созданием такой модели, надо было решить, что лучше: создать модель, собранную из отдельных свободно доступных компонентов, или использовать уже созданные модели (платформы), например, Lego [7], колёсные платформы под Arduino [8] (ROBOT-4-WHEEL-KIT, Shield Bot, Sparki), мобильные роботы POLOLU [9] (3PI ROBOT) и т.д. Изучив готовые модели РП и сопоставив их с «Соджорнер», стало ясно, что, к сожалению, готовые модели не подходят к данной работе по ряду причин: по размеру, для удобства модель РП должна быть крупнее, чем готовые модели; большинство из них 2-х и 4-х колесные, а «Соджорнер» 6-ти колесной; они не подходят для отработки различных систем управления, так как они сковывают свободу действий при создании СУ. Взяв это во внимание, было решено, что рациональнее создать модель РП, собранную из свободно доступных компонентов, в основе которой будет микропроцессорный контролер Arduino.

Разработка модели робота-планетохода

Сначала дадим общее описание модели РП, а потом рассмотрим каждый из элементов подробнее. Корпусом для модели РП служит пластмассовый короб, на котором все и крепится. На нём есть источники питания для двигателей и микропроцессорного контролера Arduino Uno, макетная плата, так как в данной работе шасси отсутствует, хотя для разрабатываемой модели возможно реализовать разные типы подвески, то двигатели крепко прикреплены к корпусу, здесь к каждому колесу подключены по двигателю, т.е. реализованы мотор-колёса, как и на прототипе. Так как у «Соджорнер» была базовая станция, то модели в этой роли выступит ПК. Для дистанционной связи между РП и ПК используется Bluetooth, который установлен и на модели, и на ПК. Также на модели установлены акселерометр, датчик угловых скоростей и гироскоп, которые находятся на одной микросхеме MPU6050. Это весьма расширяет возможности при создании системы управления, так как РП может определять своё положение в пространстве. Для поворота используется метод бортового разворота или "танковый поворот".

Arduino Uno

Контроллер Arduino Uno построен на ATmega328. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB, либо подать питание при помощи адаптера AC/DC или батареи. Arduino UNO представляет из себя отладочный комплекс, выполненный на базе микроконтроллера ATmega328. Проще говоря – это обычная плата, которая является «посредником» между пользователем и микроконтроллером, позволяя удобно цепляться к его ножкам и загружать в него прошивку прямо из среды программирования. Помимо всего прочего, плата наделена некоторыми дополнительными функциями. Arduino UNO была разработана итальянскими инженерами как одна из основных плат, имеющих открытую архитектуру. По мере увеличения популярности, у платы появилось множество «клонов», полностью совместимых по программной и аппаратной части. На рисунке №1 показан внешний вид платы Arduino UNO. Плата Arduino Uno является оптимальным вариантом как для начинающего, так и для опытного разработчика. Имея скромные размеры 7см на 5,5см, пользователь получает довольно широкий функционал, который может удовлетворить требования большинства проектов. Также огромным плюсом является бесчисленное множество библиотек с примерами, документации и обучающих материалов, что позволит в кратчайшие сроки реализовать задуманное на практике.

Заключение

Вывод

Таким образом, мы усовершенствовали ключевые системы планетоходов нового поколения, определяющих площадь и геоморфологические свойства территорий, они стали доступны для проведения научных исследований, а также для эффективной поддержки деятельности человека на поверхности небесных тел.