

УДК 004.896

ROS-МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БПЛА И НАЗЕМНОГО БЕСПИЛОТНОГО РОБОТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА В СТАТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

А.Р. Габдуллин^a (*a.gabdullin@innopolis.ru*)А.К. Буйвал^a (*alexbuyval@gmail.com*)Р.О. Лавренов^{ab} (*r.lavrenov@innopolis.ru*)Е.А. Магид^b (*dr.e.magid@ieee.org*)^a Университет Иннополис, г. Иннополис^b Казанский Федеральный Университет, г. Казань

Аннотация. Для эффективной навигации беспилотного наземного робота (БНР) необходимо иметь полноценную карту местности, которая во многих случаях недоступна и по разным причинам не может быть построена самим БНР. Задача картографирования может быть облегчена путем привлечения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), действующих совместно с БНР. В статье описываются особенности программного решения для кооперации БНА с несколькими БПЛА для задачи совместного построения трехмерных карт, получаемых с воздуха, и дальнейшее построение маршрута БНР с использованием полученной карты. Программная реализация алгоритмов осуществлена в среде ROS с использованием симулятора Gazebo.¹

Ключевые слова: SLAM, планирование пути, автономный робот, беспилотный наземный робот (БНР), ROS, Gazebo, octomap, диаграмма Вороного

Введение

Задача координации действий группы автономных роботов признается одной из ключевых при построении мультиагентных систем, и один из частных примеров - задача совместного картографирования.

Построение карты является необходимым первоначальным этапом перед планированием маршрута беспилотного наземного робота (БНР), так как именно карта представляет собой необходимое входное условие

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-57-06010).

для работы алгоритмов планирования пути. Однако, в реальных условиях, картографирование с БНР не всегда возможно в силу ограниченной его проходимости. С другой стороны, использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет преодолеть это ограничение. Таким образом, группа из нескольких БПЛА и БНР может решать задачи построения маршрута на пересеченной местности, в том числе и в динамически изменяемых условиях.

В данной статье описывается способ передачи и объединение данных об окружающей среде с нескольких БПЛА напрямую для использования наземным аппаратом, а также предлагается практическое решение для планирования пути в статических условиях.

В рамках решения текущей задачи группового взаимодействия нами используется программная модель БНР «Husky» компании Clearpath (Рис.1а) и БПЛА мультироторного типа из библиотеки «hector_quadrotor» (Рис.1б) для фреймворка ROS (Robot Operating System).



Рис. 1а. Мобильный робот Clearpath Husky

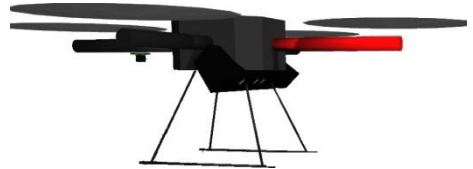


Рис. 1б. Модель квадрокоптера в Gazebo

1 Планирование маршрута в статической среде: Глобальные методы планирования

Методы планирования пути для БНР могут быть условно разделены на два типа: глобальный и локальный. Глобальный путь указывает БНР маршрут без учёта механических особенностей БНР, свойств поверхности движения и внезапных динамических изменений окружающей среды.

Среди глобальных методов планирования [Latombe, 2012] широко известны такие как:

- граф видимости [Latombe, 2012]
- диаграмма Вороного [Choset и др., 1997]
- метод потенциального поля [Magid и др., 2006]
- алгоритмы RRT, методы быстрорастущих случайных деревьев (англ. rapidly exploring random trees) [Melchior и Simmons, 2007]
- клеточное разбиение (англ. cell decomposition) [Lingelbach, 2004]

Для наших исследований основным методом планирования был выбран метод динамической диаграммы Вороного [Lau и др., 2010] ввиду его достаточной безопасности с точки зрения возможности столкновения с препятствиями и относительно невысокой вычислительной сложности.

2 Планирование маршрута в статической среде: Локальные методы планирования

Задача локального планирования [Choset, 2005] заключается в поиске пути с учётом возникающих динамических препятствий, погрешностей одометрии и информации о локально-окружающей среде. Примером алгоритма локальной навигации является семейство алгоритмов класса Bug [Magid и др., 2004]. Однако, эти алгоритмы полностью абстрагируются от физических свойств реального робота и используют исключительно локальные данные с карты, и соответственно, являются сильно теоретизированными и не оптимальными в условиях наличия даже частичной карты местности. Поэтому в качестве метода локальной планировки маршрута нами используется метод динамического окна (Dynamic Window Approach) [Fox, 1997]; основное его преимущество заключается в учете динамики робота, что даёт возможность совершать безопасные манёвры, не сталкиваясь с препятствиями.

3 Карты

Применяемые нами алгоритмы построения маршрута используют в качестве входной информации так называемые решётки занятости (англ. occupancy grid) [Elfes, 1989]. Их можно представить в виде матрицы целых чисел, представляющих собой степень проходимости ячейки пространства (0 – ячейка абсолютно непроходима, 255 – полностью проходима); таким образом, карта может быть представлена в виде растрового изображения в оттенках серого.

Однако, решётки занятости являются двумерными структурами, а сенсоры БПЛА возвращают трехмерное облако точек. Задача навигации в трехмерном пространстве существенно сложнее в решении, а также хранение и обработка облаков точек требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому, было решено совместить трехмерные

и двумерные подходы. В частности, чтобы сократить объем потребляемой облаком точек памяти, применялся подход октокарт [Норnung и др., 2013], основанный на использовании октодеревьев. Каждый узел дерева описывает степень проходимости воксела (дискретного элемента объема пространства). Узел, в свою очередь, может быть подразбит на восемь равных вокселов и т.д. (Рис.2а). Такая структура требует хранения лишь степени занятости воксела, но не его координат. Координаты могут быть вычислены динамически зная положение воксела в дереве. Также, в таком подходе, возможен выбор степени детализации октокарты. Для этого необходимо лишь ограничить глубину спуска по дереву. Это позволяет снизить вычислительную нагрузку на менее ответственных или однородных участках маршрута. Пример октокарты изображен на Рис.2б.

Проецируя вокселы на плоскость движения БНР, можно построить решетку занятости. Тем самым появляется возможность применения двумерного планирования маршрута. В нашем случае, каждый элемент решетки заполняется абсолютной максимальной высотой воксела в текущей точке пространства (т.е. максимальным значением по оси Z воксела со степенью занятости более 0 при текущих координатах (x,y)).

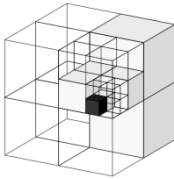


Рис. 2а. Восьмеричное разбиение, используемое в октокартах [Норnung и др., 2013]

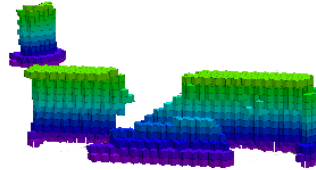


Рис. 2б. Два препятствия БНР в трехмерном пространстве, изображены вокселями.

4 Поставленные задачи и настройки системы

Основная задача, которая ставилась в данном исследовании, – моделирование совместного исследования пространства и построения карты при помощи БПЛА с дальнейшим построением маршрута для БНР. В качестве БНР использовался робот Husky от компании Clearpath. Выбор данной модели был обусловлен хорошей документированностью программных средств, а также простотой модели управления.

Программной средой выбран фреймворк ROS Indigo. ROS являет собой набор программных модулей и интерфейсов, но не дает возможности симулировать физические явления. Такой возможностью

обладает симулятор Gazebo 2.2, который использовался нами в связке с ROS.

Список основных пакетов ROS, использованных для моделирования и симуляции:

- **husky_simulator** – симулятор наземного робота Husky
- **husky_navigation** – стек навигации наземного робота (глобальное и локальное планирование маршрута)
- **hector_quadrotor** – симулятор квадрокоптера с установленным на него RGBD-сенсором (Kinect)
- **gmapper** – картографирование мобильным роботом
- **octomap** – трёхмерное картографирование и проецирование двумерной карты
- **map_server** – хранение, сохранение и загрузка двумерных карт в виде решёток занятости
- **tf** – работа с трансформациями между различными системами координат
- **voronoi_planner** – глобальный планировщик пути по диаграмме Вороного
- **rviz** – средство визуализации

Пакет *octomap*, как следует из названия, отвечает за построение, обработку и хранение октокарт. Выбор пакета обусловлен эффективностью структуры хранения данных по потреблению памяти, возможностью изменять динамически уровень детализации карты. Данное преимущество является важным, т.к. объем полученных с сенсоров летальных аппаратов данных велик и, соответственно, хранение и обработка их в виде облака точек ресурсоемко. Также, пакет *octomap* строит решетки занятости по октокартам, что требуется для планирования маршрута. Для верного построения октокарты необходим программный узел объединения облаков точек, полученных с сенсоров Kinect с различных квадрокоптеров. Это возможно лишь при условии наличия верных трансформаций между системами координат Kinect и картой БНР соответственно.

5 Моделирование «Husky» и квадрокоптера в ROS

Для моделирования квадрокоптеров использовался программный модуль (т. н. пакет библиотеки) фреймворка ROS *hector_quadrotor*. В качестве основного сенсора картографирования было принято решение использовать цвето-глубиномер (RGBD-сенсор) Kinect. Этот выбор был обусловлен планами по дальнейшему развитию проекта и доступным оборудованием. Также возможно использование стереокамер. Как БПЛА, так и БНР, используют Unified Robot Description Format (URDF) для

описания физических и механических свойств модели. Однако, в комплекте поставки пакета *hector_quadrotor* сенсор Kinect установлен в плоскости, параллельной плоскости вращения несущих винтов, то есть с нулевым тангажным углом. Учитывая то, что крен БПЛА во время следования маршруту невелик, сенсор захватывает поверхность местности недостаточно. Для решения данной проблемы, при моделировании Kinect был повернут нами на 45 градусов вниз (Рис.1б). Пример совместного расположения группы роботов, состоящей из одного БНР и двух БПЛА-квадрокоптеров, в смоделированном мире с простыми препятствиями показан на Рис.3.

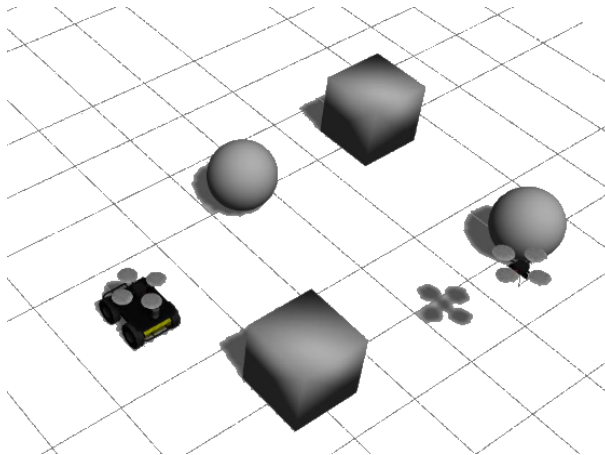


Рис. 3. Симуляция совместной работы БНР и 2-х БПЛА в Gazebo 2.2

6 Совместная работа «Husky» и квадрокоптеров в ROS

Немаловажным моментом в движении группы роботов является задача координации взаимного местоположения роботов. В целях избегания столкновений, все БПЛА были расположены на заведомо безопасном удалении друг от друга, позволяющим перекрывать области видимости сенсоров Kinect друг друга. Для следования была выбрана траектория, подобная меандру, также известная как зигзаг-бустрофедон [Galceran и Saggeras, 2013]. Аналогичные траектории используются, например, при подводной съемке [Багницкий и др, 2010]. Пример октокарты, построенной таким образом, изображен на Рис.4а, ее проекция представлена на Рис.4б.

Ключевым фактором успешного построения октокарты является точная локализация каждого робота и передача правильной матрицы

трансформации в общее дерево трансформаций (пакет *tf*). На текущем этапе локализация БПЛА использовала информацию симулятора Gazebo об истинном положении аппарата (так называемая *ground truth* локализация). Этот подход в дальнейшем будет заменён на локализацию по сенсорам БПЛА.

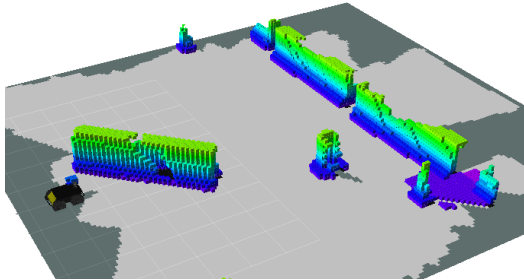


Рис. 4а. Октокарта, построенная двумя БПЛА, следующими по меандру вперед от места стоянки БНР (БНР расположен на левом крае карты, по центру)

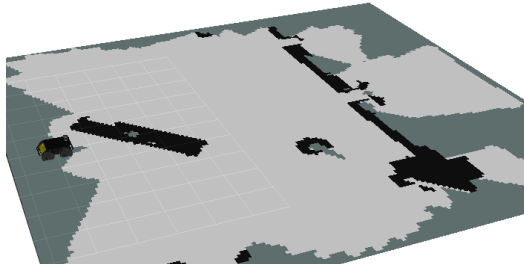


Рис. 4б. Двумерная проекция карты с Рис.4а (решётка занятости)

Для решения задачи планирования маршрута использовался алгоритм динамической диаграммы Вороного [Lau и др., 2013]. Он позволяет использовать дискретное пространство (решетку занятости), и при этом минимизирует количество ячеек, требующих обновления, в случае возникновения динамических препятствий. На Рис.5 показана построенная диаграмма при максимальном разрешении воксела в 1 кубический дециметр.

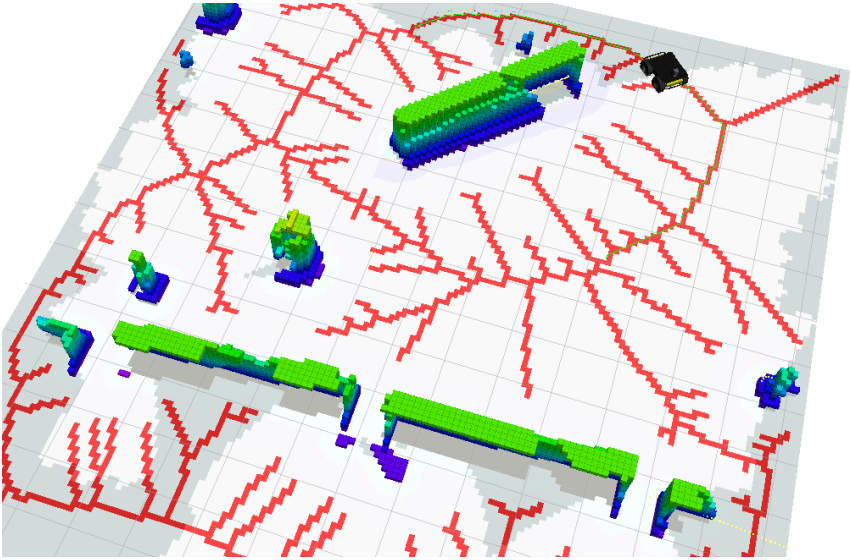


Рис. 5. Робот Husky (правый верхний угол) на карте, построенной двумя БПЛА

Разрешение карты важно для планировщика маршрута *voronoi_planner*, так как при высоком разрешении существенно увеличивается время, необходимое на расчет диаграммы Вороного и построение маршрута движения уже с использованием ребер и узлов диаграммы. Однако, при разрешении карты в 1 куб. дециметр, планировщик справляется со своей задачей за время менее 1 секунды для площадей порядка сотен квадратных метров. Пример глобального маршрута движения БНР показан на Рис.6 черной линией.

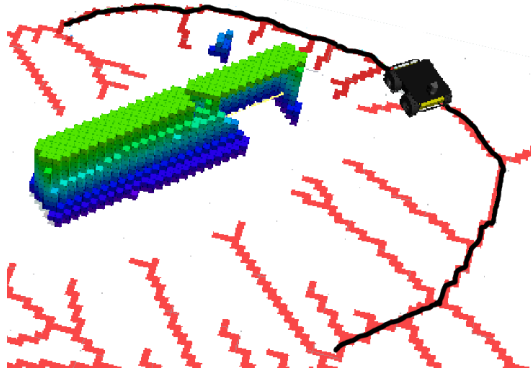


Рис. 6. БНР следует по глобальному маршруту (показан черным цветом), построенному по диаграмме Вороного (увеличенный масштаб карты с Рис.5)

6 План дальнейшей работы

На следующем шаге наших исследований предполагается внедрить более реалистичную модель БПЛА, использующую методы локализации, основывающиеся на данных с датчиков оптического потока, и применение алгоритмов визуальной одометрии. Также, мы планируем модифицировать программный комплекс для возможности работы в распределенной компьютерной системе, так как подобное ROS-моделирование требует значительных вычислительных ресурсов.

Заключение

В статье описывается программное решение для кооперации БНР с несколькими БПЛА для построения карт и поиска маршрута движения БНР с использованием полученной карты. Программная реализация алгоритмов осуществлена в среде ROS с использованием симулятора Gazebo. Нами был создан симулятор, позволяющий моделировать различные условия местности и осуществлять её картографирование с воздуха при помощи группы БПЛА. Поиск маршрута движения для БНР осуществлен на полученной карте при помощи диаграммы Вороного. Симулятор также позволяет тестировать различные алгоритмы планирования маршрута в статической среде. В дальнейшем, помимо усовершенствования модели БПЛА и использования распределенной компьютерной системы, нами планируется расширить алгоритмы картографирования и поиска маршрута для возможности их использования в динамической среде.

Список литературы

- [**Buniyamin, 2011**] Buniyamin N. et al. A simple local path planning algorithm for autonomous mobile robots //International journal of systems applications, Engineering & development. – 2011. – Т. 5. – №. 2. – С. 151-159.
- [**Choset и др., 1997**] Choset H. and Burdick J. Sensor Based Motion Planning: The Hierarchical Generalized Voronoi Graph // Advanced Robotics, 1997.
- [**Choset, 2005**] Choset H. M. Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation. – MIT press, 2005.
- [**Elfes, 1989**] Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation //Computer. – 1989. – Т. 22. – №. 6. – С. 46-57.
- [**Fox, 1997**] Fox D., Burgard W., Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance //IEEE Robotics & Automation Magazine. – 1997. – Т. 4. – №. 1. – С. 23-33.
- [**Gonzalez и др., 2015**] Gonzalez R., Mahulea C. and Kloetzer M. A Matlab-based Interactive Simulator for Teaching Mobile Robotics // IEEE CASE'2015: Int. Conf. on Autom. Science and Engineering, 2015.
- [**Galceran и Carreras, 2013**] Galceran, E., and Carreras, M. A survey on coverage path planning for robotics // Robotics and Autonomous Systems 61, no. 12, C.1258-1276, 2013.
- [**Hornung и др., 2013**] Armin Hornung, Kai M. Wurm, Maren Bennewitz, Cyrill Stachniss and Wolfram Burgard, OctoMap: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees //Autonomous Robots, 2013.
- [**Latombe, 2012**] Latombe J. C. Robot motion planning. – Springer Science & Business Media, 2012. – Т. 124.
- [**Lau и др., 2010**] Lau B., Sprunk C. and Burgard W. Improved Updating of Euclidean Distance Maps and Voronoi Diagrams // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010.
- [**Lau и др., 2013**] Lau B., Sprunk C. and Burgard W. Efficient Grid-Based Spatial Representations for Robot Navigation in Dynamic Environment // Robotics and Autonomous Systems, 2013.
- [**Lingelbach, 2004**] Lingelbach, F. Path planning using probabilistic cell decomposition // IEEE ICRA, Vol. 1, С. 467-472, 2004.
- [**Magid и др., 2004**] Magid E., and Rivlin E. CautiousBug: a competitive algorithm for sensory-based robot navigation // IEEE IROS, 2004.
- [**Magid и др., 2006**] Magid E., Keren D., Rivlin E. and Yavneh I. Spline-Based Robot Navigation // IEEE IROS, 2006.
- [**Melchior и Simmons, 2007**] Melchior, Nik A., and Reid Simmons. Particle RRT for path planning with uncertainty // IEEE Robotics and Automation, С. 1617-1624, 2007.
- [**Багницкий и др, 2010**] Багницкий А. В., Инзарцев А. В. Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий //Подводные исследования и робототехника. – 2010. – №. 2. – С. 10.