

Исследование алгоритма согласования глобальных и локальных траекторий движения робота на разномасштабных картах

Д. Е. Моторин¹, С. Г. Попов², М. А. Курочкин³, А. С. Тучков⁴

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

¹d.e.motorin@gmail.com, ²popovserge@spbstu.ru, ³kurochkinm@spbstu.ru, ⁴tucha.te@gmail.com

Аннотация. В статье исследуется алгоритм согласования глобальных и локальных траекторий движения роботов на разномасштабных картах. Целью работы является оптимизация поиска пути на реалистичной карте на основе данных обзораемой среды и карты среднего масштаба. Карты представляют собой многослойное пространство, отражающее ландшафт, тени и уровень воды. Алгоритм позволяет планировать траекторию на карте среднего масштаба и искать траекторию движения на карте, построенной на основе обзораемой среды с учетом глобального плана. Критерием корректировки путей является достижение граничной точки видимости или дальней видимой глобальной точки. В ходе симуляции использовались радиусы видимости не менее одной клетки карты низкого разрешения. Получены графики зависимости количества вызова функций пересчета локальных путей, длины путей и планов движения от масштаба среднемасштабной карты и радиуса обзора робота. Разработанный метод может быть применен при движении роботов в пространстве с неполной информацией о среде.

Ключевые слова: планирование траектории; реалистичная среда; робот; пространственно-ситуационная неопределенность; фрактальные пространства; среднемасштабная карта; многослойные карты

I. ВВЕДЕНИЕ

Задача поиска траекторий в среде с неполной информацией как правило сводится к случаям с неизвестными областями на карте известного масштаба. Многие задачи могут быть описаны с точки зрения ограниченной информации в случае известной картины в общем. Например, при наличии на борту робота карты представленной снимком со спутника, можно построить траекторию движения в среднем масштабе. Такая траектория не позволяет совершать непосредственное управление роботом, для построения точной траектории понадобится анализ информации об окружающей среде в масштабе робота, что обеспечивается его сенсорами.

В данной статье авторы рассматривают алгоритм согласования глобального плана, построенного на основе предварительных данных со спутникового снимка, и локальной траектории построенной на основе, обзораемой роботом среды. Реалистичная среда

Исследование выполнено при поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ \#2.9198.2017/8.9.

движения робота моделируется посредством фрактального алгоритма построения поверхностей для ландшафта, а также базовыми алгоритмами ограничения областей теней и уровня воды.

Построение траекторий движения робота на картах, размеченных регулярной сеткой является хорошо изученной задачей, для которой используется алгоритм A* и его модификации. В [1] алгоритм применяется для решения задачи движения летательного аппарата в трехмерном пространстве при оптимизации поиска траектории в зависимости от критерия выбора плоскости движения робота. При этом объемная задача сводится к плоской.

Задача движения робота в реалистичной трехмерной среде представленная в [2] рассматривает весь объем пространства. Траектории строятся и оптимизируются алгоритмом D* с учетом преодоления препятствий и перепада высот в текущей и конечной точках либо избегания препятствий при большой стоимости его пересечения.

Навигация роботов в сложном, частично неопределенном пространстве, рассмотрена в [3]. В статье сравниваются и согласовываются методы оценки рисков во время движения группы роботов в сложной среде. В качестве среды рассматривается химическая лаборатория, а в качестве целевой задачи - транспортировка реагентов.

Системы управления в полевых условиях требуют автономности при распознавании и анализе окружающей среды. Алгоритм распознавания и построения пространства на основе лидаров, рассматриваемый в [4] метод позволяет работать на местности с плохим или динамически изменяющимся освещением. Подход реализует конвертацию объемных точек в плоское изображение и согласование изменений среды.

Метод локализации и построения карты имеет множество подходов к реализации, например, в [5] описан алгоритм, позволяющий выполнять эту задачу при использовании одного датчика. Это позволяет сократить требования к аппаратной части и снизить нагрузку на программную.

При программной симуляции движения роботов требуется максимально приблизиться к представлению

реальной среды. Описание окружающего пространства с максимальным правдоподобием можно добиться использованием алгоритмов локального самоподобия. Например, в [6] разработан метод построения рельефа морского дна оптимизированный по объему вычислений.

Моделирование реалистичных процессов с использованием фракталов представлено в [7], где производится синтез поверхностей контролируемого дистанционного зондирования. В частности, использовалась функция Вейерштрасса-Мандельброта для синтеза процессов броуновского движения.

Анализ методов построения фрактальных поверхностей предложенный в [8] рассматривает метод смещения средней точки и метод Вейерштрасса-Мандельброта. Сравнение производилось на одно- и двухмерных функциях.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ГЛОБАЛЬНОГО И ЛОКАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

В задаче рассматриваются две карты, первая – локальная E^L , имеющая высокую точность отражения среды движения и условно описывающую реальную окружающую среду, вторая – глобальная E^G , представляющая среду как снимок местности низкого разрешения, предоставляемого роботу на старте выполнения миссии. Карты представляют собой набор из m слоев, отражающих отдельное свойство пространства, например, высоту над уровнем моря, положение тени, наличие воды. Каждый узел сетки принимает значение из диапазона слоя от максимального до минимального значения, определяемого физическими свойствами явления.

Карты E^L и E^G определяются множествами

$$E = \{E_1, \dots, E_m\},$$

где E_j – множество, каждый элемент e_{xyj} , которого отражает выбранное свойство пространства.

Локальная карта E^L размера axb представляет реалистичную среду и соответствует глобальной карте E^G размера $(a/k) \times (b/k)$, где k – коэффициент точности соответствия среды и образа у робота, то есть отношение масштабов карт E^L к E^G .

Размер робота принимаем равным размеру клетки локальной карты, а переход из текущей точки в соседнюю длится единицу времени моделирования.

Робот R находится в начальной точке A_R и движется в целевую точку Z_R , используя информацию из среды в радиусе S^R . В ходе движения строится точная карта робота E^S на основе полученных из E^L данных. Требуется построить траекторию движения робота на реальной карте:

$$T = \{A_R, \dots, t_i, \dots, Z_R\} \rightarrow \min, t_i \in E^L.$$

Такая траектория должна быть построена с использованием глобальной карты E^G и информации о локально карте получаемой роботом во время движения в радиусе видимости.

Глобальный план движения:

$$T^G = \{A_R^G, \dots, t_R^G, \dots, Z_R^G\}, T^G \in E^G,$$

используется при построении локальной траектории:

$$T_{(i)-(i+1)}^L = \{t_R^{G-L}, \dots, t_R^L, \dots, t_R^{G-L+1}\}, T^L \in E^L,$$

где t_R^G и t_R^L положение робота на глобальной и локальной карте соответственно, с учетом преобразования координат при различном масштабе карты.

Особенностью алгоритма является момент пересчета глобального плана и локальной траектории, выраженные в правилах:

- глобальный план корректируется при отсутствии локального пути для достижения плановой точки;
- локальный путь корректируется если достигли промежуточной точки планового движения или области границы известной карты.

При поиске путей на каждом этапе производится минимизация затрачиваемой на выполнение задачи движения энергии.

III. АЛГОРИТМ ПОИСКА ТРАЕКТОРИЙ И ПЛАНОВ

Разработан алгоритм поиска траекторий движения на основе глобального плана с использованием разномасштабных карт E^L и E^G .

Алгоритм Поиск траектории на глобальной и локальной карте

```

while  $R_{xy} \neq Z_R$ 
  if существует  $\text{plan}(E^G)$ 
    if существует  $\text{path}(E^L)$ 
      if  $T^L(R_{xy+1})$  принадлежит  $E^S$ 
        сместиться на следующую позицию
      else
        обнуление плана и пути
      end
    else
      корректировка пути
      получение информации о среде
      поиск дальней видимой точки плана
      построение траектории до найденной точки плана
    end
  else
    корректировка плана
    поиск плана движения на среднемасштабной карте
  end
end

```

Авторами предложен эвристический алгоритм принятия решений о построении траектории на основе среднемасштабных карт и возможностей обзора среды бортовыми средствами робота. В этом случае алгоритм непосредственного поиска траекторий на карте может быть выбран и реализован исходя из технических и энергетически возможностей вычислительной системы.

Алгоритм выраженный в форме псевдокода демонстрирует главную функцию, согласования поиска путей на локальной и планов на глобальной карте.

Для построения планового пути T^G робот определяет свое положение на карте E^G и строит траекторию до целевой точки Z_R , при невозможности построения пути, лучшим считается тот у которого минимальное количество запрещенных для проезда зон.

Далее проверяется наличие пути движения на локальной карте. В случае его отсутствия, определяется самая дальняя видимая, входящая в радиус обзора, точка плана T^{SR} . Точка T^{SR} является промежуточной целью робота, которую можно достичь на карте E^S . Далее строится локальная траектория T^L , причем построения путь можно строить через неизвестные области карты, но не через запрещенные.

При наличии пути проверяем траекторию движения на принадлежность следующей точки пути, карте E^S . В противном случае обнуляем существующий план и путь. Это делается для корректировки в случае отклонения робота от текущего плана или пути.

Алгоритм работает до тех пор, пока робот не достигнет целевой точки движения. Алгоритм сохраняет работоспособность и в случае если возникает необходимость менять целевые точки в ходе движения.

IV. МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА

Для тестирования алгоритма используется модель в системе MatLab, позволяющая симулировать движения робота на многослойных картах. Карта моделирования представлена на рис. 1.

В качестве примера среды моделирования используется квадратная карта местности 7.5×7.5 километров с центром в координатах $61^\circ 38' 50''N$, $27^\circ 28' 52''E$.

При цифровом представлении использовался алгоритм фрактальной генерации поверхности с использованием бинарной карты разрешенных/запрещенных зон. При этом генерируется слой высот (рис. 1.а) существующий в каждой точке карты в том числе под водой, слой теней (рис. 1.б) получаемый из расположения источника света и геометрии слоя высот, слой запрещенных зон (рис. 1.в), получаемый пересечением, уровня воды и ландшафта. Результирующее пространство, представленное на рис. 1.г отражает симуляцию реалистичной среды движения робота.

Ландшафтный слой сформирован с использованием алгоритма смещения средней точки [9] модифицированным для формирования фрактальных карт на основе бинарной карты реальной среды.

Для получения результатов моделирования использовались значения коэффициентов точности среднemasштабной карты и радиусы видимости робота:

$$k = [2; 4; 8; 16; 32; 64; 128; 256];$$

$$S^R = [4; 8; 16; 32; 64; 128; 256; 512; 1024].$$

Карта представлена регулярной сеткой размера 2049×2049 клеток.

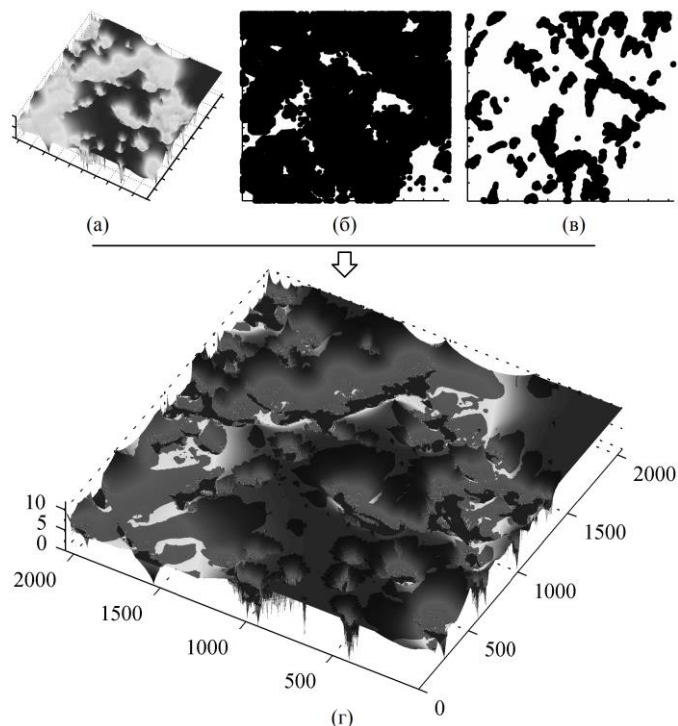


Рис. 1. Представление среды движения робота

Симуляция производилась для случаев радиуса обзора робота большего или равного размеру клетки среднemasштабной карты E^G .

V. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 представлен график числа вызовов функции поиска траекторий путей в зависимости от точности карты k и радиуса видимости робота S^R .

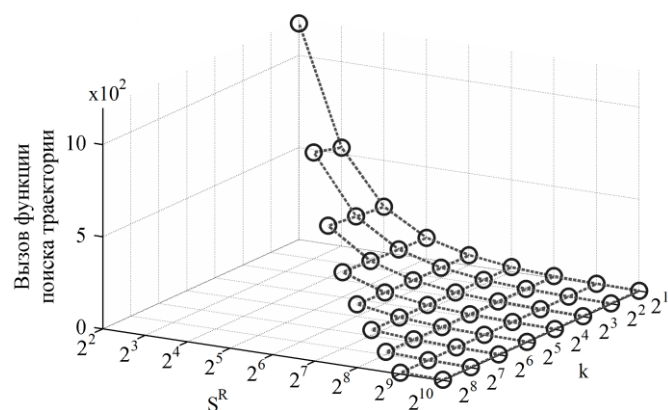


Рис. 2. Зависимость числа пересчетов локальных траекторий от точности карты и радиуса видимости

Количество вызовов функций корректировки траектории движения имеет полиномиальную зависимость от радиуса видимости робота и линейную от масштаба глобальной карты. Для снижения числа пересчётов

локального пути требуется увеличение радиуса видимости. Масштаб среднemasштабной карты влияет на число вызовов: оно увеличивается в среднем на 20%, что является несущественным на фоне роста числа вызовов при уменьшении радиуса.

На рис. 3 представлен график зависимости длины плана и траектории от масштаба карты и радиуса видимости робота локальной карты. Графики построены подсчетом числа посещенных во время движения роботом точек карты.

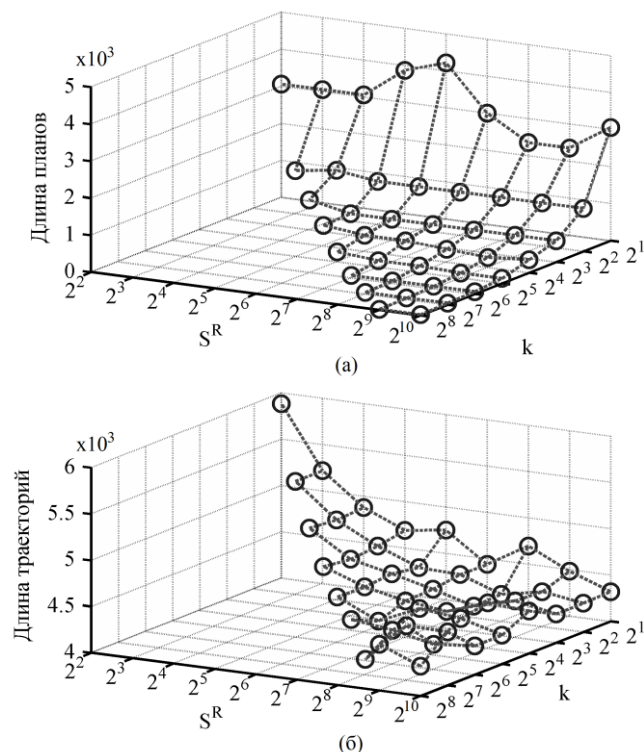


Рис. 3. Зависимость длина план (а) и траектории (б) от радиуса видимости и масштаба карты

Длина плана (рис. 3.а) зависит от масштаба имеющейся у робота среднemasштабной карты, так как робот движется от точки к точке плана, увеличение их числа возникает в случае, если требуется корректировка плана за счет обнаруженных препятствий и отклонения в ранее не посещенные зоны. Большое количество корректировок планов возникает при сложном рельефе местности, что в исследуемом случае наблюдается в случае мелкого масштаба реалистичной карты, но при этом не влияет на длину пройденной траектории (рис. 3.б).

При анализе рис. 3.б отмечается, что длина пройденной траектории при мелком масштабе и маленьком радиусе видимости максимальна, что согласуется максимальной длиной плана и числом вызовов функций корректировки пути на рис. 2 и 3.а.

Самые короткие траектории получаются в случае большого радиуса видимости, что справедливо для карт любого масштаба.

При малых радиусах видимости средняя длина траекторий увеличивается более чем на 10% только при радиусе видимости покрывающем меньше чем 2% от карты что позволяет сделать вывод о нижнем ограничении соотношения масштабов глобальной и локальной карты как 1:16.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье разработан и исследован алгоритм согласования глобальных и локальных траекторий на разномасштабных картах. Проведена симуляция с использованием карты, описывающую реальную местность. В исследовании рассмотрены зависимости вычислительной сложности от масштаба карты и радиуса обзора робота. Определено что при соотношении масштабов карт 1:16 и крупнее достаточно обзора в 2% карты для построения траектории на 10% хуже лучшей возможной. Продолжением работы является изучение альтернативных критериев моментов корректировки траектории движения на основе отклонений от планового движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Z. Lv, L. Yang, Y. He, Z. Liu and Z. Han, "3D environment modeling with height dimension reduction and path planning for UAV," 2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), Kunming, China, 2017, pp. 734-739. doi: 10.1109/ICMIC.2017.8321551
- [2] S. Majumder and M. S. Prasad, "Three dimensional D* algorithm for incremental path planning in uncooperative environment," 2016 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, 2016, pp. 431-435. doi: 10.1109/SPIN.2016.7566733
- [3] C. Bensaci, Y. Zennir, D. Pomorski and E. A. Mechhoud, "Complex safety study of intelligent multi-robot navigation in risk's environment," 2017 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST), Madrid, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/CCST.2017.8167809
- [4] F. Cao, Y. Zhuang, H. Zhang and W. Wang, "Robust Place Recognition and Loop Closing in Laser-Based SLAM for UGVs in Urban Environments," in IEEE Sensors Journal, vol. PP, no. 99, pp. 1-1. doi: 10.1109/JSEN.2018.2815956
- [5] M. G. Ocando, N. Certad, S. Alvarado and Á. Terrones, "Autonomous 2D SLAM and 3D mapping of an environment using a single 2D LIDAR and ROS," 2017 Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), Curitiba, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/SBR-LARS-R.2017.8215333
- [6] L. Liu, X. Wang and H. Ren, "3D Seabed Terrain Establishment Based on Moving Fractal Interpolation," 2014 Seventh International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, Beijing, 2014, pp. 6-10. doi: 10.1109/CSO.2014.10
- [7] D. Riccio and G. Ruello, "Synthesis of Fractal Surfaces for Remote-Sensing Applications," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, no. 7, pp. 3803-3814, July 2015. doi: 10.1109/TGRS.2014.2384595
- [8] Y. Fu, Z. Zheng, D. Fu and Y. Tong, "Comparison of two fractal surface modeling methods," 2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Guilin, 2016, pp. 417-421. doi: 10.1109/WCICA.2016.7578280
- [9] T. Sun, F. Xu, J. Lu, M. Yin and X. Liu, "A novel and practical algorithm for generating 3D volumetric clouds," 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), Nanjing, 2015, pp. 1-5. doi: 10.1109/WCSP.2015.7341322