

20. *Samoylov L.K., Chernov A.M. Analiticheskoe predstavlenie vosstanavlivayushchego opera-tora pri interpolatsii po Lagranzhu [Analytical presentation of the reducing operator interpolation Lagrange], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 2 (91), pp. 233-236.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Самойлов Леонтий Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: lksamoilov@sfedu.ru; 347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634311193; д.т.н.; профессор.

Samoilov Leonty Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lksamoilov@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +786343111193; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 620.9

В.В. Соловьев, И.О. Шаповалов, В.В. Шадрина

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО*

Целью работы является решение задачи планирования перемещения подвижного объекта в среде с априорной неопределенностью с применением диаграммы Вороного. Для решения задачи выполнен анализ зарубежных работ в результате которого установлено, что планирование перемещения подвижного объекта в среде с неопределенным расположением препятствий вычислительно затратный процесс. В результате предложен алгоритм картографирования среды на базе информации с локатора, установленного на подвижном объекте, позволяющий решать задачу планирования траектории в реальном времени. Показаны этапы алгоритма кластеризации координат и определения принадлежности к препятствию. Предложен вариант анализа кластеров координат через пересечение многоугольников. Рассмотрена процедура анализа данных сенсора при совпадении информации с данными в базе координат. Рассмотрены базовые режимы движения подвижного объекта в среде: движение между препятствиями, движение слева и справа от препятствий, движение без препятствий. Показан механизм обхода препятствий на базе приращения координат крайних точек принадлежащих одному объекту. Рассмотрено движение между препятствиями по ребру диаграммы Вороного, соответствующего случаю неполной дорожной карты. Проведены модельные эксперименты для некоторых базовых режимов, в случае расположения препятствия рядом с целью и случая равномерного расположения препятствий в среде. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенных алгоритмов для решения задачи безопасного перемещения подвижного объекта в среде с препятствиями.

Планирование траектории; диаграмма Вороного; картографирование среды; автономные подвижные объекты.

V.V. Soloviev, I.O. Shapovalov, V.V. Shadrina

PLANNING OF THE PATH MOBILE OBJECT USING THE VORONOI DIAGRAM

The aim of the paper is to solve the problem of a vehicle motion planning in the environment with a priori uncertainty using a Voronoi diagram. For the problem solution, the analysis of some representative papers was carried out and confirmed that the vehicle motion planning in the environment with uncertain location of obstacles is a computationally expensive process. As a result, an algorithm for the environment mapping on the basis of data from the range finder mounted on the vehicle was proposed. This algorithm allows solution the problem of path planning in real time. The steps of the

* Материалы статьи подготовлены в рамках выполнения работ по гранту Российского научного фонда (№ 14-19-01533) в Южном федеральном университете.

coordinate cauterization and linking with obstacles algorithm are presented. The modification of the coordinate cluster analysis using the intersection of polygons is proposed. A procedure of the sensor data analysis for the case of this data coincidence with the data in the coordinate database is considered. We also considered the following basic modes of the vehicle motion in the environment: the motion between the obstacles, the motion on the left and on the right of obstacles, the motion without obstacles. The approach to obstacle avoidance based on the adding of coordinates of extreme points belonging to the same object is shown. The motion between the obstacles along the edge of the Voronoi diagram corresponding to the case of incomplete road map is considered. Simulation of some basic modes was carried out for the cases when the obstacle location is next to a goal and the obstacles are uniformly located in the environment. The obtained results approve efficiency of the proposed algorithms for solving the problem of the safe vehicle motion in the environment with obstacles.

Planning of a path; Voronoi diagram; mapping of the environment; independent mobile objects.

Введение. Методы планирования траекторий автономных подвижных объектов можно разделить на две большие группы: интеллектуальные и графо-аналитические. К первой группе методов можно отнести методы на основе нейросетевого подхода и нечеткой логики [1–4]. Ко второй группе методов можно отнести метод потенциальных полей, методы с применением диаграмм Вороного, методы с учетом инерционных свойств подвижного объекта [5–7]. В каждом из методов второй группы в той или иной мере используются теория графов и аналитическая форма описания законов перемещения подвижных объектов, поэтому их можно называть графо-аналитическими. Исследование графо-аналитических методов представляет научный интерес из-за того, что они, как правило, являются базовыми для разработки более сложных комбинированных методов, позволяющих расширить возможности базовых методов и организовать безопасное перемещение подвижного объекта в средах с априорно неизвестным расположением препятствий. Диаграммы Вороного для решения задачи планирования траектории в среде с априорной неопределенностью стали применяться сравнительно недавно. Это связано с тем, что реализации таких алгоритмов были вычислительно неэффективными из-за большого объема геометрических расчетов. Авторами предлагается алгоритм картографирования среды для уменьшения вычислительной нагрузки и метод планирования траектории подвижного объекта в среде с априорно неизвестным расположением препятствий с применением диаграммы Вороного.

Постановка задачи. Необходимо организовать перемещение подвижного объекта (ПО) в среде с препятствиями из точки $A(x_0, y_0)$ в точку $B(x_1, y_1)$. Априорная информация о расположении и форме препятствий отсутствует. Сенсорная подсистема ПО представляет собой впередсмотрящий локатор ограниченной дальности действия. Локатор периодически во времени формирует набор интенсивностей отраженных лучей. Угол раскрытия диаграммы локатора от -45 до $+45$ градусов от продольной оси ПО и дальность – 5 м. В качестве ПО рассматривалась колесная тележка с моделью из [8], а в качестве регулятора - позиционный регулятор из [9].

Для анализа эффективности разработанного метода необходимо реализовать планировщик перемещения ПО совместно с позиционным регулятором в среде MatLab. На каждом шаге моделирования планировщик должен формировать желаемые требования к траекториям в пространстве рабочих координат в виде коэффициентов линейных и квадратичных форм [9].

Обзор известных решений применения диаграмм Вороного для планирования траекторий. Диаграмма Вороного – это разбиение плоскости с n точками (называемыми центрами) на множество выпуклых многогранников (называемых ячейками) таким образом, что каждый из них содержит один центр и любая точка внутри данного многогранника ближе к своему центру, чем к любому другому. Рассмотрим множество точек S и некоторую точку p . Для точки p ячейка диаграммы Вороного является пересечением полуплоскостей, образованных серединными перпендикулярами отрезков $[p, s]$ и содержащих точку p .

Согласно [10] классические геометрические подходы к построению траекторий могут быть разделены на две основные группы: метод разбиения на ячейки [11], метод дорожной карты [12].

В методе разбиения на ячейки при описании свободного для движения пространства (C_f) используются непересекающиеся ячейки. Разбиение может быть точным либо приближенным. При приближенном разбиении пространство разбивается до тех пор, пока каждая ячейка не окажется полностью в свободном пространстве C_f , либо полностью внутри препятствия. Процесс рекурсивного деления останавливается по достижении заданной точности. Точное разбиение на ячейки работает быстрее приближенного, но получаемые траектории имеют большую длину.

В рамках метода дорожной карты [12] описание связности свободного для перемещения пространства производится с помощью графов. Данный метод имеет несколько вариаций, из которых самой распространенной является вероятностный метод дорожной карты [13].

Также широко применяются методы дорожной карты на основе таких структур, как граф видимости для поиска кратчайшего пути и диаграммы Вороного для поиска наиболее свободного пути.

Если сравнить вычислительную сложность последних двух алгоритмов, то можно сделать вывод, что диаграмма Вороного строится за $O(n \log n)$ тактов при n узлах сети, в то время как построение графа видимости займет не более $O(n^2)$ тактов на той же карте.

Указанный недостаток может быть устранен путем применения специальных методов сглаживания траектории [14]. В статье [6] авторы объединили диаграмму Вороного, граф видимости и метод потенциальных полей для достижения компромисса между самой безопасной и кратчайшей траекторией. Получаемый путь хотя и короче пути, получаемого только на основе диаграммы Вороного, не оптимален.

Поскольку построение диаграммы Вороного по множеству многоугольников – сложный и затратный по времени процесс, авторы работы [15] аппроксимировали препятствия в виде многоугольников точками на их ребрах и построили диаграммы по этим точкам. Те ребра, которые пересекали препятствия, были удалены. Сначала была создана триангуляция Делоне [16], а затем по ней построена диаграмма Вороного за $O(n)$ тактов.

Для создания триангуляции Делоне использовался случайный инкрементный алгоритм, позволяющий добавлять новые точки без изменения всей триангуляции.

Процесс построения начинается с создания треугольника, включающего все аппроксимирующие точки, причём угловые точки этого треугольника не должны лежать внутри окружностей описывающих внутренние треугольники триангуляции. После построения общего охватывающего треугольника, точки добавляются в триангуляцию друг за другом. Необходимые топологические изменения производятся вслед за каждым добавлением точки с целью сохранения свойств триангуляции Делоне.

Следующим шагом после построения триангуляции Делоне в работе [15] является генерация дорожной карты, с добавлением в триангуляцию начальной и целевой точки. Дорожная карта генерируется путем удаления тех ребер диаграммы Вороного, которые удалены от препятствий менее чем на удвоенный радиус безопасности ($2C_{min}$). Однако если при создании диаграммы Вороного использовать только точки препятствий, полученная дорожная карта будет неполной.

На рис. 1 показаны неполная (а) и полная (б) дорожные карты. Задачу получения полной дорожной карты можно решить, если построить для вершин препятствия охватывающую рамку и расширить ее не меньше, чем на $2C_{min}$, во всех направлениях. Затем строится диаграмма Вороного по точкам, аппроксимирующим препятствия и по окружающим рамкам. На основе такой диаграммы Вороного получается полная дорожная карта, участок которой показан на рис. 1,б.

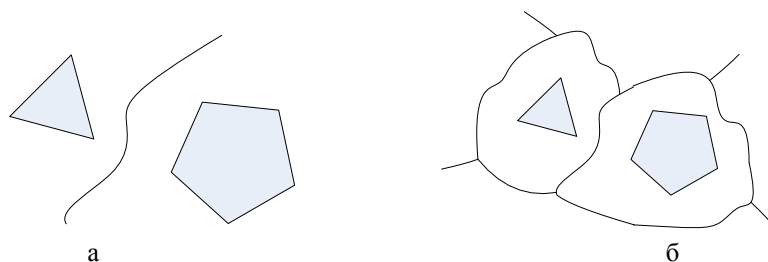


Рис. 1. Неполная и полная дорожная карты

Кратчайший путь по полученной полной дорожной карте может также существенно отличаться от оптимального из-за выпуклости препятствия. Чтобы решить эту проблему, аппроксимирующие точки описывающей рамки стягиваются к ближайшей точке препятствия на расстояние не менее $2C_{min}$ [15]. Диаграмма Вороного строится по аппроксимирующим точкам препятствия и точкам на стянутой рамке. При необходимости задать новые начальную и целевую точки, предыдущие начальная и целевая точки удаляются из триангуляции динамически.

Авторы работы [15] предложили простой подход для уменьшения длины кратчайшего пути по дорожной карте. Для вершины v_i на пути ($i=\{1, \dots, n-2\}$) проверяется, имеет ли отрезок V_i, V_{i+2} расстояние до ближайшего препятствия меньше или равное C_{min} . Если условие выполняется, то вершина v_{i+1} удаляется из кратчайшего пути и процесс поиска продолжается. После завершения процесса уменьшения длины пути производится процедура сглаживания траектории с помощью точек Штейнера [17].

В целом, предложенный метод позволяет получить траекторию, оптимальную с точки зрения безопасности и длины. Данный метод, из-за наличия нескольких итерационных алгоритмов, имеет низкую вычислительную эффективность, а логика выбора параметра C_{min} неочевидна.

В работе [18] для построения диаграммы Вороного используется алгоритм расширения границ. Хотя данная работа и направлена на исследование карты местности, а не на перемещение к целевой точке, некоторые подходы из нее могут быть использованы для успешного обхода препятствий.

Существуют подходы, не просто комбинирующие диаграммы Вороного с другими методами, а модифицирующие саму диаграмму, в частности, метод планирования траектории мобильного робота в неизвестной среде на основе обобщенного графа Вороного [19].

Алгоритм картографирования среды. Данные от локатора в необработанном виде не позволяют построить диаграмму Вороного без привлечения достаточно объемных вычислений. Действительно, на каждом этапе движения ПО множество координат получаемых с локатора, без серьезной обработки, не позволяют оценить принадлежность координат разным препятствиям и их расположение относительно ПО.

В связи с этим, для эффективного планирования движения в условиях неопределенности, необходимо выполнять картографирование местности, которое должно выполняться в одном темпе с процессом движения ПО.

Наиболее простым, но и наименее эффективным подходом является сохранение всех данных с локатора и полный перебор координат для анализа принадлежности точек тем или иным препятствиям. Однако по мере накопления информации необходимо оперировать большими объемами данных, что не позволяет удовле-

творить требованию одновременного картографирования и организации движения ПО. Суть процесса картографирования, предлагаемого в данной работе, иллюстрируется рис. 2. В процессе картографирования можно выделить несколько этапов.

Этап 1. Получение данных с локатора и объединение координат в кластеры, путем анализа расстояний между точками в процедуре полного перебора и параллельным устранением избыточности, путем удаления координат точек с нормой $\|r\| < \delta$ от соседних точек (см. рис. 3). В результате получается массив ячеек с координатами объектов находящихся в поле зрения ПО.

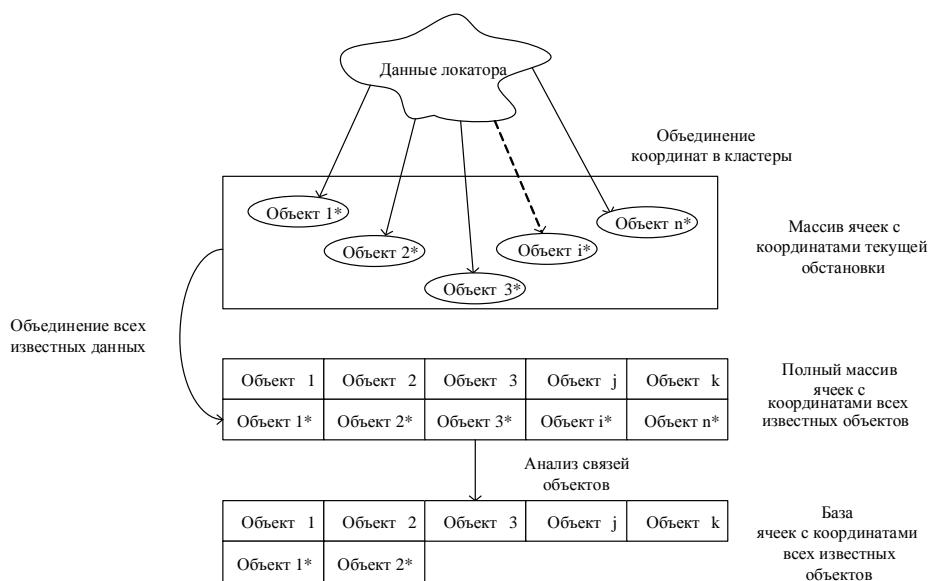


Рис. 2. Пояснение процесса картографирования

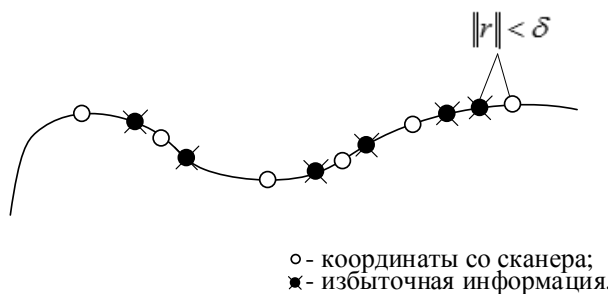


Рис. 3. Устранение избыточности информации

Этап 2. Объединение массива ячеек с координатами объектов в поле зрения ПО и базы ячеек с координатами всех известных объектов.

Этап 3. Анализ связей для слияния кластеров координат, принадлежащих одному или разным объектам, не позволяющим выполнить движение ПО между ними.

Рассмотрим, как согласуется информация, поступающая с локатора, с уже имеющейся информацией в базе ячеек координат всех известных объектов, что отображено на рис. 4. В случае рис. 4,а координаты точек, полученных с локатора и принадлежащие одному объекту, пересекаются с имеющимися координатами в базе.

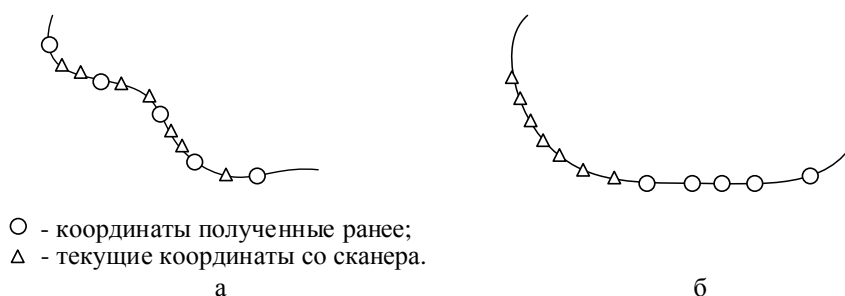


Рис. 4. Возможные варианты взаимного расположения новых и известных координат объекта

В случае, показанном на рис. 4,б, новые и известные координаты точек, принадлежащие одному объекту, не пересекаются.

Для уменьшения вычислительных затрат и устранения полного перебора координат этап 3 необходимо выполнять в две стадии. Для слияния информации в первом случае (рис. 4,а), для каждого объекта из полного массива ячеек строится многоугольник и ищется их попарное пересечение, которое можно выполнить с помощью алгоритма Уайлера–Атертона [20] или алгоритма Бентли–Отмана [21]. Если у пары многоугольников имеется хотя бы одна общая точка, то два кластера координат объединяются. Для слияния информации во втором случае (рис. 4,б), можно воспользоваться особенностью представления информации локатором: в массиве координат данные располагаются слева направо. Таким образом, в массиве ячеек с координатами текущей обстановки, координаты каждого объекта расположены слева направо. Следовательно, достаточно сравнить нормы расстояний между крайними координатами в каждой паре кластеров и определить принадлежность одному или разным объектам, что показано на рис. 5.

После выполнения третьего этапа данные базы координат всех известных объектов обновляются.

Устранение полного перебора координат в больших массивах данных делает данный алгоритм вычислительно эффективным и позволяет использовать его в режиме реального времени при планировании движения ПО.

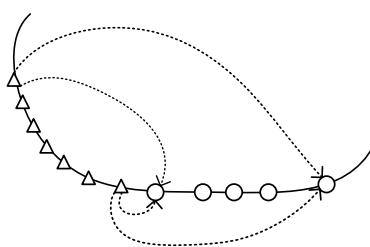


Рис. 5. Иллюстрация анализа кластеров координат принадлежащих одному объекту

Алгоритм планирования с применением диаграммы Вороного. Для реализации алгоритма планирования траекторий ПО, рассмотрим режимы движения в среде с препятствиями, показанные на рис. 6.

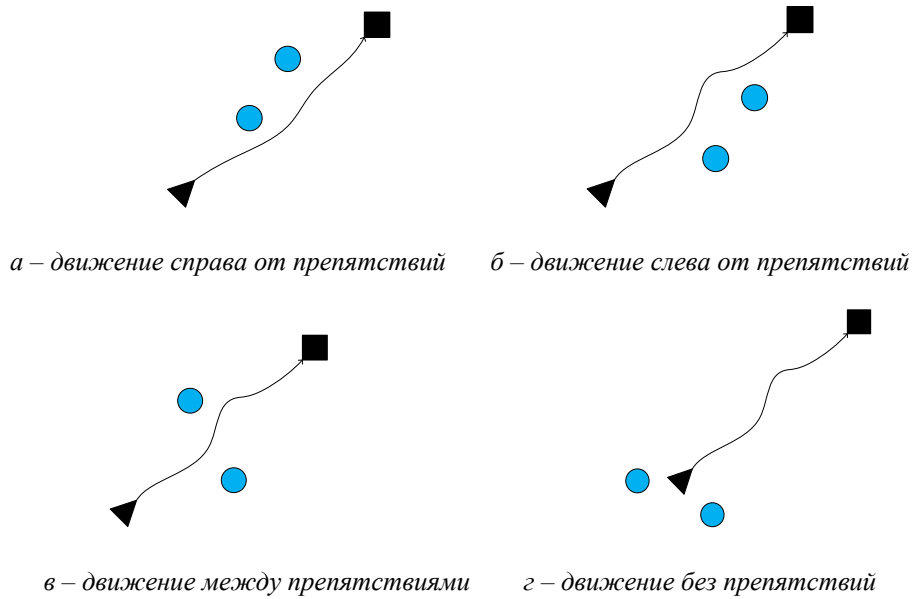


Рис. 6. Режимы движения в среде с препятствиями

Режим движение без препятствий организуется в случае если в поле зрения ПО препятствий нет. Движение к цели в этом случае может быть организовано путем назначения для цели притягивающего потенциала, как в методе потенциальных полей [5].

Рассмотрим организацию режимов движения справа или слева от препятствий. После определения местоположения препятствия и выявления ближайшего к ПО, выбирается крайняя точка препятствия. Движение слева от препятствия показано на рис. 7. При обходе i -го препятствия слева, выбираются координаты (x, y) первой точки из i -го кластера, при обходе справа – координаты последней точки. Задаются приращение координат $(x+\gamma, y-\gamma)$ и $(x-\gamma, y+\gamma)$.

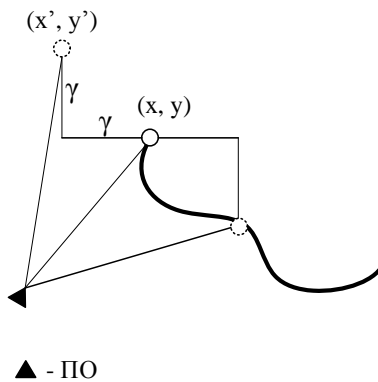


Рис. 7. Движение слева от препятствия

Из двух полученных точек выбирается максимально удаленная точка от препятствия (x', y') и ПО направляется в неё. Таким образом, обеспечивается безопасный обход препятствия.

На рис. 8 демонстрируется режим движение между препятствиями – показаны $K-1, K, K+1$ шаги. Движение в этом режиме можно представить в виде последовательности трёх этапов.

Этап 1. Поиск координат ближайших точек $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ препятствий к ПО.

Этап 2. Поиск координат (x_0, y_0) середины отрезка, соединяющего ближайшие точки.

Этап 3. Движение к точке (x_0, y_0) .

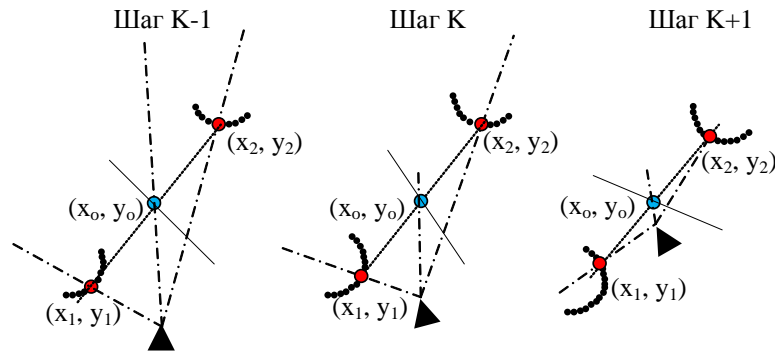
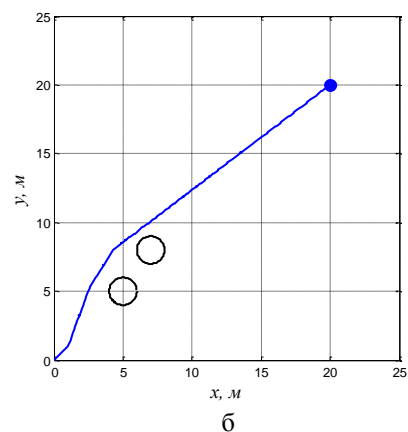
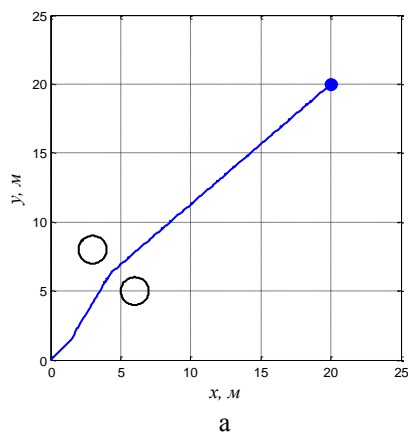


Рис. 8. Движение между препятствиями

На каждом шаге точка (x_0, y_0) принадлежит общему ребру двух многоугольников диаграммы Вороного, содержащих каждое из препятствий, что соответствует случаю неполной дорожной карты, т.к. ПО движется в условиях априорной неопределенности. Для повышения гладкости траектории в этом режиме можно организовать движение ПО по дуге окружности.

Исследование планировщика перемещения ПО. Разработанные алгоритмы реализованы в среде MatLab. Исследовалось движение из точки $(0, 0)$ в точку $(20, 20)$. Препятствия представлялись окружностями единичного радиуса. Результаты моделирования представлены на рис. 9. Исследовался режим движения между препятствиями (а), режим движения слева (б) и справа (в) от препятствий, ситуация близкого расположения препятствия к цели (г), ситуация в среде с равномерно расположенными препятствиями (д).



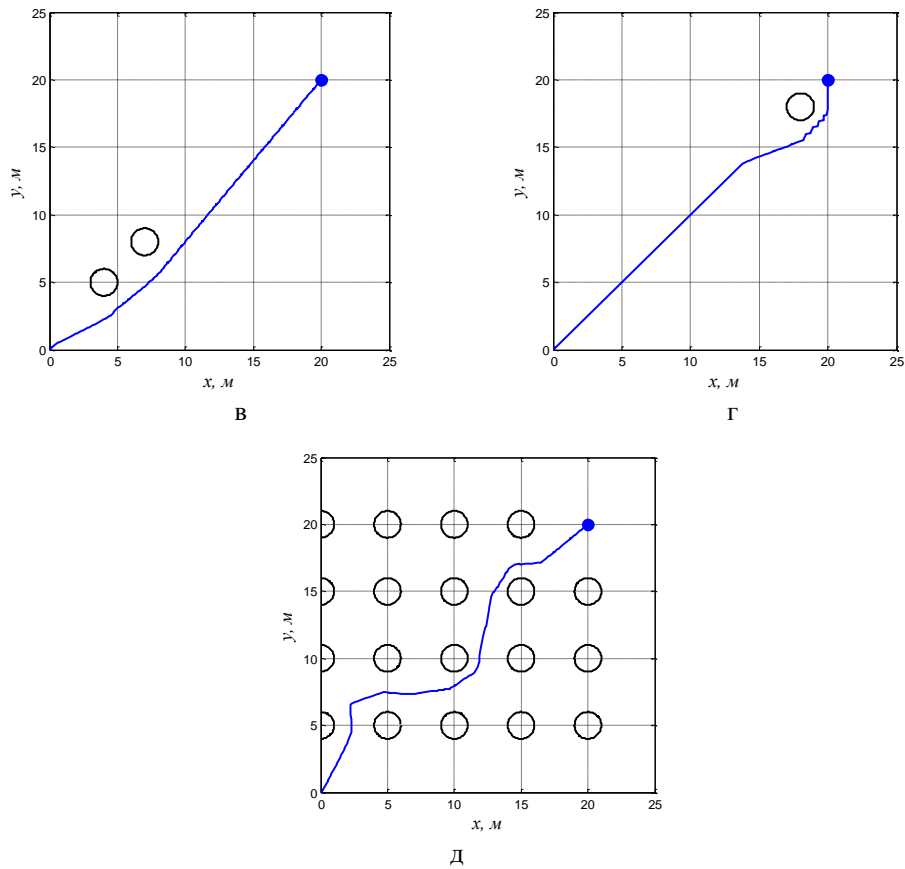


Рис. 9. Результаты моделирования перемещения ПО

Анализ результатов показывает, что при отсутствии картографирования среды при наличии в среде нескольких препятствий авторам не удалось организовать движение ПО в реальном времени из-за высоких вычислительных затрат. Предварительное картографирование среды существенно повышает эффективность, так как может выполняться в темпе с процессом планирования. Все основные режимы движения ПО были успешно реализованы. При этом минимальное расстояние между датчиком робота и любым препятствием вдоль траектории во всех примерах не менее 0,44 и средняя скорость ПО – 1,19 м/с.

Выводы. Результаты анализа полученных данных показали, что в отличие от работ [12, 15, 17] картографирование среды с целью уменьшения неопределенности, позволяет реализовать планировщик перемещения подвижного объекта с применением диаграмм Вороного с низкими вычислительными затратами. Приведенный алгоритм картографирования может выполняться в едином темпе с процессом планирования и также может использоваться для решения задач исследования среды с помощью подвижных объектов. Сравнение результатов с результатами метода потенциальных полей из работы [22], показывает, что применение разработанного алгоритма обеспечивает высокую безопасность перемещения при большей скорости движения ПО, при этом увеличении длины траектории не превышало 10 %.

В дальнейшем авторами планируется реализация режима движения вдоль препятствий и модификация для организации пространственного движения ПО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Borenstein J., Koren Y.* The Vector Field Histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots // *IEEE Journal of Robotics and Automation.* – 1991. – Vol. 7, № 3. – P. 278-288.
2. *Guzik V.Ph., Chernukhin Yu.V., Pyavchenko A.O., Polenov M.Yu., Pereverzev V.A. and Saprykin R.V.* Neural network method of intellectual planning of mobile robotic object movement in the conditions of uncertainty // *Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits. Proceedings of the 18th International Conference on Circuits (part of CSCC '14) and the 2014 International Conference on Mechatronics and Robotics, Structural Analysis (MEROSTA 2014).* Santorini Island, Greece. – 2014. – P. 194-200.
3. *Бекасов Д.Е.* Применение аппарата нечеткой логики при решении задачи поиска пути в неизвестном окружении // *Молодежный научно-технический вестник.* – URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/458182.html> (дата обращения: 12.04.2012).
4. *Rigatos G.G., Tzafestas C.S., and Tzafestas S.G.* Mobile robot motion control in partially unknown environments using a sliding-mode fuzzy logic controller // *Robotics and Autonomous Systems.* – 2000. – Vol. 33. – P. 1-11.
5. *Khatib O.* Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation.* – 1985. – P. 500-505.
6. *Masehian E., Amin-Naseri M.R.* A Voronoi diagram-visibility graph-potential field compound algorithm for robot path planning // *J. Robot Syst.* – 2004. – Vol. 21, № 6. – P. 275-300.
7. *Minguez J., Montano L.* Abstracting any Vehicle shape and the Kinematics and Dynamic Constraints from Reactive Collision Avoidance Methods // *Autonomous Robotics.* – 2006. – Vol. 20, № 1. – P. 43-59.
8. *Буданов В.М., Деянин Е.А.* О движении колесных роботов // *Прикладная математика и механика.* – 2003. – Т. 67. – Вып. 2. – С. 244-255.
9. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с.
10. *Nolborio H., Naniwa T., Arimoto S.* A quadtree-based path-planning algorithm for a mobile robot // *J. Robot Syst.* – 1990. – Vol. 7, № 4. – P. 555-574.
11. *Amato N., Wu Y.* A randomized roadmap method for path and manipulation planning // *In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation.* – 1996. – Vol. 1. – P. 113-120.
12. *Kedem K., Sharir M.* An efficient motion planning algorithm for a convex rigid polygonal object in 2-dimensional polygonal space // *Discrete Comput. Geom.* – 1990. – Vol. 5, № 1. – P. 43-75.
13. *Kim J., Pearce R.A., Amato N.M.* Extracting optimal paths from roadmaps for motion planning // *In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation.* – 2003. – Vol. 2. – P. 2424-2429.
14. *La Valle S.M.* Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning // *Computer Science Dept.* – 1998. – P. 1-4.
15. *Bhattacharya P., Gavrilova M.L.* Roadmap-Based Path Planning Using the Voronoi Diagram for a Clearance-Based Shortest Path // *IEEE Robotics & Automation Magazine.* – 2008. – Vol. 15, № 2. – P. 58-66.
16. *Guibas L.J., Knuth D.E., and Sharir M.* Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi diagrams // *Algorithmica.* – 1992. – Vol. 7, № 1. – P. 381-413.
17. *Kimberling C.* Central Points and Central Lines in the Plane of a Triangle // *Math. Mag.* – 1994. – Vol. 67. – P. 163-187.
18. *Kim J., Zhang F., Egerstedt M.* A provably complete exploration strategy by constructing Voronoi diagrams // *Autonomous Robots.* – 2010. – Vol. 29, № 3. – P. 367-380.
19. *Seda M., Pich V.* Robot motion planning using generalized Voronoi diagrams // *Proceedings of 8th WSEAS International Conference on Signal Processing, Computational Geometry and Artificial Vision, Greece.* – 2008. – P. 215-220.
20. *Weiler K., Atherton P.* Hidden surface removal using polygon area sorting // *Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques.* – 1977. – P. 214-222.
21. *de Berg M., van Kreveld M., Overmars M., Schwarzkopf O.* *Computational Geometry: Algorithms and Applications.* – Springer, 2000. – 368 p.
22. *Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф., Косенко Е.Ю., Крухмалев В.А., Медведев М.Ю., Переверзев В.А., Пшихопов В.Х., Пьявченко О.А., Сапрыкин Р.В., Соловьев В.В., Финаев В.И., Чернухин Ю.В., Шаповалов И.О.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / Под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2014. – 450 с.

REFERENCES

1. Borenstein J., Koren Y. The Vector Field Histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1991, Vol. 7, No. 3, pp. 278-288.
2. Guzik V.Ph., Chernukhin Yu.V., Pyavchenko A.O., Polenov M.Yu., Pereverzev V.A. and Saprykin R.V. Neural network method of intellectual planning of mobile robotic object movement in the conditions of uncertainty, *Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits. Proceedings of the 18th International Conference on Circuits (part of CSCC '14) and the 2014 International Conference on Mechatronics and Robotics, Structural Analysis (MEROSTA 2014)*. Santorini Island, Greece, 2014, pp. 194-200.
3. Bekasov D.E. Primenenie apparata nechetkoy logiki pri reshenii zadachi poiska puti v neizvestnom okruzhenii [The use of fuzzy logic in solving the problem of finding your way in an unknown environment], *Elektronnyy zhurnal Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik* [Youth Scientific and Technical Bulletin]. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/458182.html> (Accessed 12 April 2012).
4. Rigatos G.G., Tzafestas C.S., and Tzafestas S.G. Mobile robot motion control in partially unknown environments using a sliding-mode fuzzy logic controller, *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, Vol. 33, pp. 1-11.
5. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1985, pp. 500-505.
6. Masehian E., Amin-Naseri M.R. A Voronoi diagram-visibility graph-potential field compound algorithm for robot path planning, *J. Robot Syst.*, 2004, Vol. 21, No. 6, pp. 275-300.
7. Minguez J., Montano L. Abstracting any Vehicle shape and the Kinematics and Dynamic Constraints from Reactive Collision Avoidance Methods, *Autonomous Robotics*, 2006, Vol. 20, No. 1, pp. 43-59.
8. Budanov V.M., Devyanin E.A. O dvizhenii kolesnykh robotov [On motion of wheeled robots], *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied Mathematics and Mechanics], 2003, Vol. 67, Issue 2, pp. 244-255.
9. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Management of moving objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011, 350 p.
10. Nalborio H., Naniwa T., Arimoto S. A quadtree-based path-planning algorithm for a mobile robot, *J. Robot Syst.*, 1990, Vol. 7, No. 4, pp. 555-574.
11. Amato N., Wu Y. A randomized roadmap method for path and manipulation planning, *In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1996, Vol. 1, pp. 113-120.
12. Kedem K., Sharir M. An efficient motion planning algorithm for a convex rigid polygonal object in 2-dimensional polygonal spac, *Discrete Comput. Geom.*, 1990, Vol. 5, No. 1, pp. 43-75.
13. Kim J., Pearce R.A., Amato N.M. Extracting optimal paths from roadmaps for motion planning, *In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2003, Vol. 2, pp. 2424-2429.
14. La Valle S.M. Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning, *Computer Science Dept.*, 1998, pp. 1-4.
15. Bhattacharya P., Gavrilova M.L., Roadmap-Based Path Planning Using the Voronoi Diagram for a Clearance-Based Shortest Path, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2008, Vol. 15, No. 2, pp. 58-66.
16. Guibas L.J., Knuth D.E., and Sharir M. 'Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi diagrams, *Algorithmica*, 1992, Vol. 7, No. 1, pp. 381-413.
17. Kimberling C. Central Points and Central Lines in the Plane of a Triangle, *Math. Mag.*, 1994, Vol. 67, pp. 163-187.
18. Kim J., Zhang F., Egerstedt M. A provably complete exploration strategy by constructing Voronoi diagrams, *Autonomous Robots*, 2010, Vol. 29, No. 3, pp. 367-380.
19. Seda M., Pich V. Robot motion planning using generalized Voronoi diagrams, *Proceedings of 8th WSEAS International Conference on Signal Processing, Computational Geometry and Artificial Vision, Greese*, 2008, pp. 215-220.
20. Weiler K., Atherton P. Hidden surface removal using polygon area sorting, *Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1977, pp. 214-222.
21. de Berg M., van Kreveld M., Overmars M., Schwarzkopf O. Computational Geometry: Algorithms and Applications. Springer, 2000, 368 p.

22. *Beloglazov D.A., Guzik V.F., Kosenko E.Yu., Krukhmalev V.A., Medvedev M.Yu., Pereverzev V.A., Pshikhopov V.Kh., Pyavchenko O.A., Saprykin R.V., Solov'ev V.V., Finaev V.I., Chernukhin Yu.V., Shapovalov I.O.* Intellectuaľnoe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob'ektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of trajectories of moving objects in environments with obstacles], Under edition V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2014, 450 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Соловьев Виктор Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; ст. преподаватель.

Шаповалов Игорь Олегович – e-mail: shapovalovio@gmail.ru; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

Шадрина Валентина Вячеславовна – e-mail: valentina_@mail.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Soloviev Victor Vladimirovich - Southern Federal University; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; senior lecturer.

Shapovalov Igor Olegovich – e-mail: shapovalovio@gmail.ru; the department of automatic control systems; postgraduate student.

Shadrina Valentina Vyacheslavovna - e-mail: valentina_@mail.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519.7

А.С. Мельниченко, В.А. Шель, С.В. Кирильчик

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРОМ*

Актуальность данной статьи обосновывается тем, что прогресс в области микроэлектроники и вычислительной техники сделал возможным производство малоразмерных беспилотных летательных аппаратов, которые могут быть дешевыми в производстве и простыми в эксплуатации в случае массового производства. Надежность и гибкость являются основными преимуществами робототехнических систем, и использование беспилотного летательного аппарата (БПЛА) открывает широкие перспективы для беспилотной авиации. Целью написания данной статьи является исследование адекватности описания физических воздействий на объект и применение типовых регуляторов для управления квадрокоптером. Решение задачи управления квадрокоптером, как беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) преимущественно осуществляется методами классической теории автоматического управления. Система управления строится на основе известной математической модели и регулятора. Решение этой задачи будет успешным, если обеспечивается глобальная асимптотическая устойчивость замкнутой системы управления, что не всегда обеспечивается либо из-за отсутствия адекватной математической модели, либо из-за неудачно подобранного регулятора. Решение задачи управления полётом квадрокоптера в данной статье осуществлено следующим образом. Рассмотрены аспекты автоматического управления БПЛА - регулирование и ориентация в пространстве. Приведён вывод математической модели квадрокоптера на основе формализма

* НИР 213.01-07-2014/02ПЧВГ Разработка методов многокритериальной оптимизации параметров гибридных адаптивных интеллектуальных регуляторов плохо формализованных технических объектов