

УДК 519.876.5, 519.873, 004.023:896
doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.45

АЛГОРИТМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОИСКА ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА НА МНОГОСЛОЙНОЙ КАРТЕ

Д. Е. Моторин^а, аспирант, d.e.motorin@gmail.com

С. Г. Попов^а, канд. техн. наук, доцент, popovserge@spbstu.ru

^аСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, РФ

Постановка проблемы: сложная среда характеризуется возможностью декомпозиции воздействующих на робота факторов на независимые слои. В процессе движения робота в сложной среде на него воздействуют негативные факторы, влияющие на возможность достижения цели. В связи с этим возникает проблема выбора траектории движения при одновременной минимизации нежелательных воздействий на робота и длины пройденного пути. **Цель:** разработка и анализ результатов работы алгоритма двухкритериальной оптимизации траектории движения робота с учетом желаемых критериев взаимодействия со средой и длины траектории. **Результаты:** разработан и реализован алгоритм поиска кратчайшего пути на карте, каждый слой которой отображает свойство пространства и позволяет учитывать взаимодействие робота и среды с учетом длины пройденной траектории. Реализация алгоритма встроена в модель управления группой роботов. Для анализа алгоритма рассмотрены тестовые многослойные карты с добавлением гауссова шума. В результате симуляции построено множество траекторий движения с учетом коэффициентов влияния свойств пространства на объект управления при заданных начальном и конечном положении на карте. Построено пространство состояний движения робота, представленное в виде зависимостей влияния свойств среды на робота от длины траектории и риска отказов на протяжении всего пути. **Практическая значимость:** разработанный алгоритм может быть применен в системах планирования индивидуального или группового движения роботов. Полученное пространство состояний отражает диапазоны эффективных характеристик робота при выполнении поставленных задач в заданной среде. Продолжением работы станет применение разработанного алгоритма при поиске пути на разномасштабных картах и построение сетей траекторий в пространстве состояний группы роботов.

Ключевые слова — поиск траекторий, многослойные карты, управление, робот, пространство состояний, эвристический алгоритм, реалистичная среда.

Цитирование: Моторин Д. Е., Попов С. Г. Алгоритм многокритериального поиска траекторий движения робота на многослойной карте // Информационно-управляющие системы. 2018. № 3. С. 45–53. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.45

Citation: Motorin D. E., Popov S. G. Multi-Criteria Path Planning Algorithm for a Robot on a Multilayer Map. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 45–53 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.45

Введение

Управление роботами и их группами включает в себя ряд сложных задач, начиная с механических принципов движения и заканчивая интеллектуальными алгоритмами принятия решений о выборе глобальных целей для выполнения. В настоящий момент центральной проблемой управления и планирования движения является поиск траекторий. Построение пути на плоской карте с дискретными препятствиями является хорошо изученной задачей как в теоретическом, так и в практическом плане. Для ее решения, как правило, используются классические алгоритмы поиска на графах, такие как, например, алгоритмы Дейкстры, A*, волновой, Флойда — Уоршелла [1, 2]. Они широко и успешно применяются при наличии одного слоя карты. При этом сложно распространить их на многослойные карты, учитывающие несколько свойств среды.

Сравнение стандартных алгоритмов поиска траекторий рассматривается в работах [2–4]. Авторы оптимизируют алгоритмы A*, Дейкстры

и собственный алгоритм НСТН для систем с низкими вычислительными ресурсами. Анализ показал, что алгоритм A* наиболее эффективен по критерию минимизации длины траектории. Из стандартных поисковых алгоритмов наиболее распространенный для исследования и модификации также алгоритм A*. Например, его модификация [5] позволяет минимизировать число перспективных вершин в процессе поиска, а эвристика, оценивающая перспективность перехода на основе переменной длины шага поиска [6], сокращает время получения результата более чем в два раза. Критерий поискового алгоритма [7] учитывает не только время получения результата, но и динамику среды, состоящую в перемещении препятствий, что позволяет избегать коллизий в процессе движения. Модифицированные способы применения поисковых алгоритмов дают возможность решать сложные задачи планирования гибридных траекторий в двух приближениях [8] или разрешать коллизии траекторий [9] с использованием алгоритмов поиска промежуточных целевых точек.

Помимо классических алгоритмических подходов используются эволюционные алгоритмы [10], в частности генетические [11]. В работе [12] рассматривается модификация алгоритма с переменной длиной хромосом с апробацией в натурном эксперименте по движению робота. Сокращение вычислительных затрат [13] обеспечивается реализацией иерархического генетического алгоритма с редукцией области поиска траекторий. Генетические алгоритмы используются при построении траектории для задачи максимального покрытия, в работе [14] предложен критерий минимизации затрачиваемой роботом энергии.

Сравнительно новым подходом при поиске траекторий является муравьиный алгоритм [15–17]. Модификация этого метода [18], состоящая в редукции сложности задачи коммивояжера, указанием обязательного посещения желаемых узлов применена для решения задачи построения индивидуальных туристических маршрутов. Оптимизация муравьиного алгоритма для статических карт различного размера с типовым и случайным распределением препятствий представлена в работе [19], где исследована зависимость длины пути от размера популяции. Алгоритм [20] предоставляет решение задачи поиска траектории движения транспортного средства в реальном времени в городских условиях при имеющемся прогнозе дорожной обстановки.

Указанные выше методы и алгоритмы рассматривают двумерные плоские карты с дискретными препятствиями, что не всегда объективно отражает ситуацию в окружающей среде. Для более точного описания обстановки используются объемные трехмерные карты. Например, в статье [21] рассматривается оптимизация траектории движения самолетов относительно совместной минимизации критериев расстояния и времени полета с заданием начальных параметров оптимизации. Для поиска траектории летающих роботов с вращающимся крылом [22] применяется комбинация алгоритма A^* и эвристической функции оценки перспективности следующего узла, в которой используется значение потенциального поля, что позволяет строить плавные траектории.

В рассмотренных ранее алгоритмах и методах применяются однослойные карты, что существенно снижает возможности управления, эффективность построенных путей и увеличивает неопределенность и вероятность отказа роботов во время движения. Поиск траекторий в сложных средах, как в работе [23], предполагает вычисление траектории движения надводного робота объединением векторного поля и маски запрещенных к движению областей. Предложенный подход [24] позволяет строить траектории в условиях динамической карты, состоящей из объем-

ного слоя поверхности ландшафта и слоя с областями вероятных отказов.

Если рассматривать окружающий мир как набор отдельных слоев, содержащих измеримые значения свойств среды, то задача может быть решена методами многокритериальной оптимизации. В данной статье авторами предложен эвристический алгоритм поиска траекторий на многослойных картах.

Постановка задачи многокритериального поиска на многослойной карте

Рассматривается карта E , размеченная регулярной сеткой, состоящая из m слоев. Каждый слой отображает свойство пространства, например высоту ландшафта местности над уровнем моря, радиационный фон, температуру. Каждый узел сетки принимает значения в диапазоне определенным выбранным свойством слоя от минимального до максимального значения $[\min_i \dots \max_i]$.

В начальный момент времени робот R расположен в начальной точке сетки A_R и должен переместиться в целевую точку Z_R . Требуется построить траекторию $L = \{A_R, l_1, \dots, l_w, \dots, Z_R\} \in L : l_w \in E$, представляющую собой набор точек сетки, в которые последовательно проходит робот во время движения.

При этом робот строит траекторию движения с учетом вектора $G = \{g_1, \dots, g_m\}$, отражающего эмпирические коэффициенты подверженности робота свойствам среды.

Планирование траектории движения осуществляется на множестве E — окружающей робота среде:

$$E = \{E_1, \dots, E_i \leftarrow [e_{xyi} \in \zeta_i], \dots\}, i = 1, \dots, m,$$

где E_i — отдельный слой, характеризующий свойство, влияющее на робота, каждый элемент e_{xyi} которого отражает значение свойства из возможных значений $\zeta_i \in [\min_i, \dots, \max_i]$ в координатах сетки (x, y) . Поиск траектории осуществляется посредством эвристического правила

$$F(e_{xyi}) = h(f(g_i \times e_{xyi}, g'_i \times e'_{xyi}), \rho) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где e_{xyi} — значение свойства в i -м слое пространства на траектории движения робота; g_i — коэффициент влияния слоя на вероятность отказа объекта управления; ρ — расстояние от текущего положения до целевого; h — функция преобразования значений слоев в вероятность отказа; f — функция, задающая отношение слоев:

$$f = g_1 e_{xy1} + g_2 e_{xy2} + g_3 e_{xy3}. \quad (2)$$

Представленное правило используется при формировании критерия

$$\sum F(L) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где L — траектория движения робота.

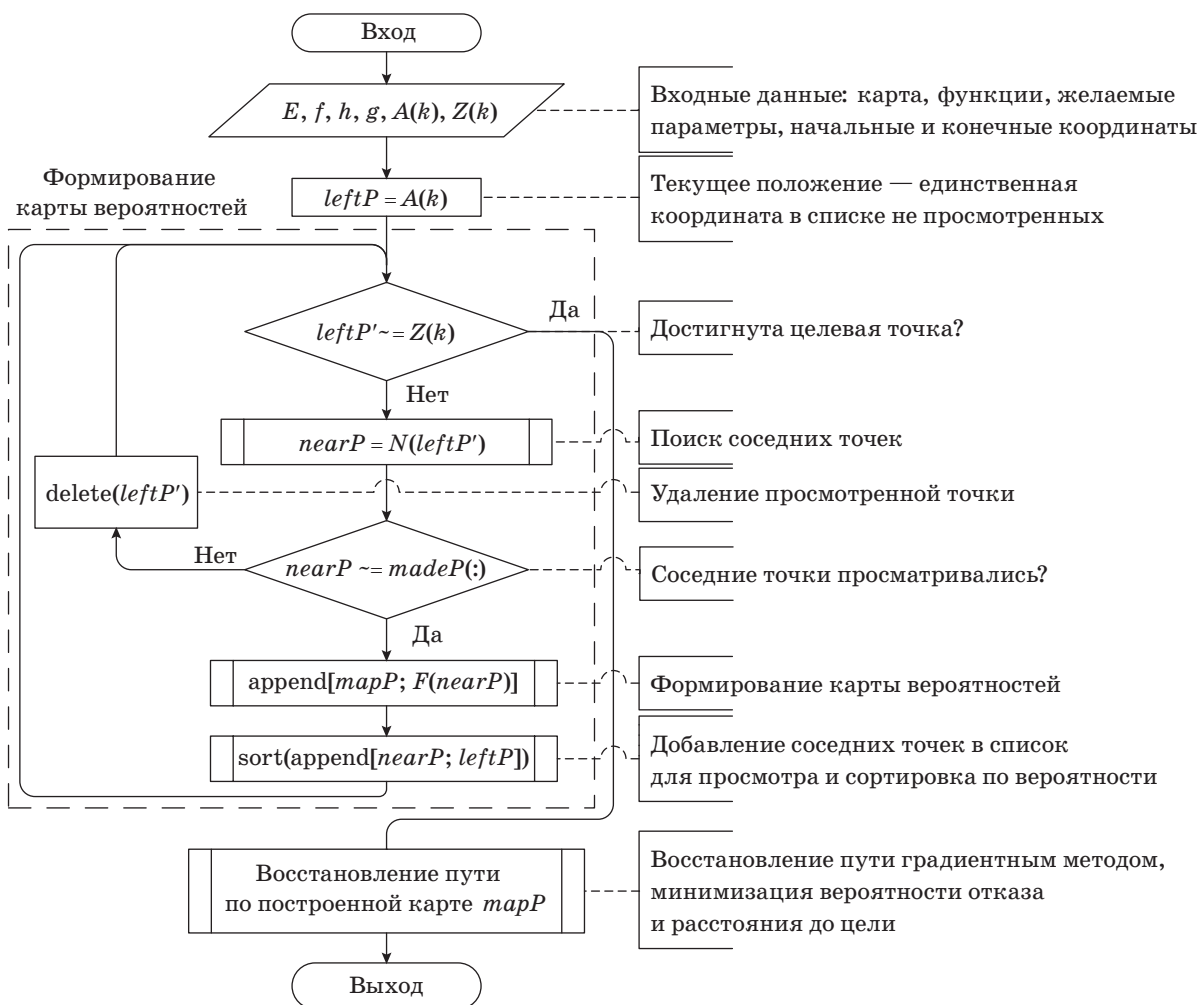
В основе алгоритма лежит минимизация вероятности отказа робота при переходах из одной дискретной точки в другую и минимизация геометрического расстояния, пройденного роботом.

Алгоритм поиска траектории на многослойной карте

Для решения поставленной задачи разработан алгоритм поиска траекторий на многослойной карте (рис. 1). Представленный алгоритм выполняется в два этапа: на первом формируется карта вероятностей, на втором строится траектория движения.

Формирование карты начинается с текущего положения объекта управления $A(k)$ в пространстве карты E , размеченной регулярной сеткой на каждом слое, которое записывается в вектор просматриваемых значений $leftP$. Далее анализируются соседние ячейки сетки $nearP$, если они еще не были просмотрены (вектор $madeP$). В найденных точках $nearP$ рассчитываются вероятности отказа оборудования, после чего точки добавляются в общую карту вероятностей $mapP$. Точки $nearP$ и $leftP$ объединяются в один список и сортируются по величине суммы вероятности отказа. Для следующих итераций берется точка с минимальной суммой. Итерации заканчиваются в момент достижения конечной точки $Z(k)$, так как сумма вероятностей отказов в ней будет минимальной, а переход из другого положения увеличит вероятность отказа.

Формируемая карта вероятности $mapP$ на начальном этапе состоит из запрещенных для про-



■ **Рис. 1.** Алгоритм формирования карты вероятностей отказа и поиска траекторий
 ■ **Fig. 1.** The algorithm for generating failure probability maps and path planning

хода значений, заменяемых в процессе выполнения первого этапа поисков на вычисленные с помощью выражения (1) значения, при этом итоговая карта $mapP$ не является многослойной.

На втором шаге используется стандартный метод градиентного спуска для поиска траекторий по минимальным значениям вероятности отказов, начиная с конечной точки.

Реализация алгоритма

Алгоритм реализован в пакете MatLab и встроен в модель системы планирования движения группы роботов как программная функция поиска траекторий движения робота из текущего положения в целевую точку `robot_search_multilayer_path`.

Входными данными являются координаты начальной и конечной точек движения, желаемые параметры оптимизации в виде вектор-столбца и пространство действия.

Выходными данными является траектория как последовательность точек перемещения робота.

Основной цикл функции работает до тех пор, пока не найдена конечная точка либо пока не кончатся не просмотренные точки на карте. В ходе его реализации из упорядоченной очереди $leftP$ берется координата с минимальной суммарной вероятностью отказа и расстоянием до конечной точки $leftP'$. Она имеет группу точек-соседей четырехсвязной области $nearP$. Каждая точка из $nearP$ проверяется на выход за пределы физических границ карты и принадлежность к стеку просмотренных точек $madeP$. Если точка проходит проверку, то вызывается подфункция расчета суммарного риска по слоям карты `robot_risk_fun`.

Риск рассчитывается в соответствии с формулой (1). Коэффициенты g_i задаются пользователем и являются входными данными для функции расчета риска. Реализация функции расстояния до цели $\rho = \sqrt{(e_{xyT} - e_{xyC})^2 + (e_{xyT} - e_{xyC})^2}$ использует оценку по прямой, где (e_{xyT}, e_{xyT}) — координаты текущего положения; (e_{xyC}, e_{xyC}) — координаты цели; $\sqrt{\quad}$ — операция взятия квадратного корня. Функция f реализована суммой произведения значений свойств слоев и коэффициентов g влияния на робота; h определяет функцию перевода физических характеристик слоя в функцию риска.

Сумма вычисленной функции `robot_risk_fun` для координат $nearP$ и значения $leftP'$ текущей точки добавляются в список $leftP$ в соответствии с сортировкой по возрастанию. Проверенная точка $leftP'$ добавляется в список $madeP$.

При попадании в целевую точку поиск завершается сформированной картой $mapP$, так как последнее выбранное значение имеет минимальную суммарную вероятность отказа для всей траектории. Для построения этой траектории на последнем этапе алгоритм возвращается по минимальным значениям вероятности от конечной точки к начальной, записывая последовательность точек перемещения.

Модель движения робота

Для тестирования алгоритма используется модель в системе MatLab, позволяющая симулировать движение группы роботов в пространстве с несколькими слоями. Модель содержит модули: отображения пространства движения объектов управления; генерации случайных и загрузки пользовательских карт; выбора постановок выполняемых задач; определения параметров и реализации взаимодействия среды и роботов; планирования операций роботов; разрешения коллизий траекторий; реализации динамических изменений среды.

На изображении интерфейса модели (рис. 2, а) указаны: слои свойств пространства движения группы роботов, положение роботов, грузов, целей и траектории движения из начальной точки в конечную при транспортировке груза для однородных и гетерогенных групп роботов. Дополнительно могут быть визуализированы слои карты, траектории, пространство состояний.

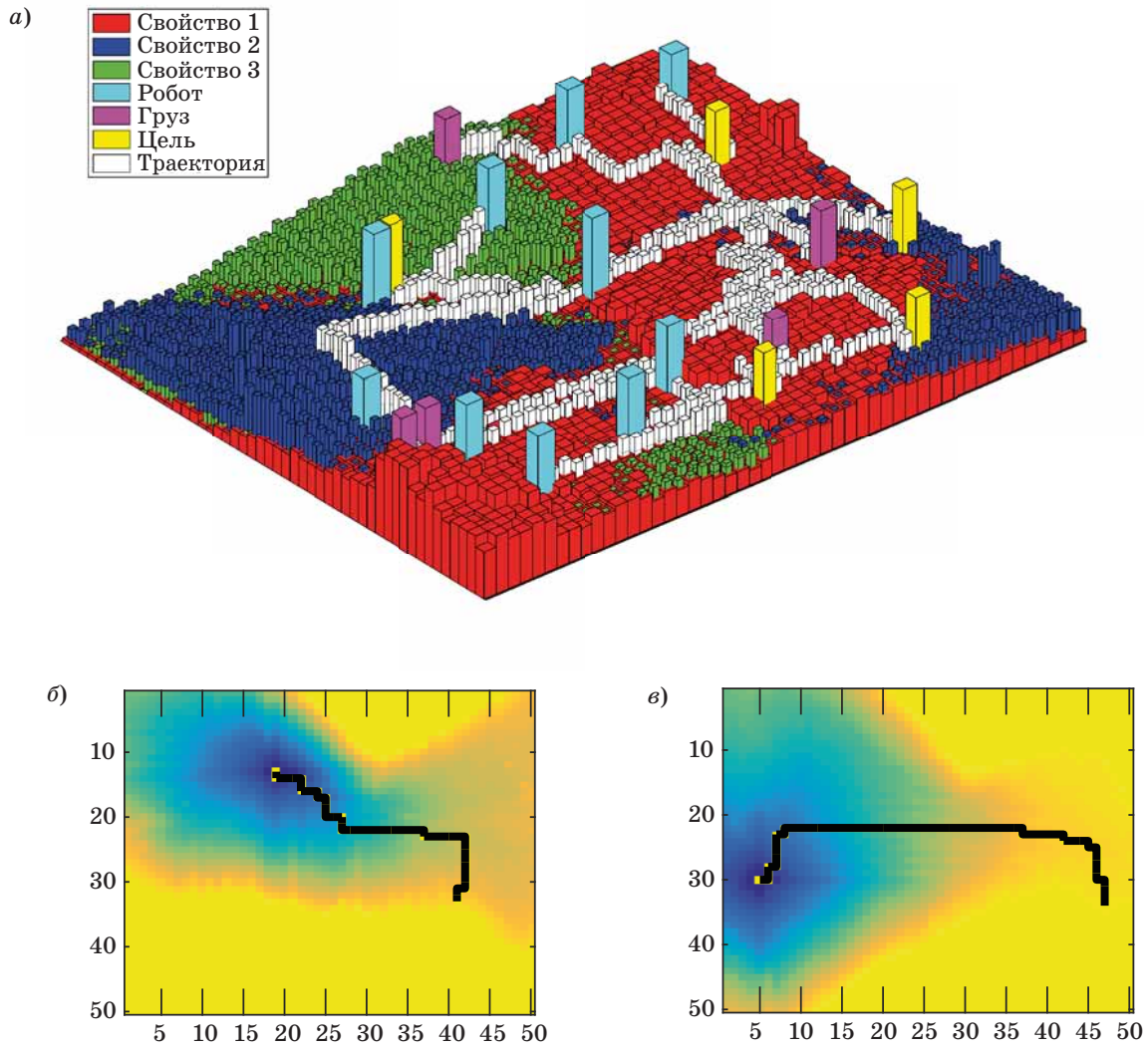
Построение траекторий осуществляется в соответствии с алгоритмом (см. рис. 1).

На рис. 2, а представлено решение транспортной задачи доставки грузов в целевые точки группой гетерогенных роботов, транспортеров и погрузчиков; на карте показано пересечение трех слоев пространства. На рис. 2, б и в продемонстрированы индивидуальные траектории роботов на картах вероятностей отказов, генерируемых в процессе поиска траектории.

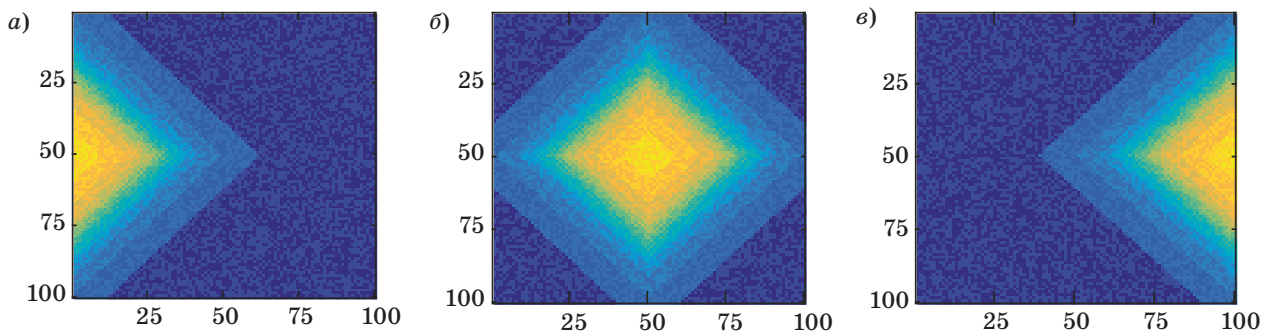
Моделирование

Для проверки работоспособности алгоритма реализована трехслойная карта (рис. 3, а–в). Каждый слой хранит характеристики среды, используемые для расчета коэффициентов риска по формуле (1).

Каждый слой карты представляет собой функцию с единственным максимумом, суммированную с функцией гауссова шума и отражающую значения свойства пространства движения. Слои смещают траекторию объекта управления с учетом коэффициентов влияния G .



■ **Рис. 2.** Представление среды в модели (а) и примеры отражения слоя вероятности отказа и построенной на нем траектории (б, в)
 ■ **Fig. 2.** Representation of the environment in the model (a) and examples of the failure probability layer and planned trajectory on it (б, в)



■ **Рис. 3.** Значения уровня свойств слоев. При построении траекторий слой смещает траекторию вправо (а); отталкивает от центра карты (б); смещает влево (в)
 ■ **Fig. 3.** Layer property level values. When constructing trajectories, the layer shifts the trajectory to the right (a); pushes away from the center of the map (б); shifts to the left (в)

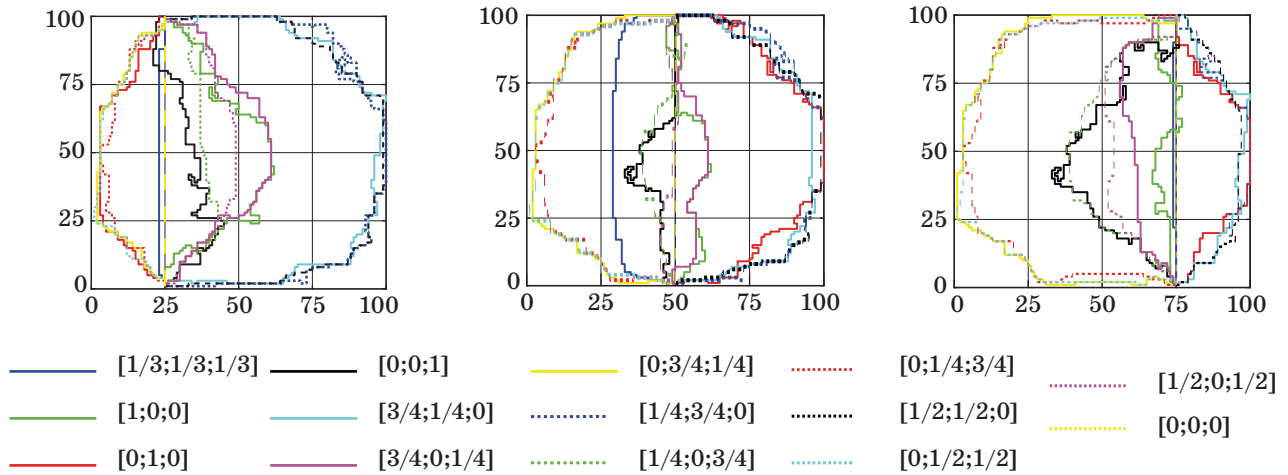
Результаты работы алгоритма построения траекторий для различных значений коэффициентов влияния слоев на роботов представлены на рис. 4. Различные траектории движения демонстрируют отклонения от кратчайшего расстояния, что подтверждает работоспособность предложенного алгоритма. Отклонение путей от идеальных прямых обусловлено добавлением аддитивного шума и коэффициентами влияния слоев, что полностью предсказывает предложенный алгоритм.

Коэффициенты G , помимо влияния слоев на отклонение траектории, также оказывают влияние на приоритетность критериев; например, на рис. 4 при случае $[0;0;0]$ траектория превращается в прямую. Если указать для модели дискретный слой, вероятность отказа на котором будет либо нулевой, либо бесконечной, то ал-

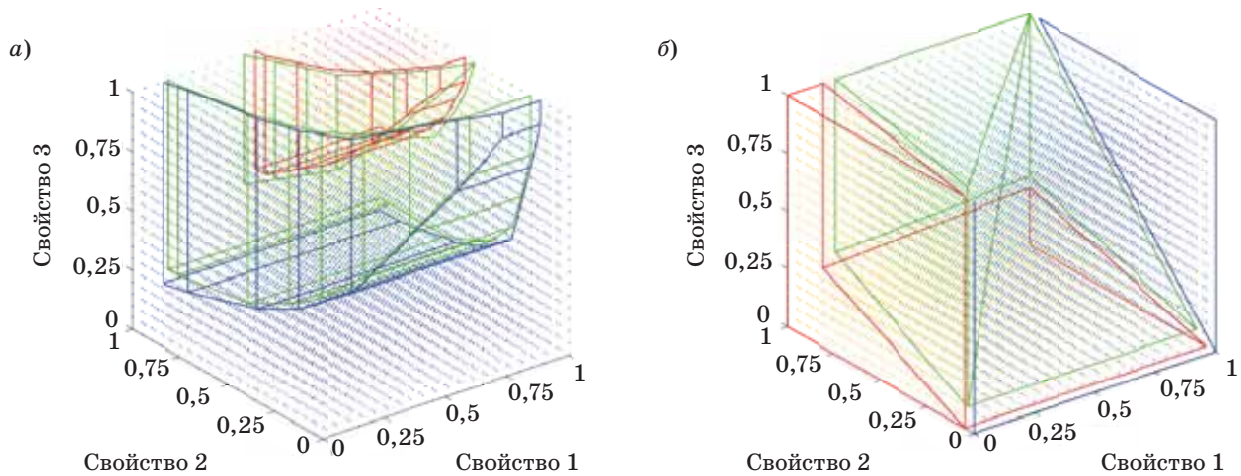
горитм будет работать по аналогии с алгоритмом A^* .

Множество построенных траекторий может быть отображено в виде пространства состояний. Пространство состояний для робота, траектории которого показаны на рис. 4 (в центре), представлены на рис. 5, где приняты следующие цветовые обозначения: красный цвет — высокие значения параметров (вероятности или длины), зеленый — средние, синий — малые. Стоит отметить, что изменения величин происходят плавно, а не скачкообразно, и границы областей являются условными.

На рис. 5, *a* отражена зависимость длины траектории от коэффициентов влияния свойства слоя на путь движения робота; большое влияние всех слоев пространства очевидно увеличивает вероятность отказа (область, ограниченная крас-



■ **Рис. 4.** Траектории движения робота при различных значениях G
 ■ **Fig. 4.** Robot' motion trajectories for different values of G



■ **Рис. 5.** Пространство состояний: *a* — вероятность; *б* — длина траектории
 ■ **Fig. 5.** State space: *a* — probability; *б* — trajectory length

ным цветом), но при снижении влияния хотя бы одного из слоев менее чем на 50 % (при 100%-м влиянии остальных) создаются условия, позволяющие строить траектории со средними и низкими вероятностями отказов. На рис. 5, б представлена вероятность достижения цели роботом. Можно заметить, что даже при максимальном влиянии свойств 1 и 3 траектории минимальны, как и вероятности; более того, длина траектории зависит в основном от свойства 2, что логично следует из рис. 3, б.

Заключение

В статье разработан и исследован алгоритм планирования траектории движения робота на многослойных картах. Встроенный в модель алгоритм может быть использован для планирования группового движения роботов.

Построены семейства траекторий при трех различных значениях начальных и целевых условий, демонстрирующие корректную работу алгоритмов и зависимость от значений свойств окружающего пространства и желаемых коэффициентов.

Построенное пространство состояний позволяет планировать движение робота при заданных условиях среды. Даны рекомендации по модификации параметров объекта управления для оптимизации времени выполнения задачи или вероятности выполнения поставленных перед системой задач.

В продолжение данной работы планируется модификация алгоритма для работы с пространством состояний и построения в нем траекторий в целях оптимизации параметров вероятности отказов и длин траекторий в динамически изменяемых средах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-29-04319.

Литература

1. Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein. Introduction to Algorithms. 3rd. — MIT Press, 2009. — 1313 p.
2. Eraghi N. O., López-Colino F., de Castro A., Garrido J. Path Length Comparison in Grid Maps of Planning Algorithms: HCTNav, A* and Dijkstra // Design of Circuits and Integrated Systems, Madrid, 2014. P. 1–6. doi:10.1109/DCIS.2014.7035557
3. Столяров А. А., Санников Е. В. Выбор эффективного алгоритма планирования для формирования информационной подсистемы движения мобильного робота // Universum: Технические науки: электрон. науч. журн. 2015. № 8-9(20). <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2586> (дата обращения: 28.04.2018).
4. Нейдорф Р. А., Полях В. В., Черногоров И. В., Ярахмедов О. Т. Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2016. № 3 (176). С. 127–143.
5. Lin M., Yuan K., Shi C., Wang Y. Path Planning of Mobile Robot based on Improved A* Algorithm // 2017 29th Chinese Control and Decision Conf. (CCDC), Chongqing, 2017. P. 3570–3576. doi:10.1109/CCDC.2017.7979125
6. Da K., Xiaoyu L., Bi Z. Variable-Step-Length A* Algorithm for Path Planning of Mobile Robot // 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Chongqing, 2017. P. 7129–7133. doi:10.1109/CCDC.2017.7978469
7. Cherni F., Boutereaa Y., Rekik C., Derbel N. Autonomous Mobile Robot Navigation Algorithm for Planning Collision-Free Path Designed in Dynamic Environments // 2015 9th Jordanian International Electrical and Electronics Engineering Conf. (JIEEEEC), Amman, 2015. P. 1–6. doi:10.1109/JIEEEEC.2015.7470747
8. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Синтез гибридных интеллектуальных алгоритмов планирования траектории // Фундаментальные исследования. 2015. № 12. Ч. 4. С. 676–681. <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39603> (дата обращения: 28.04.2018).
9. Моторин Д. Е., Попов С. Г., Курочкин Л. М. Алгоритм разрешения коллизий при планировании движения группы роботов в условиях пространственно-ситуационной неопределенности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 32–44. doi:10.18721/JCSTCS.10203
10. Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю. Эволюционные методы вычислений для синтеза управления группой роботов и поиска оптимальных траекторий их движения // Cloud of Science. 2017. Т. 4. № 3. С. 395–414.
11. Федоренко К. В., Оловянный А. Л. Исследование основных параметров генетического алгоритма применительно к задаче поиска оптимального маршрута // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 4. С. 714–723. doi:10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723
12. Ni J., Wang K., Huang H., Wu L., Luo C. Robot Path Planning based on an Improved Genetic Algorithm with Variable Length Chromosome // 2016 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), Changsha, 2016. P. 145–149. doi:10.1109/FSKD.2016.7603165
13. Li J., Huang Y., Xu Z., Wang J., Chen M. Path Planning of UAV based on Hierarchical Genetic Algo-

- rithm with Optimized Search Region // 2017 13th IEEE Intern. Conf. on Control & Automation (ICCA), Ohrid, 2017. P. 1033–1038. doi:10.1109/ICCA.2017.800320323
14. Schäfle T. R., Mohamed S., Uchiyama N., Sawodny O. Coverage Path Planning for Mobile Robots using Genetic Algorithm with Energy Optimization // 2016 International Electronics Symposium (IES), Denpasar, 2016. P. 99–104. doi:10.1109/ELECSYM.2016.7860983
 15. Ming K. Solving Path Planning Problem based on Ant Colony Algorithm // 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Chongqing, 2017. P. 5391–5395. doi:10.1109/CCDC.2017.7979455
 16. Ватугин Э. И., Титов В. С. Анализ результатов применения алгоритма муравьиной колонии в задаче поиска пути в графе при наличии ограничений // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2014. № 12 (161). С. 111–120.
 17. Мартынов А. В., Курейчик В. М. Гибридный алгоритм решения задачи коммивояжера // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2015. № 4 (165). С. 36–44.
 18. Zhang W., Gong X., Han G., Zhao Y. An Improved Ant Colony Algorithm for Path Planning in One Scenic Area With Many Spots // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 13260–13269. doi:10.1109/ACCESS.2017.2723892
 19. Uriol R., Moran A. Mobile Robot Path Planning in Complex Environments using Ant Colony Optimization Algorithm // 2017 3rd Intern. Conf. on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Nagoya, 2017. P. 15–21. doi:10.1109/ICCAR.2017.7942653
 20. Xiao S. Optimal Travel Path Planning and Real Time Forecast System based on Ant Colony Algorithm // 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conf. (IAEAC), Chongqing, 2017. P. 2223–2226. doi:10.1109/IAEAC.2017.8054413
 21. Lin T., Zhang K., Cui N., Tu Z., Zhang H. Path Planning of Aircraft based on Adaptive Multiobjective Estimation of Distribution Algorithm // 2016 IEEE Symp. Series on Computational Intelligence (SSCI), Athens, 2016. P. 1–8. doi:10.1109/SSCI.2016.7850199
 22. Tan J., Zhao L., Wang Y., Zhang Y., Li L. The 3D Path Planning based on A* Algorithm and Artificial Potential Field for the Rotary-Wing Flying Robot // 2016 8th Intern. Conf. on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), Hangzhou, 2016. P. 551–556. doi:10.1109/IHMSC.2016.155
 23. Song R., Liu W., Liu Y., Bucknall R. A Two-Layered Fast Marching Path Planning Algorithm for an Unmanned Surface Vehicle Operating in a Dynamic Environment // OCEANS 2015, Genova, Genoa, 2015. P. 1–8. doi:10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271405
 24. Chen H., Wang H., Jiang L. Path Planning of UAV based on Cultural Algorithm in Dynamic Environments // 2016 6th Intern. Conf. on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), Beijing, 2016. P. 130–134. doi:10.1109/ICEIEC.2016.7589704

UDC 519.876.5, 519.873, 004.023:896
doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.45

Multi-Criteria Path Planning Algorithm for a Robot on a Multilayer Map

Motorin D. E.^a, Post-Graduate Student, d.e.motorin@gmail.com

Popov S. G.^a, PhD, Tech., Associate Professor, popovserge@spbstu.ru

^aPeter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: A complex environment is characterized by the possibility to decompose the factors affecting the robot into independent layers. As the robot is moving in a complex environment, it is exposed to negative factors which affect its ability to achieve the goal. The problem arises how to choose the motion trajectory while minimizing the negative effects on the robot and the distance covered. **Purpose:** Developing and analyzing an algorithm for two-criteria optimization of robot motion trajectory, taking into account the desired criteria about the interaction with the environment and the trajectory length. **Results:** We have developed and implemented an algorithm for shortest path search on a map each layer of which displays a property of the space and allows you to take into account the interaction between the robot and the environment, as well as the distance covered. The algorithm implementation is incorporated into the robot group control model. To analyze the algorithm, test multilayer maps were used, with the addition of Gaussian noise. The simulation results are a set of trajectories reflecting the coefficients with which the space properties affect the robot when the initial and final positions on the map are given. A space of the robot motion states demonstrates how the influence of the environment properties on the robot depends on the trajectory length and on the failure risk throughout the path. **Practical relevance:** The developed algorithm can be applied in planning systems of individual or group motion of robots. The resulting state space reflects the ranges of effective characteristics of the robot when performing tasks in a given environment. As the next step, the developed algorithm will be applied to plan paths on multiscale maps, and sets of trajectories will be built in the state space of a group of robots.

Keywords — Trajectory Planning, Multilayer Maps, Control, Robot, State Space, Heuristic Algorithm, Realistic Environment.

Citation: Motorin D. E., Popov S. G. Multi-Criteria Path Planning Algorithm for a Robot on a Multilayer Map. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 45–53 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.45

References

1. Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein. *Introduction to Algorithms*. 3rd. MIT Press, 2009. 1313 p.
2. Eraghi N. O., López-Colino F., de Castro A., Garrido J. Path Length Comparison in Grid Maps of Planning Algorithms: HCTNav, A* and Dijkstra. *Design of Circuits and Integrated Systems*, Madrid, 2014, pp. 1–6. doi:10.1109/DCIS.2014.7035557
3. Stolyarov A. A., Sannikov E. V. Choice of Effective Planning Algorithm for Formation of Informative Subsystem of Mobile Robot Motion. *Universum: Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 8-9(20). Available at: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2586> (accessed 28 April 2018) (In Russian).
4. Neydorf R. A., Polyakh V. V., Chernogorov I. V., Yarakhmedov O. T. The Study of Heuristic Algorithms in the Tasks Strip, and Optimization of Routes in an Environment with Obstacles. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2016, no. 3 (176), pp. 127–143 (In Russian).
5. Lin M., Yuan K., Shi C., Wang Y. Path Planning of Mobile Robot based on Improved A* Algorithm. *2017 29th Chinese Control and Decision Conf. (CCDC)*, Chongqing, 2017, pp. 3570–3576. doi:10.1109/CCDC.2017.7979125
6. Da K., Xiaoyu L., Bi Z. Variable-Step-Length A* Algorithm for Path Planning of Mobile Robot. *2017 29th Chinese Control and Decision Conf. (CCDC)*, Chongqing, 2017, pp. 7129–7133. doi:10.1109/CCDC.2017.7978469
7. Cherni F., Boutereaa Y., Rekek C., Derbel N. Autonomous Mobile Robot Navigation Algorithm for Planning Collision-Free Path Designed in Dynamic Environments. *2015 9th Jordanian Intern. Electrical and Electronics Engineering Conf. (JIEEEEC)*, Amman, 2015, pp. 1–6. doi:10.1109/JIEEEEC.2015.7470747
8. Darintsev O. V., Migranov A. B. Synthesis of the Hybrid Intelligent Algorithm of Planning Path. *Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental Research]*, 2015, no. 12, part 4, pp. 676–681. Available at: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39603> (accessed 28 April 2018) (In Russian).
9. Motorin D. Ye., Popov S. G., Kurochkin L. M. An Algorithm for Collision Avoidance in Path Planning for a Group of Robots in a Spatio-Situational Indeterminacy. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekomunikatsii. Upravlenie [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology]*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 32–44 (In Russian). doi:10.18721/JCSTCS.10203
10. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. Evolutionary Computing Methods for Control Synthesis a Group of Robots and the Search for Optimal Trajectories of their Movement. *Cloud of Science*, 2017, vol. 4, no. 3, pp. 395–414 (In Russian).
11. Fedorenko K. V., Olovyannikov A. L. Research of the Main Parameters of the Genetic Algorithm for the Problem of Searching the Optimal Route. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 714–723 (In Russian). doi:10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723
12. Ni J., Wang K., Huang H., Wu L., Luo C. Robot Path Planning based on an Improved Genetic Algorithm with Variable Length Chromosome. *2016 12th Intern. Conf. on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*, Changsha, 2016, pp. 145–149. doi:10.1109/FSKD.2016.7603165
13. Li J., Huang Y., Xu Z., Wang J., Chen M. Path Planning of UAV based on Hierarchical Genetic Algorithm with Optimized Search Region. *2017 13th IEEE Intern. Conf. on Control & Automation (ICCA)*, Ohrid, 2017, pp. 1033–1038. doi:10.1109/ICCA.2017.800320323
14. Schäfle T. R., Mohamed S., Sawodny O. Coverage Path Planning for Mobile Robots using Genetic Algorithm with Energy Optimization. *2016 International Electronics Symposium (IES)*, Denpasar, 2016, pp. 99–104. doi:10.1109/ELECSYM.2016.7860983
15. Ming K. Solving Path Planning Problem based on Ant Colony Algorithm. *2017 29th Chinese Control And Decision Conf. (CCDC)*, Chongqing, 2017, pp. 5391–5395. doi:10.1109/CCDC.2017.7979455
16. Vatutin Je. I., Titov V. S. Analysis of the Results of Applying the Ant Colony Optimization Algorithm to the Shortest Path Problem in the Graphs with Constraints. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2014, no. 12 (161), pp. 111–120 (In Russian).
17. Martinov A. V., Kureichik V. M. Hybrid Approach for Travelling Salesman Problem. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2015, no. 4 (165), pp. 36–44 (In Russian).
18. Zhang W., Gong X., Han G., Zhao Y. An Improved Ant Colony Algorithm for Path Planning in One Scenic Area with Many Spots. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 13260–13269. doi:10.1109/ACCESS.2017.2723892
19. Uriol R., Moran A. Mobile Robot Path Planning in Complex Environments using Ant Colony Optimization Algorithm. *2017 3rd Intern. Conf. on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, Nagoya, 2017, pp. 15–21. doi:10.1109/ICCAR.2017.7942653
20. Xiao S. Optimal Travel Path Planning and Real Time Forecast System based on Ant Colony Algorithm. *2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conf. (IAEAC)*, Chongqing, 2017, pp. 2223–2226. doi:10.1109/IAEAC.2017.8054413
21. Lin T., Zhang K., Cui N., Tu Z., Zhang H. Path Planning of Aircraft based on Adaptive Multiobjective Estimation of Distribution Algorithm. *2016 IEEE Symp. Series on Computational Intelligence (SSCI)*, Athens, 2016, pp. 1–8. doi:10.1109/SSCI.2016.7850199
22. Tan J., Zhao L., Wang Y., Zhang Y., Li L. The 3D Path Planning based on A* Algorithm and Artificial Potential Field for the Rotary-Wing Flying Robot. *2016 8th Intern. Conf. on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, Hangzhou, 2016, pp. 551–556. doi:10.1109/IHMSC.2016.155
23. Song R., Liu W., Liu Y., Bucknall R. A Two-Layered Fast Marching Path Planning Algorithm for an Unmanned Surface Vehicle Operating in a Dynamic Environment. *OCEANS 2015*, Genova, Genoa, 2015, pp. 1–8. doi:10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271405
24. Chen H., Wang H., Jiang L. Path Planning of UAV based on Cultural Algorithm in Dynamic Environments. *2016 6th Intern. Conf. on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, Beijing, 2016, pp. 130–134. doi:10.1109/ICEIEC.2016.7589704