

27. *Belov B.P., Korotitskiy E.V., Semenov N.N., Setin A.I. Informationsionnoe obespechenie robotov dlya vypolneniya razlichnykh missiy [Information support of robots for various missions], International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2017, October 9-11, 2017, Saint-Petersburg, Russia.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.С. Малышкин.

Мартьянова Любовь Александровна – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30; тел.: +79219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Карсаев Олег Владиславович – СПИИРАН; e-mail: karsaev@ips-logistic.com; 199178, Санкт-Петербург, В.О., 14 линия, 39; тел.: +79119095270; к.т.н.; с.н.с.

Martynova Liubov Alexandrovna – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; 197046, Saint-Petersburg, Malaja Posadskaja street, 30; phone:+79219411395; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

Karsaev Oleg Vladislavovich – SPIIRAS; e-mail: karsaev@ips-logistic.com; 199178, V.O., 14 liniya, 39; phone: +79119095270; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 681.5+008.8

А.Г. Курочкин, А.В. Гривачев, В.В. Варганов, Е.А. Титенко

АППАРАТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНОГО ПОДВИЖНОГО РОБОТА

Цель исследования состоит в повышении эффективности планирования маршрута для наземного подвижного робота. Повышение эффективности достигается за счет получения на матрице местности дополнительной информации. Эта информация имеет глобальный характер. Она формируется на основе аппаратно реализуемых логических операций конъюнкции или дизъюнкции. Статусы проходимости ячеек матрицы являются входными данными для данных логических операций, которые могут вычисляться параллельно. В работе рассмотрены ограничения классического метода и алгоритма А-звездочка. Согласно методу, местность описывается как матрица с проходимыми или непроходимыми ячейками. Показано, что бинарное описание препятствий не всегда является достаточным для рационального планирования маршрута. Для расширения возможностей подвижного робота статус проходимости ячейки описывается многозначным образом: непроходимая ячейка, свободная ячейка матрицы, частично проходимая ячейка. Такая модификация позволяет при наличии коридора или прохода в протяженном объекте-препятствии строить более короткий по длине маршрут. Следующей задачей исследования является модификация алгоритма А-звездочка. Сущность модификации состоит в использовании объективной дополнительной информации об особенностях исходной матрицы ячеек. Эта информация представляется двоичными флагами. Они обозначают свободные от препятствий строки и столбцы матрицы. Модификация позволяет строить маршруты, включающие прямолинейные участки из свободных ячеек. Главная особенность данного метода заключается в использовании побитовых логических операций над значениями ячеек. Дополнительная информация имеет глобальный характер, она применима независимо от исходной позиции подвижного робота, целевой позиции, процента непроходимых ячеек в матрице. Моделирование фигур препятствий (спираль, коши, лестница) на наиболее трудных для планирования маршрутах показало, что использование двоичных флагов свободных строк или столбцов позволяет строить прямолинейные маршруты и двигаться по ним с максимальной скоростью. Также научная новизна модифицированного метода планирования маршрута определяется возможностью выходить из тупиковой ячейки по ранее проложенной траектории. Эта особенность позволяет сократить время планирования маршрута.

Подвижный робот; планирование маршрута; эвристика; логические операции; матрица ячеек; препятствия.

A.G. Kurochkin, A.V. Grivachev, V.V. Varganov, E.A. Titenko

HARDWARE METHOD OF PLANNING THE MOVEMENT OF A GROUND MOBILE ROBOT

The aim of the study is to improve the efficiency of route planning for a ground mobile robot. Increase in efficiency is achieved by obtaining additional information on the matrix of the terrain. This information is of a global nature. It is formed on the basis of hardware-implemented logical operations of conjunction or disjunction. The patency states of the matrix cells are input data for the logical operations data, which can be calculated in parallel. The limitations of the classical method and the A-star algorithm are considered. According to the method, the terrain is described as a matrix with passable or impassable cells. It is shown that a binary description of obstacles is not always sufficient for rational route planning. To expand the capabilities of the mobile robot, the patency status of a cell is described in many ways: an impenetrable cell, a free matrix cell, and a partially passable cell. Such a modification allows, in the presence of a corridor or a passage in an extended object-obstacle, to build a shorter route along the length. The next research task is the modification of the A-star algorithm. The essence of the modification consists in using objective additional information about the features of the original matrix of cells. This information is represented by binary flags. They denote obstacle-free rows and columns of the matrix. Modification allows you to build routes that include straight sections from free cells. The main feature of this method is the use of bitwise logical operations on the values of cells. The additional information is global, it is applicable regardless of the starting position of the mobile robot, the target position, the percentage of impassable cells in the matrix. Simulation of obstacle patterns (spiral, ladle, ladder) on the most difficult for planning routes showed that the use of binary flags of free rows or columns allows to build straight lines and move along them with maximum speed. Also, the scientific novelty of the modified route planning method is determined by the ability to leave the dead-end cell along the previously trajectory. This feature reduces planning time for the route.

Mobile robot; route planning; heuristics; logical operations; matrix of cells; obstacles.

Актуальность. Современный этап создания робототехнических комплексов (РТК) [1, 2], в том числе двойного применения [3], связывается с созданием интеллектуальных систем управления (СУ) [4], осуществляющих функции контроля и координации действий РТК по достижению цели с рациональным расходом ресурса. Планирование и контроль движения РТК по маршруту является важнейшим видом работы [5, 6]. В связи с этим создание СУ сопровождается существенной долей автоматизации истинно человеческих функций по взаимодействию с окружающим миром: системы технического зрения (СТЗ) для задач распознавания объектов внешней среды, бортовой экспертной системы планирования действий и др. [7–10].

Успехи современной робототехники [11–13], вычислительной техники (ВТ) [14], геоинформационных систем (ГИС), бионики, систем управления вывели на передовой уровень проблематику создания автономно действующих наземных РТК. С вычислительной точки зрения автономная машина представляется многофункциональным исполнителем, имеющим память (программу) действий и осуществляющим целевые перемещения и работы в процессе движения [15–17]. Технические средства сбора, обработки и представления информации о состоянии объектов внешней среды являются важнейшей основой успешного движения автономного РТК [18].

С системной точки зрения предметом рассмотрения является объект «РТК - Внешняя среда» [18–21]. Наличие дополнительной информации, полученной средствами «очувствления» робота, о состоянии участков местности, их проходимости, размещении объектов на карте местности позволяет разрабатывать модели, мето-

ды и алгоритмы управления движением РТК в динамично меняющейся обстановке. Вместе с тем, ограниченность возможностей СТЗ, объективная неопределенность о положении динамичных объектов, неизвестность статуса проходимости участков местности и др. не позволяют считать данную задачу полностью решенной, что определяет актуальность исследования.

Постановка и формализация задачи. Задача автономного перемещения подвижного робота с учетом картографической привязки исходной позиции, главной цели, потенциальных препятствий является классической оптимизационной задачей. Успех решения данной задачи определяется рядом условий [5]:

- ◆ трактовка внешней среды как замкнутой дискретной системы, значения ячеек которой заранее известны, но доступны только в рамках возможностей средств очувствления (СТЗ), т.е. ограниченно доступны подвижному роботу;
- ◆ ограничение вычислительных возможностей и ресурсов памяти для бортовой СУ.

В этих условиях для планирования и коррекции маршрута в реальном масштабе времени необходимы аппаратно-ориентированные решения оценки местности и планирования маршрута, основанные на глобальных характеристиках данных и параллельных (преимущественно побитовых) операциях над однородными данными.

Разработка аппаратно-ориентированного метода планирования маршрута. Для построения маршрута используется сеточный подход представления цифровой карты местности (ЦКМ), при котором векторная карта разбивается сеткой с шагом Δ_x , Δ_y на ячейки, образуя матрицу ячеек $M=\{m_{ij}\}$. В дальнейшем построение маршрута – это определение координат центров ячеек (точек), через которые пройдет маршрут.

Типовая исходная ситуация для организации поиска маршрута имеет вид, приведенный на рис. 1. В исходной ситуации считаются заданными координаты робота (зеленая ячейка), цели Goal (красная ячейка), и координаты препятствий, имеющих произвольную геометрию (серые ячейки).

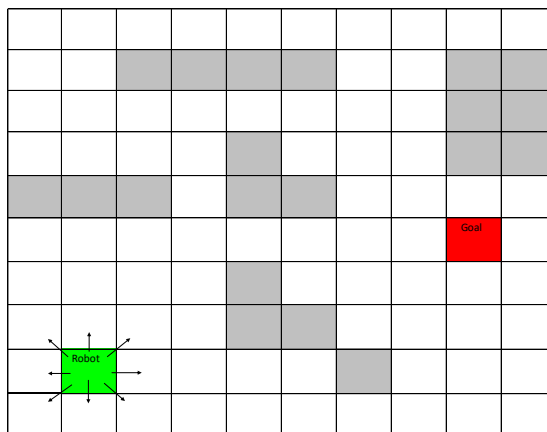


Рис. 1. Типовая исходная ситуация для планирования маршрута

Задача поиска в пространстве ячеек с анализом 8-связанной окрестности описывается пятеркой вида

$$\langle (ij)_R, (i+k1, j+k2)_{GOAL}, (P_1 - P_{8(16)}, Matrix, Limit) \rangle, \quad (1)$$

где $(ij)_R$ – исходная ячейка с роботом Robot в координатах (ij) , $(i+k1,j+k2)_{GOAL}$ – целевая ячейка с координатами $(i+k1,j+k2)$; P_1-P_8 – 8-связные правила анализа окрестных ячеек относительно исходной; *Matrix* – матрица ячеек, включая целевую ячейку; *Limit* – целевая функция оценки расстояния.

В работе в качестве базовых метода и алгоритма поиска выбраны метод и алгоритм A^* – (А-звездочка). Организация поиска сводится на текущем шаге цикла перебора ячеек матрицы M к выбору следующей ячейки, имеющей минимум целевой функции – комплексной оценки расстояния. Каждая ячейка m_{ij} ($m_{ij} \in M$) имеет 8 соседей (ближайшая окрестность). При этом подвижный робот может перемещаться как по горизонтали/вертикали, так и по диагонали ячеек матрицы, ячеек $M=\{m_{ij}\}$. Направление перемещения робота между клетками оценивается на каждом шаге как минимизация функции целевой функции расстояния *Limit*

$$Limit = G + H \rightarrow \min, \quad (2)$$

где G – длина пройденного пути, вычисляемая как $G_{k+1} = G_k + L_{ij}$; H – эвристическая оценка длины пути, оставшегося до цели H .

Сущность алгоритма A^* заключается в выполнении следующих шагов:

- 1) текущая ячейка (вначале это ячейка с исходной позицией робота) заносится в список закрытых вершин (для исключения повторных обращений к ней);
 - 2) для m_{ij} генерируются координаты 8-ми соседних ячеек, выполняется проверка выхода за границы ЦКМ;
 - 3) проверяются биты статуса ячеек по проходимости: если status=busy, то такие ячейки заносятся в Список закрытых вершин;
 - 4) выделенные свободные ячейки относительно текущей m_i заносятся во Временный открытый список;
 - 5) выполняется расчет расстояний G , H и суммарного расстояния F для всех ячеек из Временного списка;
 - 6) ячейки из Временного открытого списка заносятся в Главный открытый список;
 - 7) если новая ячейка уже есть в Главном открытом списке, то проверяется суммарная стоимость расстояния через эту ячейку. Если $F_{new} > F_{old}$, то переход на п.8. Если же $F_{new} \leq F_{old}$, то смена текущей ячейки на новую ячейку из Главного списка и переход на п.1;
 - 8) сортировка Главного списка открытых вершин по минимальному расстоянию F и выбор ячейки (координат) как минимума;
 - 9) если сортированный Главный списка открытых вершин содержит более 1-й ячейки с минимальным расстоянием, то выбор родительской ячейки – по правилу первой ячейки с большим индексом столбца (движение вправо), затем с большим индексом строки (вверх);
 - 10) первая ячейка из сортированного Главного списка открытых вершин помечается как родительская, переход на п.1;
 - 11) останов алгоритма поиска в случаях:
 - ◆ в Главный список открытых вершин добавлена целевая ячейка (путь найден),
 - ◆ Главный список открытых вершин пуст (путь не найден);
 - 12) обратным перемещением от цели к исходной ячейке восстанавливаем родительские ячейки, координаты которых являются маршрутом движения робота.
- Тем не менее стандартный алгоритм A^* не исключает неопределенность выбора следующей ячейки. В п.9 применяется директивное правило выбора, не связанное ни с состоянием ячеек исходной матрицы, ни с координатами робота и цели. По сути A^* становится «слепым», что порождает непродуктивные затраты времени. Другой недостаток A^* – отсутствие возвратного движения по графу.

Для повышения обоснованности принимаемых решений в классический алгоритм поиска A^* вносятся изменения с оценкой статуса проходимости ячеек и их количественных значений.

При стандартном подходе ячейкам матрицы местности соответствует бинарная карта проходимости, где ij -й бит соответствует ij -й ячейке матрицы. В результате на текущем шаге анализа соседних потомков ij -й ячейке матрицы учитывается статус ячейки $status_{ij}$

$$status_{ij} = \begin{cases} 0, (free) & ij - \text{ая ячейка проходимая} \\ 1, (busy) & ij - \text{ая ячейка непроходимая} \end{cases} \quad (3)$$

Использование двоичного статуса ячеек является грубой оценкой местности по проходимости, так как РТК характеризуется своим уровнем прочности и проходимости (*hardness*), измеряемым в шкале больше, чем бинарная (например, четверичная). Предлагается расширить значения статуса проходимости ячеек с учетом особенностей гидрографии местности, (болота, песчаные участки, ледяная корка и др.), и негативного влияния внешней среды на движение РТК (задымленные сектора, туман, пылевая буря и др.). Соответственно проходимость роботом ij -й ячейки возможна при выполнении условия

$$hardness - status_{ij} = h \rightarrow max, \quad (4)$$

где h – порог проходимости ячейки.

Введение условия (4) позволяет роботу расширить область допустимых значений при анализе соседних ячеек и подстраивать маршрут под особенности местности. Другими словами, робот получает большее число альтернативных траекторий для следующего шага. Эту возможность расширения поиска можно считать элементом интеллектуализации эвристического алгоритма.

Несмотря на введение эвристической функции оценки расстояния по (2) и порога проходимости ячеек по (4), A^* характеризуется неопределенностью выбора следующей ячейки при равных значениях суммарной функции расстояний. Дело в том, что матричная структура достаточно адекватна для движения робота на плоскости, но она не задает топологического разнообразия ячеек матрицы $M=\{m_{ij}\}$ исходя из дополнительной информации глобального характера.

В связи с этим предлагается ввести объективную дополнительную информацию об особенностях исходной ЦКМ. Эта информация представляется двоичными флагами, обозначающими свободные от препятствий строки и столбцы матрицы (рис. 2).

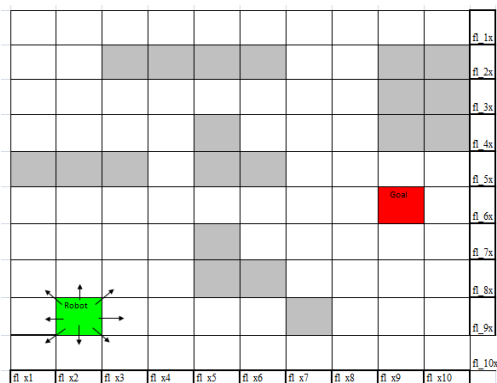


Рис. 2. Исходная ситуация для планирования маршрута, расширенная флагами

Глобальный характер свойств столбцов и строк заключается в побитовой реализации операции конъюнкции или дизъюнкции над битами, обозначающими статус ячеек.

Для квадратной матрицы $n \times n$ дополнительно вводятся строка флагов и столбец флагов $fl_{x1} - fl_{xn}$ и $fl_{1x} - fl_{nx}$ соответственно. Каждый бит флага информирует робота о том, что соответствующий столбец/строка свободные или занятые.

$$\forall k | fl_{xk} = \begin{cases} 1, & \text{если } \&_{j=1}^n (status(m_{xj}) = free), \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\forall k | fl_{kx} = \begin{cases} 1, & \text{если } \&_{j=1}^n (status(m_{jx}) = free), \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (6)$$

где k – индекс ячейки в строке или столбце ($k=1 - n$).

В результате при выполнении проверок на выбор следующей ячейки вводится дополнительный шаг приоритетного выбора по (5) и (6) такой следующей ячейки, которая входит в свободную строку или столбец. Движение по свободной строке или столбцу возможно в бессеточном представлении местности, т.е. на длительной дистанции с максимальной скоростью.

Таким образом, на основе A^* разработан аппаратно-ориентированный метод планирования маршрута, включающий этапы:

- а) подготовки расширенной матрицы ячеек, содержащей не только информацию о препятствиях на местности, но и дополнительные строку и столбец, каждый бит которых содержит информацию о наличии свободного столбца или строки в исходной матрице;
- б) расширенной проверки статуса ячеек, соседних с текущей на проходимость по картограмме проходимости;
- в) дополнительной проверки подмножества ячеек с минимальным расстоянием по строке-флагу и столбцу-флагу и выборе такой следующей ячейки, которая имеет минимальное расстояние до ближайшей свободной строки или столбца в матрице ячеек;
- г) дополнительной проверки расширенной окрестности ячеек с целью упреждающего обнаружения тупиковых областей ячеек.

В рамках аппаратно-ориентированного метода планирования маршрута вводится дополнительная функция оценки маршрута – максимизация скорости движения на отдельном его участке

$$\forall q (V|_{Gq}) \rightarrow \max, \quad (7)$$

где V – скорость робота на q -м участке маршрута, $q=1 - E$.

Апробация аппаратно-ориентированного метода планирования движения. При наличии большого количества свободных строк и столбцов в матрице $M=\{m_{ij}\}$ предлагаемый метод не будет иметь приоритетов для обоснованного выбора следующей ячейки. Тем не менее, по мере увеличения на матрице объектов-препятствий (серый ячейки) эффективность разработанного аппаратно-ориентированного метода планирования движения будет увеличиваться, так как ограниченное число свободных строк или столбцов позволит выполнить на шаге 9 обоснованный выбор и в дальнейшем двигаться с максимально возможной скоростью по прямолинейному участку.

Эффективность предлагаемого метода во многом определяется не столько количественными (процент заполнения матрицы непроходимыми ячейками), сколько структурными свойствами расположения непроходимых ячеек в матрице.

В качестве тестовых примеров выбраны матрицы с таким структурным расположением непроходимых ячеек, при котором классический и модифицированный (аппаратно-ориентированный) метод и алгоритм находятся в невыгодном положении, что определяет алгоритму осуществлять выбор или направленный перебор альтернатив соответственно.

На рис. 3 показаны различные результаты поиска по двум алгоритмам для фигуры препятствия – «ковш». Она выбрана как наиболее трудная фигура, имеющая локальные и глобальные тупиковые точки вне зоны оперативного средств «очувствления» робота и анализа текущей обстановки. Кроме того, исходная позиция подвижного робота задана на границе «ковша», что предопределяет поиск в область локальных и глобальных тупиковых ячеек внутри «ковша».

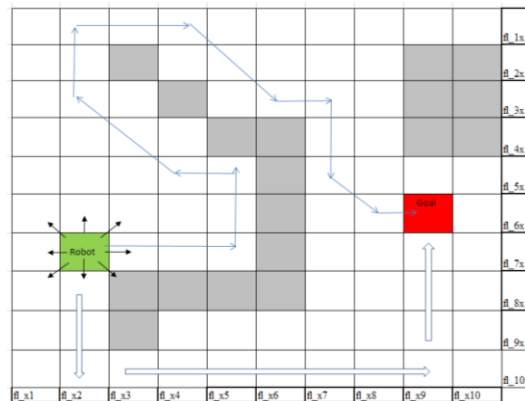


Рис. 3. Маршруты поиска по классическому и модифицированному алгоритму A^* для фигуры «ковш»

По классическому алгоритму поиск показан тонкими линиями. По модифицированному алгоритму маршрут отражен фигурными стрелками. Он состоит их 3-х прямолинейных участков и является более коротким по длине. Возможность обхода тупиковых ячеек связывается с градиентом поиска, направленным на свободные области в обход «ковша».

Формально классический A^* выбирает по градиенту – движение вправо, а при достижении тупика – движение вверх. В результате неудачной стартовой эвристики A^* начинает по контуру обходить препятствие по его наибольшей стороне. В итоге A^* строит маршрут из 19 ячеек при расстоянии Манхэттена до цели – 8 ячеек. Можно количественно оценить эффективность планирования как $(8/19) \cdot 100 \% = 42 \%$.

Используя дополнительную информацию о наличии свободных строк и столбцов, модифицированный A^* осуществляет движение к ближайшей свободной строке и далее по градиенту цели осуществляет ортогональное движение в нужную ячейку, построив маршрут из 13 ячеек. Можно количественно оценить эффективность планирования по модифицированному A^* как $(8/13) \cdot 100 \% = 61,5 \%$

Далее на рис. 4 показано сравнение стандартного и разработанного модифицированных алгоритмов A^* для планирования маршрута при невозможности обхода «ковша» снизу в матрице ячеек.

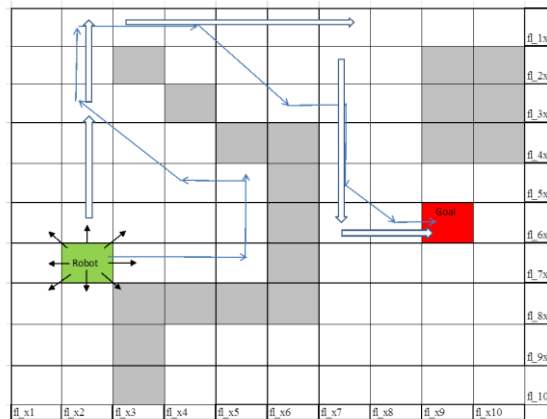


Рис. 4. Маршруты поиска по классическому и модифицированному алгоритму A^* для фигуры «ковш с ручкой»

Классический A^* также строит маршрут из 19 ячеек при расстоянии Манхэттена до цели – 8 ячеек. Можно количественно оценить эффективность планирования как $(8/19)*100\% = 42\%$. Модифицированный A^* осуществляет движение к ближайшей свободной строке и далее по градиенту цели осуществляет ортогональное движение в целевую ячейку за 18 шагов. Можно количественно оценить эффективность планирования по модифицированному алгоритму A^* как $(8/18)*100\% = 45\%$

На рис. 5 результаты планирования маршрута классическим и модифицированным методами на «лестничной» фигуре препятствий.

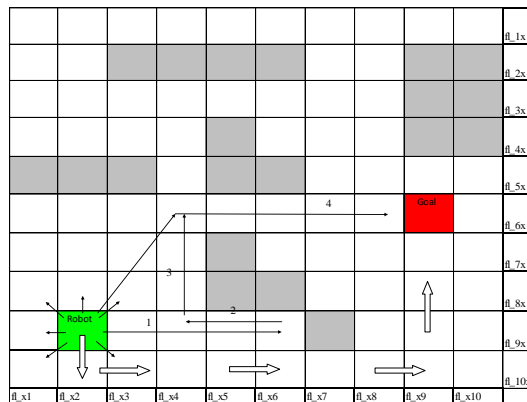


Рис. 5. Маршруты поиска по классическому и модифицированному алгоритму A^* для фигуры «лестница»

По классическому алгоритму A^* поиск показан тонкими линиями. Модифицированный алгоритм отражен фигурными стрелками. В ситуации неопределенности робот среди равных альтернатив может выбрать ячейку по диагонали вверх-вправо или ячейку вправо. В первом случае маршрут робота будет наименьшим и равным 8-ми клеткам матрицы. Во втором случае робот выполнит прямые и возвратные движения (показаны участки 1-2-3-4), ведущие к цели, пройдя 14 клеток. По модифицированному методу робот, пройдя 11 клеток, двигаясь к цели с максимальной скоростью, так как найденные свободные участки – прямолинейные и на них гарантированно нет препятствий.

Соответственно эффективность поиска при расстоянии Манхэттена, равном 10, составит:

- ◆ классический метод $(10/14) \cdot 100 \% = 71 \%$;
- ◆ модифицированный метод $(10/11) \cdot 100 \% = 91 \%$.

Заключение. На основе эвристического метода и алгоритма А-звездочка и систематического алгоритма поиска в глубину синтезирован аппаратно-ориентированный метод планирования маршрута, объединяющие положительные свойства двух типов алгоритмов. Сущность модификации сводится к подготовке расширенной матрицы ячеек и выполнении дополнительного шага приоритетного выбора такой следующей ячейки, которая входит в свободную строку или столбец, что позволяет двигать роботу на длительной дистанции без препятствий с максимальной скоростью. Научная новизна модифицированного метода планирования маршрута определяется также возможностью выходить из тупика по ранее проложенной траектории, что позволяет вернуться в точку ветвления по пройденному пути без риска встречи с препятствием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каляев И.А., Гайдук А.Р.* Однородные нейроразнообразные структуры в системах выбора действий интеллектуальных роботов. – М.: Янус-К. 2000. – 280 с.
2. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
3. *Курочкин А.Г.* Метод и алгоритмическая схема модели ситуации «боевые интеллектуальные роботы – внешняя среда» // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: Сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2015. – С. 203-205.
4. *Титенко Е.А., Мирталибов Т.А., Фролов С.Н., Ханис А.Л.* Многоагентные системы в технической диагностике сложных технических объектов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2015. – Т. 1, № 3 (60). – С. 18-25.
5. *Лоторев П.В., Курочкин А.Г., Гривачев А.В.* Математическая модель динамической коррекции маршрута подвижного робота // Научные технологии. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 21-25.
6. *Piper J.E., Commander K.W., Thorsos E.I., and Williams K.L.* Detection of buried targets using a synthetic aperture sonar // IEEE Journal of oceanic engineering. – 2002. – Vol. 27, No. 3. – P. 495-504.
7. *Пищухов В.Х., Корнеев И.Г.* Структурно-алгоритмическая реализация комбинированной системы управления движением интеллектуальных мобильных роботов в экстремальных средах // Известия ТРТУ. – 2004. – № 3. – С. 191-196.
8. *Курочкин А.Г., Емельянов С.Г., Титенко Е.А.* Анализ алгоритмов поиска по образцу для управления группой роботов // Научные технологии. – 2014. – Т. 15, № 12. – С. 4-8.
9. *Титенко Е.А., Курочкин А.Г., Гривачев А.В.* Модифицированный метод и алгоритм планирования маршрута для безэкипажных машин // Десятая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – С. 87-89.
10. *Hornfeld W., Baunsgaard J.P.* C-systems-concept for a modular AUV family // Proc. of the 13th Int. Sympos. on unmanned untethered submersible technology. AUSI, USA, 2003.
11. *Казаков К.А., Семенов В.А.* Обзор современных методов планирования движения // Труды ИСП РАН. – 2016. – Т. 28. – Вып. 4. – С. 241-296.
12. *Пищухов В.Х.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 183 с.
13. *Пищухов В.Х., Медведев М.Ю.* Оценивание и управление в сложных динамических системах. – М.: Физматлит, 2009. – 294 с.
14. *Титенко Е.А., Атакищев О.И., Зерин И.С.* Метод, алгоритм и техническое решение параллельного поиска и подстановки на ассоциативной памяти // В мире научных открытий. Математика. Механика. Информатика. – 2012. – № 1. – С. 166-180.

15. *Clem T.R. and Lopes J.L.* Progress in the development of buried mine hunting systems // Proc. of oceans-2003 // MTS / IEEE. San-Diego, Sept. 22-26. San- Diego, 2003. – P. 500-511.
16. *Курочкин А.Г., Емельянов С.Г., Бородин М.В.* Продукционная модель для координации бесконфликтного расположения группы автономных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2015. – Т. 13, № 6. – С. 10-14.
17. *Гривачев А.В.* Математическая модель описания предметной области управления группой роботов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: Сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2015. – С. 105-107.
18. *Casbeer D.W.* Forest fire monitoring with multiple small UAVs // Proceedings of the 2005 American Control Conference. – 2005. – P. 3530-3535.
19. *Spry S.C., Girard A.R., Hedrick J.K.* Convoy Protection using Multiple Unmanned Aerial Vehicles: Organization and Coordination // Proc. of the 24th American Control Conference, Portland, OR., June 2005.
20. *Tonetti S., Hehn M., Lupashin S., D'Andrea R.* Distributed control of antenna array with formation of UAVs // In World Congress. – 2011, August. – Vol. 18, No. 1. – P. 7848-7853.
21. *Chung J.* Cooperative Control of UAVs Using a Single Master Subsystem for Multi-task Multi-target Operations // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – Vol. 345. – P. 193-212.

REFERENCES

1. *Kalyaev I.A., Gayduk A.R.* Odnorodnye neyropodobnye struktury v sistemakh vybora deystviy intellektual'nykh robotov [Homogeneous neural structure in the systems of selection of actions of intelligent robots]. Moscow: Yanus-K. 2000, 280 p.
2. *Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.* Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 280 p.
3. *Kurochkin A.G.* Metod i algoritmicheskaya skhema modeli situatsii «boevye intellektual'nye roboty – vneshnyaya sreda» [Method and algorithmic diagram of the situation model "combat intelligent robots – external environment"], *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazheniy i simvol'noy informatsii: Sb. materialov XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Optoelectronic devices and devices in the systems of image recognition, image processing and symbolic information: Proceedings of the XII international scientific and technical conference]. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2015, pp. 203-205.
4. *Titenko E.A., Mirtalibov T.A., Frolov S.N., Khanis A.L.* Mnogoagentnye sistemy v tekhnicheskoy diagnostike slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov [Multi-agent systems in technical diagnostics of complex technical objects], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestia South-West state University], 2015, Vol. 1, No. 3 (60), pp. 18-25.
5. *Lotorev P.V., Kurochkin A.G., Grivachev A.V.* Matematicheskaya model' dinamicheskoy korrektsii marshruta podvizhnogo robota [Mathematical model of dynamic correction of mobile robot route], *Naukoemkie tekhnologii* [Knowledge-based technologies], 2016, Vol. 17, No. 3, pp. 21-25.
6. *Piper J.E., Commander K.W., Thorsos E.I., and Williams K.L.* Detection of buried targets using a synthetic aperture sonar, *IEEE Journal of oceanic engineering*, 2002, Vol. 27, No. 3, pp. 495-504.
7. *Pshikhopov V.Kh., Korneev I.G.* Strukturno-algoritmicheskaya realizatsiya kombinirovannoy sistemy upravleniya dvizheniem intellektual'nykh mobil'nykh robotov v ekstremal'nykh sredakh [Structural and algorithmic implementation of a combined system of movement control of intelligent mobile robots in extreme environments], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2004, No. 3, pp. 191-196.
8. *Kurochkin, A.G., Emel'yanov S.G., Titenko E.A.* Analiz algoritmov poiska po obraztsu dlya upravleniya gruppoy robotov [Analysis of search algorithms for a sample to control a group of robots], *Naukoemkie tekhnologii* [Knowledge-intensive technologies], 2014, Vol. 15, No. 12, pp. 4-8.
9. *Titenko E.A., Kurochkin A.G., Grivachev A.V.* Modifitsirovannyy metod i algoritm planirovaniya marshruta dlya bezekipazhnykh mashin [The modified method and algorithm of route planning for non-scale machines], *Desyataya Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya* [Tenth all-Russian multi-conference on management]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, pp. 87-89.

10. Hornfeld W., Baunsgaard J.P. C-systems-concept for a modular AUV family, *Proc. of the 13th Int. Sympos. on unmanned untethered submersible technology. AUSI, USA, 2003.*
11. Kazakov K.A. Semenov V.A. Obzor sovremennykh metodov planirovaniya dvizheniya [An overview of modern methods of planning of movement], *Trudy ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2016, Vol. 28, Issue 4, pp. 241-296.
12. Pshikhopov V.Kh. Pozitsionno-traektornoe upravlenie podvizhnymi ob'ektami [Position-trajectory control of mobile objects]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, 183 p.
13. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Otsenivanie i upravlenie v slozhnykh dinamicheskikh sistemakh [Estimation and control in complex dynamical systems]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 294 p.
14. Titenko, E.A. Atakishchev O.I., Zerin I.S. Metod, algoritm i tekhnicheskoe reshenie parallel'nogo poiska i podstanovki na assotsiativnoy pamyati [Method, algorithm and technical solution PA-lallinaho search and lookup in an associative memory], *V mire nauchnykh otkrytiy. Matematika. Mekhanika. Informatika* [In the world of scientific discoveries. Mathematics. Mechanics. Informatics], 2012, No. 1, ppS. 166-180.
15. Clem T.R. and Lopes J.L. Progress in the development of buried mine hunting systems, *Proc. of oceans-2003, MTS, IEEE. San-Diego, Sept. 22-26. San- Diego, 2003*, pp. 500-511.
16. Kurochkin A.G. Emel'yanov S.G., Borodin M.V. Produktsionnaya model' dlya koordinatsii beskonfliktnogo raspolozheniya gruppy avtonomnykh robotov [Production model for coordination of conflict-free arrangement of a group of Autonomous robots], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems], 2015, Vol. 13, No. 6, pp. 10-14.
17. Grivachev A.V. Matematicheskaya model' opisaniya predmetnoy oblasti upravleniya gruppy robotov [Mathematical model of the description of the subject area of control of a group of robots], *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazheniy i simvol'noy informatsii: Sb. materialov XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Optoelectronic devices and devices in the systems of pattern recognition, image processing and symbolic information: Sat. proceedings of the XII international scientific and technical conference]. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2015, pp. 105-107.
18. Casbeer D.W. Forest fire monitoring with multiple small UAVs, *Proceedings of the 2005 American Control Conference*, 2005, pp. 3530-3535.
19. Spry S.C., Girard A.R., Hedrick J.K. Convoy Protection using Multiple Unmanned Aerial Vehicles: Organization and Coordination, *Proc. of the 24th American Control Conference, Portland, OR., June 2005.*
20. Tonetti S., Hehn M., Lupashin S., D'Andrea R. Distributed control of antenna array with formation of UAVs, *In World Congress*, 2011, August, Vol. 18, No. 1, pp. 7848-7853.
21. Chung J. Cooperative Control of UAVs Using a Single Master Subsystem for Multi-task Multi-target Operations, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, Vol. 345, pp. 193-212.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Коськин.

Курочкин Александр Геннадиевич – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет»; e-mail: ak.kursk@mail.ru; 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94; тел.: 84712222464; зам. директора НИИ РЭС; аспирант.

Гривачев Александр Валерьевич – e-mail: garpun-22@gmail.com; директор НИИ РЭС, аспирант.

Варганов Вячеслав Валерианович – e-mail: prcvvv@mail.ru; к.с.н., зам. директора НИИ РЭС.

Титенко Евгений Анатольевич – e-mail: johntit@mail.ru; тел.: +79051588904; к.т.н.; доцент; начальник управления НИИ РЭС.

Kurochkin Alexander Gennadievich – The federal state budget educational institute "South-West State University"; e-mail: ak.kursk@mail.ru; 305040, Kursk, street 50 years of October, 94; phone: +74712222464; deputy director of the Scientific Research Institute; postgraduate student.

Grivachev Alexander Valerevich – e-mail: garpun-22@gmail.com; director of the Scientific Research Institute; postgraduate student.

Varganov Vyacheslav Valerianovich – e-mail: npcvvv@mail.ru; cand. of socio. sc.; deputy director of the Scientific Research Institute.

Titenko Evgeny Anatolievich – e-mail: johntit@mail.ru; +79051588904; cand. of eng. sc.; docent; head of department of the Scientific Research Institute.

УДК 629.127

В.В. Костенко, И.Г. Мокеева, А.Ю. Толстоногов

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ АНПА ПРИ БУКСИРОВКЕ МАГНИТОМЕТРА

Традиционно, придонная магнитная съемка выполняется буксировкой магнитометра судном при значительной длине кабеля связи. Этот способ имеет высокие эксплуатационные расходы и существенные ограничения, обусловленные рисками потери оборудования при неблагоприятных погодных условиях. В то же время, магнитное поле, создаваемое бортовым оборудованием, исключает возможность установки прецизионного магнитометра на подводном аппарате. Для достижения максимальной точности магнитной съемки требуется буксировать измерительное оборудование на некотором удалении от аппарата, зависящем от его размеров и магнитного фона. В статье показаны результаты исследований влияния буксируемого магнитометра на параметры движения автономного необитаемого подводного аппарата. Приведена разработанная авторами методика расчета силового воздействия буксируемого оборудования на аппарат в режимах установившегося движения и маневрирования по типовым траекториям. Определена математическая модель возмущений от буксировки магнитометра, основанная на аналитическом представлении результатов моделирования стационарных режимов движения. Предложенная в статье структура регулирования движения аппарата позволяет эффективно компенсировать возмущения от буксируемого оборудования. Приведены результаты моделирования движения подводного аппарата с буксируемым магнитометром. Полезность полученных в работе результатов подтверждена в ходе выполнения морской магнитной съемки района укладки подводной волоконно-оптической линии передач в Охотском море.

Магнитная съемка; автономный необитаемый подводный аппарат; буксируемый магнитометр; компенсация возмущений; регуляторы движения; движительно-рулевой комплекс.

V.V. Kostenko, I.G. Mokeeva, A.Yu. Tolstonogov

CONTROL THE MOVEMENT OF AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE WITH A TOWED MAGNETOMETER

Traditionally, bottom magnetic surveying is performed during towing the magnetometer by the ship with considerable length of the communication cable. This method is high costed and has significant limitations due to risks of equipment loss at adverse weather conditions. At the same time, the magnetic field created by on-board equipments excludes possibility of installing a precision magnetometer in an underwater vehicle. To achieve the maximum accuracy of the magnetic survey, it is required to tow the measuring equipment at some distance from the vehicle, depending on its length. The article shows study results of effect of the towed magnetometer on the motion parameters of an autonomous uninhabited underwater vehicle. The method developed by the authors for calculating the force effect of towed equipment on a vehicle in cruising and maneuvering modes along standard trajectories is presented. The mathematical model of disturbances by towing of a magnetometer is determined. This model is based on an analytical representation of simulation results of stationary modes of motion. The structure of vehicle motion controller proposed in