

УДК 004.896

А. Н. Мартынюк, канд. техн. наук,
В. В. Калиниченко, Н. О. Ульченко

МЕТОД РАЗРАБОТКИ ПОДСИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Аннотация. Рассмотрена задача создания эффективной подсистемы навигации автономного мобильного робота. Отмечены достоинства и недостатки существующих систем, основанных на использовании локальных и глобальных методов навигации. Предлагается комбинированная система навигации автономного мобильного робота, базирующаяся на подходах глобальных методов навигации с компенсацией части их недостатков с помощью функционала локальных. Показано преимущество метода по ресурсопотреблению как перед локальными, так и перед глобальными подходами, в частности в условиях динамичного мира с низкой частотой изменения.

Ключевые слова: робототехническая система, автономный мобильный робот, навигация робота, глобальная навигация, локальная навигация, ультразвуковой датчик, ресурсоэффективность навигации, карта местности, актуализация мира, поиск решений, комбинированный подход, исследование мира, модификация карты, оптимальный путь, незнакомая местность, локализация, двухмерная карта местности, препятствия, динамичный мир

A. N. Martyniuk, PhD.,
V. V. Kalinichenko, N. O. Ulchenko

METHOD OF DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOT'S NAVIGATION SUBSYSTEM

Abstract. In this paper the task of creating the effective navigation subsystem of autonomous mobile robot is regarded. The highs and lows of existing schemes, based on local and global navigation methods are noted. Combined system of navigation of autonomous mobile robot is offered, which is based on global approaches with compensating of part of its lows with the help of functionality of local approaches. The advantage of method by its resource consumption comparing with both local and global methods, especially in condition of dynamic world with low change frequency, is shown.

Keywords: robotic system, autonomous mobile robot, robot navigation, global navigation, local navigation, ultrasonic sensor, navigation's resource consumption, field, world's actualization, search for solutions, combined approach, world's exploration, map's modification, optimal path, unknown environment, localization, 2-d map, obstacles, dynamic world

О. М. Мартинюк, канд. техн. наук,
В. В. Калініченко, М. О. Ульченко

МЕТОД РОЗРОБКИ ПІДСИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Анотація Розглянуто створення ефективної підсистеми навігації автономного мобільного робота. Відмічено переваги та недоліки існуючих систем, заснованих на локальних та глобальних підходах навігації. Пропонується комбінована система навігації автономного мобільного робота, яка базується на підході глобальних методів навігації з компенсацією частини їх недоліків за допомогою функціоналу локальних. Виявлена перевага методу по ресурсоспоживанню як перед локальними, так і перед глобальними підходами, зокрема в умовах динамічного світу з низькою частотою зміни.

Ключові слова: робототехнічна система, автономний мобільний робот, навігація робота, глобальна навігація, локальна навігація, ультразвуковий сенсор, ресурсоефективність навігації, карта місцевості, актуалізація світу, пошук рішень, комбінований підхід, дослідження світу, модифікація карти, оптимальний шлях, незнайома місцевість, локалізація, двомірна карта, перешкоди, динамічний світ

В настоящее время робототехника переживает значительный подъем в развитии. Приоритетным направлением разработки в этой отрасли являются автономные мобильные роботизированные системы. Главное их достоинство – независимость функциониро-

© Мартынюк А.Н., Калиниченко В.В.,
Ульченко Н.О., 2013

вания от оператора и принятие решений на основе анализа показаний датчиков и реакции на события окружающей среды и её изменения [7 – 8]. Тем не менее, достичь истинной автономности за пределами наиболее алгоритмически примитивных систем на данный момент не удалось, что делает это направление весьма привлекательным для разработки и исследования. Кроме того, ав-

тономный мобильный робот (АМР) общего случая можно воспринимать как пример интеллектуального агента, что позволяет использовать для него их законы и принципы алгоритмического построения. В искусственном интеллекте под термином «интеллектуальный агент» понимается сущность, получающая информацию через систему сенсоров о состоянии управляемых ими процессов и осуществляющая влияние на них через систему актуаторов, при этом её реакция рациональна в том смысле, что её действия способствуют достижению определенных параметров и задач [2 – 4, 13].

Критической частью любых мобильных автономных устройств является подсистема навигации. Её цель – решение комплекса задач, связанных с локализацией устройства в пространстве и нахождением оптимального с учетом заданных условий и состояния мира маршрута. Основной трудностью для решения таких задач является необходимость однозначного определения позиции устройства относительно известных ориентиров мира в каждый конкретный момент времени, а также количество задержек и ошибок в процессе расчёта маршрута и движения. Кроме того, работа с картой в АМР в большинстве случаев заменяется дистанционным управлением устройством, что приводит к существенному падению автономности системы [9].

Как было описано в предыдущей статье авторов, на данный момент существуют две основные группы методов навигации АМР – локальные и глобальные. Глобальные методы служат для работы с заранее известным оперативным пространством устройства, с полностью прописанными изначально условиями и статичным миром. Локальные – в тех случаях, когда карта оперативного пространства неизвестна или имеет низкую достоверность, а мир динамичен и меняется с заранее неизвестной периодичностью [14]. Каждая из этих групп имеет свои преимущества – глобальные методы ценой высоких вычислительных затрат позволяют точно спланировать маршрут движения, а локальные не только значительно проще, но и позволяют адекватно реагировать на изменяющийся мир [5 – 6].

Тем не менее, ни один из подобных методов сам по себе не обеспечивает решения

поставленной задачи. Необходимость и эффективность гибридного метода навигации, комбинирующего оба подхода, была показана в предыдущей работе авторов [1]. В существующих на данный момент серийных АМР используется похожий подход, но локализация в пространстве осуществляется только направлением и дистанцией до маяка, а работа с окружающим миром осуществляется исключительно локальными методами.

Однако для полноценной работы более алгоритмически сложного АМР в условиях реального мира такого подхода недостаточно. Помимо знания своего местонахождения в пространстве и реакции на встреченные препятствия, зачастую необходимо знать наиболее эффективный и быстрый маршрут движения. Для этого необходимо знать и дополнять, в случае необходимости, полную карту местности (двухмерную или трехмерную в зависимости от типа АМР). Кроме того, в зависимости от того, разовое ли действие выполняет АМР, может иметь смысл исследование карты, не связанное напрямую с достижением заданной цели, а также другие подобные операции. Данный подход особенно эффективен в случае, когда в силу тех или иных причин дистанционное управление устройством сильно усложнено или невозможно.

В данной работе предлагается подобный метод построения и реализация подсистемы навигации, позволяющий выполнять исправление и исследование карты, в дополнение к оптимизации маршрута движения на основании результатов этих действий. Тип мира определяется в контексте решаемой задачи как статичный; в противном случае существующая карта теряет достоверность после каждой итерации его изменения, что делает невозможным применение любых глобальных методов навигации.

Предлагаемый метод реализует выполнение этих действий на основе:

- 1) исходного представления мира с неизвестной заранее достоверностью;
- 2) локальной информации о мире в пределах действия датчиков;
- 3) модификации алгоритма A^* для работы с миром используемой местности;

Используемый в процессе вычисления алгоритм A^* является адаптацией концепции

поиска оптимального решения для работы с массивами данных, в том числе с картами местности. Из существующих на данный момент концепций поиска семейство алгоритмов A^* даёт наиболее высокую точность, хотя и является наиболее технически затратным. Тем не менее, в контексте АМР, энергозатраты на вычисления значительно ниже, чем на любую другую подсистему, например на двигатели и сенсоры, или индикацию, а время реакции АМР на какое-либо событие, например, препятствие на его пути, несоизмеримо больше, чем время вычисления такого алгоритма, поэтому было принято решение пренебречь этими затратами в пользу высокой точности и надёжности [10 – 12].

Приведенная реализация метода имеет следующие ограничения:

1) ввиду того, что данная реализация АМР имеет физическое представление, и является роботом, способным передвигаться только в одной плоскости, используемая им карта двухмерная;

2) реальный размер препятствий проецируется на координатную сетку таким образом, что размер препятствия дополняется до кратного единице измерения системы координат. Таким образом, линейные размеры препятствий рассматриваются АМР как кратные единице измерения;

3) малые расстояния между препятствиями (такие, через которые АМР не может выполнить перемещение) рассматриваются как препятствия. Эти ограничения обусловлены используемым техническим оборудованием (Lego Mindstorms NXT 2.0 brick).

В предлагаемом методе исходными данными является начальное представление мира, в случае представленной реализации АМР – двухмерная карта. В данном случае ячейки карты заполняются значениями 0 и 1, где 0 – доступная для передвижения местность, а 1 – участок, занимаемый препятствием. В общем случае клетка может иметь отличный от 0 или 1 вес, который будет определять «цену» перемещения по ней и будет учитываться при определении оптимального пути. В качестве сенсорной системы АМР в данной реализации использует три ультразвуковых датчика, расположенных по направлению его движения, а остальные два датчика – влево и вправо от него. Такое рас-

положение датчиков позволяет одновременно отслеживать три соседние клетки (по отношению к той, где робот находится определенный момент времени). Четвертая клетка является достоверно известной и не требует исследования, так как робот находился в ней в предыдущий момент времени. Одометрическая система АМР обладает встроенным датчиком оборотов двигателей.

В условиях ограничения физической реализации используется двухмерная декартова система координат, в которой установлена единица измерения, равная одному обороту ступицы АМР. Размер одной клетки на карте принимается равным размеру робота. Начальная и конечная точка движения задаётся вручную на карте перед каждым запуском. Предполагается, что конечная точка не занята препятствием и достижима АМР движением из исходной точки.

В рамках предлагаемого метода у АМР существует два режима работы: 1) стремление к финишу; 2) исследование карты. В первом режиме АМР полагается на данные исходной карты для определения оптимального пути с помощью модификации алгоритма A^* и следует проложенному маршруту. Во втором – исследует несоответствующий карте участок местности на определенную глубину, задаваемую как определенное количество шагов от точки перехода в этот режим.

Процесс движения АМР состоит из этапов. Очередной этап начинается при наступлении события прохождения робота в соседнюю клетку. Исходя из анализа карты и показаний ультразвуковых датчиков, в режиме стремления к финишу выделяется три типа событий:

1) нахождение передним сенсором занятого препятствием участка на предполагаемом пути следования;

2) нахождение одним из боковых сенсоров проходимого участка рядом с текущей позицией робота, где по карте должно быть расположено препятствие;

3) достижение финишной клетки.

В режиме исследования выделяются также три типа событий:

1) достижение роботом непроходимого участка или заданной глубины исследования;

2) завершение исследования участка, выявленного в определении исследованных или

непроходимых участков со всех трех сторон робота;

3) достижение исходной точки исследования.

В общем случае функционирование системы выглядит следующим образом. В начальный момент времени АМР начинает функционирование в режиме стремления к финишу. По существующей карте АМР определяет кратчайший (оптимальный) путь следования с помощью адаптированного для работы с картой алгоритма A^* и начинает следовать по нему. После перехода в каждую следующую клетку снимаются данные с трех сенсоров (переднего, левого и правого). В случае необходимости выполнить поворот показания снимаются после его осуществления.

В момент, когда на пути следования сенсор обнаруживает препятствие, на карту наносится соответствующее значение новой клетки, и оптимальный путь пересчитывается с учетом новых данных. Когда один из боковых сенсоров отмечает отсутствие на местности препятствия, которое есть на карте, АМР разворачивает шасси к препятствию и переходит в режим исследования. В момент, когда АМР достигает финиша, его работа завершается.

Режим исследования отличается от режима стремления к финишу тем, что все движения, совершаемые роботом, записываются для возможности возвращения его на исходную позицию, которая была до начала исследования. В режиме исследования в начальный момент времени робот углубляется на одну клетку вперед в неисследованную местность. В случае, если клетка перед ним также свободна, не соответствует карте или не была уже исследована, он движется вперед. Если она занята и/или совпадает с картой, АМР анализирует клетки слева и справа, разворачиваясь туда в случае их доступности/неизвестности, и продолжает движение глубже.

В случае, когда все три клетки недоступны и не представляют интереса (соответствуют карте или уже были исследованы), робот совершает в обратном порядке выполненные до этого движения, маркируя на карте каждую покинутую клетку как исследованную и повторяя анализ в каждой клетке, куда прихо-

дит. В момент, когда АМР проходит в обратном порядке весь свой путь и приходит в точку, где он перешел в режим исследования, он покидает её и переходит вновь в режим стремления к финишу.

Опциональной в режиме исследования является возможность задать глубину исследования. Эта величина определяет максимальное количество клеток, на которые робот может удалиться от исходной точки в процессе исследования местности. Она служит для экономии времени работы АМР на большой неточной карте в случае, если в её полной актуализации нет необходимости.

Поскольку в ограничениях предлагаемой реализации у АМР нет каких-либо средств геопозиционирования, например радиомаяка, определение текущего направления движения АМР относительно осей системы координат производится по значению целочисленной переменной $turn_count$, имеющей значение, равное разности количества совершенных АМР от начала движения поворотов налево (\bar{N}), количества совершенных поворотов направо (\bar{N}) и числа 1

$$turn_{count} = \bar{N} - \bar{N} + 1. \quad (1)$$

Изменение значения переменной $turn_count$ происходит при совершении каждого поворота робота. Переменная $turn_count$ может принимать четыре значения: -1, 0, 1, 2. При выходе за пределы этого промежутка значение принимается равным граничному с противоположной стороны, 2 для -2, и -1 для 3. Правила рассмотрения величины $turn_count$ аналогичны таковым в прошлой статье, её значение рассматривается в двоичном коде, старший разряд $turn_count[1]$ определяет, осуществляется ли движение по горизонтальной или вертикальной оси, а младший $turn_count[0]$ – движется ли АМР в направлении уменьшения или увеличения координаты (Рис. 1). Как и прежде, значение «-1» интерпретируется дополнительным кодом, т.е. $11_2[1]$.

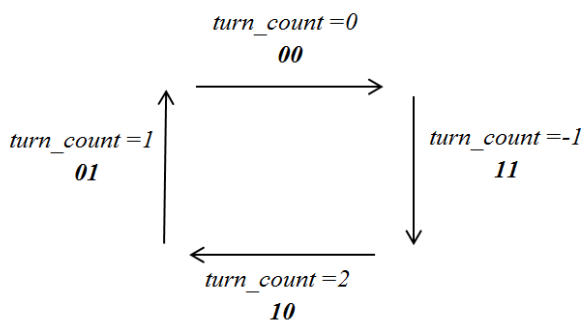


Рис. 1. Определение направления движения АМР по значению переменной *turn_count*

Ниже приведено принятое правило модификации координат *x* и *y* при перемещении по клеткам.

$$x = x + ((turn_{count[1]} - turn_{count[1]}) \cdot turn_{count[0]})$$

$$y = y + (turn_{count[1]} - (turn_{count[1]}) \cdot turn_{count[0]}) \quad (2)$$

Таким образом, при перемещении в соседнюю клетку выполняется пересчёт координат положения АМР в соответствии с правилом (2), а в случае выполнения поворота – соответствующим образом модифицируется переменная *turn_count*. После каждой модификации координат их значение сравнивается со значением конечных. Если они совпадают – значит, цель достигнута и АМР прибыл к финишу. Обобщенная блок-схема предлагаемого метода навигации и исследования окружающей среды АМР приведена на рисунках 2 и 3 соответственно.

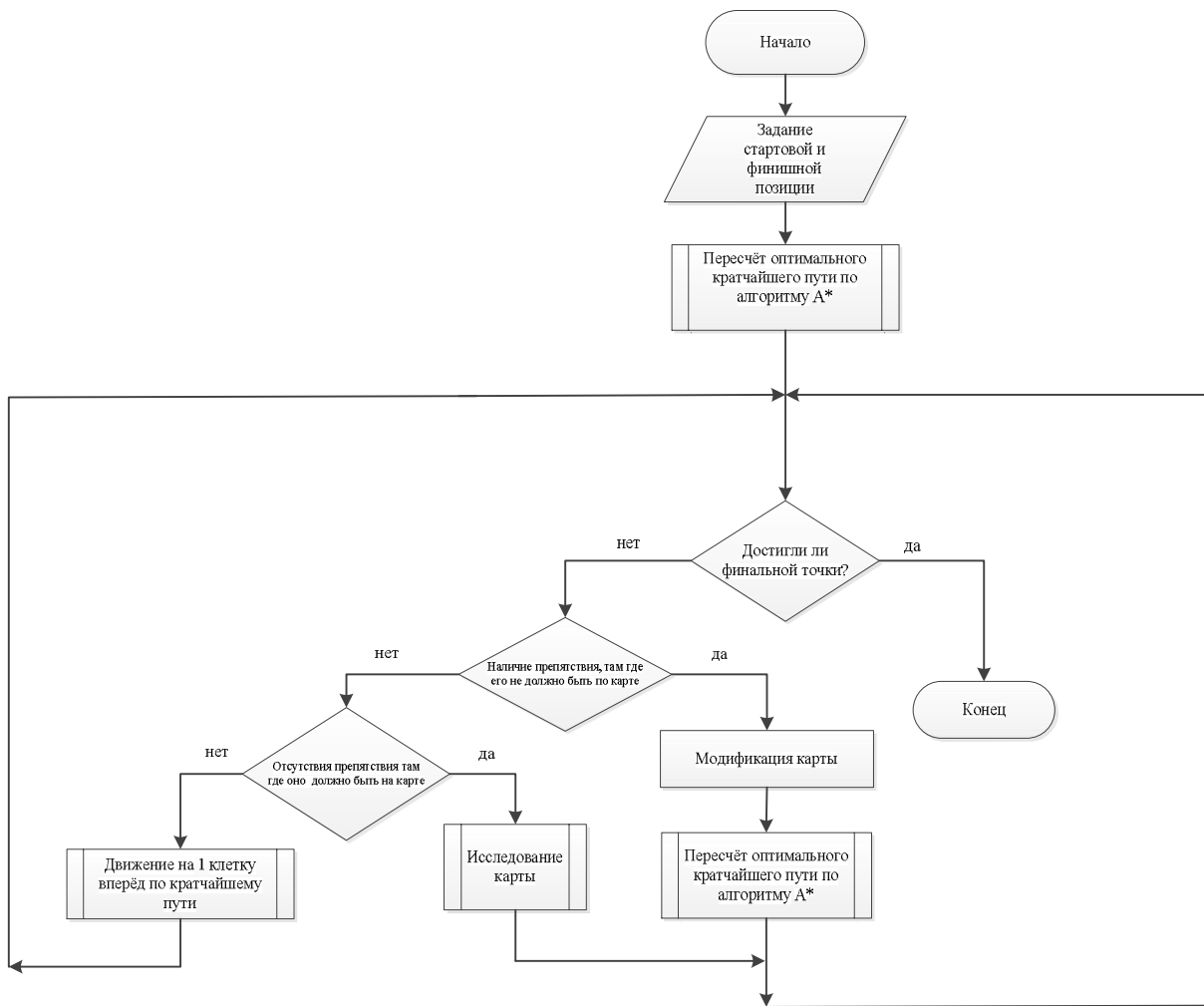


Рис. 2. Обобщенная блок-схема предлагаемого метода навигации (общий алгоритм)

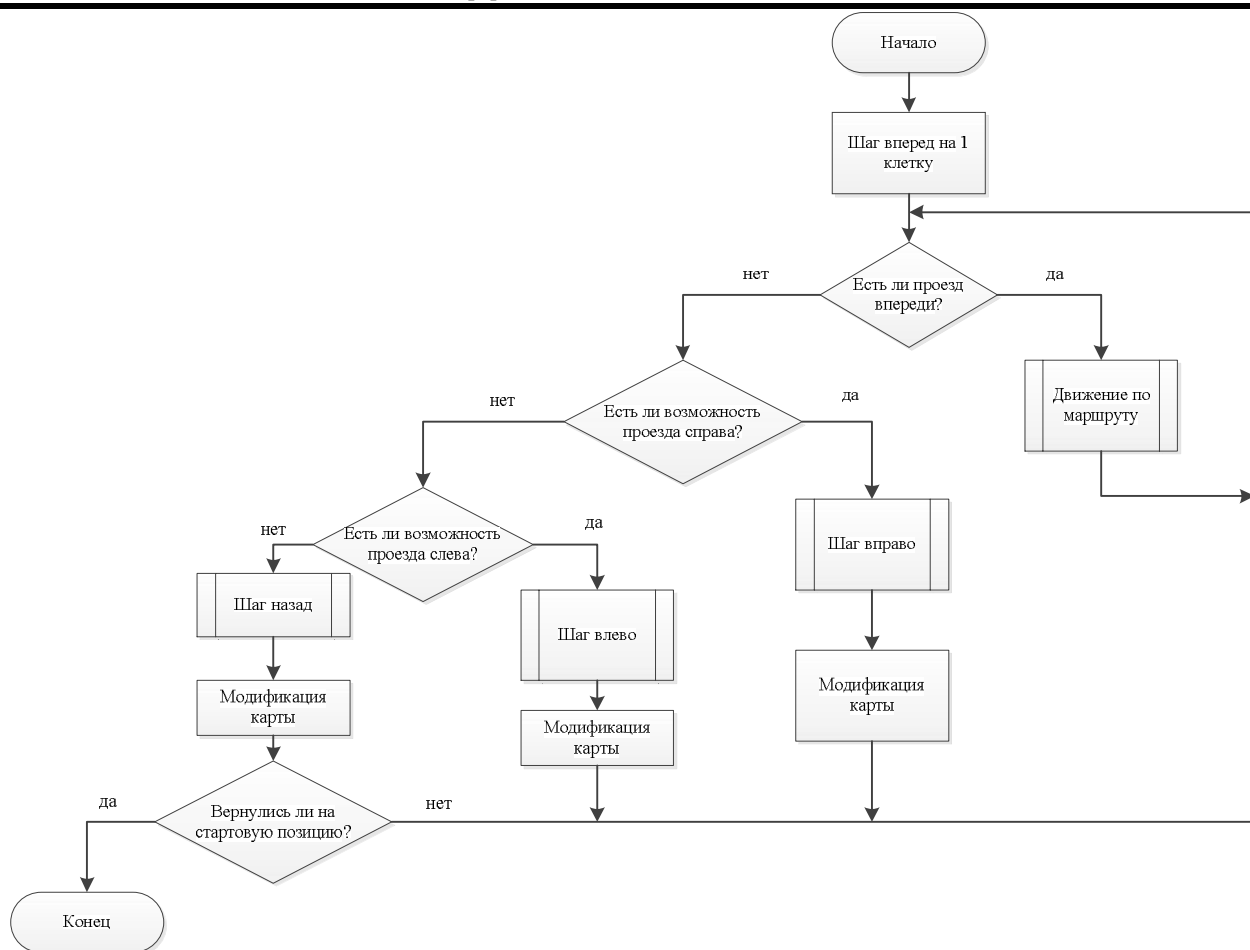


Рис. 3. Обобщенная блок-схема способа исследования окружающей среды в рамках предлагаемого метода навигации

Рассмотрим результаты экспериментальной проверки реализации предложенного метода (рис. 4).

В точке (0) АМР задаются координаты его текущего местоположения и его цели, а также предварительная, неточная карта местности. С помощью модификации алгоритма А* для работы с картой АМР рассчитывает оптимальный маршрут следования и начинает двигаться по нему. В точках 3 и 4 АМР фронтальным сенсором определяет наличие препятствия на пути следования, тогда как его не было на карте. В карту вносятся изменения, и оптимальный маршрут пересчитывается с учетом дополненной карты. В точках 1 и 5 АМР одним из боковых сенсоров обнаруживает отсутствие препятствия там, где оно должно быть по карте; АМР разворачивается к клетке, где было обнаружено несоответствие, и делает шаг вперед, переходя в режим исследования. В точках 6 и 7 АМР в ходе ис-

следования обнаруживает препятствие на своём пути и меняет направление исследования исходя из показаний датчиков. В точках 2 и 8 АМР обнаруживает, что все клетки перед ним либо заняты, либо исследованы и известны, и начинает двигаться в обратном направлении, возвращаясь на маршрут и переходя в режим стремления к финишу. В точке 9 АМР достигает финиша и завершает работу, выдавая на выходе уточненную карту.

В рамках экспериментальной проверки было проведено сравнение предлагаемого метода навигации с рядом классических методов, относящихся к локальным, глобальным и гибридным. Осуществлялась серия из 10 запусков системы в статичном мире (предполагалось, что мир меняется после 10 циклов работы робота) с неточно известной на старте картой (или без таковой, в случае локальных методов).

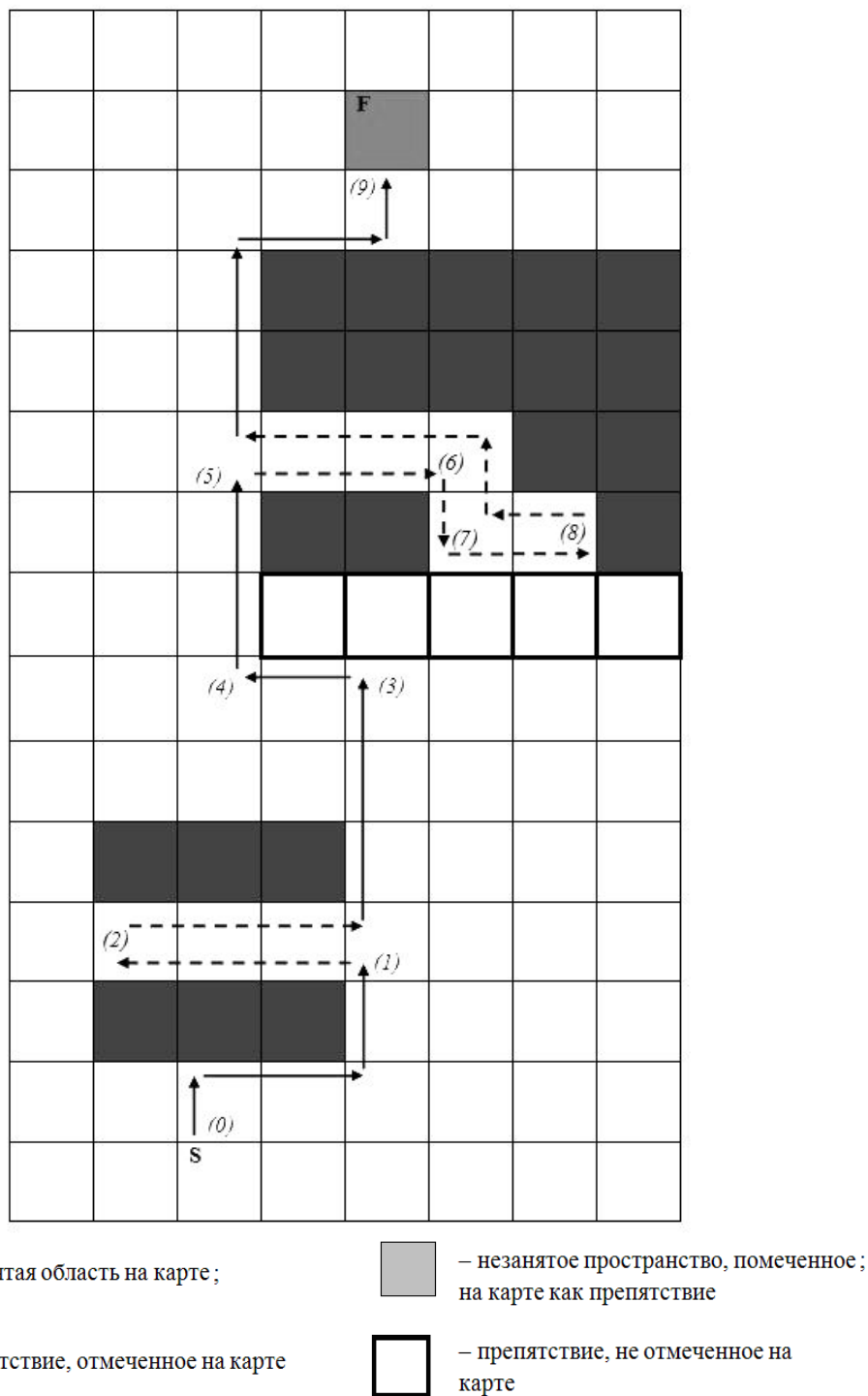


Рис. 4. Результат экспериментальной проверки предложенного метода

Выводы. Предлагаемый метод, в отличие от существующих, позволяет работать с неточной или недостаточно достоверной картой. По сравнению с системами, основанными на локальных методах навигации и использовании внешнего маяка в качестве средства локализации, обеспечивается существенно большая точность, экономия времени и ресурсов при многократном применении в пре-

делах одной итерации изменения мира. Эффективность экономии временных и энергетических ресурсов тем выше, чем больше используется устройство после одноразовой актуализации карты.

По сравнению с системами, основанными исключительно на глобальных методах навигации, даётся возможность использовать частично заполненную карту, которая будет

дальше заполняться и уточняться в процессе функционирования АМР. Одновременно снижаются требования к точности изначальной карты.

По сравнению с системами, основанными на гибридных методах навигации, но без дополнительного исследования карты, преимущество метода проявляется в ситуации, когда в процессе работы меняются точки старта и финиша. В то время, как предлагаемый метод имеет возможность использовать уже полученные в результате исследования актуальные данные, другие гибридные методы всегда начинают работу «с нуля».

Экспериментальные исследования показали преимущество предлагаемого метода по сравнению с использованием традиционных подходов с использованием локальной навигации в статичном мире. А возможность актуализировать карту даёт преимущество перед глобальными и гибридными методами в динамичном мире с низкой частотой изменения. Тем не менее, при высокой частоте изменения мира метод теряет свою эффективность в силу того, что карта теряет актуальность вскоре после завершения исследования, а, возможно, и в процессе него; рассчитываемый же оптимальный путь перестаёт быть таковым, и исследование вместе с пересчётом маршрута нужно начинать заново. При наличии же точной карты режим исследования не имеет практического применения.

Список использованной литературы

1. Защелкин К. Реализация комбинированного способа навигации автономного мобильного робота [Текст] / К. В. Защелкин, В. В. Калиниченко, Н. О. Ульченко // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2013. – К. : Техника. – № 09(85). – С. 102 – 109.
2. Russel S. Artificial Intelligence: A Modern Approach [Text] / S. Russel // New Jersey: Prentice Hall, 2006. – 1407 p.
3. Девятков В. Системы искусственного интеллекта [Текст] / В. Девятков // Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 352 с.
4. Kasabov N. Introduction: Hybrid Intelligent Adaptive Systems [Text] / N. Kasabov //

International Journal of Intelligent Systems. – 1998. – Vol. 6. – P.453 – 454.

5. Fahimi F. Autonomous Robots. Modeling, Path Planning and Control [Text] / F. Fahimi. – New York : Springer, 2009. – 348 p.

6. Hachour O. Path Planning of Autonomous Mobile Robot [Text] / O. Hachour // *International Journal of Systems Applications, Engineering and Development*. – 2009. – Iss. 4. – Vol. 2.

7. Lumelsky V. Sensing, Intelligence Motion [Text] / V. Lumelsky. – New Jersey : Wiley-Interscience, 2006. – 456 p.

8. Siegwart R. Introduction to Autonomous Mobile Robots [Text] / R. Siegwart, I. Nourbakhsh. – Boston : MIT Press, 2004. – 336 p.

9. Juliá, M. A Comparison of Path Planning Strategies for Autonomous Exploration and Mapping of Unknown Environments [Text] / M. Juliá, A. Gil, O. Reinoso // *Autonomous Robots*, 33 (4). – 2012. – P. 427 – 444. DOI : 10.1007/s10514-012-9298-8.

10. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта : пер. с фр. и ред. В. Л. Стефанюка [Текст] / Ж.-Лю Лорьер. – М. : Мир. – 1991. – С. 238 – 244.

11. Нильсон Н. Искусственный интеллект: методы поиска решений [Problem-solving Methods in Artificial Intelligence] : пер. с англ. В. Л. Стефанюка; под ред. С. В. Фомина [Текст] / Н. Нильсон // – М. : Мир. – 1973. – С. 70 – 80.

12. Pearl J. Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving [Text] / Pearl J. – Addison-Wesley, 1984.

13. Da Costa A.L. Omnidirectional Mobile Robots Navigation: A Joint Approach Combining Reinforcement learning and Knowledge-based Systems [Text] / [A. L. Da Costa, A. G. S. Ceonceicao, R. G. Cerqueira and others] // *ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference, BRC*, art. no. 6487531. – 2013. DOI : 10.1109/BRC.2013.6487531.

14. Yaonan W. Autonomous Mobile Robot Navigation System Designed in Dynamic Environment Based on Transferable Belief Model [Text] / [W. Yaonan, Y. Yimin, Y. Xiaofang and others] // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 44 (8). – 2011. – P. 1389 – 1405.

DOI : 10.1016/j.measurement.2011.05.010.

Получено 06.07.2013

References

1. Zashcholkin K. Realization of Combined Means of Navigation of the Autonomous Mobile Robot [Text] / K. V. Zashcholkin, V. V. Kalinichenko, N. O. Ulchenko // *Electrotechnic and Computer Systems*. – Kyiv : Technique. – 2013. – № 09 (85). – P. 102 – 109 [in Russian].

2. Russel S. Artificial Intelligence: A Modern Approach [Text] / S. Russel. – New Jersey : Prentice Hall, 2006. – 1407 p. [in English].

3. Devyatkov V. Systems of Artificial Intelligence / V. Devyatkov // Publishing of Bauman's MNTU, 2001. – 352 p. [in Russian]

4. Kasabov N. Introduction: Hybrid Intelligent Adaptive Systems [Text] / N. Kasabov // *International Journal of Intelligent Systems*. – 1998. – Vol. 6. – P. 453 – 454 [in English].

5. Fahimi F. Autonomous Robots. Modeling, Path Planning and Control [Text] / F. Fahimi. – New York : Springer, 2009. – 348 p. [in English].

6. Hachour O. Path Planning of Autonomous Mobile Robot [Text] / O. Hachour // *International Journal of Systems Applications, Engineering and Development*. – 2009. – Iss. 4. – Vol. 2 [in English].

7. Lumelsky V. Sensing, Intelligence Motion [Text] / V. Lumelsky. – New Jersey : Wiley-Interscience, 2006. – 456 p. [in English].

8. Siegwart R. Introduction to Autonomous Mobile Robots [Text] / R. Siegwart, I. Nourbakhsh. – Boston : MIT Press, 2004. – 336 p. [in English].

9. Juliá, M. A Comparison of Path Planning Strategies for Autonomous Exploration and Mapping of Unknown Environments [Text] / M. Juliá, A. Gil, O. Reinoso // *Autonomous Robots*, 33 (4). – 2012. – P. 427 – 444 [in English]. DOI : 10.1007/s10514-012-9298-8.

10. Lorier G.L. Systems of Artificial Intelligence [Text] / G. L. Lorier. – Moscow : World. – 1991. – P. 238 – 244 [In Russian].

11. Nielson N. Problem-solving Methods in Artificial Intelligence [Text] / N. Nielson. – Moscow : World. – 1973. – P. 70 – 80 [in Russian].

12. Pearl J. Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving

[Text] / J. Pearl – Addison-Wesley, 1984 [in English].

13. Da Costa A. L. Omnidirectional Mobile Robots Navigation: A Joint Approach Combining Reinforcement learning and Knowledge-based Systems [Text] / [A. L. Da Costa, A. G. S. Ceoniceao, R. G. Cerqueira and others] // *ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference, BRC*, art. no.6487531. – 2013 [in English]. DOI : 10.1109/BRC.2013.6487531.

14. Yaonan W. Autonomous Mobile Robot Navigation System Designed in Dynamic Environment Based on Transferable Belief Model [Text] / [W. Yaonan, Y. Yimin, Y. Xiaofang and others] // *Measurement : Journal of the International Measurement Confederation*, 44 (8). – 2011. – P. 1389 – 1405 [in English]. DOI : 10.1016/j.measurement.2011.05.010.



Мартынюк Александр Николаевич,

канд. техн. наук, доц. каф. компьютерных интеллектуальных систем и сетей Одесского нац. политехн. ун-та,

тел.: (067) 489-81-69

e-mail: anmartynyuk@ukr.net

Калиниченко Владимир Владимирович, аспирант каф. компьютерных интеллектуальных систем и сетей Одесского нац. политехн. ун-та,

тел.: (063) 070-32-66

e-mail:

w1shmast3r88@gmail.com

Ульченко Николай Олегович,

специалист Одесского нац. политехн. ун-та,

тел.: (050) 921-93-91

e-mail:

mkz_place@yahoo.com

