

УДК 004.896

**К. В. Защелкин**, канд. техн. наук,  
**В. В. Калинин**, **Н. О. Ульянов**

### РЕАЛИЗАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА НАВИГАЦИИ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

**Аннотация.** Рассмотрена задача навигации автономного мобильного робота. Отмечены достоинства и недостатки двух основных групп методов навигации: локальной и глобальной. Предлагается комбинированный способ навигации автономного мобильного робота, сочетающий подходы, характерные как для локальной, так и для глобальной навигации. Показана возможность реализации предложенного способа с использованием тактильного и ультразвукового датчиков, что позволяет понизить энергопотребление и конечную стоимость робота по сравнению с использованием нескольких ультразвуковых датчиков.

**Ключевые слова:** робототехническая система, автономный мобильный робот, навигация робота, глобальная навигация, локальная навигация, ультразвуковой датчик, тактильный датчик, энергоэффективность навигации

**K. V. Zashcholkin**, PhD.,  
**V. V. Kalinichenko**, **N. O. Ulchenko**

### REALIZATION OF COMPLEX MEANS OF NAVIGATION OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOT

**Abstract.** In this paper the task of navigation of mobile robot is regarded. The highs and lows of the two main groups of methods for local and global navigation are marked. The complex means of navigation is offered, combining approaches typical for both local and global navigation. The possibility of realization of offered means with use of tactile and ultrasonic sensor is shown, which allows to reduce energy consumption and final cost of the robot as compared with the use of several ultrasonic sensors.

**Keywords:** robotic system, autonomous mobile robot, robot navigation, global navigation, local navigation, ultrasonic sensor, tactile sensor, power efficiency of navigation

**К. В. Защолкін**, канд. техн. наук,  
**В. В. Калініченко**, **М. О. Ульянов**

### РЕАЛІЗАЦІЯ КОМБІНОВАНОГО СПОСОБУ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

**Анотація.** Розглянуто проблему навігації автономного мобільного робота. Відзначено переваги та недоліки двох основних груп методів навігації: локальної та глобальної. Пропонується комбінований спосіб навігації автономного мобільного робота, який поєднує підходи, характерні як для локальної, і так і для глобальної навігації. Показано можливість реалізації запропонованого способу з використанням тактильного та ультразвукового датчиків, що дозволяє знизити енергоспоживання та кінцеву вартість робота в порівнянні з використанням декількох ультразвукових датчиків.

**Ключові слова:** робототехнічна система, автономний мобільний робот, навігація робота, глобальна навігація, локальна навігація, ультразвуковий датчик, тактильний датчик, енергоефективність навігації

**Введение.** В настоящее время робототехника активно используется в тех областях жизнедеятельности, в которых имеется необходимость замены человеческого труда машинным. Одним из наиболее перспективных направлений робототехники являются автономные мобильные роботизированные системы. Отличительная особенность таких систем состоит в полностью независимом от оператора функционировании, основанном на анализе показаний датчиков и принятии решений о выполнении необходимых действий. Исходя из этого, разработка новых моделей, методов и алгоритмов навигации

автономных мобильных роботов (АМР) представляет собой весьма актуальную научную задачу.

Цель навигации АМР состоит в нахождении оптимального (в соответствии с заданными критериями) маршрута его перемещения между заданными точками пространства.

**Методы навигации АМР** принято делить на две группы: глобальные и локальные. Глобальные методы основаны на том, что перед началом движения АМР полностью известна карта местности. Зная свое местонахождение, точку финиша, а также расположение всех препятствий, АМР, используя заданный алгоритм действий, нахо-

© Защелкин К.В., Калинин В.В.,  
Ульянов Н.О., 2013

дит кратчайший путь от старта до финиша и после этого преодолевает этот путь. К наиболее часто используемым на практике глобальным методам навигации можно отнести методы фронта волны,  $A^*$ , дерева квадратов, видимого графа [1–3].

Достоинство глобальных методов навигации состоит в возможности заранее спланировать оптимальный маршрут движения, опираясь на глобальную информацию о внешней среде. Наиболее значимый недостаток таких методов – повышенная вычислительная сложность и необходимость хранения карты среды (зачастую большого размера). Необходимость выполнения интенсивных вычислений и хранения карты среды приводит к значительному энергопотреблению навигационной системы АМР.

Локальные методы навигации используются в тех случаях, когда АМР не известна глобальная карта внешней среды или препятствия в этой среде имеют динамический характер (могут появляться и исчезать, менять свое местоположение). В этом случае АМР получает навигационную информацию о локальной области внешней среды, находящейся в пределах действия его датчиков. К наиболее часто используемым локальным методам навигации АМР можно отнести: методы, основанные на использовании потенциальных полей препятствий [1], методы семейства BUG [4, 5], использующие для получения навигационной информации тактильные датчики, а также методы семейства VisBUG [5–7], которые предполагают получение навигационной информации от ультразвуковых датчиков, что дает возможность не касаться препятствий в процессе движения. К преимуществам методов локальной навигации следует отнести их вычислительную простоту. Недостатки этих методов в сравнении с методами глобальной навигации состоят в отклонении от оптимального маршрута и более сложной процедуре локализации АМР в пространстве.

Для обеих групп методов навигации АМР характерна проблема перехода от представления робота в виде материальной точки к его пространственному представлению с учетом формы корпуса, расположения датчиков, конструкции системы движения.

Большинство существующих методов навигации не предусматривает учета реальных размеров, формы и расположения сенсорной системы АМР. Из-за этого зачастую имеют место большие погрешности локализации АМР в пространстве, которые не позволяют успешно достичь цели навигации [8–10].

Несмотря на значительный объем исследований в данной области, проблема навигации АМР, оптимальной по параметрам скорости, стоимости, энергоэффективности остается открытой.

**Описание предлагаемого способа навигации.** В данной работе предлагается способ навигации АМР, основанный на комбинации подходов, характерных как для глобальных, так и для локальных методов навигации, позволяющий снизить стоимость и повысить энергоэффективность навигации АМР. Предлагаемый способ предполагает выполнение навигации на основе:

- 1) локальной информации о внешней среде в пределах действия датчиков;
- 2) двух компонентов глобальной навигационной информации: направление на цель (градиент) и расстояние до цели.

Использование предлагаемого способа имеет следующие ограничения:

- 1) местность, по которой передвигается АМР, состоит из участков двух видов: открытых участков и препятствий;
- 2) обрабатываются только выпуклые препятствия с прямыми углами (такими препятствия, например, могут выступать здания);
- 3) АМР не может прямо преодолеть препятствие. Если препятствие оказывается на пути АМР, то он должен его объехать;

Особенности предлагаемого способа состоят в следующем:

- 1) реальный размер препятствий проецируется на координатную сетку таким образом, что размер препятствия дополняется до кратности единицы измерения системы координат. Таким образом, линейные размеры препятствий рассматриваются АМР как кратные единице измерения;
- 2) малые расстояния между препятствиями (такие, через которые АМР не может выполнить перемещение) рассматриваются как препятствия.

В предлагаемом способе исходными данными для выполнения навигации являются:

1) *градиент* – вектор, имеющий своим началом точку старта, а своим концом – точку финиша. Градиент задает направление движения к финишной точке по траектории наименьшей длины. В простейшем случае градиент задается путем установки АМР на стартовой позиции таким образом, чтобы он своим передним бампером был направлен по линии, соединяющей стартовую и финишную позицию;

2) *относительное расстояние*  $d$  (расстояние, выраженное в выбранных единицах измерения системы координат) между стартовой и финишной позицией.

В качестве сенсорной системы АМР в данной работе рассматривается система из двух датчиков: тактильного датчика, установленного на переднем бампере АМР и ультразвукового датчика, направленного влево, перпендикулярно к движению АМР. Такое расположение бокового датчика обуславливает возможность обхода препятствий против часовой стрелки. Предполагается, что одометрическая система АМР имеет встроенные датчики оборотов двигателей.

Предлагаемый способ навигации предполагает использование двухмерной декартовой системы координат, в которой установлена единица измерения, равная одному обороту ступицы АМР. При этом начало системы координат  $(0, 0)$  находится в точке финиша. Точка старта имеет координаты  $(0, d)$ . Таким образом, основная задача предлагаемого способа состоит в перемещении АМР из точки  $(0, d)$  в точку  $(0, 0)$ .

В рамках предлагаемого способа процесс движения АМР состоит из этапов. Очередной этап начинается при наступлении события, фиксируемого сенсорной системой АМР или события достижения линии градиента. По типу датчиков выделяется два вида событий: 1) касание препятствия передним тактильным датчиком; 2) потеря препятствия боковым ультразвуковым датчиком.

Пройденный путь (выраженный в количестве оборотов ступицы АМР) на каждом этапе движения записывается в переменную  $path\_taken$ . Определение текущего направления движения АМР относительно осей сис-

темы координат производится по значению целочисленной переменной  $turn\_count$ , равному 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 каждый раз при наступлении события, фиксируемого сенсорной системой АМР. В случае потери ультразвуковым датчиком границы препятствия – АМР поворачивает налево, а значение переменной  $turn\_count$  инкрементируется; в случае срабатывания тактильного датчика – АМР поворачивает направо, а значение переменной  $turn\_count$  декрементируется:

**if** (выполнен поворот налево)  
**then**  $turn\_count = turn\_count + 1$ ;  
**if** (выполнен поворот направо)  
**then**  $turn\_count = turn\_count - 1$ .

При наличии во внешней среде только выпуклых препятствий переменная  $turn\_count$  может принимать четыре значения:  $-1, 0, 1, 2$ . Значение этой переменной представляется в виде двухразрядного двоичного числа. Старший разряд данного числа будет обозначаться  $turn\_count[1]$ , а младший разряд –  $turn\_count[0]$ . При этом  $turn\_count[1]$  определяет движется АМР параллельно или перпендикулярно к градиенту движения, а  $turn\_count[0]$  – движется АМР в направлении увеличения или уменьшения соответствующей координаты (рис. 1, таблица). При этом значение переменной  $turn\_count$ , равное  $-1$ , в двоичном представлении будет интерпретироваться дополнительным кодом, т.е.  $11_2$ .

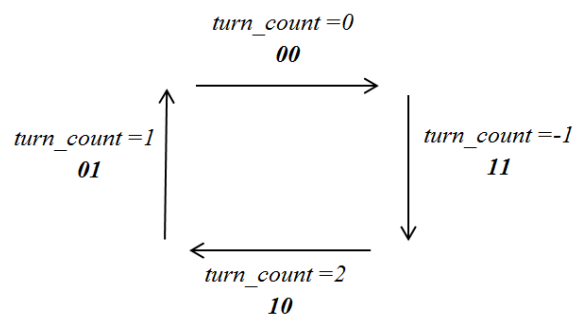


Рис. 1. Определение направления движения по значению переменной  $turn\_count$

1. Соотношения между разрядами двоичного представления переменной *turn\_count*

<i>turn_count</i>	<i>turn_count</i> [1] изменения координаты	<i>turn_count</i> [0] положения АМР
1	0 уменьшается <i>y</i>	1 параллельно градиенту
-1	1 увеличивается <i>y</i>	1 параллельно градиенту
0	0 увеличивается <i>x</i>	0 перпендикулярно к градиенту
2	1 уменьшается <i>x</i>	0 перпендикулярно к градиенту

Следует отметить, что при использовании указанного кодирования направлений значениями переменной *turn\_count* (рис. 1), информация о положении АМР относительно градиента и информация о необходимости увеличения или уменьшения соответствующей координаты совместно модифицируются при каждом повороте по правилу (2).

Ниже приведено предлагаемое правило модификации координат *x* и *y* при наступлении события (в конце каждого этапа), фиксируемого сенсорной системой АМР

$$\begin{aligned}
 x &= x + ((\overline{\text{turn\_count}[1]} - \text{turn\_count}[1]) \cdot \\
 &\quad \cdot \overline{\text{turn\_count}[0]}) \cdot \text{path\_taken}; \\
 y &= y + ((\text{turn\_count}[1] - \overline{\text{turn\_count}[1]}) \cdot \\
 &\quad \cdot \text{turn\_count}[0]) \cdot \text{path\_taken}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Таким образом, при наступлении события:

1) выполняется пересчет координат положения АМР в соответствии с правилом (3);

2) значение переменной *path\_taken*, содержащей длину пути на пройденном этапе движения, обнуляется;

3) в зависимости от вида события выполняется поворот АМР: при событии от переднего тактильного датчика – направо, при событии от бокового ультразвукового датчика – налево. Выполнение поворота приводит к изменению значения переменной *turn\_count* в соответствии с выражением (2).

В предложенном способе навигации возвращение к движению по градиенту в процессе обхода препятствий обеспечивается за счет того, что линия градиента (фактически ось *Y* системы координат) рассматривается как препятствие. При достижении линии градиента АМР разворачивается параллельно этой линии и следует по ней в направлении точки финиша. Это достигается тем, что при движении в сторону линии градиента, перпендикулярно к ней (т.е. если значение переменной *turn\_count* равно 2), боковой ультразвуковой датчик не должен отслеживать границу препятствия, находящегося слева. При этом АМР стремится сократить значение переменной *x* до 0. Как только значение величины пути пройденного этапа *path\_taken* станет равно значению переменной *x* (что означает достижение линии градиента), АМР совершает поворот направо, значение переменной *turn\_count* в соответствии с выражением (2) становится равным 1 и на следующем этапе АМР продолжает движение уже по линии градиента.

При этом в случае, если АМР, достигнув линии градиента и повернув направо, должен будет осуществить движение вперед, но ему при этом будет мешать препятствие, АМР обнаружит это препятствие тактильным датчиком и начнет выполнять его обход в соответствии с принципами, изложенными ранее.

Если координата *x* равна 0, а пройденный на текущем этапе пути *path\_taken* равен текущей координате *y*, – то это означает, что достигнута финишная точка движения.

Обобщенная блок-схема предлагаемого способа навигации АМР приведена на рис. 2.

**Пример выполнения навигации.** Рассмотрим пример реализации предложенного способа на заданной карте местности, включающей в себя несколько препятствий разной формы (рис. 3). В этом примере стоит задача перемещения из точки S в точку F. Градиентом движения в данном случае является линия оси ординат, соединяющая точку S с точкой F. На рис. 3, для наглядности, текущие координаты АМР *x* и *y*, а также значения переменных *turn\_count* и *path\_taken* показаны на момент, предшествующий обнулению переменной *path\_taken*. Значения указанных переменных в точке S показаны на момент старта АМР.

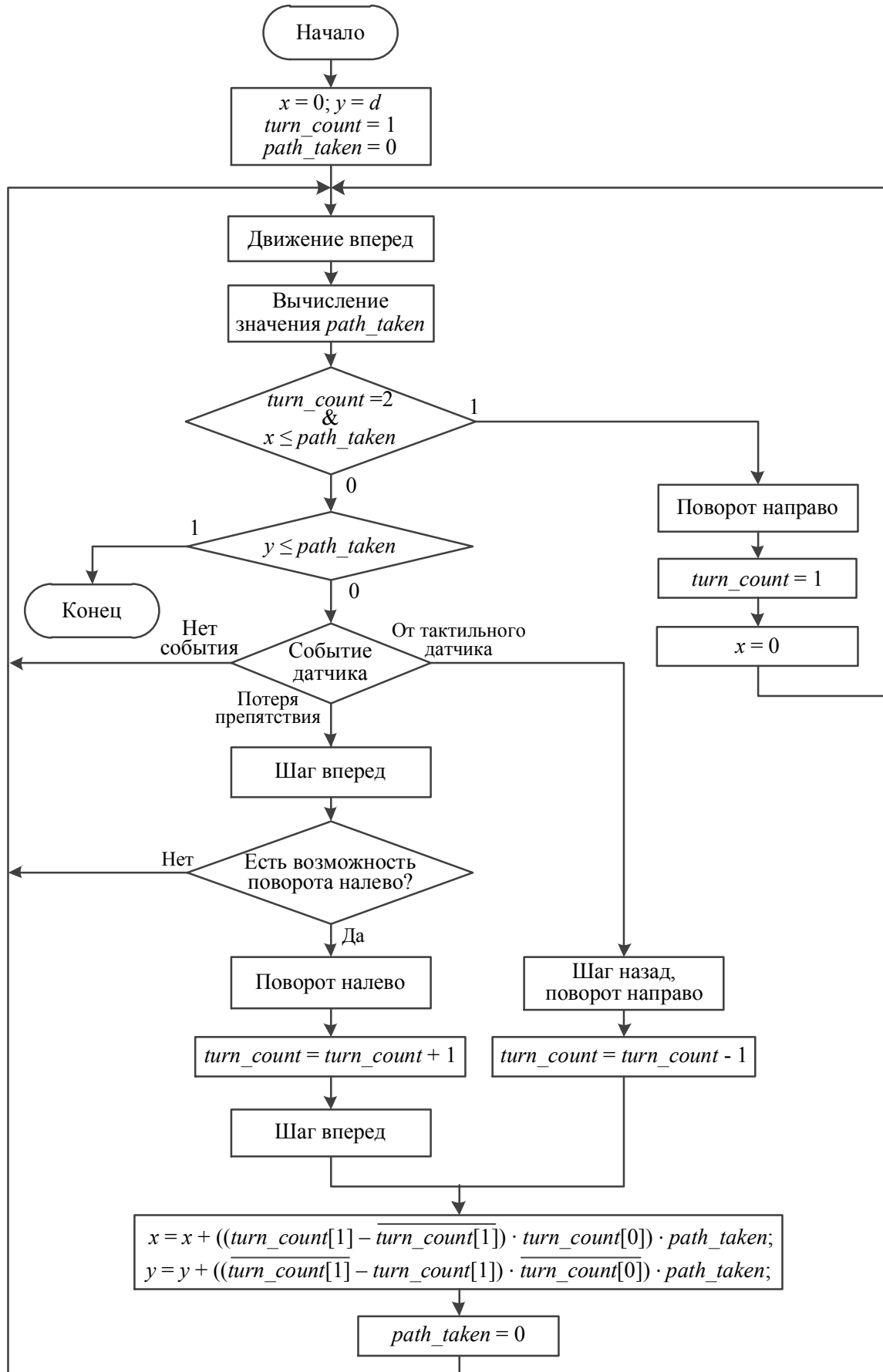


Рис. 2. Обобщенная блок-схема предлагаемого способа навигации

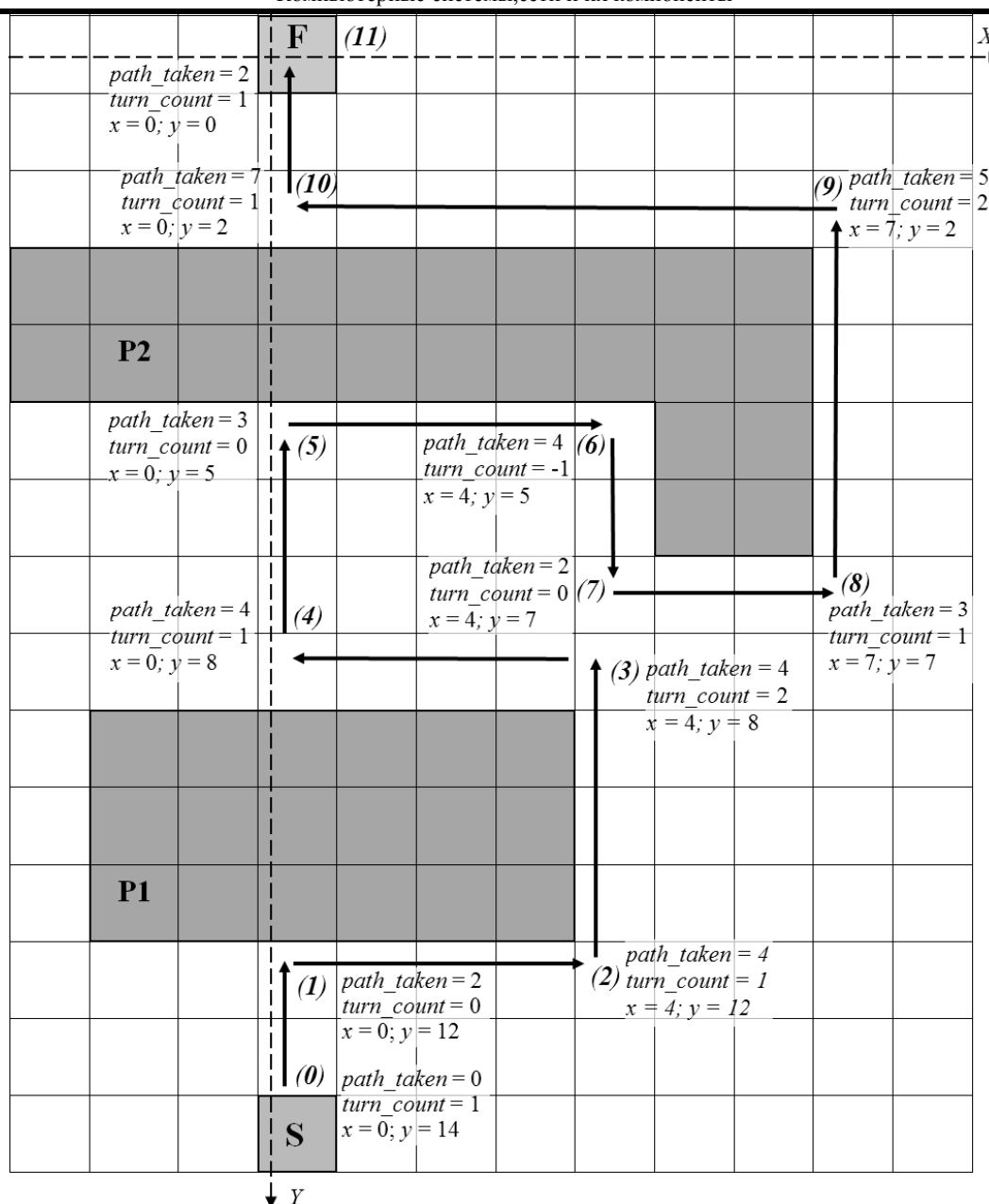


Рис. 3. Пример реализации предложенного способа навигации

В точке 0 АМР задается градиент к цели и расстояние до точки F. Начальное значение переменной *turn\_count* равно 1, что обусловлено принятым кодированием направлений.

В точках 1, 5 и 6 происходит событие, регистрируемое передним тактильным датчиком. В результате этого осуществляются: поворот АМР направо, пересчет значения переменной направления *turn\_count* в соответствии с выражением (2), пересчет координат в соответствии с выражением (3), значение переменной *path\_taken*, содержащей длину пути на пройденном этапе движения, обнуляется.

В точках 2, 3, 7, 8 и 9 происходит событие потери границы препятствия, регистри-

руемое боковым ультразвуковым датчиком. В результате этого осуществляются: поворот АМР налево, пересчет значения переменной направления *turn\_count* в соответствии с выражением (2), пересчет координат в соответствии с выражением (3), значение переменной *path\_taken*, содержащей длину пути на пройденном этапе движения, обнуляется.

При движении от точки 3 к точке 4 и от точки 9 к точке 10 АМР приближается к линии градиента. При этом достижение линии градиента вызывает поворот АМР направо и дальнейшее движение по этой линии в направлении точки финиша. Таким образом, в точках 4 и 10 поворот направо происходит не по собы-

тию, регистрируемому сенсорной системой, а по событию достижения линии градиента.

#### **Преимущества предлагаемого способа.**

Предлагаемый способ, в отличие от практических реализаций известных методов глобальной навигации, не требует хранения карты пространства и выполнения сложной процедуры вычисления маршрута, а также процедуры пересчета маршрута при динамическом изменении ландшафта. Таким образом, предложенный способ является потенциально менее энергозатратным по сравнению с глобальными методами навигации из-за отсутствия необходимости хранения карты, расчета и пересчета маршрута.

В отличие от известных дистанционных методов локальной навигации (таких, например, как семейство методов VisBUG) он не требует наличия двух-трех постоянно действующих датчиков (ультразвуковых, лазерных), а предполагает использование одного фронтального тактильного датчика и одного бокового ультразвукового датчика. Поскольку ультразвуковой и лазерный датчики постоянно генерируют и принимают соответствующие сигналы, они более энергозатратны по сравнению с тактильными датчиками. Кроме того, сами по себе они являются более дорогими устройствами. Предлагаемый способ позволяет минимизировать количество таких датчиков до одного.

В отличие от тактильных методов локальной навигации (таких, например, как семейство методов BUG) предлагаемый способ лишен проблемы потери препятствия датчиком и необходимости адаптации к рельефу поверхности препятствия.

Таким образом, предлагаемый способ можно считать эффективным с позиции энергозатрат (которые являются критическим ресурсом для автономных устройств) и с позиции стоимости сенсорной системы.

#### **Исследование предлагаемого способа.**

Для экспериментального исследования предложенного способа навигации была использована робототехническая платформа LEGO Mindstorms NXT 2.0. Выбор данной платформы обусловлен ее доступностью, гибкостью и разнообразием оборудования. Программная реализация предложенного способа в рамках выбранной платформы была произведена на языке NXT-G. Материалом

для эксперимента послужили 20 моделей внешней среды с выпуклыми препятствиями случайной формы и расположения.

Для проведения эксперимента последовательно было собрано четыре конструкции АМР, отличающиеся набором датчиков и реализованными алгоритмами навигации: методом глобальной навигации на основе фронта волны; методом локальной навигации семейства VisBUG с двумя ультразвуковыми датчиками; методом локальной навигации семейства BUG с двумя тактильными датчиками; предлагаемым способом навигации.

В ходе проведения экспериментов измерялся параметр энергоэффективности, выраженный в максимально возможном количестве повторов прохождения одной и той же карты на одном заряде аккумулятора АМР. Указанные параметры измерялись в двух ситуациях: при статической карте местности и при динамически меняющейся карте, на которой удалялись и добавлялись препятствия в ходе движения АМР.

Экспериментальное исследование показало преимущества предлагаемого комбинированного способа по сравнению с реализациями традиционных методов локальной навигации как на статической, так и на динамической карте. При использовании статической карты местности предложенный способ уступает глобальному методу навигации, с которым проводилось сравнение, однако имеет преимущество над ним на динамической карте.

#### **Список использованной литературы**

1. Адамів, О. П. Моделі та інтелектуальні засоби адаптивного керування автономним мобільним роботом [Текст] дис. ... канд. техн. наук: захищена 12.12.2007 / Адамів Олег Петрович. – Одеса, 2007. – 124 с.
2. Fahimi, F. *Autonomous Robots. Modeling, Path Planning and Control* / F. Fahimi – New York : Springer, 2009. – 348 p.
3. Hachour, O. Path planning of Autonomous Mobile robot / O. Hachour // *International Journal of Systems Applications, Engineering and Development*. – 2009. – Issue 4. – P. 178–190.
4. Lumelsky, V. *Sensing, intelligence motion* / V. Lumelsky – New Jersey : Wiley-Interscience, 2006. – 456 p.

5. Song, H. Research on Path Planning for the Mobile Intelligent Robot / H. Song, L. Hu // World Congress on Computer Science and Information Engineering. – 2009. – № 1. – P. 121 – 144.

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

7. Jian, Y. Comparison of Optimal Solutions to Realtime Path Planning for a Mobile Vehicle / Y. Jian, Q. Zhihua, W. Jing, C. Kevin // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part A: System and Humans. – 2010. – Vol. 40. – P. 721 – 725.

8. Ersson, T. Path Planning and Navigation of Mobile Robots in Unknown Environments / T. Ersson, X. Hu // IEEE Journal of Robotics and Automation. – 2010. – № 6. – P. 212 – 228.

9. Зенкевич, С. Л. Управление движением мобильного робота в неподвижную точку / С. Л. Зенкевич, П. В. Космачев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 3. – С. 55 – 60.

10. Черноножкин, В. А. Система локальной навигации для наземных мобильных роботов / В. А. Черноножкин, С. А. Половко // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – №57. – С. 13-22.

Получено 17.01. 2013

#### References

1. Adamiv, O. P. Models and intellectual means for adaptive autonomous mobile robot control: dissertation for PhD (candidate of science) degree. 12.12.2007. – Odessa, 2007. – 124 p. [in Russian]

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

3. Hachour, O. Path planning of Autonomous Mobile robot / O. Hachour // International Journal of Systems Applications, Engineering and Development. –2009. – Issue 4. – P. 178 – 190 [in English].

4. Lumelsky, V. Sensing, intelligence motion / V. Lumelsky. – New Jersey : Wiley-Interscience, 2006. – 456 p. [in English]

5. Song, H., Hu L. Research on Path Planning for the Mobile Intelligent Robot / H. Song, Hu L // World Congress on Computer Science and Information Engineering. – 2009. – № 1. – P. 121 –144 [in English].

6. Siegwart, R., Nourbakhsh I. Introduction to Autonomous Mobile Robots / R. Siegwart, I.

Nourbakhsh – Boston : MIT Press, 2004. – 336 p. [in English].

7. Jian, Y. Comparison of Optimal Solutions to Realtime Path Planning for a Mobile Vehicle / Y. Jian, Q. Zhihua, W. Jing, C. Kevin // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part A: System and Humans. – 2010. – Vol. 40. – P. 721 – 725 [in English].

8. Ersson, T. Path Planning and Navigation of Mobile Robots in Unknown Environments / T.Ersson, Hu X. // IEEE Journ. of Robotics and Automation. – 2010. – № 6. – P. 212–228 [in English].

9. Zenkevich, S.L. Motion control of mobile robot in a fixed point / S L. Zenkevich, P. V. Kosmatchev // Mechatronics, Automation, Control – 2010. –№ 3. – P. 55 – 60 [in Russian].

10. Shernonozkin, V. A. Local navigation system for mobile robots / V. A. Shernonozkin, S. A. Polovko // Scientific and Technical Bulletin SFMO. – 2008. – № 57. – P. 13 – 22 [in Russian].



Защелкин Константин Вячеславович,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
компьютерных интеллектуальных систем и сетей  
Одесского нац. политехн.  
ун-та  
тел.: (048) 734-83-22  
e-mail: const-z@te.net.ua



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