

5. *Батищев Д.И.* Генетические алгоритмы решения экстремальных задач: Учебное пособие. – Воронеж, 1995. – 69 с.
6. *Дуккардт А.Н.* Методы генетического поиска для мультихромосомных представлений / VII всероссийская научная конференция студентов и аспирантов, Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – С. 108–109.
7. *J. Cong, C. Wu*, “Global Clustering-Based Performance-Driven Circuit Partitioning”, Proc. ISPD, 2002.
8. *W.E. Donath et al*, “Timing Driven Placement Using Complete Path Delays”, Proc. ACM/IEEE DAC, 1990.
9. *G. Karypis, R. Aggarwal, V. Kumar, S. Shekhar*, “Multilevel Hypergraph Partitioning: Application in VLSI domain”, Proc. ACM/IEEE DAC, 1997.
10. *J. Minami, T. Koide, S. Wakabayashi*, “An Iterative Improvement Circuit Partitioning Algorithm under Path Delay Constraints”, IEICE Trans. Fundamentals, Dec. 2000.
11. *P. Zarkesh-Ha, J.A. Davis, J.D. Meindl*, “Prediction of Net-Length Distribution for Global Interconnects in Heterogeneous System-on-a-Chip”, IEEE Trans. VLSI Systems, Dec. 2000.

Ю.В. Чернухин, А.А. Приемко

АЛГОРИТМ НАВИГАЦИИ АДАПТИВНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПО АВТОМАТИЧЕСКИ ФОРМИРУЕМОЙ КАРТЕ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Введение. Автоматическое формирование карты внешней среды и навигация по ней в условиях динамических изменений этой среды являются актуальными проблемами современной робототехники. Для их решения необходимо разрешить как минимум две задачи. Первой из них является выработка стратегии исследования среды функционирования робота с одновременным формированием ее карты. Такая стратегия должна обеспечивать полное обследование среды для выявления всех возможных путей движения к цели, так как некоторые из них могут оказаться перекрытыми подвижными препятствиями в процессе навигации. Второй задачей является планирование кратчайшего маршрута движения при помощи созданной карты без столкновений со стационарными и подвижными препятствиями.

Решение этих задач известными методами вызывает значительные трудности, т.к. они ориентированы на применение в условиях статических сред с априори известной конфигурацией элементов [1]. Данное обстоятельство стимулирует разработку новых бионических методов, связанных с имитацией нейросетевым способом алгоритмов решения указанных задач живыми организмами.

С целью решения указанных задач в работе [2] предложен метод формирования и использования карты внешней среды адаптивным мобильным роботом (АМР). При этом предполагается, что АМР имеет в своем составе сенсорную подсистему (СП), содержащую дальнометры для измерения расстояний до объектов среды и видеокамеру для идентификации этих объектов и их классификации по признаку принадлежности к препятствиям либо цели. Определение пути, пройденного АМР, осуществляется с помощью одометрической подсистемы с применением пассивного колеса. Суть метода формирования карты состоит в том, что внешняя среда дискретизируется на участки, соизмеримые с габаритными размерами корпуса робота. Построение карты происходит одновременно с исследованием внешней среды. Участок, на котором в начальный момент времени находился АМР, считается началом координат создаваемой карты. Находясь на начальном участке, АМР определяет координаты соседних участков, связанных с начальным по шаблону четырехсвязности. После этого робот переходит к их исследованию с

одновременным нанесением на карту координат этих участков вместе с типами расположенных на них объектов. Далее происходит определение участков, соседних с исследованными, их изучение и т.д. Описанный процесс повторяется до тех пор, пока в среде не останется ни одного неисследованного участка [2]. После формирования карты процесс навигации по ней осуществляется согласно бионическому методу управления АМР на основе нейропроцессорных сетей [3]. При этом предполагается, что кроме СП робот имеет в своем составе подсистему формирования модели внешней среды (ПФМВС), отображающую сеть (ОС), сеть афферентного синтеза (САС), сеть принятия решений (СПР), подсистему определения собственного положения (ПОСП) и эффекторную подсистему (ЭП).

Пусть цель задана на карте и не попадает в зону восприятия СП робота. Тогда процедуру определения направления движения на каждом шаге выполняется в два этапа [3]. На первом этапе карта в масштабе отображается в САС, где определяется направление глобального перемещения АМР без отработки шага перемещения ЭП. Информация об этом направлении с выходов СПР отображается в тот процессор дальнего ряда САС, который соответствует выбранному направлению. На втором этапе в САС отображается информация с выходов СП, а выбранный на предыдущем этапе процессор используется в качестве целевого. Решение, принятое СПР на втором этапе, поступает в ЭП и обрабатывается исполнительными устройствами робота. После этого происходит определение собственного положения АМР на карте среды, которая вновь считывается в САС с учетом произошедшего перемещения. Снова определяется промежуточная цель, вычисляется и обрабатывается следующее направление движения и т.д. до выхода АМР в зону цели [3].

Экспериментальные исследования этого метода показали его эффективность в условиях статической среды, а также в динамической среде, содержащей подвижные объекты, перемещающиеся со скоростями значительно меньшими скорости АМР. В процессе эмуляции описанного метода на программных моделях при скоростях этих объектов приблизительно равных или превосходящих собственную скорость робота происходили их столкновения с АМР. В то же время наличие таких столкновений в условиях реальной внешней среды крайне нежелательно. Например, они могут повлечь за собой повреждение АМР или даже выход его из строя. Поэтому стратегия планирования маршрута движения робота в среде должна учитывать не только длину траектории, но и безопасность АМР (в смысле отсутствия столкновений с препятствиями) в процессе ее отработки. С целью устранения отмеченного недостатка в данной работе предлагается использовать в составе системы навигации по сформированной карте специальных структур, экстраполирующих перемещения подвижных объектов среды. Суть задачи, решаемой этими структурами, состоит в определении положений подвижных препятствий на следующем шаге на основании сравнения их текущих положений с теми, которые они занимали в предыдущий момент времени t_{i-1} [4].

Алгоритм навигации по карте в условиях динамических изменений внешней среды. Предполагается, что перед началом процесса навигации АМР при помощи карты цель не попадает в зону восприятия его СП. Тогда основная идея алгоритма состоит в определении при помощи карты направлений движения к свободным участкам, через которые проходит кратчайший маршрут следования к цели, и перемещении в определенном направлении до тех пор, пока цель не попадет в зону восприятия сенсоров АМР. Свободные участки, ведущие к цели, будем называть промежуточными целями. Для формального описания алгоритма введем следующие обозначения:

Percept – оператор формирования дискретной модели внешней среды в ПФМВС; *PathPlan* – оператор определения единичного вектора направления к цели; *Extr* – оператор экстраполяции положения подвижных препятствий на 1 квант дискретного времени; $\bar{Y}_{OM_{i+1}}^E$ – дискретные вектора, определяющие экстраполированные положения подвижных препятствий в следующий момент дискретного времени; \bar{U}_i – единичный вектор направления на цель; ρ – модуль скорости робота; \bar{X}_{Ri}^K – дискретный вектор, определяющий положение робота на карте среды на i-м шаге; \bar{Y}_T^K – дискретный вектор, определяющий положение цели на карте (цель предполагается неподвижной); \bar{Y}_{OSi}^K – дискретные вектора, определяющие положение стационарных препятствий на карте; \bar{Y}_{li} – дискретный вектор, определяющий положение промежуточной цели в системе координат, связанной с корпусом робота; \bar{Y}_{OSi} – множество дискретных векторов, определяющих положение стационарных препятствий в среде на i-м шаге, в той же системе координат; \bar{Y}_{OMi} – множество дискретных векторов, определяющих положения подвижных препятствий в среде, в той же системе координат, что и \bar{Y}_{OSi} ; X_{Ri} – вектор, определяющий положение робота в среде на i-м шаге; *Correct* ($X_{R(i+1)}$) – оператор локализации положения АМР на карте по информации, получаемой из среды. Тогда, в соответствии с бионическим методом управления [3], алгоритм движения к цели по карте может быть сформулирован следующим образом:

1. $i=1$.
2. $\{\bar{Y}_{Ti}, \bar{Y}_{OSi}, \bar{Y}_{OMi}\} = \text{Percept}(Y_T, Y_{OSi}, Y_{OMi})$.
3. Если $\bar{Y}_{Ti} \neq 0$, то переход к п.11, иначе – следующий шаг.
4. $\bar{Y}_{li} = \text{PathPlan}(\bar{Y}_T^K, \bar{Y}_{OSi}^K)$.
5. $\bar{Y}_{OM_{i+1}}^E = \text{Extr}(\bar{Y}_{OMi}, \bar{Y}_{OM_{i-1}})$.
6. $\bar{U}_i = \text{PathPlan}(\bar{Y}_{li}, \bar{Y}_{OSi}, \bar{Y}_{OM_{i+1}}^E)$.
7. $\Delta X_{Ri} = \rho \bar{U}_i \Delta t$.
8. $X_{R(i+1)} = X_{Ri} + \Delta X_{Ri}$.
9. $\bar{X}_{R(i+1)}^K = \text{Correct}(X_{R(i+1)})$.
10. $i=i+1$, переход к п.2.
11. $\bar{Y}_{OM_{i+1}}^E = \text{Extr}(\bar{Y}_{OMi}, \bar{Y}_{OM_{i-1}})$.
12. $\bar{U}_i = \text{PathPlan}(\bar{Y}_{OSi}, \bar{Y}_{OM_{i+1}}^E, \bar{Y}_{Ti})$.
13. $\Delta X_{Ri} = \rho \bar{U}_i \Delta t$.
14. $X_{R(i+1)} = X_{Ri} + \Delta X_{Ri}$.
15. Если $X_{R(i+1)} = Y_{Ti}$, то останов, иначе – следующий шаг.
16. $i=i+1$, переход к п.2.

Данный алгоритм построен так, что в п.2 выполняется формирование модели внешней среды при помощи оператора *Percept*. Далее в п.3 происходит проверка попадания цели в область восприятия СП АМР. Если цель находится в его зоне восприятия, то карта не используется. Вместо этого происходит переход к п.11, в котором экстраполируются положения подвижных препятствий в следующий момент дискретного времени. Далее в п.12 определяется единичный вектор направления движения к цели с учетом экстраполированного плана проходимости среды. В п.13 выполняется определение величины шага перемещения АМР в определенном направлении, который обрабатывается в п.14. Далее в п.15 происходит проверка достижения цели. Если АМР достиг цель, то работа алгоритма завершается, в противном случае описанный процесс повторяется. Если же цель находится вне зоны восприятия СП АМР, то в п.4 происходит определение вектора направления на промежуточную цель по карте среды оператором *PathPlan*. После этого в п.5 экстраполируются положения подвижных препятствий, а в п.6 определяется направление движения к очередной промежуточной цели с учетом этой информации. В п.п.7-8 реализуется шаг в определенном направлении. В п.9 происходит уточнение позиции АМР на карте. Цикл движения к цели при помощи карты, приведенный в строках 4-9, повторяется до попадания цели в зону восприятия АМР.

Экспериментальные исследования алгоритмов. Экспериментальная проверка описанных алгоритмов проводилась при помощи специально разработанного программного моделирующего средства, реализованного в операционной системе Windows. Главное окно этой программы приведено на рис.1,а. Данное средство включает программную модель нейросетевой системы управления АМР, редактор внешней среды с возможностью задания положений робота, и цели, а также траекторий движения подвижных препятствий. Кроме этого, моделирующее средство имеет в своем составе подпрограммы, реализующие алгоритмы автоматического формирования карты внешней среды и навигации по ней АМР. При этом имеется возможность включать и отключать экстраполяцию положения подвижных препятствий в среде при навигации. При помощи описанного средства был проведен ряд экспериментов. Взаимное расположение АМР, неподвижного препятствия и цели перед началом одного из них показано на рис.1,а. В начале эксперимента среда задавалась статической. Эксперимент проводился в три этапа. На первом этапе АМР осуществлял построение карты среды, используя описанную выше методику. При этом начальная позиция робота отмечена на рис.1,а прямоугольником. В результате АМР полностью исследовал внешнюю среду и сформировал ее карту, показанную на рис.1,б. В процессе исследования среды столкновения робота с препятствием отсутствовали.

На втором этапе эксперимента АМР помещался на начальный участок, а в среду добавлялось подвижное препятствие, начальное положение и траектория которого совпадали (см. рис.1,в). Скорости АМР и этого препятствия задавались равными 2 м/с. Перед роботом ставилась задача поиска оптимального (в смысле длины траектории) пути движения к цели при помощи созданной карты без применения экстраполяции позиции подвижного препятствия. В результате эксперимента (см. рис.2,а) АМР спланировал траекторию наиболее короткую из всех, ведущих к цели, однако в процессе движения допустил столкновение с подвижным препятствием.

На третьем этапе АМР вновь помещался на начальный участок. При этом для навигации по карте использовался описанный алгоритм с экстраполяцией. Траектория движения робота к цели в этом случае показана на рисунке рис.2,б, из которого видно что, хотя спланированная траектория немного длиннее, чем предыдущая, но она позволила АМР избежать столкновения с подвижным препятствием.

Результат эксперимента свидетельствует о том, что описанный алгоритм навигации по карте позволяет планировать не только короткие, но и безопасные траектории движения к цели.

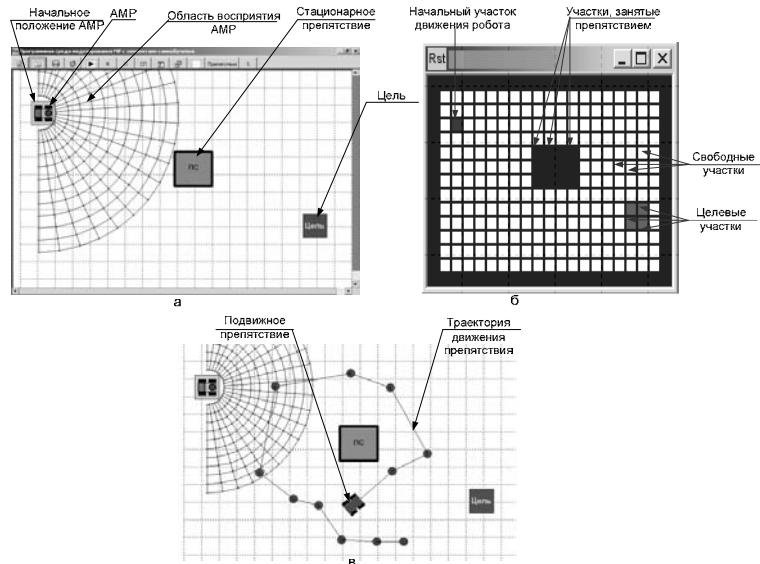


Рис.1. Окна программного моделирующего средства

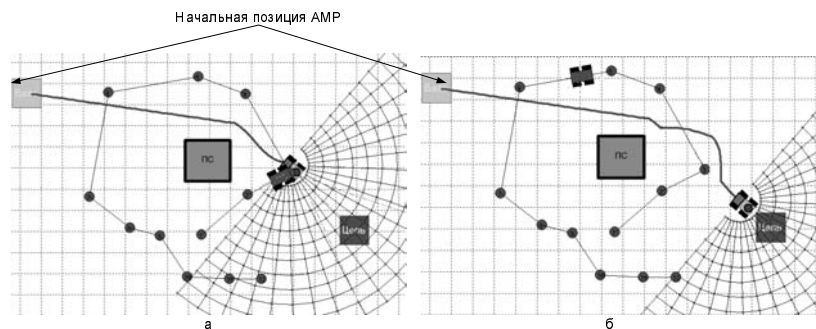


Рис.2. Результаты экспериментов

Вывод. Таким образом, применение описанного алгоритма навигации по автоматически сформированной карте в условиях динамических изменений внешней среды позволило AMР планировать короткие и безопасные траектории движения к цели в условиях, когда его собственная скорость сравнима со скоростями подвижных препятствий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Filliat D., Meyer J.A. Map based navigation in mobile robots. A review of localization strategies. *Journal of Cognitive System Research*, №4,2003, pp. 243-282.
2. Чернухин Ю.В., Приемко А.А. Формирование и использование карты внешней среды в задаче навигации адаптивного мобильного робота. Материалы VIII всероссийской научно-технической конференции “НЕЙРОИНФОРМАТИКА 2006”, Сборник трудов. Часть 2. – М.: Изд-во МГУЛ. 2006. – С.10-16.

3. Чернухин Ю.В. Нейропроцессорные сети. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 439 с.
4. Чернухин Ю.В., Писаренко С.Н. Нейросетевая экстраполяция в системах управления интеллектуальных мобильных роботов. Сборник докладов Юбилейной Международной конференции по нейрокибернетике. – Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «ЦВВР», 2002, Т2. – С. 147-151.

Б.К. Лебедев, С.А. Степаненко

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РАЗМЕЩЕНИЯ, УПРАВЛЯЕМЫЙ ВРЕМЕННЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ*

Введение. Интенсивное исследование проблемы размещения элементов СБИС, управляемого временными ограничениями, проводилось в последние 20 лет, и продолжается в настоящее время. Производительность схемы определяется задержкой наиболее длинного пути, но временные ограничения являются предельно сложными. Число путей прохождения сигнала растет экспоненциально с ростом размера схемы. Даже схема умеренного размера может иметь огромное количество путей. Более того, на различные пути могут накладываться разные ограничения.

Существующие алгоритмы размещения, управляемого временными ограничениями, можно разделить на 2 категории: основанные на оценке путей распространения сигналов (*path-based*) и основанные на оценке цепей схемы (*net-based*).

Path-based алгоритмы [1-3] непосредственно пытаются минимизировать задержку наиболее длинного пути. Популярным подходом является минимизация суммы длин некоторого множества критических путей. Этот набор критических путей либо предварительно определяется методом статического временного анализа, либо может динамически изменяться от итерации к итерации. Большинство алгоритмов этого класса основано на методах математического программирования. Преимуществом алгоритмов типа *path-based* является достаточно точный учет временных ограничений в процессе оптимизации. Тем не менее, их недостаток заключается в том, что они требуют существенное количество вычислительных ресурсов из-за экспоненциального числа путей, которые необходимо одновременно минимизировать. Кроме того, в некоторых типах алгоритмов размещения, например, в алгоритмах, основанных на нисходящем разбиении, очень трудно, а иногда невозможно, поддерживать точный глобальный учет временных ограничений.

Алгоритмы **net-based** [4-7] в отличие от **path-based** алгоритмов непосредственно не накладывают ограничения на пути прохождения сигнала. Вместо этого, временные ограничения или требования на пути преобразовываются в ограничения на длину цепей или веса цепей. Основная идея заключается в том, чтобы более критическим цепям присвоить больший вес. Эта информация затем используется алгоритмом минимизации взвешенной длины соединений, с целью получения размещения с лучшей временной задержкой. Этот полученный вариант размещения рассматривается статическим анализатором, после чего получается новый набор временной информации, которая используется на следующей итерации. Обычно этот процесс повторяется на нескольких итерациях, до тех пор, пока наблюдается улучшение или пока не будет выполнено заданное число итераций. Методики, основанные на вычислении весов цепей, обладают некоторыми привлекательными свойствами: сравнительно низкая временная сложность, большая гибкость (могут быть интегрированы в существующие алгоритмы, минимизирующие длину про-

* Работа выполнена при финансовой поддержке программы развития научного потенциала высшей школы РНП.2.1.2.2238