

УДК 629.051:004.932.72

Е.И. КУЧЕРЕНКО, А.С. БОНДАРЕНКО

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

АДАПТИВНАЯ НАВИГАЦИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

В работе рассматривается задача синтеза информационно-управляющей структуры программно-аппаратного обеспечения навигационных подсистем мобильных роботов для априорно неопределенной рабочей среды. Предложен математический аппарат построения алгоритмически однородных навигационных сред на основе расширенных сетей Петри, в рамках которого дается формализация основных положений интерпретирующей навигации. Обосновываются решения основных навигационных задач в рамках предложенной концепции.

навигация, навигационная среда, сети Петри, адаптер, адаптация, мобильный робот

Введение

Автономные мобильные системы, в частности, мобильные роботы (МР), применяются сегодня в самых разнообразных сферах: промышленность требует многофункциональных роботов, рядовой покупатель интересуется интеллектуальными сервисными и игровыми роботами, службы чрезвычайных ситуаций рассчитывают на автономные роботы, способные выполнять задачи слежения и поиска, требующие адаптивного перемещения в недетерминированной среде – проблемной среде (ПС). Одними из ключевых задач, требующих оперативных решений, являются задачи навигации. В динамически изменяющихся условиях ПС преобладающе применяются персональные схемы навигации и, в частности, интерпретирующая навигация [1, 2].

Многообразие сенсорной информации, используемой для синтеза разрешенных зон передвижения [3], как и многообразие алгоритмов и методов ее обработки (зачастую несовместимых), вносят значительную неоднородность в представление данных о ПС, используемых для синтеза навигационной среды МР. Многоуровневая взаимосвязанность частичных алгоритмов анализа сенсорных данных в процессе навигации фактически исключает схему централизованного развития решений, – требуется централизованно-децентрализованная структура поддержки и принятия решения, что позволяет рации-

нальное распределение ресурсов и задач в практических реализациях. В связи с этим предлагаемая работа является **актуальной**.

Целью настоящей работы является повышение эффективности принимаемых решений в системах навигации МР за счет развития и применения математических моделей, адекватно отображающих объекты исследования. В качестве модели такой структуры, обладающей одновременно алгоритмической однородностью, предлагается использование аппарата расширенных сетей Петри [4, 5].

1. Постановка задачи

Важной проблемой, решение которой во многом влияет на функциональность навигационной подсистемы МР, является применение таких видов сенсорной информации, которые позволяют получать достаточно большой объем информации о ПС за малое время и изыскания соответствующих методов эффективной ее обработки. Одним из наиболее перспективных видов сенсорной информации является визуальная информация (ВИ). В этом случае основным связывающим звеном между МР и ВС является отношение видимости \mathcal{N} характерных элементов среды [2], образующих терраин Tr с введенным множеством M^{\sim} ориентиров, обладающих пространственно-временным континуумом, сохраняющимся при переходе из точки α_1 в точку α_2 , где

$\alpha_1, \alpha_2 \in \{\alpha_i\}$, $i \in I$, при условии, что точки видимы одна из другой: $\alpha_1 \sim \alpha_2$. Соответственно, будем обозначать точки невидимые одна из другой как $\alpha_1! \sim \alpha_2$.

Необходимо построить активную адаптивную по отношению к пространству состояний ПС, которое в общем случае может быть определено не полностью, модель навигации, базирующуюся на конечном множестве A_F алгоритмов синтеза и верификации визуальных признаков ВС [6] и множеств \mathfrak{Z} и \mathfrak{X} , позволяющую формировать образ ВС, траекторию передвижения подвижных частей и алгоритм оценки относительного месторасположения МР.

2. Структурно-алгоритмическая организация мобильной системы

Навигационной средой (НС) будем называть конфигурационное пространство, составленное множествами дескрипторов ПС и реализованных информационно-двигательных действий (ИДД) МР, на которых определено однозначное отношение достижимости его элементов. В этой связи предполагается, что МР является активной системой, описываемой множеством \mathfrak{X} , содержащим топологически фиксированное множество \mathfrak{Z} , характеризующее ИДД, элементы которого находятся в непосредственной адаптивной визуальной взаимосвязи с конфигурацией ПС, представленной множеством A_0 .

Укрупненная схема навигации произвольного прототипа автономной мобильной системы разбивается на две частичных схемы: восприятия окружающей его, с позиций интерпретации проблемной среды и организацию целенаправленных действий по решению поставленных задач. Эффективная реализация этих схем возможна лишь на основе оптимального на множестве критериев и ограничений согласования характеристик всех подсистем МР. Это, в частности, может означать минимизацию ресурсов на обработку поступающей в систему управ-

ления информации. На каждом уровне переработки информации в подсистемах МР происходит принятие некоторых решений, которые по типу могут быть одношаговыми, многошаговыми либо непрерывными. Использование ВИ предопределяет использование многошаговых или непрерывных решений, а использование в качестве бортовых компьютеров цифровых вычислительных систем обуславливает в основном реализации многошаговых (дискретных) решающих схем, основанных на теории дискретных автоматических систем и теории конечных автоматов.

Решение задач навигации прежде всего связано с наличием априорного описания ПС в виде карты либо, в более общем случае, в виде виртуальной модели [1]. В результате, если имеется формализованное, ограниченное описание внешней среды, то в его пространстве реализуемы классические методы идентификации целей на множестве и формирования траекторий подхода к ним, например, используя методы динамического программирования [7]. Синтез полностью формализованного описания ПС в рамках некоторого единого подхода практически неосуществим, поэтому одним из адекватных вариантов формализации ПС является структурно-иерархическое описание.

До настоящего времени было разработано значительное количество алгоритмов анализа изображений, синтеза дескрипторов, построения предположений о глубине ПС по ее двухмерной проекции, но в сущности они организуются разрозненно, порой манипулируя противоречивыми исходными данными, что в целом при совместном их использовании привносит алгоритмическую неоднородность в описание внешней среды на функциональном уровне ее виртуальной модели [6]. Наряду с этим, формализмы, на которых базируются решения навигационных задач, требуют оптимального выбора существующих алгоритмов их определения в пространстве состояний МР и ПС.

Весомым аргументом для определения алгоритмической однородности является тот факт, что реализация сложной иерархической структуры навигационной подсистемы требует, чтобы процесс формирования ею решений не сокращал реальной скорости передвижения при безусловном выполнении задач функционирования МР (исполнение в масштабе «жесткого» реального времени), а это практически невозможно без распараллеливания алгоритмов [8]. В зависимости от структурной сложности среды востребуются различные уровни механической, сенсорной и интеллектуальной активности МР, причем зачастую уровни, определяемые их комплексной комбинацией. При этом, поскольку МР функционирует с определенной и всегда конечной целью, способ постановки задачи функционирования во многом предопределяет возможности навигации в ПС.

Анализ существующих решений [4] показал, что основными требованиями, предъявляемыми к алгоритмическим средам представления систем являются: возможность представления всего процесса функционирования системы в динамике при одновременном протекании отдельных частичных процессов; простота перехода к другим методам алгоритмического описания и обратно для использования известных методов анализа и синтеза; простота и наглядность при формулировке проблемы или алгоритма функционирования; описание проблемы функционирования известным математическим аппаратом; изменение алгоритмического описания при уточнении проблемы функционирования; простота правил композиции и декомпозиции алгоритмического описания отдельных частей процесса функционирования; минимизация алгоритмического описания при его анализе и синтезе. Дополнительные требования, предъявляемые к алгоритмическому представлению НС, – для достижения произвольной цели необходимо либо исследование среды, либо наличие формального описания уже исследо-

ванной среды, представленной дескриптивной картой (виртуальной моделью).

Исходя из функционально-логической структуры взаимодействующих объектов, НС характеризуется модульностью и структурной гибкостью, причем с характерной лишь ей алгоритмической неоднородностью. Поэтому, синтез модели целесообразно проводить по агрегативно-декомпозиционному принципу.

Произвольная навигационная система мобильного объекта условно может рассматриваться в виде трех уровней [9]: прикладного, стратегического и тактико-рефлексивного. При этом прикладной уровень представляет интерфейс задания целей, тактико-рефлексивный уровень регламентирует доступный технический интерфейс согласованного (некритического) управления исполнительными модулями (включительно управление сенсорными устройствами), а стратегический уровень – стратегии совместного согласованного управления модулями системы, объединяемыми выполнением единой цели. Естественно, что информационные потоки, циркулирующие на этих трех уровнях, в общем случае разнообразны и, соответственно, их описание фактически невозможно осуществить, находясь в каком-либо единственном математическом аппарате. Следовательно, первоочередной задачей является реализация связки информационных потоков различного типа в соответствии с их взаимовлиянием.

Если множество инструкций переходов \mathcal{Z} является четко формализованным, то подобным свойством не характеризуется множество A_0 , элементами которого являются некоторые, реализуемые бортовым компьютером, алгоритмы интерпретации ВИ. Множеству A_0 свойственна неполнота описания, что в конечном итоге ведет к трудностям определения конфигурации ПС, а значит и положения МР в ней. Используемые ранее в промышленных роботах количественные [10], например, декартовы, системы координат становятся из-за относительно больших

вариаций определения абсолютного расположения конструкции робота в среде неприменимыми в исходном виде. На замену им вводятся качественные системы координат, основанные на определении отношения видимости – отношений между дескрипторами ВИ и возможностями МР их уточнения посредством допустимых ИДД. Таким образом, структурная организация навигационной подсистемы может быть представлена сетью связанных элементов целевого вывода поддержки принятия решений.

3. Математическая модель навигационной среды

Конфигурационное пространство в динамической недетерминированной среде формируется в результате установления причинно-следственных связей между идентифицированными локальными признаками ВИ и пространственной конфигурацией расположения подвижных частей конструкции МР. Недетерминированность среды определяется недоопределенностью (нечеткостью) [11] множества A_0 в условиях ограничения на временные и иные ресурсы. Фактически функционирование навигационной подсистемы определяется алгоритмом, общий вид которого имеет довольно сложную иерархическую структуру. Алгоритм любой сложности при этом может быть представлен в виде декомпозиции элементарных инструкций, а его решения – в пространстве состояний.

В этой связи качественную систему координат, используемую в персональной и локальной схеме навигации, эффективно реализовать сетью Петри. В данном случае система может быть представлена композицией двух интерпретаций – управляющей СП (УСП) [4] и раскрашенной СП (РСП) [5]. Следствием композиции УСП и РСП является новое расширение сетей Петри – навигационные СП (НСП).

Навигационной СП называется бихроматический динамический оргграф

$$NPN = \langle P, T, K, V, \Sigma, G, E, \Omega, M, I \rangle, \quad (1)$$

состоящий из двух непустых непересекающихся множеств вершин $P = \{p_i\}$ и $T = \{t_j, \tau_j\}$, $P \cap T = \emptyset$. Вершины P , T связаны множеством дуг K ($P \cap K = T \cap K = \emptyset$) согласно множества функций объединения узлов V , которые определены объединением декартовых произведений ($P \times T \cup T \times P$). В сети элементам множества позиций P сопоставляется разметочный комплект M , который определен на конечном множестве типов разметок Σ , а элементам множества переходов сопоставляются функции срабатывания множества G , выбираемые в зависимости от выполнения множества условий E и множества временных ограничений Ω ; I – инициализирующее множество, определяющее начальное состояние модели.

Использование оргграфа (1) удовлетворяет требованиям общей функционально-логической схемы навигации перемещением маркера (или группы маркеров) через разрешенные переходы $t_j, \tau_j \in T$. Навигация определяется фиксированной процедурой поддержки принятия решений о дальнейшем продвижении на текущем этапе.

Сложная задача может быть сконструирована и смоделирована на НСП (1) из более простых задач, вплоть до элементарных вычислительных инструкций, причем определяемые действия декларируются вершинами-переходами сети, принадлежащих множеству T . Все множество переходов функционально может быть разделено на два подмножества – простых переходов $t_j \in T$ и макропереходов [4].

Макропереход обобщает группу простых инцидентных переходов t_j в отдельный конструктивный элемент сети

$$\tau_{j_1} = \left\{ t_j^u \right\} \tau_{j_1} \subset T, \quad j \in J, \quad j_1 \in J, \quad J_1 \subset J. \quad (2)$$

В виду того, что НС объединяет как описание взаимодействия подсистем реального динамического объекта, так и информационно-управляющей

системы активирования этих подсистем, то переходам и макропереходам может сопоставляться алфавит $L = \{\bar{X}, \bar{Y}\}$. Алфавит L репрезентирует выполнение инструкций как функциональную зависимость выходного вектора \bar{Y} от входного \bar{X} и, в общем случае, позволяющего дополнять условия выполнения алгоритмов на сети реальной зависимостью активирования описываемой подсистемы.

Текущая конфигурация НС формируется маркированием вершин-позиций сети из множества P . Соответственно, позиции НСП репрезентируют априорно определенные исходы работы алгоритмов, реализованных в сети. Тогда нахождение пути от исходной точки (состояния МР) к целевой точке (состояния МР у цели) формализуется в пространстве маркировок позиций НСП. Применение аппарата НСП позволяет моделировать и реализовать навигационную подсистему МР как надстройку над его системой управления, что может быть реализовано в виде системы знаний [12].

Пространство состояний НС определяется разметочным множеством $M : [P \times \Sigma] \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$. Элементы $\zeta_i \in \Sigma$ формируют маркирование позиций и, в общем случае, определяются многочленом [5]:

$$\zeta_i = \sum_{r \in N, S} \kappa'_r \zeta_s, \quad (3)$$

где ζ_s – ранее фиксированные разметочные типы, $\zeta_s \subseteq \Sigma$; κ'_r – вес элемента типа ζ_s ; S – количество ранее определенных типов; N – множество целых натуральных чисел.

Типизация позиций НСП, позволяющая преодолеть «проклятие размерности» [7], – отображает сигнальное пространство сенсорной подсистемы во множество элементов, многозначно кодируемых посредством выражения (3). Если рассматривать формализацию элементами НСП алгоритмов распознавания и идентификации, то Σ представляет структурно-иерархическое связывание локальных признаков. Определение подобным образом струк-

турированных маркеров формирует правила декомпозиции системы на части. Это позволяет раскладывать сложные задачи восприятия внешней среды на более простые, имеющие различные реализации, моделируя их исполнение с целью выбора оптимальных решений, тем самым сокращаются ресурсные затраты мобильной системы.

Таким образом, адаптивная навигация прежде всего основана на выделении из всей имеющейся комплексной сенсорной информации множества эталонных (имеющих абсолютный признак) дескрипторов, определяющих относительную конфигурацию ПС и позволяющих адаптироваться к среде.

Введем понятие адаптерного типа маркера. Адаптерным типом маркера называется регламентируемый многочленом (3) и имеющий в границах НСП абсолютную интерпретацию. Соответственно, позиция, имеющая адаптерный маркер, называется адаптером. На уровне визуального восприятия адаптером определяется элемент ПС, для которого определена пространственная граница.

Тогда решение навигационных задач осуществляется в пространстве синтезированных адаптерных типов, от числа и точности которых зависит функциональность навигационной подсистемы МР в целом. Поскольку пара связываемых состояний модели может реализовываться на различных по типу маркеров позициях, а определяемые связывающим эти позиции переходом инструкции могут лежать на границе входящих типов маркеров, то каждой дуге сопоставляется условие $e \in E$ так, что

$$\forall k \in K \exists e \in E : [e(k) \subseteq \Sigma(p)], \quad (4)$$

где $k : [\{p, t\} \vee \{t, p\}]$ – связка, $p \in P, t \in T$; $\Sigma(p)$ – структурное ограничение типизации позиции p .

Емкость j -й позиции определяется как комплект [13] на элементах множества Σ :

$$c_j = \bigcup_{i=0}^{M_j} M_{j,i} \zeta_i, \quad \zeta_i \in \Sigma, M_j \neq 0. \quad (5)$$

Определим значение комплекта:

$$\Xi(e) = \begin{cases} (\zeta_r, \xi) + [\#(\zeta_r, c) - \#(\zeta_r, e)] \geq 0, \forall \zeta_r \in \Sigma; \\ \emptyset, \end{cases} \quad (6)$$

где $r = 0, 1, \dots, \lambda$.

Следовательно, для активации дуги $k \in K$ с условием $e(\zeta_0, \zeta_1, \dots, \zeta_\lambda)$ и входящей емкостью c (5), необходимо, чтобы комплект принимал ненулевое значение $\Xi(e) \neq \emptyset$:

В традиционной интерпретации СП [14] вектор маркирования исключает количественные характеристики, а лишь позволяет проследивать структурное согласование. Поскольку МР функционирует в ограниченном метрическом пространстве, то алгоритмы структуризации ПС и управления исполнительными подсистемами МР должны согласовываться также количественно (данные, параметры времени, сложности и т.п.). Сообразно этому, обобщенное условие активации дуги запишется в виде функции принадлежности:

$$\mu_e(\chi, t) = \begin{cases} 1, \text{ если } \forall \chi \in \bar{X}_t, \exists \zeta \subseteq e_t : \\ \quad \{\chi \subset \langle \zeta \rangle \wedge \Xi(e_t) \neq \emptyset\}; \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases} \quad (7)$$

где $\bar{X}_t \in L$ – входной алфавит перехода t ; e_t – условия, регламентируемые множеством входящих в переход дуг; $\langle \zeta \rangle$ – количественная характеристика передаваемых переходу данных.

Используя подходы теории искусственного интеллекта [15, 16], в общем случае функция (7) может быть представлена на некотором интервале $[0, 1]$. Характеристическая функция (7) прежде всего используется для построения карты местности, поскольку на ней могут находиться одновременно несколько идентичных типов объектов/препятствий, а следовательно их отличия могут формироваться лишь посредством алфавитов переходов.

Уточним понятие отношения видимости. *Отношением видимости*, определенным на элементах НСП, называется допустимая граница разницы между разметочными векторами текущего и выбранного состояний сети.

Без ограничения общности репрезентируемых НСП объектов пространства НС, переходим на уровень абстракций представления карты местности (виртуальной модели ПС), функция $\mu_e(\chi, t)$ определяет отношение видимости $p_r \sim p_s$ объектов. Отношение видимости $p_r \sim p_s$ определяется соответственно структурами данных ζ в некоторых позициях p_r и p_s . В случае $\mu_e(\chi, t) = 0$ для некоторых позиций определяется отрицание отношения видимости $p_r \not\sim p_s$.

Проследивая активность переходов, тем самым формируется допустимое множество \mathfrak{Z} (в предположении, что иерархия связей связана с управлением исполнительными подсистемами) и, соответственно, разрешается исполнение функций этих переходов $g \in G$. Использование ВИ регламентирует строгие ограничения на время активности разрешенных ИДД. В этой связи каждому переходу сопоставляется время его активности Ω и, поскольку выбор переходов в процессе смены состояний производится посредством анализа функции (7), выполнение инструкций перехода зависит от времени его допустимой активности. Тогда для временного согласования активирования переходов достаточно следить за соответствующими значениями *дебюта* ω_d – временем начала и *эндишпелем* ω_e – временем окончания выполнения перехода.

Срабатывание перехода t происходит каждый раз, когда $\forall e \in \bullet K[t], \exists \mu_e(\chi, t) = 1$, что приводит к формированию нового вектора маркирования, определяющего состояния системы:

$$\begin{aligned} (\omega_d, \omega_e) \in \Omega \wedge \forall (p^\bullet, \bullet p) \in P, M^{(z+1)}[p] = \\ = M^{(z)}[p^\bullet] - \Xi(K^\bullet[t]) + M^{(z)}[\bullet p] + \Xi(\bullet K[t]), \end{aligned} \quad (8)$$

где $K^\bullet[t]$ – условия, определенные активировавшими переход дугами; $\bullet K[t]$ – условия, определенные активированными переходом дугами; $\bullet p, p^\bullet$ – соответственно, выходящие и входящие позиции, струк-

турно связанные с переходом; z – индекс состояния системы.

Поскольку разметка в сети может иметь адаптерную форму, то наряду с простыми переходами существуют макропереходы τ_j (2), которые позволяют разделить так же, как отмечено выше, процедуру обработки данной метки без изменения структуры сети. В этом случае управление срабатыванием осуществляется объединением условий срабатывания входящих в макропереход простых переходов.

Обобщенный алгоритм функционирования модели можно представить диаграммой отображений:

$$I \rightarrow P \times \Sigma \xrightarrow{E \times K} P \times T \xrightarrow{G(M, \mu_e, \Omega) \times E \times K} T \times P \quad (9)$$

Следствия.

1. Разметка, которая следует из $M^{(z)}$ после срабатывания некоторого подмножества переходов из множества T , является *последующей разметкой* $M^{(z+1)}$ сети.

2. Смена разметок наступает в результате последовательности срабатываний переходов $\delta = t_u, \dots, t_U$, определяющих дерево решений, представляемое последовательностным отношением $[\delta >$, в соответствии с которым смена разметок представлена как $M^{(z)}[\delta > M^{(z+U)}$.

3. Разметка $M^{(z+U)}$, которая может быть получена в результате последовательности срабатываний δ , является *достижимой разметкой* или *достижимым состоянием*.

4. Подходы к практической реализации модели ПС

Навигационное описание ПС в некотором состоянии (расположении МР) $M^{(z)}$ это в общем случае некая информация о видимых (достижимых состояниях НСП) особенностях среды. Поскольку множество алгоритмов A_F получения дескрипторов

ВИ ограничено, то для формирования произвольного объекта, определяющего при движении МР в пространстве препятствие, необходимо произвести их оптимальную композицию в соответствии с правилами функционирования НСП.

Любой прототип имеет ограниченное множество $A_{\mathcal{R}}$ алгоритмов двигательных действий, которые включают информационный уровень A_F и аппаратный уровень $A_{\mathcal{R}'}$. Следовательно, для формирования адаптивной траектории передвижения в недетерминированной среде достаточно реализовать связную структуру использования результатов этих алгоритмов в виде НСП.

Основной задачей навигации является формирование пути от текущего месторасположения МР к целевой точке. Путь от исходной точки к целевой формируется разметкой сети, соответствующей описанию целевой точки. Таким образом, решение задач навигации заключается в упорядочивании последовательности вызовов модулей, решающих частичные задачи в рамках одной целевой задачи навигации. При этом согласование различных алгоритмов определяется конструированием их взаимосвязей посредством стандартных блоков, представленных на рис. 1. Декомпозиция нескольких алгоритмов

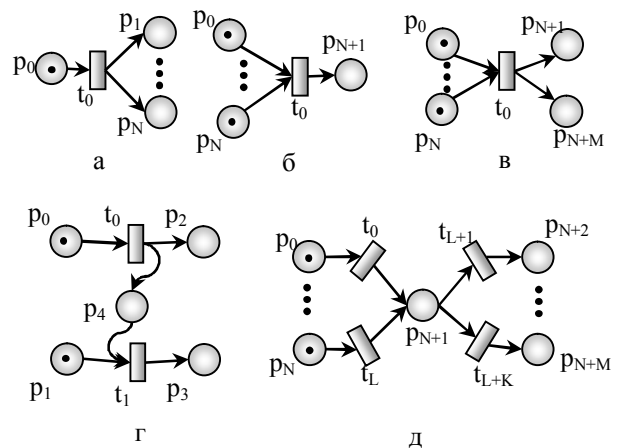


Рис. 1. Структурные элементы композиции взаимодействующих модулей:
 а – разветвление; б – слияние; в – синхронизация;
 г – параллельное с синхронизацией; д – пересечение с использованием некоторых общих ресурсов

мов A_{3R} , A_F стандартными блоками производится до тех пор, пока участок сети, образованный этими элементами в совокупности не будет решать исходную задачу.

В общем случае под МР в НСП понимается маркер (либо группа маркеров), перемещаемый согласно условий дальнейшего маркирования сети из исходной позиции $p_i \in P$. При этом МР снабжен сенсорной системой, реализованной в виде элементов НСП. После формирования подсетей, описывающих алгоритмы функционирования необходимых узлов МР, вычисляется начальное маркирование сети M_0 , определяемое преимущественно аппаратным состоянием МР:

$$\zeta \in \Sigma(p), \forall (p, \zeta) \in V : M_0(p, \zeta) = (I(p))(\zeta). \quad (10)$$

Это связано с тем, что состояние МР определяется сенсорным обеспечением. Тогда последующие действия МР могут быть вычислены исходя из текущего состояния. Полная инициализация NPN (1) (включая информационную часть), т.е. когда определены вектором маркирования визуальные признаки среды, осуществляется последовательным выполнением переходов маркированных позиций сети. В этом случае задача нахождения пути от исходной точки к цели заключается в расчете оптимального вектора маркирования, приводящего к цели согласно критериев и ограничений, – формированием последовательности δ_u . ИДД.

Множество \aleph отношений видимости (алгоритмов их построения) проектируют все пространство ВС, состоящее из проективных преобразований светового потока, во множество $M^{\sim} \subseteq \Sigma$, представляемое совокупностью визуальных признаков, извлекаемых реализованными в НСП алгоритмами. Разнообразие признаков зависит от конкретного метода анализа ВИ и может быть представлено как нахождение элементарных точек, так и более сложных элементов, например, линий или эллипсов.

Без ограничения общности рассматриваемого

круга задач, траектория передвижения подвижных узлов МР может рассматриваться исключительно как последовательность δ срабатывания множества переходов и исходно определяться временем достижения целевого состояния (анализ временных ограничений множества Ω). При этом между каждым состоянием НС предлагается структурный и условно-динамический набор допустимых ИДД, формирующих множество \aleph . Поскольку цель (или цели) задается в виде общего вектора маркирования НСП, то текущее отношение видимости будет определяться как

$$\aleph : \{p \mid \forall p \in (M^{(z)} - M^{(z+1)})\}, \quad (11)$$

где $M^{(z)}$ – маркировка, определяющая текущую конфигурацию НС; $M^{(z+1)}$ – маркировка, определяющая следующую возможную конфигурацию НС.

Группа адаптеров, связанная отношением \aleph подобно общей постановке алгоритмов выбора пути [2], объединяется террайном – метрическим пространством НСП. Тогда если Tr – носитель террайна (множество достижимых адаптеров), Tr^g – границы Tr , то $x \sim y$ эквивалентно $[x, y] \subset Tr$, где x, y соответственно начальная и конечная точки решаемой задачи навигации, причем $[x, y] \cap Tr \neq \emptyset$.

Исходя из этого под задачей понимается упорядоченная тройка $\eta = (Tr, b, z)$, где Tr – исследуемый терраин, b – начальная точка движения, z – конечная точка движения. Упорядоченная пара (b, z) называется псевдовектором задачи. Тогда если путь Π является последовательностью

$$M^{(b)}[\delta > M^{(z)}] = \{p_0, p_1, \dots, p_n\} \quad (12)$$

в рамках террайна такой что, $p_i \sim p_{i+1}$, $i = \overline{0, n-1}$ и $a = (b, z)$ – задача при $p_0 = b$, $p_n = z$, то $M^{(b)}[\delta > M^{(z)}]$ является решением задачи $a = (b, z)$ на NPN, описывающую НС.

Если каждому террайну сопоставить собственный адаптер, то решение задачи $a = (b, z)$ сводится

к построению по существующей НСП графа адаптерной достижимости. В результате анализа графа может динамически надстраиваться виртуальная модель в виде НСП таким образом, что в процессе функционирования МР формируется ассоциативный критерий выбора последующих состояний. Это определяет свойства обучаемости объекта. Предполагая, что НСП НС согласована на этапе моделирования и, соответственно, сформировано допустимое множество типов маркирования Σ , можно определить множество вершин графа Γ_A как множество адаптеров, характеризующих опорные точки траектории передвижения в ПС. Граф Γ_A строим таким образом, что пара вершин в нем соединяется направленной дугой, отмеченной символом соответствующего множества переходов T , если $\exists M_1, M_2$ достижимы из M_0 так, что $\exists p_1, p_2 \in P$, $M_1(p_1, \zeta_i) \neq 0$, $M_2(p_2, \zeta_j) \neq 0$ и M_2 непосредственно достижима из M_1 в результате срабатывания перехода $t(M_1 \xrightarrow{t} M_2)$.

Замечание. Поскольку каждый задействованный в построении траектории переход обладает алфавитом L , позволяющим метрически согласовывать структурные образования ПС, то очевидно траектория, определяемая как достижимый путь на Γ_A , является конечной. Следовательно нахождение оптимального пути адаптерной достижимости формирует оптимальную траекторию адаптивного передвижения МР в текущих условиях на множестве критериев и ограничений.

Существующие решения и подходы [1, 3, 17] ориентированы на решение данного класса задач, однако их результаты носят преимущественно постановочный и общий характер. Так в [17] рассматриваются теоретические аспекты решения задач навигации на основе графа информационной эквивалентности, построение которого фактически ни как не связано с сенсорной информацией, а это в свою очередь лишает результаты практической целесооб-

разности. В [3] была получена практическая реализация реальной навигационной системы, но при этом было введено множество значительных ограничений ПС. Таким образом, полученные в данной работе результаты обладают новизной, имеют существенные преимущества над существующими решениями. Это определяет практическую и научную значимость результатов.

Заключение

Для целей создания моделей мобильных роботов получили дальнейшее развитие расширения сетей Петри на основе композиции управляющих СП и раскрашенных СП. В работе эти расширения определены как навигационные СП. Навигационные СП относятся к классам интегральных сетей Петри. Это позволило на основе достоинств УСП и РСР получить модели, обладающие свойствами моделирования, анализа и управления объектом исследования с оперативным учетом его динамики и состояния.

Усовершенствована адаптивная модель навигации МР, которая базируется на интерпретации и представлении конечного множества алгоритмов синтеза и анализа визуальных признаков и позволяет формирование и определение траектории и месторасположения мобильного робота с учетом выбранных критериев предметной области.

Важным преимуществом навигационных СП является изобразительная мощь графического представления ими моделируемой системы. Использование графического представления исключает необходимость решения задачи адекватности формирования навигационных целей пилотом. В этом случае, в зависимости от функциональности реализованных в сети алгоритмов адаптации, графическое представление может изменяться от традиционного представления навигационных СП до навигационно-ориентированного представления в виде графических прообразов адаптеров и определенных для них информационно-двигательных действий.

Практическая значимость работы заключается в

том, что впервые предложены подходы и принципы реализации МР на основе моделей с использованием навигационных СП. Это позволило решить практические задачи по реализации процессов управления МР в составе сложных объектов.

В качестве одного из перспективных направлений дальнейшего развития результатов работы является минимизация времени моделирования, которое при возрастании размерности НС может значительно увеличиться. Это относится преимущественно к однопроцессорным системам. Однако затраченное на этапе моделирования время окупается при реализации информационно-управляющей структуры НСП в реальных системах. Перспективным направлением является также применение многопроцессорных систем.

Литература

1. Sgouros N.M., Papakonstatinou G., Tsanakas P. Localized qualitative navigation for indoor environments // Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation. – 1996. – 1. – P. 921 – 926.
2. Кирильченко А.А. О представлении информационно-двигательного взаимодействия мобильного робота со средой на основе отношения видимости. – Препринт ИПМ АН СССР № 235, 1987. – 28 с.
3. Borenstein J., Everett H.R., Feng L. Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning. – University of Michigan, USA, April 1996. – 352 p.
4. Васильев В.В., Кузьмук В.В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем. – К.: Наук. думка, 1990. – 216 с.
5. Jensen K. Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. – Berlin: Springer-Verlag, 1996. – 236 p.
6. Jiang X., Bunke H. Dreidimensionales Computersehen. – Berlin: Springer-Verlag, 1996. – 361 p.
7. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965. – 460 с.
8. Коноплянко З.Д., Хархалис І.Р. Швидкодійні багатопроцесорні обчислювальні системи. – К.: ІСДО, 1994. – 148 с.
9. Levi P., Bräunle Th., Muscholl M., Rausch A. Architektur und Ziele der Kooperativen Mobilen Robotersysteme // Autonome Mobile Systeme. – Stuttgart, 13 – 14 Oktober 1994. – P. 262 – 273.
10. Нофа Ш. Справочник по промышленной робототехнике. – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с.
11. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р.Р. Ягера – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.
12. Невлюдов И.Ш., Бондаренко А.С. Синтез модели навигационной подсистемы мобильного робота на основе расширений сетей Петри // Вісті академії інженерних наук України. – 2004. – № 4 (24). – С. 101 – 107.
13. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
14. Мурата Т. Сети Петри: Свойства, анализ, приложения // ТИИЭР. – 1989. – № 4. – С. 41 – 85.
15. Tsoukalas L.H., Uhrig R.E. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering. – New York: John Wiley&Sous. Ins, 1997. – 587 p.
16. Кучеренко Е.И. Проблема моделирования и анализа нечетких процессов управления // Радиоэлектроника и информатика. – 2001. – № 2. – С. 118 – 121.
17. Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М. Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота. – Препринт ИПМ РАН, 2002. – 33 с.

Поступила в редакцию 19.10.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.