

Взаимодействие стратегического и тактического планирования поведения коалиции агентов в динамической среде¹

Аннотация. В работе исследуется задача автоматического планирования в контексте более общей проблемы создания интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами (мобильными роботами, беспилотными транспортными средствами и др.). Основное внимание уделяется задачам, которые не могут быть решены без взаимодействия методов стратегического (символьного) и тактического (субсимвольного) планирования. В работе предлагаются оригинальные методы планирования на символьном (психологически правдоподобное планирование поведения агента) и субсимвольном (планирование траектории) уровнях. Описываются способы их взаимной увязки и возникающие прямые и обратные связи. Приводится описание применения указанных алгоритмов на модельном примере задачи коллективного перемещения в динамической среде с разрушаемыми препятствиями.

Ключевые слова: иерархическое планирование, планирование поведения, планирование траектории, знаковая картина мира, образ, значение, личностный смысл, эвристический поиск, A*, JPS.

Введение

В настоящее время наблюдается повышение интереса исследователей к созданию интеллектуальных агентов, способных действовать в коалициях для решения поставленных задач. В качестве примера таких агентов можно привести различные робототехнические системы, беспилотные транспортные средства и др. Одним из ключевых компонентов системы управления интеллектуального агента, действующего в коалиции, является планировщик, т.е. модуль (или совокупность модулей), ответственный за построение согласованного плана, направленного на достижение заданной цели. Процесс планирования обычно рассматривается исследователями одновременно в нескольких аспектах, и поэтому реализуется (автоматизируется) с помощью различных методов и подходов искусственного интеллекта, когнитивного моде-

лирования, теории автоматического управления. Так обычно различают планирование поведения и планирование траектории. В первом случае речь идёт о рассуждениях в контексте возможных действий и целей агента, во втором – в контексте перемещений. Различают также методы планирования траектории и методы выработки управления для обеспечения следования по этой траектории (т.е. планирование на уровне управляющих воздействий). Эти обстоятельства обуславливают целесообразность разработки многоуровневых систем управления [1], в которых модули планирования расположены на различных уровнях иерархии и связаны между собой (восходящими и нисходящими связями).

В работе [2] была предложена архитектура интеллектуальной системы управления STRL (strategic, tactical, reactive, layered), содержащая три уровня управления – стратегический, тактический, реактивный – и включающая отдель-

¹ Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проекты №15-37-20893, № 16-37-60055.

ные компоненты планирования на каждом из уровней. В рамках STRL-архитектуры предполагается, что на стратегическом уровне управления осуществляется планирование поведения, на тактическом – планирование траектории с учетом геометрических ограничений, формируемых на реактивном уровне. Также модулями реактивного уровня обеспечивается следование по построенной траектории. Целью настоящего исследования, продолжающего и развивающего предыдущие работы авторов, является разработка принципов и механизмов эффективного межуровневого взаимодействия для создания «сквозных» технологий планирования, необходимых, в том числе, при решении ряда навигационных задач, в которых требуется взаимодействие методов стратегического и тактического планирования.

Разработка указанных технологий основывается на следующих предпосылках. Очевидно, планирование является одной из базовых когнитивных функций, эффективность реализации которой играет большую роль в интеллектуальных системах управления реальными физическими объектами [2-4]. В искусственном интеллекте существует отдельное направление, занимающееся созданием алгоритмов автоматического планирования, в рамках которого разработано большое количество подходов. Многие из них ограничены символьной STRIPS постановкой задачи [5] и используют те или иные особенности процесса планирования поведения человеком, например, иерархичность, возможность планирования от целевой ситуации, неполное планирование и т.д. Однако такие методы планирования не опираются на существующие нейрофизиологические и психологические теории деятельности и процессы составления плана действий [6]. При этом в настоящее время наблюдается повышенный интерес исследователей к биологически правдоподобным алгоритмам, разработка которых, как показывает практика, приводит к появлению более универсальных и эффективных методов решения определенного класса задач (оптимизация с использованием генетических алгоритмов, распознавание образов на основе глубоких нейронных сетей и др.). В настоящей работе предлагается принять во внимание психологические данные о том, как человек строит план своего поведения, что позволит на основе такого психологически

правдоподобного метода планирования решать такие сложные задачи, как планирование в коалициях, распределение ролей и человеко-машинное взаимодействие [7, 8].

В реализующих психологически правдоподобные методы планирования алгоритмах огромную роль играет представление знаний, используемое в системах управления для описания действий и объектов внешней среды. Для того, чтобы объединить алгоритмы приобретения знаний и планирования действий, представление знаний должно обеспечивать взаимодействие символьного подхода для реализации абстрактного планирования действий без привязки к конкретным реализующим их операциям и особенностям планирующего субъекта, и субсимвольного метода обучения, обеспечивающего поиск и применение уже конкретных операций, зависящих от текущих внутренних и внешних условий.

В настоящей работе предлагается использовать психологическую теорию деятельности [9,10] при описании картины мира и построении модели процесса планирования поведения. Психологически правдоподобный метод планирования поведения использует трехуровневое представление реализующих действия процедур в соответствии со следующими положениями этой теории. Во-первых, поведение субъекта (интеллектуального агента) в конкретный момент времени осуществляется в рамках процесса, называемого деятельностью и направляемого некоторым мотивом, значением предмета потребности (первый уровень процедур – наиболее обобщенные действия). Во-вторых, деятельность включает в себя набор собственно действий, каждое из которых направлено на достижение определенной цели (представления о результате действия; второй уровень процедур – обобщения действия). Наконец, на операциональном уровне каждое действие состоит из набора операций, комбинация которых при одной и той же цели может быть различной, в зависимости от условий выполнения действия (третий уровень процедур – конкретизированные действия и операции).

Основная гипотеза, используемая в настоящей работе при моделировании процесса планирования, заключается в том, что данное трехуровневое разбиение множества всех доступных процедур на действия и операции является динамическим и может меняться со вре-

менем в процессе, как самого планирования, так и выполнения построенного плана. При этом целенаправленные действия будем относить к символьному уровню, а операции (например, конкретные перемещения на местности) – к субсимвольному.

Для демонстрации предлагаемого подхода и используемой гипотезы в настоящей работе рассматривается задача коллективного перемещения в сложной внешней обстановке. Эта задача имеет большое значение в робототехнике и, в зависимости от вида препятствий, свойств карты, задающей расположение объектов, и наличия других активных участников, демонстрирует различные технические и когнитивные аспекты поведения. К таким аспектам относятся: возможность задания различных классов действий (разные типы элементарных перемещений, манипулирование объектами, коммуникация), совмещение различных уровней описания (описание объектов и пространство-временных соотношений) [11]. В данной работе основное внимание уделяется взаимодействию между символьным и субсимвольным методами планирования, т.е. между планированием поведения и планированием траектории. Представлены алгоритмы планирования на каждом уровне представления: символическом (знаковый алгоритм планирования поведения MAP) и субсимвольном (алгоритм планирования траекторий). Особое внимание уделяется взаимной увязке обоих алгоритмов и описания обратных связей между ними, которые реализуются с помощью выбранного метода представления знаний.

1. Модельная задача

Рассмотрим одну из характерных задач, возникающих при управлении коалицией агентов, а именно интеллектуальное планирование совместного перемещения в динамической среде. Пусть на ограниченной площадке располагается группа агентов, а также некоторые статические препятствия различного типа, которые в общем случае можно отнести к разрушаемому и не разрушаемому. Перед агентами стоит общая задача перемещения всей группы в определенную область, отделенную от начального расположения набором препятствий. Особенностью задачи является то, что непосредственное перемещение некоторых агентов невозможно без

разрушения сопутствующих препятствий, т.е. построение траектории на текущей карте местности невозможно. Таким образом, план поведения в задаче коллективного перемещения должен включать в себя дополнительные действия по применению средств устранения препятствий агентом, столкнувшимся с подобной подзадачей, либо другим участником коллектива, обладающим необходимым набором возможностей.

В качестве основного способа представления знаний применяется предложенная в [8, 12] модель, использующая в качестве связанных с внешней средой символом сложные четырехкомпонентные структуры, называемые знаком. Знак, как компонент картины мира, может опосредовать статический объект или некоторый процесс, действие. Знак обладает именем, подчиняющимся лингвистическим правилам используемого в группе агентов языка при формировании сообщений в процессе коммуникации. Компонента образа представляет собой процедуру распознавания опосредуемого знаком объекта или процесса с использованием его характерных признаков. Значение знака определяет функциональную и иную роль опосредуемой сущности в известных коллективу агентов динамических сценариях. Эта компонента является согласованной в коллективе агентов. И, наконец, личностный смысл знака определяет роль сущности в личных сценариях субъекта, обладателя картины мира. Участвующие в формировании образа знака признаки могут быть либо другими знаками в картине мира в том случае если данный уровень актуализации соответствующего знака относится к символическому, либо ссылками на субсимвольные признаки или операции. При рассмотрении задачи коллективного перемещения данными признаками могут служить операции по планированию некоторого действия по перемещению, т.е. некоторая операция планирования траектории.

На символическом уровне при описании пространственного расположения объектов используется одна из пространственных логик, в некотором приближении моделирующая пространственные рассуждения человека по данным когнитивных психологов [13, 14]. Например, при использовании пространственной логики ситуационного анализа [15] направления и целевые области пространства для

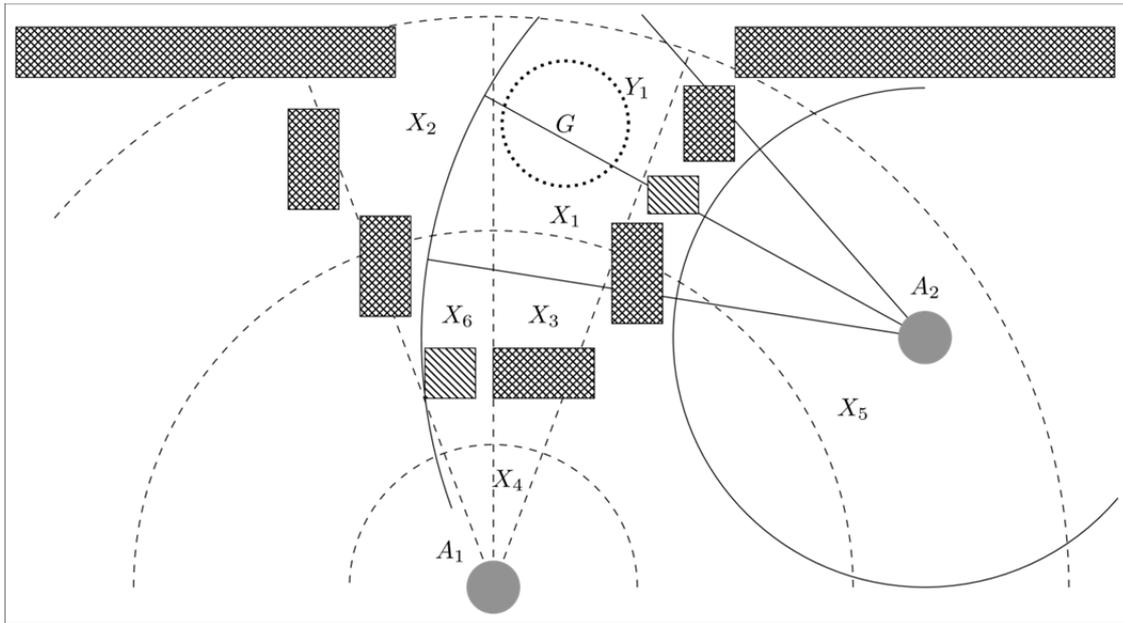


Рис. 1. Агнто-центрированная полярная координатная сетка

выделены области с соответствующими знаками с именами X_1, X_2, G, Y_1 и др. агенты обозначены серыми кругами радиуса R

перемещения задаются не в виде точных значений (45 градусов против часовой стрелки и 13 метров вперед), а в виде имен знаков, опосредующих некоторые нечеткие направления и расстояния («слева», «далеко») на агнто-центрированной полярной координатной сетке (Рис. 1). Образы данных знаков по иерархии связей на сети образов [12] задаются конкретными интервалами значений в градусах и метрах, задающих нечеткую целевую область (подробнее в [16]).

Каждое действие по перемещению в картине мира агентов A_1, A_2 представлено в виде знака с определенным именем («далекое перемещение по прямой», «близкое перемещение по кривой» и т.п.). Каждое действие по сети образов связано с определенными нечеткими изменениями расстояния, рассчитываемыми от текущего положения агента, и ограничениями на разрешенное отклонение от идеальной прямой до целевой области.

На субсимвольном уровне (т.е. при планировании траектории) окружающее агента пространство представляется в виде прямоугольной области (в некотором евклидовом пространстве L_2 с определенной декартовой системой координат) $U: x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$, называемой рабочей областью. Рабочая область есть объединение свободного пространства и непроходимого: $U = U_{free} + U_{obs}$. Непроходимое простран-

ство представлено набором препятствий, каждое из которых задано ограничивающим его многоугольником: $U_{obs} = \{obs^1, \dots, obs^M\}$, $obs^i = \{p^i_1, p^i_2, \dots, p^i_j, \dots, p^i_k\}$, $p_j = (x_j, y_j) \in U$. Некоторые препятствия могут быть уничтожены агнтом, что моделируется функцией $destr(U_{obs}) \rightarrow \{true, false\}$, если $destr(obs^i) = true$, то агнт может уничтожить препятствие obs^i , приблизившись к нему на некоторое заданное расстояние. Сам агнт моделируется кругом радиуса R . При этом считается, что масса агента распределена равномерно, т.е. его центр совпадает с центром круга его моделирующего. Целевая область G задана с помощью четырех точек, образующих квадрат со стороной l , который полностью содержит в себе целевую область, определяемую на символьном уровне планирования (см. выше). Формально имеем $G = \{g_1, g_2, g_3, g_4\}$, $g_1 = (x_g, y_g)$, $g_2 = (x_g + l, y_g)$, $g_3 = (x_g + l, y_g + l)$, $g_4 = (x_g, y_g + l)$, при этом $G \subseteq U_{free}$ и $l > 2R$ (агнт способен полностью поместиться в целевой области).

Предполагается, что задана функция, устанавливающая соответствие между символьным и субсимвольным представлением пространства. В простейшем случае такая функция есть функция перевода из агнто-центрированной полярной системы координат в глобальную декартову. Так, например, на символьном уровне целевая область задается в виде области, определенной с помо-

щью набора полярных координат (r_i, φ_i) . Эти координаты могут быть переведены в декартовы и далее определен квадрат, ограничивающий эту область. Этот квадрат и является целевой областью G на субсимвольном уровне (т.е. при планировании траектории).

2. Планирование в знаковой картине мира

На символьном уровне представления знаний используется знаковая картина мира. Моделью представления знаний агента является семиотическая сеть, состоящая из семантических сетей трех типов: на образах, на значениях и на личностных смыслах, в соответствие с четырехкомпонентной структурой элемента картины мира – знака. Каждое отношение на компонентах знаков реализуется определенной относительной конфигурацией структур этих компонент, входящих в данное бинарное отношение. Каждая компонента знака описывается унифицированной моделью, опирающейся на данные о строении первичных зон коры головного мозга человека [17]. Структура образной компоненты знака обеспечивает связь символьного и субсимвольного уровней представления объектов и процессов в картине мира субъекта.

Модель образной компоненты знака представляет собой структурированный набор ссылок (связей) на образы других знаков либо элементарные признаки или операции. Эти ссылки будем называть просто признаками образа знака. Признаки организованы в так называемые битовые каузальные матрицы. В каузальной матрице каждая строчка соответствует признаку, а единицы в каждом столбце определяют признаки, которые должны присутствовать при распознавании опосредуемого знаком объекта или процесса в данный момент времени. Т.е. каузальная матрица задает последовательность наборов входных признаков, которые должны последовательно появляться во входном потоке данных, чтобы можно было считать, что данный знак распознается в этом входном потоке. Например, если мы рассмотрим знак с именем «дверь», то один из вариантов каузальной матрицы может быть последовательностью признаков «порог», «рама двери», «петли», «дверная ручка».

Организация признаков в такую структуру позволяет, во-первых, смоделировать динамику процесса распознавания с учетом саккадиче-

ских движений глазодвигательного аппарата человека. Во-вторых, обратная связь с действиями, изменяющими внутреннее состояние агента (например, поворот камеры на определенный угол, изменение скорости, необходимость дозаправки и т.п.), позволяет смоделировать такие когнитивные процессы как произвольное и непроизвольное внимание.

Образу одного знака s может соответствовать несколько каузальных матриц, что связано с прецедентным характером процесса обучения, в результате которого формируется образ знака. Например, для знака с именем «дверь» помимо указанного выше примера каузальной матрицы может присутствовать матрица с измененными порядком признаков («петли», «дверная ручка», «порог», «рама двери») и матрица с новым характерным признаком («петли», «дверная ручка» + «деревянная», «порог», «рама двери»). В том случае, когда среди всех колонок каузальных матриц одного знака удастся выделить строгую последовательность, т.е. определить набор признаков, которые всегда предшествуют другому набору признаков, то это означает обнаружение причинно-следственной связи между этими наборами признаков. Иными словами, данный знак опосредует некоторый детерминированный динамический процесс, действие (процедурные знаки).

Значением знака s является набор знаков (в том числе и процедурных), в образах которых данный знак является необходимым для распознавания. Т.е. в соответствующей знаку s ячейке каузальной матрицы некоторого знака s_m в некоторой колонке стоит единица. При этом данный набор является согласованным в некоторой группе агентов, что важно в случае коллективного взаимодействия. Процедурные знаки, участвующие в определении значения некоторого другого знака, чаще всего являются обобщенными, содержащими ссылки на определенные роли, а не конкретные объекты.

Личностный смысл знака s формируется в процессе деятельности субъекта и является конкретизацией действий субъекта с этим знаком или конкретизацией связей этого знака с другими в определенной ситуации. Личностные смыслы связаны с конкретными характеристиками агента и его эмоционально-потребностной сферой, определяя мотив любой деятельности агента.

Алгоритм планирования поведения МАР [12, 16] представляет собой итерационный про-

цесс обновления текущей ситуации на сети личностных смыслов. Планирование осуществляется от целевой ситуации к начальной. Итерации выполняются до тех пор, пока текущая ситуация не будет по каузальной матрице вкладываться в начальную ситуацию. Сама итерация алгоритма состоит из трех основных шагов. На М-шаге происходит выбор таких значений всех знаков, входящих в ситуацию, для которых возможно заполнение всех ролей, т.е. таких значений, которые допускают конкретизацию в условиях текущей ситуации. Затем, на А-шаге происходит генерация конкретного действия на основе отобранных значений и оценка полученных действий по личностным смыслам соответствующих знаков за счет предыдущей истории деятельности. На А-шаге, таким образом, применяется некоторая эвристика, которая, являясь внутренней характеристикой агента, также опосредуется некоторым знаком и может быть изменение в ходе обучения. Знаковый подход обладает широкими возможностями для моделирования метакогнитивных функций. Наконец, Р-шаг состоит в объединении условий отобранных действий для генерации следующей ситуации (которая, на самом деле, является предыдущей, так как планирование осуществляется в обратном порядке). В том случае, если начальная ситуация оказалась достигнута, на Р-шаге принимается решение о готовности плана либо о его уточнении за счет «раскрытия» образа составляющих план действий. Первый вариант приводит к непосредственно активации составляющих действие признаков в процессе реализации плана (в том числе тут происходит и активация процедур планирования траектории). Второй вариант заключается в снижении уровня абстракции и перевода субсимвольного уровня на символичный за счет рассмотрения подпланов, для которых начальной ситуацией является набор признаков, входящих в условия действия, а конечной ситуаций – набор признаков, входящих в эффект действия. Выбор из этих двух вариантов также осуществляется за счет метакогнитивной регуляции.

3. Планирование траектории

Задачу планирования траектории будем рассматривать как поиск пути на графе специального вида. В его качестве будем использовать граф регулярной декомпозиции – метрический топологический граф (ГРД/МТ-граф), в англо-

язычной терминологии – grid [18], который является простой в построении и использовании и вместе с тем информативной моделью окружающего агента пространства [19]. Основной компонентой этой модели является представляемое в виде матрицы множество элементов, каждый из которых соответствует квадратной области рабочего пространства заданного размера и поэтому именуется клеткой. Если клетка ГРД/МТ-графа соответствует области пространства, которая не содержит ни одного препятствия (или части препятствия), то она считается проходимой, если нет – непроходимой. Отдельные фиксируемые положения агента привязаны к центрам проходимых клеток, т.е. считается что агент (центр масс агента) изначально расположен в центре некоторой клетки и при движении агент перемещается от центра одной клетки к центру другой. Для измерения расстояний между клетками используется евклидова метрика, т.е. это длина отрезка прямой, соединяющей центры клеток.

Выбор размера клетки осуществляется при построении графом модели по исходным данным (координатам многоугольников, ограничивающих препятствия) и оказывает весьма сильное влияние на решение задачи планирования. Так, при дискретизации пространства на клетки большого размера становится достаточно легко (в вычислительном смысле) отыскать путь на графе известными методами, так как общее число клеток мало. Однако длина соответствующей пространственной траектории, скорее всего, будет существенно выше желаемой длины кратчайшей (в геометрическом смысле) траектории. Также при использовании клеток большого размера проявляется эффект слипания препятствий, когда два различных препятствия, разделенные проходимой областью, попадают на этапе построения в одну клетку, которая становится полностью непроходимой. Таким образом, возможна ситуация, когда траектория на плоскости (в непрерывном пространстве) существует, а на графе – нет. Очевидно, что использование клеток меньшего размера снижает шанс возникновения таких ситуаций, однако повышает вычислительную сложность задачи планирования. Таким образом, в общем случае вопрос о выборе размера клетки остается открытым, но, очевидно, что этот размер должен быть не слишком большим и не слишком маленьким. В данной работе

предполагается, что размер клетки равен размеру целевой области. Также предполагается, что этот размер больше диаметра круга, моделирующего агента (таким образом, агент полностью помещается в клетку при совмещении центра масс агента с центром клетки).

После фиксации размера клетки и построения ГРД/МТ-графа поиск пути на нем осуществляется с помощью алгоритма JPS [20], который является модификацией известного алгоритма A* [21]. Путь, отыскиваемый этим алгоритмом, представляет собой последовательность секций, т.е. отрезков прямых, соединяющих центры смежных клеток. Возможно использование также альтернативных алгоритмов эвристического поиска, способных искать другие виды путей. Например, пути, состоящие из секций, которые соединяют центры не обязательно смежных клеток – Theta* [22], или пути, состоящие из секций, таких, что угол между любыми двумя последовательными секциями не превышает заданного порога – LIAN [23] и др.

После того как с символического уровня приходит запрос на планирование траектории из текущего положения в заданное, осуществляется построение графа и поиск пути на нем с помощью алгоритма JPS. Алгоритм JPS является полным, т.е. гарантирует отыскание пути (на графе), если такой существует. В противном случае алгоритм гарантирует возвращение в качестве результата специального символа *failure*. Если путь построен, то соответствующая информация передается на уровень выше, т.е. на уровень символического планирования. Символьный планировщик, таким образом, может пометить соответствующую активность по перемещению, как успешную в рамках MAP-алгоритма планирования. Более интересная ситуация возникает, если алгоритм JPS возвращает *failure* в качестве решения. В рамках традиционного подхода к решению навигационных задач (т.е. задач по перемещению на плоскости) дальнейшее рассуждение обычно не предпринимается, и задача считается нерешаемой. Однако в случае наличия информации о том, что часть препятствий может быть разрушена агентом, возможна следующая ситуация – цель заблокирована разрушаемым препятствием, уничтожив которое становится возможным построить путь. Возникает новая задача – идентификация блокирующего препятствия, решение которой необходимо для того, чтобы

запланировать на символическом уровне уничтожение этого препятствия. Таким образом, за счет взаимодействия с верхним уровнем планирования, возможно решение этой задачи, которое не может быть получено при традиционном подходе, когда она рассматривается вне контекста планирования поведения интеллектуального агента, а как изолированная, самостоятельная навигационная задача.

Для идентификации блокирующего препятствия предлагается метод, основанный на следующем обстоятельстве. Представим, что известна одна проходимая клетка ГРД/МТ-графа, смежная с блокирующим препятствием, т.е. смежная с одной из непроходимых клеток, образующих внешний контур препятствия. Тогда, используя алгоритм обхода контура по/против часовой стрелки, можно получить набор клеток, образующих этот контур – *CONTOUR*. И именно *CONTOUR* теперь может быть передан в качестве результата на символический уровень планирования (с трансляцией координат в агенто-центрированную полярную систему координат). Таким образом, задача идентификации блокирующего препятствия сводится к задаче обнаружения клетки, смежной с этим препятствием.

Обозначим NR множество клеток ГРД/МТ-графа, не достижимых из начальной клетки S . На Рис. 2 эти клетки белые, в то время как клетки достижимые из S – серые, препятствия – черные. Целевая клетка G , заблокирована внутри препятствия, расположенного в центральной части рабочей области.

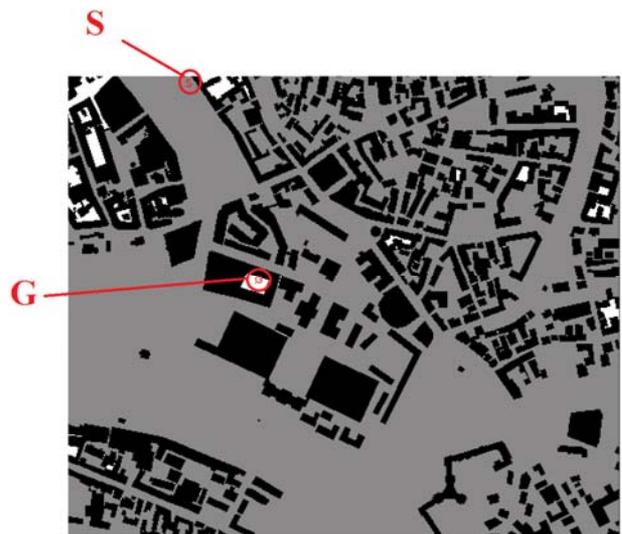


Рис. 2. Области недостижимости на ГРД/МТ-графе

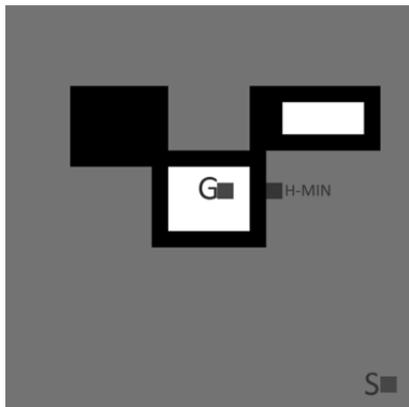


Рис. 3. Пограничная клетка H-MIN

Нетрудно удостовериться, что проходима клетка из области достижимости такая, что расстояние от нее до целевой наименьшее, всегда смежна с блокирующим препятствием. На Рис. 3 эта клетка обозначена как H-MIN.

С учетом того факта, что в основу алгоритмов эвристического поиска A* и JPS заложен принцип итерационного обхода графа для поиска пути, а также свойства полноты этих алгоритмов, можно утверждать, что в процессе поиска алгоритмами будут рассмотрены все клетки из области достижимости, в том числе и интересующая пограничная клетка². Таким образом, необходимо при поиске пути для каждой рассматриваемой алгоритмом клетки рассчитывать расстояние до целевой (что и так делается, так как именно это расстояние используется в качестве эвристики при фокусировке поиска) – h-cug и сравнивать с минимальным расстоянием известным к текущей итерации (сохраненным в отдельной переменной h-min). Если h-cug < h-min, то значение h-min модифицируется. Таким образом, к концу обхода будет известна клетка, принадлежащая области достижимости и расположенная на минимальном удалении от целевой, т.е. искомая пограничная клетка. Остается теперь идентифицировать блокирующее препятствие с помощью процедуры обхода контура (см. выше).

Заметим также, что пограничная клетка может быть смежна с несколькими препятствиями, но зная координаты этой клетки и координаты

² Разница между A* и JPS здесь в том, что A* сохраняет все рассмотренные клетки до завершения поиска, а JPS - лишь малую часть из них (за счет чего и обеспечиваются намного более высокие показатели вычислительной эффективности).

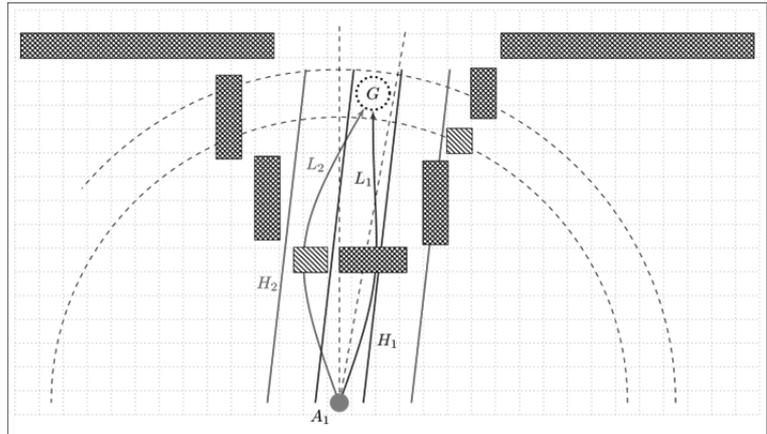


Рис. 4. Примеры действий агента по перемещению

цели, можно определить их положение относительно друг друга. Очевидно, что препятствие, которое блокирует проход к цели, всегда находится между пограничной и целевой клетками. Т.е., если целевая клетка находится выше пограничной, то и блокирующее препятствие расположено выше.

4. Модельный эксперимент

В качестве примера задачи коллективного перемещения рассмотрим задачу достижения некоторой области пространства двумя агентами на местности с препятствиями, некоторые из которых разрушаемы (другой вариант задачи в [16]). Пусть имеются два агента A1 и A2 одинакового размера, располагающиеся в координатах (x1, y1) и (x2, y2) соответственно, и препятствия двух типов – А и В. Агент A2 обладает способностью разрушать препятствия типа В, в то время как агент A1 не может разрушать никакие препятствия. Перед агентами стоит цель, заключающаяся в том, чтобы оба агента попали в целевую зону G (Рис. 4) с координатами (xG, yG). Местность полностью наблюдаема, а ее карта доступна обоим агентам.

В картине мира агентов действия по перемещению представлены знаками s(i) (i = 1, 2... – имя действия), которым соответствуют каузальные матрицы типа Zi, состоящие из трех столбцов:

$$z_1=(l_x, D), z_2=(l_y, d_u, E) \text{ и } z_3=(l_y, I, t_v),$$

где l_x, l_y – признаки, соответствующие категории расстояния в пространственной логике [14] (например, *вплотную, близко, далеко* и др.);

d_u – признак, соответствующий категории направления в пространственной логике (например, *вперед*, *слева* и др.); t_v – признак, соответствующий категории времени во временной логике [14] (например, *скоро*, *в будущем* и др.); I – признак присутствия самого агента; E – признак отсутствия препятствия.

В матрице типа Z_i столбцы z_1 и z_2 являются столбцами условий, а столбец z_3 – столбцом эффектов. Т.е. каузальные матрицы задают такие действия, как *быстро переместиться далеко вперед*, *медленно переместиться недалеко вправо* и т.п.

Некоторые действия по перемещению могут быть представлены в виде последовательного выполнения других действий (более точных в пространстве и во времени). Например, если в действии $s(1)$ l_x – это *вплотную*, l_y – *далеко*, d_u – *вперед*, t_v – *скоро*, то оно может быть представлено в виде цепочки действий $s(2)$, где l_x – *вплотную*, l_y – *очень близко*, d_u – *вперед*, t_v – *очень скоро*.

На операционном уровне каждое действие по перемещению представлено некоторой траекторией, которая строится на основе целевой и исходной областей, определяемых соответствующей каузальной матрицы. В зависимости от типа действия (*переместиться прямо*, *переместиться по кривой* и т.п.), для траекторий задается «коридор», в рамках которого должна располагаться траектория.

Агент строит план по достижению цели G в виде последовательности действий $s(i)$. Так как этот процесс – иерархический, то планирование осуществляется, в зависимости от предыдущего опыта, вплоть до тех действий, которые обеспечивают непротиворечивую последовательность ситуаций. Например, в зависимости от опыта агента, планирование на символическом уровне может закончиться на уровне действия $s(1)$, либо действия $s(2)$ (пример выше). В обоих случаях будут запущены операции планирования траектории, но в первом случае это будет одна длинная траектория, а во втором – несколько более коротких.

В случае агента A_1 ввиду отсутствия возможности разрушать препятствия, на некотором этапе признак E будет отсутствовать и условие очередного действия, например $s(2)$, не будет выполнено (Рис. 5, а). В таком случае, если агенту A_1 доступно действие по передаче сообщения M_1 , то в план может быть включена

посылка информации агенту A_2 о препятствии в области obs_1 (Рис. 5, б). Если у агента A_2 имеется знак, представляющий агента A_1 (представление о другом агенте), в образ которого входит его положение, то агент A_2 сможет построить план по перемещению в область obs_1 и устранению препятствия (Рис. 3, в-е). На завершающем этапе агенты поочередно перемещаются в целевую зону (Рис. 5, ж-з).

Заключение

Планирование является одним из ключевых компонентов реализации целенаправленного поведения искусственных систем (мобильных роботов, беспилотных транспортных средств, программных агентов и пр.) и достаточно давно и активно изучается в искусственном интеллекте. Однако подавляющее большинство известных к настоящему моменту моделей, методов и подходов не опираются на существующие нейрофизиологические и психологические теории деятельности и процессов составления плана действий. В рамках настоящей работы предложен психологически правдоподобный подход к планированию, позволяющий, в частности объединить планирование на символическом и субсимволическом уровнях. Описаны алгоритмы, являющиеся компонентами предложенного подхода и их интерфейсы. Рассмотрен модельный пример решения навигационной задачи коллективного перемещения (не решаемой только на тактическом или стратегическом уровнях планирования) с помощью предлагаемых методов и алгоритмов. К дальнейшим направлениям исследований можно отнести программную реализацию разработанных методов для проведения натурных экспериментальных исследований на реальных робототехнических платформах.

Литература

1. Зубарев Д.В., Макаров Д.А., Панов А.И., Яковлев К.С. Принципы построения многоуровневых архитектур систем управления беспилотными летательными аппаратами // Авиакосмическое приборостроение. 2013. №4. С.10-28.
2. Макаров Д.А., Панов А.И., Яковлев К.С. Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами // Искусственный интеллект и принятие решений. 2015. № 3. С. 18–33.

13. Herskovits A. Language, Spatial Cognition, and Vision // Spatial and Temporal Reasoning / Ed. by O. Stock. Springer. 1997. Pp. 155–202.
14. Kuipers B. Spatial semantic hierarchy // Artificial Intelligence. Vol. 119, no. 1. 2000. Pp.191–233.
15. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука. 1986. С. 288.
16. Панов А.И. Представление знаний автономных агентов, планирующих согласованные перемещения // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 4(9). С. 34–40.
17. Панов А. И. Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия // Машинное обучение и анализ данных. 2014. Т. 1. № 7. С. 863–874.
18. Yap P. Grid-based path-finding //Advances in Artificial Intelligence. – Springer Berlin Heidelberg. 2002. Pp. 44-55.
19. Яковлев К.С., Баскин Е.С. Графовые модели в задаче планирования траектории на плоскости // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. №1. С.5-12.
20. Harabor D., Grastien A. Online graph pruning for path-finding on grid maps. In AAAI-11. 2011.
21. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths //Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on. 1968. Т. 4. №. 2. Pp. 100-107.
22. Alex Nash, Kenny Daniel, Sven Koenig, Ariel Felner. Theta*: Any-Angle Path Planning on Grids. In Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (Vol. 22, No. 2, p. 1177). 2007. Menlo Park, Calif.: AAAI Press.
23. Yakovlev, K., Baskin, E., & Hramoin, I. Grid-based angle-constrained path planning. In Proceedings of The 38th Annual German Conference on Artificial Intelligence (KI'2015). Springer International Publishing. Pp. 208-221.

Панов Александр Игоревич. Старший научный сотрудник ИСА ФИЦ «Информатика и управление» РАН. Доцент Высшей школы экономики. Окончил Новосибирский государственный университет в 2009 году, Московский физико-технический институт (государственный университет) в 2011 году. Кандидат физико-математических наук. Автор 40 печатных работ. Область научных интересов: машинное обучение, распознавание образов, когнитивное компьютерное моделирование, мультиагентные системы. E-mail: pan@isa.ru, arpanov@hse.ru

Яковлев Константин Сергеевич. Старший научный сотрудник ИСА ФИЦ «Информатика и управление» РАН. Кандидат физико-математических наук. Автор 35 печатных работ. Область научных интересов: интеллектуальное планирование, планирование траектории, робототехника, интеллектуальные системы управления, эвристический поиск. E-mail: yakovlev@isa.ru

On interaction of strategic and tactical planning for the coalition of agents in dynamic environment

A.I. Panov, K.S. Yakovlev

Abstract. Planning problems are studied in the article in the context of a global task of development of the intelligent control system for complex technical objects (mobile robots, unmanned vehicles etc.). We concentrate on the class of tasks that can not be solved without an interaction between strategic (symbolic) and tactical (sub-symbolic) planning. Original behavior and path planning methods are proposed as well as their relations and interfaces. A model example of a coalition relocation task in a dynamic environment with the destroyable obstacles is considered.

Keywords: intelligent planning, automated planning, behavior planning, path planning, sign world model, image, significance, personal meaning, heuristic search, A*, JPS.

Panov Aleksandr. Senior Researcher of Federal Research Centre "Informatics and Control" of Russian Academy of Sciences. Graduated in 2009, Department. of Physics at Novosibirsk State University, in 2011, Department of Control/Management and Applied Mathematics at Moscow Institute of Physics and Technology (State University). PhD in Computer Science. Number of publications: 40. Research interests: machine learning, pattern recognition, cognitive computer modeling, multiagent systems. E-mail: pan@isa.ru

Yakovlev Konstantin. Senior Researcher of Federal Research Centre "Informatics and Control" of Russian Academy of Sciences. PhD in Computer Science. Number of publications: 35. Research interests: artificial intelligence, intelligent control systems, intelligent dynamic systems, robotics, path finding, heuristic search, multi-agent systems, cognitive agents. Email: yakovlev@isa.ru