

А.М. КОРСАКОВ, В.В. ИВАНОВА, С.А. ПОЛОВКО
**ФОРМАЛЬНЫЙ ЯЗЫК ОПИСАНИЯ НАВИГАЦИОННОГО
ПОВЕДЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ**

Корсаков А.М., Иванова В.В., Половко С.А. **Формальный язык описания навигационного поведения мобильных роботов.**

Аннотация. Статья содержит результаты исследований в области формализации навигационного поведения мобильных роботов на основе когнитивного подхода к представлению пространства. Авторами предложен новый формальный язык LRNB (Language of Robot Navigation Behavior), предназначенный для описания информационно-двигательных действий, сценариев и миссий роботов в рамках интерпретирующей навигации. Ключевой особенностью когнитивного подхода является отказ от декартовой системы координат в пользу ориентированного графа – когнитивной карты, вершины которой соответствуют семантическим ориентирам, а рёбра – последовательностям действий, задаваемых на LRNB. Язык строится на универсальной структуре команды, обеспечивая возможность описания широкого спектра поведенческих паттернов: от простого движения вдоль объекта до сложных миссий с динамическими целями и логическими условиями. В работе представлены три метода построения когнитивных карт: на основе семантически сегментированных изображений, в процессе автономного исследования среды роботом, а также с использованием больших языковых моделей (БЯМ) для трансляции естественно-языковых инструкций в формальные команды LRNB. В качестве наиболее удобной иллюстрации для демонстрации возможностей LRNB проведена экспериментальная оценка возможностей БЯМ в автоматической генерации команд LRNB по текстовым описаниям. Показано, что на уровне отдельных информационно-двигательных действий модель демонстрирует высокую точность (95 % корректных преобразований), однако при переходе к формированию сложных составных сценариев эффективность критически снижается. Тем не менее, сделан вывод о практической применимости языка LRNB. Предложенный формальный язык LRNB демонстрирует высокую гибкость и выразительность, что делает его эффективным инструментом для описания сложного навигационного поведения мобильных роботов в разнообразных сценариях.

Ключевые слова: интерпретирующая навигация, когнитивное представление пространства, когнитивная карта, семантически сегментированное изображение, большая языковая модель.

1. Введение. Понятие «поведение» связано со способностью биологического или искусственного существа планировать и выполнять рациональные действия в соответствии с заданными целями и условиями среды. В технике проблема формирования поведения связана с процессом обработки информации в интеллектуальных информационных и управляющих системах. Этот процесс традиционно включает следующие этапы:

1. Восприятие информации – ввод, слияние информации от разных источников и распознавание образов;
2. Формирование поведения, на котором используются результаты этапа восприятия.

Поэтому в технических системах обработки информации системы восприятия информации и поведенческие системы можно рассматривать отдельно [1]. В мобильной робототехнике наиболее важным является навигационное поведение, которое основано на восприятии среды с построением карты окружения робота и локализации в ней самого робота, а также формированием поведения с планированием маршрута его перемещения к заданной цели и управлением траекторным движением к ней [2].

Современные системы навигационного поведения роботов строятся на основе когнитивного подхода, который основан на когнитивном представлении пространства: восприятии незнакомой среды и формировании когнитивных карт в виде семантических сетей или графов, в том числе и путем обучения. Предполагается, что такой подход также должен включать когнитивные методы исследования роботом пространства и построения при этом локальных и глобальных представлений, которые далее могут быть использованы при реализации навигационного поведения с заданными целями.

Одним из наиболее популярных подходов при решении навигационных задач являются алгоритмы SLAM (simultaneous localization and mapping – одновременная локализация и построение карты). Это метод, используемый в мобильных автономных средствах для построения карты в неизвестном пространстве или для обновления карты в заранее известном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути. SLAM применяется в наземных [3], воздушных [4] и подводных [5] системах. Визуальный SLAM (Visual SLAM, V-SLAM) – это метод визуальной одометрии, который использует камеры для определения положения и ориентации автономного агента в окружающей среде, а также для составления карты этой среды [6-8]. Карты, построенные традиционными методами SLAM, содержат только информацию о расположении и форме препятствий, но не позволяют классифицировать объекты на сцене. Для решения этой задачи применяют различные методы семантического SLAM (semantic SLAM) [9].

Помимо семантического SLAM, на сегодняшний день существует множество других подходов к построению когнитивных карт – это методы на основе графов [10], векторных и потенциальных полей [11], теории множеств [12], различные модели пространственной (эпизодической) памяти [13]. В зависимости от используемого подхода в качестве входных данных для построения карты могут выступать данные бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и данные сенсоров, установленных

на работе (2D камер, RGB-D камер, дальномеров, лидаров), а также различные их комбинации.

Генерацию верхнеуровневого и нижнеуровневого поведения роботов, во многом подобного поведению человека, при выполнении задач в сложных непредсказуемых средах могут обеспечить большие языковые модели (БЯМ). В обзорной работе [14] показано, как БЯМ могут быть использованы в системах навигации и планирования маршрутов роботов. Используя многомодальные данные сенсоров, БЯМ дают возможность роботам воспринимать семантическую информацию об окружающей среде, распознавать препятствия, целевые местоположения и решать навигационные задачи, а также генерировать подходящие решения для планирования пути. Например, в системе PaLM-E [15] используется БЯМ, где наряду с текстовыми токенами, включены токены из различных модальностей. Модель генерирует высокоуровневые инструкции для таких выполняемых роботом задач, как мобильные манипуляции и планирование движения.

В настоящей работе авторами в рамках решения общей задачи навигации на основе когнитивного представления пространства (интерпретирующей навигации) предлагается формальный язык описания навигационного поведения мобильных роботов LRNB (Language of Robot Navigation Behavior). Сам оригинальный подход к решению указанной общей задачи объединяет в себе сразу несколько существующих направлений в области навигации – когнитивное картирование, визуальную навигацию по ориентирам [16], распознавание семантики, задание команд на естественном языке с использованием БЯМ и, кроме того, способен обеспечивать сложное навигационное поведение. При этом язык LRNB выступает в качестве базового инструмента, который позволяет описывать сложные миссии и сценарии, задавать условия завершения действия, характер движения агента в зависимости от объектов (в том числе динамических), их взаимного расположения и характеристик.

Известным формализмом для описания задач планирования поведения является язык PDDL (Planning Domain Definition Language). Однако, в отличие от PDDL, ориентированного на дискретное логическое планирование последовательностей действий в пространстве состояний, язык LRNB предназначен для описания непрерывного навигационного поведения, управляемого сенсорной обратной связью в реальном времени и напрямую привязанного к семантическим ориентирам в когнитивной карте.

Далее в разделе 2 приведено описание задачи интерпретирующей навигации на основе когнитивного представления

пространства, дан ряд необходимых определений. В разделе 3 рассмотрены способы построения когнитивной карты и маршрута мобильного робота. В разделе 4 представлен формальный язык описания информационно-двигательных действий мобильного робота (LRNB). В разделе 5 приведены некоторые характерные примеры задания навигационного поведения робота на предлагаемом формальном языке. В разделе 6 представлены результаты экспериментов по построению команд на LRNB с использованием БЯМ, тогда как раздел 7 посвящён обсуждению полученных результатов. В заключительном разделе 8 подведены итоги результатов работы.

2. Интерпретирующая навигация на основе когнитивного представления пространства. Настоящая работа рассматривается в рамках задачи глобальной навигации, т.е. задачи построения маршрута следования мобильного робота (МР) при выполнении им некоторой миссии на произвольной сцене. Подразумевается универсальность решения с точки зрения возможности его применения на разных сценах (помещения разного назначения, различные варианты открытых сцен) и даже в разных средах (наземные, воздушные, надводные и подводные РТК). Ещё одним требованием является отсутствие связи с оператором в момент функционирования МР. Связь с оператором подразумевается лишь в момент задания им миссии для МР. Кроме того, далее будем исходить из того, что нам не известны координаты и ориентация робота в мировой системе координат.

Для решения задачи глобальной навигации в указанных условиях представляется необходимым использовать подход, связанный с организацией интерпретирующей навигации на базе когнитивного представления пространства. Суть интерпретирующей навигации заключается в том, что положение МР на местности определяется не в декартовой системе координат (ДСК), а на основе описаний окружающего пространства на языке видимых особенностей среды – ориентиров (Рис. 1). При этом аналогом количественной модели ДСК выступает иная модель – ориентированный граф, вершинам которого соответствуют ориентиры, либо группы однородных ориентиров, а рёбрам – набор информационно-двигательных действий (ИДД). т.е. организация передвижения МР по маршруту основывается на фиксированном наборе ИДД. Под когнитивным представлением пространства и будем понимать указанное выше описание, сам же полученный граф будем называть когнитивной картой.

Дадим определения возможных действий МР при его передвижении по когнитивной карте:

- типовая технологическая операция (ТОП) [17]. Под ТОП будем понимать элементарное безусловное действие (движение прямо, поворот налево, поворот направо, остановка и пр.),
- информационно-двигательное действие (ИДД). Под ИДД будем понимать элементарное обусловленное действие. На каждой итерации расчёта выполнения конкретного ИДД входом для него является вектор показаний сенсоров, а выходом – одна из ТОП,
- сценарий. Под сценарием будем понимать набор нескольких ИДД, необходимый для решения некоторой частной локальной задачи,
- миссия. Под миссией будем понимать набор нескольких сценариев и/или ИДД, необходимый для решения некоторой функционально завершённой полезной задачи.

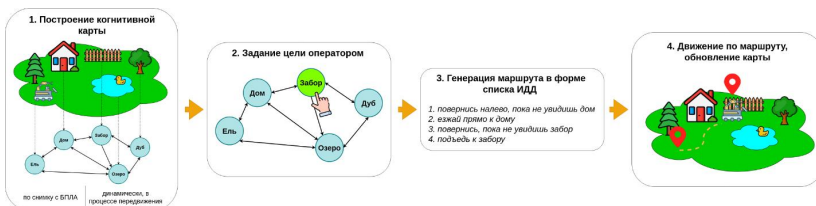


Рис. 1. Суть интерпретирующей навигации на базе когнитивного представления пространства

Доступный набор ИДД в каждом конкретном случае должен зависеть от функциональных возможностей МР и от установленных на нём сенсоров.

В качестве основной миссии МР рассматривается перемещение МР из некоторой начальной точки к некоторому выбранному (оператором, либо СУ мобильного робота) конечному ориентиру (Рис. 2). Примером других миссий могли бы служить: «следуй за», «сledi», «патрулируй», «исследуй», «вернись», «найди» и т.п.

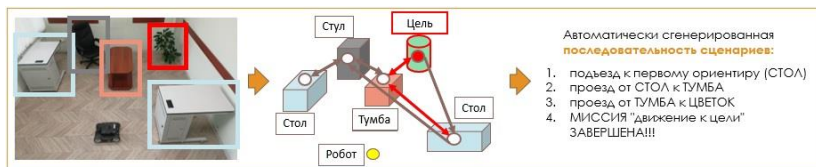


Рис. 2. Пример когнитивной карты, построенного маршрута и набора сценариев, обеспечивающих выполнение миссии «движение к цели»

Ещё одним важным ограничением при решении задачи интерпретирующей навигации является то, что при начальном построении когнитивной карты и задании маршрута (миссии) требуемый для его выполнения набор ИДД должен формироваться автоматически, а при динамическом изменении когнитивной карты, автоматически должен меняться и набор ИДД.

При работе с ориентирами важно учитывать, что каждый отдельный ориентир имеет двойную идентификацию:

- абсолютный идентификатор, т.е. метка ориентира для стороннего наблюдателя (не доступен МР),
- относительный идентификатор, т.е. метка ориентира, присваиваемая ему в результате решения задачи классификации (доступен МР).

Укажем ещё ряд допущений и ограничений, которые были приняты при решении задачи интерпретирующей навигации:

- на МР установлен набор сенсоров, обеспечивающий идентификацию ориентиров и определение расстояния,
- задачи распознавания и сопровождения отдельных ориентиров критически важны для решения задачи интерпретирующей навигации, но не являются предметом настоящего исследования; для решения данных задач предполагается использовать известные сторонние решения (например, YOLO [18], DeepSORT [19] и т.д.),
- предлагаемый в работе подход исключает функционирование в условиях отсутствия идентифицируемых ориентиров,
- предлагаемый подход исключает функционирование в среде, содержащей исключительно однотипные ориентиры (ориентиры, с одинаковыми относительными идентификаторами), неразличимые имеющимися техническими средствами,
- предлагаемый подход должен позволять динамическое построение и/или перестройку когнитивной карты,
- предлагаемый подход должен обеспечивать робастность к ошибкам идентификации ориентиров.

Отдельно необходимо подчеркнуть, что вопросы, связанные со способами выполнения конкретных ИДД (например, регулятор, обеспечивающий движение МР на заданном расстоянии от препятствия и т.п.) в настоящей работе рассматриваться не будут.

3. Способы построения когнитивной карты и маршрута мобильного робота. Укажем лишь три из всех возможных подходов к построению когнитивной карты и маршрута МР. Когнитивная карта и маршрут могут быть построены:

- по семантически сегментированному изображению,
- динамически, в процессе автономного исследования среды МР,
- по речевому (либо текстовому) сообщению оператора с использованием больших языковых моделей (БЯМ).

С точки зрения демонстрации возможностей предлагаемого авторами языка LRNB наиболее удобным видится использование подхода, связанного с использованием БЯМ. Тем не менее, приведём краткое описание всех трёх указанных подходов.

Первый подход основан на использовании семантически сегментированного изображения (Рис. 3). В данном случае под семантически сегментированным изображением будем понимать некоторое изображение местности (вид сверху), где каждой из выделенных областей соответствует свой относительный идентификатор. Основой для такого изображения может служить реальный фотоснимок (полученный со спутника, БЛА и т.д.). Пример разработанной модели семантической сегментации можно найти в работе [20]. Конкретные алгоритмы построения когнитивной карты по семантически сегментированному изображению будут приведены авторами в следующих работах.

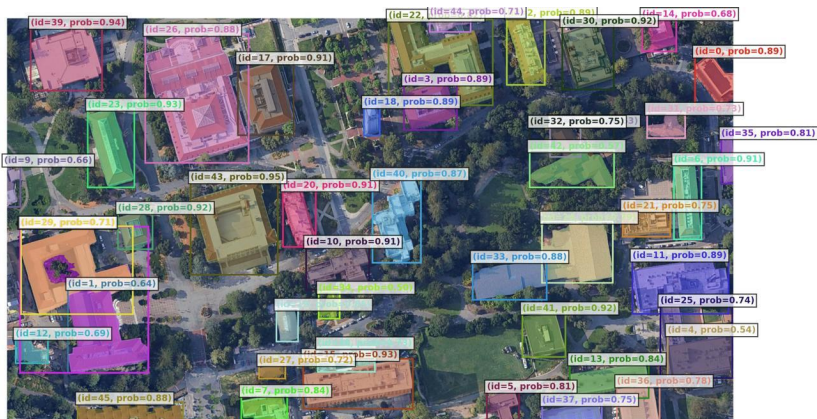


Рис. 3. Пример семантически сегментированного изображения [21]

Использование данного подхода дает ряд существенных преимуществ: еще до начала выполнения миссии МР возможно получить общее представление о форме ориентиров, их взаимном расположении и относительных расстояниях между ними, а также сразу построить исходную когнитивную карту. Одним из следствий указанных преимуществ является, например, возможность описания

ориентиров геометрическими примитивами, что также потенциально даёт нам ряд преимуществ при решении общей задачи. Однако у данного подхода есть и серьёзный недостаток: необходимость гарантировать тождественность идентификации ориентиров (присвоение одного и того же относительного идентификатора) как сенсорами, установленными на борту МР, так и классификатором, используемым при создании семантически сегментированного изображения.

После построения когнитивной карты оператор имеет возможность выбрать целевой ориентир. Далее происходит построение кратчайшего маршрута до целевого ориентира одним из стандартных методов нахождения оптимального пути внутри графа от одного узла до другого, например, методом поиска в ширину (BFS, Breadth-First Search). Пример когнитивной карты, построенной по семантически сегментированному изображению с использованием геометрических примитивов, представлен на рисунке 4.

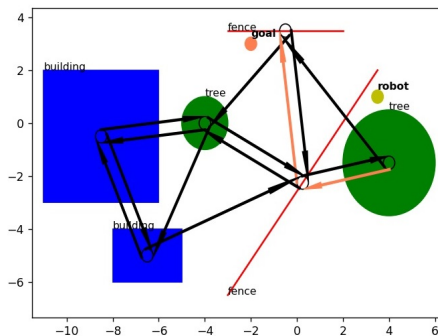


Рис. 4. Когнитивная карта и построенный маршрут при описании ориентиров геометрическими примитивами

На рисунке 4 ориентиры обозначены цветными прямоугольниками, окружностями и отрезками; чёрными окружностями – узлы графа; стрелками – рёбра графов; причём оранжевым отмечены ребра, соответствующие построенному маршруту. Кроме того, рисунок 4 иллюстрирует возможность учитывать форму ориентиров. Как видно из рисунка, в данном случае маршрут построен не по кратчайшему ребру, а с учётом потенциально возникающего при движении препятствия (fence).

Второй возможный подход к построению когнитивной карты и маршрута робота подразумевает их динамическое построение

мобильным роботом в ходе выполнения миссии. Преимущество такого подхода следует из отсутствия необходимости в построении семантически сегментированного изображения и, как следствие, отсутствия необходимости обеспечивать тождественность при идентификации ориентиров на семантически сегментированном изображении с идентификацией ориентиров средствами, доступными на борту МР. В остальном характер функционирования системы интерпретирующей навигации при втором подходе представляется более затруднительным по сравнению с первым.

Во-первых, отсутствие априорного знания о форме ориентира заставляет изначально безусловно полагать её одинаковой (например, прямоугольной). Соответственно, сценарии, основанные на априорном знании формы ориентиров, должны быть пересмотрены в сторону усложнения.

Во-вторых, одним из основных ограничений при решении поставленной общей задачи является отсутствие данных об ориентации МР в мировой системе координат. Отчасти это компенсируется возможностью измерять углы локально (например, при помощи видеокamеры). Однако при использовании второго подхода накопительная ошибка камеры как угломера может оказаться критической, что может приводить к добавлению на когнитивную карту одного и того же ориентира в качестве двух разных узлов и, в результате, к заикливаю. Необходимо отметить, что при наличии априорного знания о том, что все относительные идентификаторы ориентиров уникальны, указанной проблемы не возникает.

Маршрут МР во втором подходе также должен строиться динамически, причём используемые сценарии должны обеспечивать по возможности полный обход всех ориентиров, принадлежащих некоторой области. Детальная проработка и исследование таких сценариев к настоящему времени авторами не проводилась. Данное направление станет предметом дальнейших исследований.

Третий подход основан на задании маршрута робота при помощи речевого (либо текстового) сообщения оператором и связан с использованием технологий БЯМ. При таком подходе оператор описывает маршрут робота так, как будто бы он объяснял путь другому человеку, после чего БЯМ транслирует это сообщение в набор ИДД, которые МР должен выполнить. Преимуществом такого подхода является то, что, хотя МР в процессе выполнения миссии и может строить когнитивную карту аналогично второму подходу, строгим условием это не является. Кроме того, отметим, что в первых двух указанных подходах, с учётом требования автоматического построения

набора ИДД, соответствующих рёбрам графа, набор используемых сценариев должен быть жёстко фиксированным. При рассматриваемом же подходе, навигационное задание МР в пределе может быть сколь угодно сложным, ограничиваясь лишь способностью МР его выполнить и способностью БЯМ сформировать набор ИДД отвечающих данному заданию. В том числе именно поэтому данный подход и был выбран в качестве удобного способа демонстрации возможностей формального языка LRNB.

4. Формальный язык описания информационно-двигательных действий. Поскольку в предлагаемом общем подходе к организации интерпретирующей навигации на основе когнитивного представления пространства любое навигационное поведение (маршрут) МР сводится к определённому набору ИДД, то и предлагаемый авторами статьи формальный язык описания навигационного поведения LRNB сводится к формальному языку описания ИДД.

Необходимо подчеркнуть, что ИДД задаёт именно запрос на поведение МР. Например, «подойди к ориентиру», «повернись к ориентиру», «следуй вдоль ориентира» и т.п. Конкретный способ реализации ИДД может быть различным и зависеть как от типа МР, так и от установленных на нём сенсоров. Грубо говоря, ИДД отвечает на вопрос «что делать?», но не отвечает на вопрос «как сделать?».

Описание конкретных ИДД предлагается строить универсальным образом. Соответственно, и LRNB должен подчиняться некоторым универсальным правилам. Для описания одного ИДД на LRNB будем использовать термин «команда». В качестве универсального решения предлагается строить команды, отвечающие отдельным ИДД из восьми лексем. Структура такой команды показана на рисунке 5.



Рис. 5. Структура команды при описании ИДД на LRNB

На рисунке 5 «Действие» является оператором команды (далее будем непосредственно использовать термин «действие»); тогда как «объект действия», «объект завершения действия» и «условие завершения действия» – параметрами команды.

Отметим, что достаточность подобной структуры команды, как и достаточность конкретных наборов термов в неё входящих, требует формального доказательства. Ниже мы обратим на это отдельное внимание.

Все возможные варианты действий и их аргументов (зелёные блоки на рисунке 5) представлены в таблице 1. Действие определяет характер изменения положения и ориентации МР в мировой системе координат. Предлагается использовать набор из четырёх действий. Поскольку описанные в таблице 1 наборы термов, отвечающие действию и аргументу действия, позволяют независимо изменять все шесть обобщённых координат МР, достаточность этих конкретных наборов термов можно считать самоочевидной.

Таблица 1. Все возможные варианты действий и их аргументы на LRNB

Действие	Аргумент действия	Описание
unknown	any	Действие не задано. Может быть использовано, например, при ожидании роботом команды на выполнение миссии. Независимо от дальнейших лексем после unknown ИДД формирует ТОП stop.
wait	stop	Ожидание. Линейные перемещения и повороты вокруг главных осей МР запрещены. Аргумент stop применим лишь с действием wait. Использование данного аргумента с любым другим действием, как и использование действия wait с любым другим аргументом, вырождается в wait (stop).
turn	any	Поворот. Линейные перемещения запрещены. Разрешает МР поворот вокруг любой из его главных осей и остановку.
	left	Разрешает только танковый поворот (на месте) налево и остановку.
	right	Разрешает только танковый поворот направо (на месте) и остановку.
	left_roll	Разрешает только поворот по углу крена налево и остановку.
	right_roll	Разрешает только поворот по углу крена направо и остановку.
	up_trim	Разрешает только поворот по положительному углу дифферента (атаки) и остановку.
	down_trim	Разрешает только поворот по отрицательному углу дифферента (атаки) и остановку.
go	any	Движение. Разрешены любые линейные перемещения, любые повороты вокруг главных осей и остановка.
	forward	Разрешает только движение вперёд, любые повороты вокруг главных осей и остановку.
	back	Разрешает только движение назад, любые повороты вокруг главных осей и остановку.
	left_step	Разрешает только движение налево, любые повороты вокруг главных осей и остановку.
	right_step	Разрешает только движение направо, любые повороты вокруг главных осей и остановку.
	up	Разрешает только движение вверх, любые повороты вокруг главных осей и остановку.
	down	Разрешает только движение вниз, любые повороты вокруг главных осей и остановку.

Объект действия (фиолетовые блоки на рисунке 5) обуславливает действие МР некоторым объектом (ориентиром). Все наборы термов для объекта действия и для его значений перечислены в таблице 2. Необходимо указать на допустимость использования в LRNB логических операций AND, OR и NOT для четвёртой (а также второй и шестой) лексемы. С учётом этого, а также с учётом возможности как полностью задать положение объекта действия относительно МР, так и сам объект действия либо их комбинации, авторы утверждают и достаточность наборов термов, приведённых в таблице 2.

Таблица 2. Все введённые варианты объектов действия и их значения на LRNB

Объект действия	Значение объекта действия	Описание
not_defined	any	Объект действия не задан. Действие МР ничем не обусловлено.
front_object	any	Объект действия спереди. Действие МР обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся перед МР. После захвата объекта (ориентира), МР стремится удерживать его спереди.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.
left_object	any	Объект действия слева. Действие МР обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся слева от МР. После захвата объекта (ориентира), МР стремится удерживать его слева.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.
right_object	any	Объект действия справа. Действие МР обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся справа от МР. После захвата объекта (ориентира), МР стремится удерживать его справа.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.
back_object	any	Объект действия сзади. Действие МР обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся позади МР. После захвата объекта (ориентира), МР стремится удерживать его сзади.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.

Продолжение таблицы 2. Все введённые варианты объектов действия и их значения на LRNB

Объект действия	Значение объекта действия	Описание
up_object	any	Объект действия вверх. Действие МР обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся над МР. После захвата объекта (ориентира), МР стремится удерживать его вверх.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.
bottom_object	any	Объект действия вниз. Действие МР обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся под МР. После захвата объекта (ориентира), МР стремится удерживать его вниз.
bottom_object	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.

Объект завершения действия (синие блоки на рисунке 5) определяет завершение ИДД, обусловленное наличием некоторого объекта (ориентира). При отсутствии задания последней пары лексем (см. ниже), сама фиксация объекта завершения действия завершает ИДД. Все наборы термов для объекта завершения действия и для его значений перечислены в таблице 3. По аналогии с предыдущими двумя лексемами, авторы также утверждают достаточность приведённых в таблице 3 наборов термов.

Таблица 3. Все введённые варианты объектов завершения действия и их значения на LRNB

Объект завершения действия	Значение объекта завершения действия	Описание
not_defined	any	Объект завершения действия не задан. Завершения ИДД по объекту (ориентир) не происходит, тем не менее, возможны другие варианты завершения ИДД (см. таблицу 4).
front_object	any	Объект завершения действия спереди. Завершение действия обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся перед МР.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.
left_object	any	Объект завершения действия слева. Завершение действия обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся слева от МР.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.

Продолжение таблицы 3. Все введённые варианты объектов завершения действия и их значения на LRNB

Объект завершения действия	Значение объекта завершения действия	Описание
right_object	any	Объект завершения действия справа. Завершение действия обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся справа от МР.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.
back_object	any	Объект завершения действия сзади. Завершение действия обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся позади МР.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.
up_object	any	Объект завершения действия вверх. Завершение действия обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся над МР.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.
bottom_object	any	Объект завершения действия вниз. Завершение действия обусловлено объектом (ориентиром) с произвольным относительным идентификатором, находящимся под МР.
	no_object	В качестве объекта действия выбирается отсутствие ориентира. Является инверсией значения any.
	Относительный идентификатор	В качестве объекта действия выбирается ориентир с заданным относительным идентификатором.

Все условия завершения действия (красные блоки на рисунке 5) можно разделить на две группы: условия, которые релевантны только если задан объект завершения действия, и условия, которые могут быть заданы независимо от наличия объекта завершения действия. Все условия завершения действия и их значения приведены в таблице 4. Представляется необходимым пояснить случай, когда одновременно заданы и объект завершения действия, и условие завершения действия. В таком варианте обработка условия завершения действия происходит лишь в случае фиксации объекта завершения действия. Например, если последние две пары лексем заданы как *front_object (tree) time (5)*, то момент начала отсчёта времени совпадает с моментом фиксации объекта с меткой «tree» с фронтальной стороны робота. Необходимость выполнить эти два условия по функции логического «ИЛИ» подразумевает переход на сценарный уровень при параллельном способе формирования сценария (см. раздел 5).

Проблема с формальным доказательством полноты предлагаемой структуры команды и наборов термов её составляющих особенно ярко видна на примере последней пары лексем – условий завершения действия и их значений. Очевидно, что при всём многообразии МР и сенсоров, которыми они могут быть оснащены, любой список, построенный по предлагаемому принципу, будет не полным. С целью обхода указанной трудности в список термов последней пары лексем авторами введён терм «*special_event*», который может принимать значения *True*, либо *False*. Предполагается, что при невозможности описать какое-либо условие завершения действия при помощи термов, представленных в таблице 4 (например, превышение радиационным фоном некоторого порогового значения), данное событие может быть описано с использованием указанного термина. Другая возможность заключается в расширении списка термов, представленном в таблице 4, необходимыми недостающими значениями.

Таблица 4. Все введённые варианты условий завершения действия и их значения на LRNB

Условие завершения действия	Значение условия завершения действия	Описание
not_defined	0	Условие завершения действия не задано. Если при этом не задан и объект завершения действия – действие будет продолжаться неограниченно.
number	Натуральное число	Номер. Задаёт необходимость завершения ИДД при достижении значением подсчитанного числа объектов завершения действия заданной величины. Релевантно только при заданном объекте завершения действия.
distance	Действительное число	Дистанция. Задаёт необходимость завершения ИДД при достижении значением измеренной дистанцией до объекта завершения действия заданной величины. Релевантно только при заданном объекте завершения действия.
	minimum	Задаёт необходимость завершения ИДД при достижении минимального значения дистанции до объекта завершения действия. Релевантно только при заданном объекте завершения действия.
jump_from	Действительное число	Задаёт необходимость завершения ИДД при увеличении значения дистанции до объекта завершения действия на пороговую величину. Релевантно только при заданном объекте завершения действия.
jump_to	Действительное число	Задаёт необходимость завершения ИДД при уменьшении значения дистанции до объекта завершения действия на пороговую величину. Релевантно только при заданном объекте завершения действия.
path	Действительное число	Путь. Задаёт необходимость завершения ИДД при достижении значением пройденного МР пути заданной величины. Релевантно как при заданном объекте завершения действия, так и в противном случае.

Продолжение таблицы 4. Все введённые варианты условий завершения действия и их значения на LRNB

Условие завершения действия	Значение условия завершения действия	Описание
angle	Действительное число	Угол. Задаёт необходимость завершения ИДД при достижении значением угла поворота МР заданной величины. Релевантно как при заданном объекте завершения действия, так и в противном случае.
time	Действительное число	Время. Задаёт необходимость завершения ИДД при достижении значением измеряемого времени заданной величины. Релевантно как при заданном объекте завершения действия, так и в противном случае.
special_event	True / False	Специальное событие. Задаёт необходимость завершения ИДД при наступлении (True), либо при отсутствии (False) особого события. Релевантно как при заданном объекте завершения действия, так и в противном случае.

Как было указано в разделе 2, выходом ИДД на каждой итерации расчёта является одна из ТОП. В качестве простейшего примера (для гусеничного либо колёсного робота) можно предложить следующий набор выходов ИДД:

- *unknown*. Может возникнуть, например, когда ИДД не задано, или задано ошибочно. МР выполняет безусловную остановку,
- *left*. Безусловный танковый поворот налево,
- *right*. Безусловный танковый поворот направо,
- *forward*. Безусловное движение вперёд,
- *back*. Безусловное движение назад,
- *stop*. Безусловная остановка,
- *completed*. Специальная команда, сигнализирующая о завершении ИДД. МР выполняет безусловную остановку.

Отдельно приведём один из возможных примеров, приводящих к выходу ИДД «*unknown*». Предположим, нам необходимо описать следующее поведение робота на языке LRNB: «Стой на пляже, пока температура воздуха не превысит 40 градусов Цельсия». На языке LRNB такое поведение можно задать командой: *wait (stop) bottom_object (beach) not_defined (any) special_event (True)*. Предположим, что в момент поступления данной команды МР не идентифицирует ориентир с меткой «*beach*» под собой. В таком случае, поскольку оператор *wait* запрещает любые перемещения и повороты (см. таблицу 1), принимается решение о невозможности выполнить данную команду с возвращением значения «*unknown*».

Кроме того, данный пример поясняет присутствие в таблице 4 термина «*special_event*». Поскольку в списке термов для условия завершения действия не предусмотрена температура, то при

необходимости дать возможность описывать указанное в примере поведение разработчик может либо дополнить таблицу 4, добавив новый терм, например, «*temperature*», либо использовать терм «*special_event*», реализованный соответствующим образом.

5. Примеры задания поведения мобильного робота на LRNB.

Можно предложить следующие характерные примеры команд на LRNB:

1. **go (forward) not_defined (any) not_defined (any) not_defined (0).**

В данном примере задаётся безусловное прямолинейное движение МР.

2. **go (forward) front_object (no_object) not_defined (any) not_defined (0).** В данном примере задаётся прямолинейное движение МР с условием избегания препятствий. Возможно описание и более сложных ситуаций, требующее использования логических элементов. Например, комбинация **front_object (NOT L)** задаёт поведение, когда МР будет избегать нахождения ориентира L со своей фронтальной стороны.

3. **go (forward) left_object (L) not_defined (any) not_defined (0).**

Поясим особенности поведения робота при использовании объекта действия (Рис. 6).

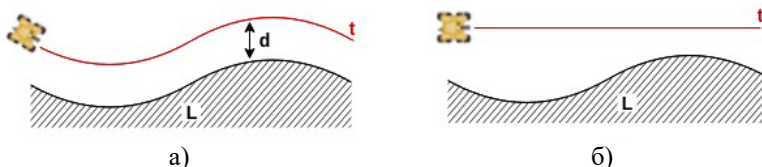


Рис. 6. Пример, демонстрирующий возможности использования объекта действия

На рисунке 6 пиктограммой обозначен МР; t – траектория движения МР; L – ориентир (объект действия).

Важно подчеркнуть, что обе ситуации (Рис. 6(а) и (б)) отвечают заданному примеру. Как было указано в таблице 1, значение действия *forward* в сочетании с действием *go* допускает движение МР прямо, поворот, либо остановку. При этом значение аргумента объекта действия L при объекте действия *left_object*, требует удерживать ориентир L с левой стороны. Как видим, и ситуация (а), и ситуация (б) удовлетворяют данному условию. Разница лишь в выборе конкретного способа реализации поведения, заданного на предлагаемом формальном языке. При исчезновении объекта действия из поля зрения в нужной части видеокamеры (или других сенсоров, позволяющих идентифицировать объект с нужной стороны), исходя из

заданного поведения МР будет совершать манёвры, необходимые для того, чтобы вернуть объект интереса в зону внимания.

4. *go (forward) front_object (D) not_defined (any) not_defined (0)*. В данном случае МР будет совершать прямолинейное движение, стремясь удерживать ориентир D перед собой. Менее интересен случай, когда D – неподвижный ориентир. В этом случае робот будет двигаться на ориентир до тех пор, пока не будет выполнено одно из условий завершения действия, либо пока он не врежется в ориентир. В случае, когда D – динамический объект, МР будет следовать за данным объектом. Важным моментом здесь является необходимость регулирования скорости МР с целью исключить его отставание от объекта следования, либо, наоборот, столкновения с объектом. Представляется неверным выносить такое регулирование на уровень реализации ИДД. В таком случае (если требовать соблюдение некоторой дистанции от МР до D) это может привести к потере общности, заставляя МР всегда безусловно останавливаться перед объектом действия на заданном расстоянии. Однако миссией МР может являться именно поражение (таран) некоторого заданного объекта. Указанная проблема легко разрешается при переходе на уровень сценариев. Т.е. необходимая в указанном примере регулировка может осуществляться, например, для сценария *follow*, но отсутствовать для сценария *hit*.

5. *turn (any) front_object (L) not_defined (any) not_defined (0)*. Данная комбинация термов реализует слежение за ориентиром (в отличие от следования, МР меняет лишь свою ориентацию, не меняя положения).

6. *go (forward) left_object (L) left_object (NOT L) not_defined (0)*. В данном примере задаётся движение МР, при котором он стремится удерживать ориентир L слева. ИДД завершается, когда ориентир L пропадает из заданной зоны интереса (слева).

7. *go (forward) left_object (building) front_object (tree) not_defined (0)*. Пример использования объекта завершения действия представлен на рисунке 7.

На рисунке 7 пиктограммой обозначен МР; жёлтой линией – траектория МР; фиолетовые отрезки определяют ориентацию робота; синие прямоугольники соответствуют ориентирам с относительными идентификаторами «*building*»; зелёные окружности соответствуют ориентирам с относительными идентификаторами «*tree*». Как видно из рисунка 7, сначала МР совершал движение вдоль ориентира (объекта действия) «*building*». После того, как объект действия пропал из зоны интереса для объекта действия (лево), МР начал

совершать поворот налево, стремясь удерживать объект действия в зоне интереса. Кадр иллюстрирует момент, когда ИДД было завершено, т.е. когда ориентир (объект завершения действия) «tree» попал в свою зону интереса МР (фронт).

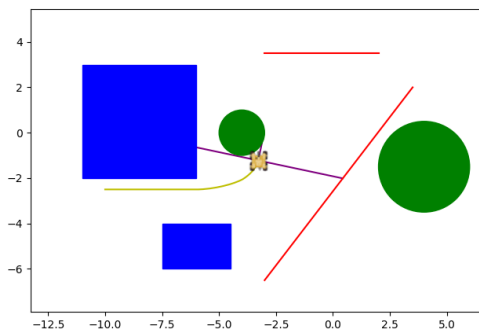


Рис. 7. Пример, демонстрирующий возможности использования объекта завершения действия

8. **turn (any) not_defined (any) front_object (tree) not_defined (0).**

Данный пример демонстрирует ориентацию МР на объект интереса «tree». В данном случае само действие робота не обусловлено каким-либо ориентиром. Ориентир «tree» задаёт исключительно условие завершения ИДД.

9. **go (forward) front_object (footpath) left_object (tree) number (5).**

При таком ИДД МР будет перемещаться по тропинке (footpath) (повторяя её возможные изгибы) до пятого дерева слева (tree).

10. **go (forward) not_defined (any) not_defined (any) path (5).**

Данный ИДД требует безусловного перемещения робота на пять метров.

11. **turn (right) not_defined (any) not_defined (any) angle (45).**

ИДД в данном примере требует безусловного поворота робота на сорок пять градусов.

12. **go (forward) right_object (building) left_object (fence) time (5).**

Данный ИДД задаёт перемещение МР вдоль здания (building) справа, до тех пор, пока слева не появится забор (fence) и МР не проедет вдоль него 5 секунд.

13. **turn (any) not_defined (any) front_object (any) distance (minimum).** Данное ИДД требует от МР поворота к ближайшему ориентиру.

14. **go (forward) left_object (fence) left_object (fence) jump_from (value).** Данное ИДД определяет движение вдоль забора (fence) слева,

ИДД завершается, когда происходит резкий скачок дистанции в сторону увеличения (забор заканчивается).

15. *go (forward) not_defined (any) left_object (no_object) jump_to (value)*. Данное ИДД завершается, когда МР достигает любого объекта слева. У данной команды существует синоним: *go (forward) not_defined (any) left_object (any) not_defined (0)*.

16. *wait (stop) not_defined (any) front_object (elephant) number (10)*. ИДД в примере 16 завершится после попадания в фронтальную зону интереса МР десятого ориентира с относительным идентификатором *elephant*.

17. *go (forward) front_object (person AND red_cap) front_object (person AND red_cap) distance (1)*. Пример №17 демонстрирует использование логических операторов. ИДД определяет движение МР одновременно к ориентирам с относительными идентификаторами «*person*» и «*red_cap*» и остановку перед ними на дистанции в один метр.

Как было указано в разделе 2, сценарий представляет из себя набор нескольких ИДД, необходимый для решения некоторой частной локальной задачи. Можно предложить по крайней мере два способа формирования сценариев: последовательный и параллельный. Кроме того, сценарии могут иметь иерархическую структуру (вкладываться друг в друга), когда вызывающий сценарий приостанавливает своё выполнение, до завершения вызываемого сценария.

Последовательный сценарий подразумевает вызов следующего ИДД после выполнения предыдущего. Выходное значение *completed* (см. раздел 4) последнего из составляющих сценарий ИДД завершает весь сценарий. В качестве примера последовательного сценария рассмотрим сценарий «*to_next_landmark*», состоящий из трёх ИДД, который обеспечивает передвижение МР от текущего ориентира к следующему в простейшем случае (все ориентиры на сцене имеют уникальный относительный идентификатор, расстояния между ориентирами позволяют МР перемещаться между ними):

1. *turn (any) not_defined (any) side (landmark) distance (minimum)*. Поворот к текущему ориентиру *landmark* необходимой (вместо *side* подставляем *left_object* или *right_object*) стороной.

2. *go (forward) side (landmark) front_object (goal) not_defined (0)*. Обход текущего ориентира *landmark* с необходимой стороны.

3. *go (forward) front_object (goal) front_object (goal) distance (value)*. Подход к следующему ориентиру *goal*.

Параллельный сценарий подразумевает циклический вызов двух или более ИДД в рамках одной итерации расчёта. Выходное значение *completed* любого из составляющих сценарий ИДД завершает весь

сценарий. В качестве модельного примера параллельного сценария рассмотрим сценарий, описывающий поведение МР «лети над речкой, пока не увидишь мост, но не более 10 километров»:

1. go (forward) bottom_object (river) front_object (NOT bridge) path (10000). Движение над ориентиром с относительным идентификатором «*river*» на расстояние 10000 метров, при условии, что во фронтальной зоне МР не фиксируется ориентир с относительным идентификатором «*bridge*». Обратим внимание, что появление ориентира «*bridge*» при таком ИДД не завершает сценарий, а лишь приостанавливает подсчёт пути. Именно поэтому нам необходимо второе, параллельное ИДД.

2. go (forward) bottom_object (river) front_object (bridge) not_defined (0). Движение над ориентиром с относительным идентификатором «*river*», пока во фронтальной зоне МР не будет зафиксирован ориентир с относительным идентификатором «*bridge*».

Отдельно взятое ИДД go (forward) bottom_object (river) front_object (bridge) path (10000) не решает поставленную задачу, т.к. в этом случае действие завершится лишь при преодолении расстояния в 10 км. при постоянной фиксации во фронтальной зоне МР ориентира с относительным идентификатором «*bridge*».

Очевидно, что сценарии могут быть организованы и комбинированным образом, сочетая в себе признаки последовательных, параллельных и вложенных сценариев.

Как было указано в разделе 2, миссия представляет из себя набор нескольких сценариев и/или ИДД, необходимый для решения некоторой функционально завершённой полезной задачи. В простейшем случае миссия робота «*go_to_goal*», обеспечивающая перемещение робота из начального положения к конечной цели, сводится к $N - 1$ вызовам описанного выше сценария «*to_next_landmark*» с последовательным перебором пар ориентиров, составляющих маршрут, где N – общее число ориентиров в маршруте.

6. Проведение экспериментов по формированию ИДД на языке LRNB с использованием большой языковой модели. Авторами настоящей работы была проведена серия экспериментов по формированию ИДД на языке LRNB с использованием большой языковой модели DeepSeek (chat.deepseek.com). Однако при написании настоящей статьи перед авторами встал вопрос о форме представления результатов, с учётом важности запросов (промтов) БЯМ, которые получались достаточно объёмными. В результате было принято решение в качестве промпта использовать сам текст данной статьи начиная с раздела 2 и заканчивая текущим абзацем включительно.

Результаты эксперимента приведены в таблицах 5-8. Во всех экспериментах использовался один и тот же запрос (промт): «Необходимое поведения робота: "B". Напиши команду или сценарий на LRNB для описания этого поведения. Выводи только одну команду или серию команд!». Вместо *B* в запрос подставлялся текст из столбцов «Текстовое сообщения» в таблицах 5-8. Далее к запросу прикреплялся файл MsWord с содержанием данной статьи, как указано выше. Каждый запрос повторялся пять раз.

В таблице 5 ПС – полное совпадение, ПО – поведение обеспечено (синоним), О – ошибка.

В таблице 6 ПС – полное совпадение, ПО – поведение обеспечено (синоним), О – ошибка.

В таблицах 5 и 6 приведены результаты, связанные с необходимостью формирования одной команды на языке LRNB. Ниже в таблицах 7 и 8 приведены результаты, связанные с необходимостью формирования сценария, т.е. некоторого набора ИДД.

Таблица 5. Результаты перевода текстового сообщения в произвольной форме на язык LRNB на уровне ИДД. Запрос основан на примерах из раздела 5.

№	Текстовое сообщение	Команда на LRNB	ПС	ПО	О
1	Плыви вперёд	go (forward) not_defined (any) not_defined (any) not_defined (0)	5	0	0
2	Лети вперёд, избегая препятствий	go (forward) front_object (no_object) not_defined (any) not_defined (0)	5	0	0
3	Двигайся вдоль реки слева	go (forward) left_object (river) not_defined (any) not_defined (0)	5	0	0
4	Следуй за белой машиной	go (forward) front_object (white_car) not_defined (any) not_defined (0)	1	4	0
5	Оставаясь на месте, следи за луной	turn (any) front_object (moon) not_defined (any) not_defined (0)	3	2	0
6	Лети, удерживая дрон слева, пока он не пропал	go (forward) left_object (drone) left_object (NOT drone) not_defined (0)	5	0	0
7	Оплывай скалу справа, пока не увидишь маяк	go (forward) right_object (rock) front_object (lighthouse) not_defined (0)	5	0	0
8	Поворачивайся вправо до первого здания	turn (right) not_defined (any) front_object (building) not_defined (0)	3	2	0
9	Лети над лесом пока не долетишь до второй реки	go (forward) bottom_object (forest) front_object (river) number (2)	5	0	0
10	Пройди в сторону трубы двадцать пять метров	go (forward) front_object (pipe) not_defined (any) path (25)	5	0	0
11	Развернись	turn (any) not_defined (any) not_defined (any) angle (180)	3	0	2

Продолжение таблицы 5. Результаты перевода текстового сообщения в произвольной форме на язык LRNB на уровне ИДД. Запрос основан на примерах из раздела 5.

№	Текстовое сообщение	Команда на LRNB	ПС	ПО	О
12	Плыви вдоль трубы справа, пока не увидишь затонувший корабль слева, вдоль корабля проплыви ещё 10 секунд	go (forward) right_object (pipe) left_object (shipwreck) time (10)	5	0	0
13	Поворачивай вниз так, чтобы ближайший любой объект был перед тобой	turn (down_trim) not_defined (any) front_object (any) distance (minimum)	5	0	0
15	Следуй вдоль дома справа до выступа этого дома	go (forward) right_object (building) right_object (building) jump_to (value)	2	2	1
16	Жди десять минут	wait (stop) not_defined (any) not_defined (any) time (600)	5	0	0
17	Догони человека с синей сумкой	go (forward) front_object (person AND blue_bag) front_object (person AND blue_bag) distance (minimum)	2	2	1

Таблица 6. Результаты перевода текстового сообщения в произвольной форме на язык LRNB на уровне ИДД. Запрос не основан на примерах из раздела 5.

№	Текстовое сообщение	Команда на LRNB	ПС	ПО	О
1	Едь по дороге, пока не стемнеет	go (forward) front_object (road) not_defined (any) special_event (True)	3	2	0
2	Найди полицейского или пожарника	turn (any) not_defined (any) front_object (policeman OR firefighter) not_defined (0)	0	5	0
3	Повернись налево, пока не увидишь перед собой стену, продолжи поворот ещё на 30 градусов	turn (left) not_defined (any) front_object (wall) angle (30)	3	2	0
4	Плыви вдоль рифа справа, пока слева не увидишь любой объект, кроме рыбы	go (forward) right_object (reef) left_object (NOT fish) not_defined (0)	5	0	0
5	Лети от Земли, пока не совершишь скачок в пространстве	go (forward) bottom_object (earth) bottom_object (earth) jump_from (value)	0	3	2

Таблица 7. Результаты перевода текстового сообщения в произвольной форме на язык LRNB на уровне сценария. Запрос основан на примерах из раздела 5.

№	Текстовое сообщение	Команды на LRNB	ПС	ПО	О
1	Обойди стол и подойди к тумбе, расположенной за ним	1. turn (any) not_defined (any) left_object (table) distance (minimum). 2. go (forward) left_object (table) front_object (cabinet) not_defined (0). 3. go (forward) front_object (cabinet) front_object (cabinet) distance (value).	0	0	5
2	Жди робота-спасателя, но не более пяти минут	1. wait (stop) not_defined (any) front_object (rescuer_robot) not_defined (0). 2. wait (stop) not_defined (any) not_defined (any) time (300).	2	0	3

В таблице 7 ПС – полное совпадение, ПО – поведение обеспечено (синоним), О – ошибка.

Таблица 8. Результаты перевода текстового сообщения в произвольной форме на язык LRNB на уровне сценария. Запрос не основан на примерах из раздела 5.

№	Текстовое сообщение	Команды на LRNB	ПС	ПО	О
1	Жди третьего вагона поезда, а потом подойди к нему	1. wait (stop) not_defined (train_car) front_object (train_car) number (3) 2. go (forward) front_object (train_car) front_object (train_car) distance (value)	0	0	5
2	Найди стол двигайся к нему; слева от стола найди тумбу, двигайся к тумбе, объезжай тумбу справа; пока не увидишь цветок; двигайся к цветку	См. рисунок 8(б)	0	0	5

В таблице 8 ПС – полное совпадение, ПО – поведение обеспечено (синоним), О – ошибка.

Отдельно отметим, что при проведении экспериментов с целью избежать дополнительных галлюцинаций БЯМ каждый очередной запрос формировался после нового открытия страницы chat.deerseek.com.

7. Обсуждение результатов. Эксперименты по использованию БЯМ для формирования команд на LRNB в большей степени рассматривались авторами в качестве наглядной демонстрации возможностей предлагаемого формального языка. Однако поскольку при организации интерпретирующей навигации МР среди прочих способов авторами указывается и данный вариант задания маршрута, необходимо дать некоторые комментарии к полученным результатам.

Результаты экспериментов, представленные в таблицах 5-8 позволяют сделать следующие выводы.

Несмотря на относительно низкое число ошибок в таблицах 5 и 6 возможность применения БЯМ при необходимости формировать даже достаточно простое поведение МР подразумевает серьёзный анализ, в первую очередь, с позиции последствий, наступающих при ошибках выполнения необходимого поведения, и/или с позиции наличия возможности экстренной остановки МР при неверном выполнении задания.

Главной проблемой здесь является отсутствие повторяемости результата, при абсолютно идентичных входных данных (промптах).

Кроме того, необходимо отметить и «эксцесс исполнителя». Очевидно, что интерес при использовании БЯМ вызывает возможность использования простого, не формализованного, обывательского языка, что, несомненно, должно лишь увеличивать количество ошибок.

Отдельно кратко рассмотрим эксперименты в таблицах 7-8, где запрос подразумевал переход на сценарный уровень. Полученные в ходе экспериментов результаты оказались неудовлетворительными. Необходимо отметить, что ухудшение качества работы вызывается самой необходимостью БЯМ генерировать именно набор команд. Т.е. запрос, подразумевающий вывод составляющих сценарий команд по отдельности, уменьшил бы число ошибок генерации сценария в целом.

Возможным решением указанных проблем мог бы стать переход на сценарный уровень, когда БЯМ строила бы поведение робота не как набор ИДД, а как последовательность сценариев. Однако, помимо очевидной сложности, связанной с необходимостью подготовки набора таких сценариев разработчиками, использование сценариев неизбежно будет снижать количество возможных миссий МР в соответствии с размером такого набора.

Тем не менее, в качестве основного результата в настоящей работе авторы рассматривают само введение формального языка описания навигационного поведения роботов LRNB. Примеры, приведённые в разделе 5, а также результаты экспериментов, приведённые в разделе 6, по мнению авторов демонстрируют широкий круг навигационных задач, которые могут быть описаны с использованием LRNB.

В разделе 3 были упомянуты ещё два потенциальных подхода при использовании LRNB: динамическое построение когнитивной карты и построение когнитивной карты на основе семантически

сегментированного изображения. И если первый подход в настоящий момент рассматривается лишь в качестве перспективного для дальнейших исследований, то в рамках второго подхода авторами получен ряд результатов.

Так на рисунке 8 представлены результаты выполнения МР сценария №2 из таблицы 8 на основе указанного второго подхода. Результат получен в специально разработанном для исследования задач интерпретирующей навигации эмуляторе.

На рисунке 8(а) серыми прямоугольниками обозначены ориентиры с меткой «стол», оранжевым прямоугольником ориентир с меткой «тумба», зелёной окружностью ориентир с меткой «цветок»; МР обозначен пиктограммой; жёлтой линией – траектория робота; фиолетовые лучи задают ориентацию робота. На рисунке 8(б) приведён автоматически сгенерированный набор ИДД, заданных на языке LRNB, обеспечивающий данное поведение.

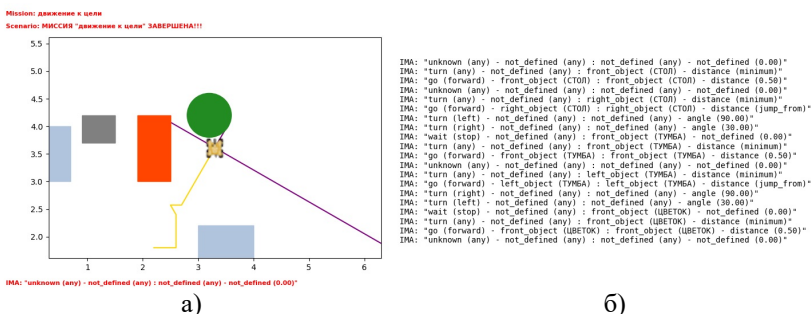


Рис. 8. Воспроизведение требуемого поведения МР из примера №2 таблицы 8: а) в эмуляторе; б) в виде набора ИДД

Данный простой пример также иллюстрирует эффективность использования языка LRNB при решении навигационных задач МР. Другие, более сложные примеры навигационного поведения МР и их исследования в рамках подходов, не связанных с БЯМ, будут приведены в следующих работах авторов.

8. Заключение. В работе описана задача интерпретирующей навигации на основе когнитивного представления пространства. В рамках данной задачи авторами введён формальный язык описания навигационного поведения мобильных роботов LRNB. LRNB позволяет описывать сложные миссии и сценарии, задавать условия завершения действия, характер движения агента в зависимости от объектов (в том числе динамических), их взаимного расположения

и характеристик. Приведён ряд примеров, иллюстрирующих использование LRNB как на уровне информационно-двигательных действий, так и на сценарном уровне.

Кроме того, рассмотрены три способа построения когнитивной карты в рамках задачи интерпретирующей навигации: по семантически сегментированному изображению; динамически, в процессе выполнения миссий мобильного робота; при помощи голосового (либо текстового) сообщения на естественном языке с использованием БЯМ. Для последнего случая представлены результаты экспериментов по генерации команды на LRNB по заданному оператором навигационному заданию на естественном языке. При работе на уровне ИДД количество неверных ответов составило 5 %. Попытки построения наборов ИДД на сценарном уровне привели к неудовлетворительному результату.

Среди основных недостатков решения задачи интерпретирующей навигации с использованием БЯМ необходимо отметить следующие. Это прежде всего отсутствие гарантий повторяемости и «эксцесс исполнителя». Кроме того, это ещё и неспособность БЯМ построить корректный сценарий, как набор ИДД. Последний недостаток по мнению авторов может нивелироваться переходом на сценарный уровень, т.е. когда БЯМ будет вынуждена выбирать из уже готовых, подготовленных разработчиком, сценариев.

Несмотря на указанные недостатки и с учётом того, что в качестве основного результата работы авторы позиционируют само введение формального языка описания навигационного поведения мобильных роботов LRNB, в целом по мнению авторов результаты работы можно считать положительными. Предложенный формальный язык LRNB демонстрирует высокую гибкость и выразительность, что делает его эффективным инструментом для описания сложного навигационного поведения мобильных роботов в разнообразных сценариях.

В качестве дальнейшего направления исследований авторы рассматривают проведение полноценных экспериментов (как в эмуляции, так и на мобильных роботах) в рамках подходов по организации интерпретирующей навигации, связанных с построением семантически сегментированных изображений и динамического построения когнитивной карты. Язык LRNB рассматривается авторами в качестве основного инструмента при решении указанных и иных перспективных задач.

Литература

1. Станкевич Л.А. Когнитивные поведенческие системы // XIX Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2017». Лекции по нейроинформатике. 2017. С. 31–97.
2. Спасский Б.А. К вопросу об автономной навигации сельскохозяйственных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2025. Т. 13. №2. С. 85–90.
3. Zhu Z., et al. Visual-Inertial RGB-D SLAM With Encoders for a Differential Wheeled Robot // IEEE Sensors Journal. 2022. vol. 22. no. 6. pp. 5360–5371. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3101370.
4. Slovak P., Kaniewski P. Stratified Particle Filter Monocular SLAM // Remote Sensing. 2021. vol. 13. no. 16. 3233 p. DOI: 10.3390/rs13163233.
5. Teixeira B., et al. Deep Learning for Underwater Visual Odometry Estimation // IEEE Access. 2020. vol. 8. pp. 44687–44701. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978406.
6. Bala J.A., Adeshina S.A., Aibinu A.M. Advances in Visual Simultaneous Localisation and Mapping Techniques for Autonomous Vehicles: A Review // Sensors. 2022. vol. 22. no. 22. 8943 p. DOI: 10.3390/s22228943.
7. Li C., et al. Bridging the Gap Between Visual Servoing and Visual SLAM: A Novel Integrated Interactive Framework // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2022. vol. 19. no. 3. pp. 2245–2255. DOI: 10.1109/TASE.2021.3067792.
8. Yang S., et al. Visual SLAM Based on Semantic Segmentation and Geometric Constraints for Dynamic Indoor Environments // IEEE Access. 2022. vol. 10. pp. 69636–69649. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3185766.
9. Chen K., et al. Semantic Visual Simultaneous Localization and Mapping: A Survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2025. vol. 26. no. 6. pp. 7426–7449. DOI: 10.1109/TITS.2025.3556928.
10. Zhang T., et al. Endotaxis: A neuromorphic algorithm for mapping, goal-learning, navigation, and patrolling // eLife. 2024. vol. 12. DOI: 10.7554/eLife.84141.3.
11. Lobov S.A., et al. Spatial Memory in a Spiking Neural Network with Robot Embodiment // Sensors. 2021. vol. 21. no. 8. 2678 p. DOI: 10.3390/s21082678.
12. Babichev A., et al. Topological Schemas of Cognitive Maps and Spatial Learning // Frontiers in Computational Neuroscience. 2016. vol. 10. DOI: 10.3389/fncom.2016.00018.
13. Gupta S., et al. Cognitive Mapping and Planning for Visual Navigation // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. pp. 2616–2625.
14. Zeng F., et al. Large Language Models for Robotics: A Survey // arXiv preprint arXiv:2311.07226. 2023.
15. Driess D., et al. PaLM-E: An Embodied Multimodal Language Model // arXiv preprint arXiv:2303.03378. 2023.
16. Wang F., et al. Object-Based Reliable Visual Navigation for Mobile Robot // Sensors. 2022. vol. 22. no. 6. 2387 p. DOI: 10.3390/s22062387.
17. Смирнова Е.Ю., Спасский Б.А. Организация супервизорного управления в сценариях экстремальной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. Т. 8. №4. С. 245–258. DOI: 10.31776/RTSJ.8401.
18. Hussain M. YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection // Machines. 2023. vol. 11. no. 7. 677 p. DOI: 10.3390/machines11070677.
19. Du Y., et al. StrongSORT: Make DeepSORT Great Again // IEEE Transactions on Multimedia. 2023. vol. 25. pp. 8725–8737. DOI: 10.1109/TMM.2023.3240881.
20. Матвеев В.Д., Архипов А.Е., Фомин И.С. Разработка модели семантической сегментации RTC-SAM для определения препятствий на пути мобильного робота // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. №2. С. 212–220. DOI: 10.18522/2311-3103-2025-2-212-220.

21. Add support for SAM3 // GitHub. URL: <https://github.com/opengeos/segment-geospatial/pull/430> (дата обращения: 29.12.2025).

Корсаков Антон Михайлович — канд техн. наук, старший научный сотрудник, 912 лаборатория «Технологий искусственного интеллекта», ЦНИИ РТК. Область научных интересов: нейроморфные системы и спайковые нейронные сети, математические основы управления робототехническими системами, системы технического зрения. Число научных публикаций — 61. anton_korsakov@mail.ru; Тихорецкий проспект, д. 21, г. Санкт-Петербург, 194064, РФ; м.т. +7(911)7842747.

Иванова Виктория Владимировна — инженер, 912 лаборатория «Технологии искусственного интеллекта», ЦНИИ РТК. Область научных интересов: биомедицинские технологии, искусственные нейронные сети, нейроморфные системы. Число научных публикаций – 13. overtrape@gmail.com; Тихорецкий проспект, д. 21, г. Санкт-Петербург, 194064, РФ; м.т.: +7(965)0113931.

Половко Сергей Анатольевич — канд техн. наук, научный руководитель научно-исследовательского центра, ЦНИИ РТК. Область научных интересов: системы управления. Число научных публикаций — 53. s.polvko@rtc.ru; Тихорецкий проспект, д. 21, г. Санкт-Петербург, 194064, РФ; м.т. +7(921)9349469.

Поддержка исследований. Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00558-26-00 «Исследование методов организации навигации роботов в сложных недетерминированных средах на базе теории когнитивного представления пространства» (FNRG-2025-0007 1024050200005-9-1.2.1;2.2.2).

A. KORSAKOV, V. IVANOVA, S. POLOVKO
**A FORMAL LANGUAGE FOR THE DESCRIPTION OF
NAVIGATION BEHAVIOR OF MOBILE ROBOTS**

Korsakov A., Ivanova V., Polovko S. A Formal Language for the Description of Navigation Behavior of Mobile Robots.

Abstract. The article presents research results in the field of formalizing the navigation behavior of mobile robots based on a cognitive approach to spatial representation. The authors propose a new formal language, LRNB (Language of Robot Navigation Behavior), designed for describing information-motor actions, scenarios, and missions of robots within the framework of interpretative navigation. The key feature of the cognitive approach is the abandonment of the Cartesian coordinate system in favor of an oriented graph – a cognitive map, where vertices correspond to semantic landmarks, and edges correspond to sequences of actions specified in LRNB. The language is built upon a universal command structure, enabling the description of a wide range of behavioral patterns: from simple movement along an object to complex missions with dynamic targets and logical conditions. The work presents three methods for constructing cognitive maps: based on semantically segmented images, during autonomous environment exploration by a robot, and using large language models to translate natural language instructions into formal LRNB commands. As the most convenient illustration for demonstrating the capabilities of LRNB, an experimental evaluation of the potential of LLMs for the automatic generation of LRNB commands from textual descriptions was conducted. It is shown that at the level of individual information-motor actions, the model demonstrates high accuracy (95% correct transformations); however, when transitioning to the formation of complex composite scenarios, effectiveness critically decreases. Nevertheless, a conclusion is drawn regarding the practical applicability of the LRNB language. The proposed formal language LRNB demonstrates high flexibility and expressiveness, making it an effective tool for describing complex navigation behavior of mobile robots in diverse scenarios.

Keywords: interpretative navigation, cognitive spatial representation, cognitive map, semantically segmented image, large language model.

References

1. Stankevich L.A. [Cognitive behavioral systems]. XIX Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Neuroinformatika-2017". Lektsii po neuroinformatike [XIX International Scientific and Technical Conference Neuroinformatics-2017". Lectures on neuroinformatics]. 2017. pp. 31–97. (In Russ.).
2. Spassky B.A. [On the issue of autonomous activity of civil servants]. Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika – Robotics and technical cybernetics. 2025. vol. 13. no. 2. pp. 85–90. (In Russ.).
3. Zhu Z., et al. Visual-Inertial RGB-D SLAM With Encoders for a Differential Wheeled Robot. *IEEE Sensors Journal*. 2022. vol. 22. no. 6. pp. 5360–5371. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3101370.
4. Slowak P., Kaniewski P. Stratified Particle Filter Monocular SLAM. *Remote Sensing*. 2021. vol. 13. no. 16. 3233 p. DOI: 10.3390/rs13163233.
5. Teixeira B., et al. Deep Learning for Underwater Visual Odometry Estimation. *IEEE Access*. 2020. vol. 8. pp. 44687–44701. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978406.

6. Bala J.A., Adeshina S.A., Aibinu A.M. Advances in Visual Simultaneous Localisation and Mapping Techniques for Autonomous Vehicles: A Review. *Sensors*. 2022. vol. 22. no. 22. 8943 p. DOI: 10.3390/s22228943.
7. Li C., et al. Bridging the Gap Between Visual Servoing and Visual SLAM: A Novel Integrated Interactive Framework. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2022. vol. 19. no. 3. pp. 2245–2255. DOI: 10.1109/TASE.2021.3067792.
8. Yang S., et al. Visual SLAM Based on Semantic Segmentation and Geometric Constraints for Dynamic Indoor Environments. *IEEE Access*. 2022. vol. 10. pp. 69636–69649. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3185766.
9. Chen K., et al. Semantic Visual Simultaneous Localization and Mapping: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2025. vol. 26. no. 6. pp. 7426–7449. DOI: 10.1109/TITS.2025.3556928.
10. Zhang T., et al. Endotaxis: A neuromorphic algorithm for mapping, goal-learning, navigation, and patrolling. *eLife*. 2024. vol. 12. DOI: 10.7554/eLife.84141.3.
11. Lobov S.A., et al. Spatial Memory in a Spiking Neural Network with Robot Embodiment. *Sensors*. 2021. vol. 21. no. 8. 2678 p. DOI: 10.3390/s21082678.
12. Babichev A., et al. Topological Schemas of Cognitive Maps and Spatial Learning. *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2016. vol. 10. DOI: 10.3389/fncom.2016.00018.
13. Gupta S., et al. Cognitive Mapping and Planning for Visual Navigation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017. pp. 2616–2625.
14. Zeng F., et al. Large Language Models for Robotics: A Survey. *arXiv preprint arXiv:2311.07226*. 2023.
15. Driess D., et al. PaLM-E: An Embodied Multimodal Language Model. *arXiv preprint arXiv:2303.03378*. 2023.
16. Wang F., et al. Object-Based Reliable Visual Navigation for Mobile Robot. *Sensors*. 2022. vol. 22. no. 6. 2387 p. DOI: 10.3390/s22062387.
17. Smirnova E.Yu., Spassky B.A. [The organization of supervisory management in scenarios of extreme robotics]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika – Robotics and technical cybernetics*. 2020. vol. 8. no. 4. pp. 245–258. DOI: 10.31776/RTCJ.8401. (In Russ.).
18. Hussain M. YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection. *Machines*. 2023. vol. 11. no. 7. 677 p. DOI: 10.3390/machines11070677.
19. Du Y., et al. StrongSORT: Make DeepSORT Great Again. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2023. vol. 25. pp. 8725–8737. DOI: 10.1109/TMM.2023.3240881.
20. Matveev V.D., Arkhipov A.E., Fomin I.S. [Development of an RTC-SAM semantic segmentation model for detecting obstacles in the path of a mobile robot]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskkiye nauki – IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES*. 2025. no. 2. pp. 212–220. DOI: 10.18522/2311-3103-2025-2-212-220. (In Russ.).
21. Add support for SAM3. *GitHub*. Available at: <https://github.com/opengeos/segment-geospatial/pull/430> (accessed 29.12.2025).

Korsakov Anton — Ph.D., Senior researcher, Laboratory No. 912 of Artificial Intelligence Technologies, Federal State Autonomous Scientific Institution "Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics" (Central Research Institute of RTK). Research interests: aeromorphic systems and spiking neural networks, mathematical foundations of control of robotic systems, vision systems. The number of publications — 61. anton_korsakov@mail.ru; 21, Tikhoretsky Ave., 194064, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(911)784-2747.

Ivanova Victoria — Engineer, Laboratory No. 912 of Artificial Intelligence Technologies, Federal State Autonomous Scientific Institution "Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics" (Central Research Institute of RTK). Research interests: biomedical technologies, artificial neural networks, neuromorphic systems. The number of publications — 13. overtpace@gmail.com; 21, Tikhoretsky Ave., 194064, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(965)011-3931.

Polovko Sergei — Ph.D., Scientific supervisor, Scientific Research Center, Federal State Autonomous Scientific Institution "Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics" (Central Research Institute of RTK). Research interests: management systems. The number of publications — 53. s.polovko@rtc.ru; 21, Tikhoretsky Ave., 194064, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(921)934-9469.

Acknowledgements. The work was carried out as part of the state assignment of the Russian Ministry of Education and Science No. 075-00553-26-00.