

А.М. Корсаков, В.В. Иванова**ОРГАНИЗАЦИЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ
КОГНИТИВНОГО КАРТИРОВАНИЯ**

Рассматривается актуальная задача обеспечения автономности мобильных роботов в сложных условиях, когда использование традиционных навигационных методов, основанных на глобальных системах координат и спутниковых данных, невозможно или неэффективно. Для решения данной проблемы предлагается подход, основанный на когнитивной (интерпретирующей) навигации, где основную роль играет семантическое понимание среды. Ключевой особенностью метода является построение когнитивной карты – семантически ориентированного графа, вершины которого соответствуют объектам-ориентирам (либо группам однородных ориентиров), а рёбра – фиксированным наборам информационно-двигательных действий (элементарным обусловленным паттернам поведения). Таким образом маршрут робота при его движении по когнитивной карте сводится к фиксированному набору информационно-двигательных действий. Процесс построения карты осуществляется автоматически на основе предварительно полученного семантически сегментированного изображения местности, что позволяет мобильному роботу априори получить информацию о взаимном расположении и форме ориентиров. Для формализации процесса навигации и управления поведением робота на основе когнитивной карты авторами предложен специально разработанный формальный язык LRNB (Language of Robot Navigation Behavior). Этот язык позволяет декомпозировать сложные миссии на элементарные информационно-двигательные действия, задавать условия их завершения и описывать сценарии взаимодействия с динамическими и статическими объектами. В работе описаны принципы построения когнитивной карты, синтаксис языка LRNB, а также механизм формирования маршрута как последовательности команд. Практическая часть включает результаты верификации подхода в условиях симуляции с использованием специально разработанного эмулятора, а также предварительные натурные испытания на лабораторном гусеничном мобильном роботе, подтвердившие принципиальную работоспособность предложенного подхода. Полученные результаты свидетельствуют о потенциале метода для применения в критически важных сценариях, таких как зоны стихийных бедствий, области радиоэлектронного подавления и другие среды с высокой степенью неопределённости. Предложены дальнейшие планы работ, связанные с приближением условий экспериментов к реальным условиям возможной эксплуатации.

Когнитивная навигация; семантическая сегментация; когнитивная карта; формальный язык; мобильный робот.

A.M. Korsakov, V.V. Ivanova**ORGANIZATION OF MOBILE ROBOTS NAVIGATION BASED
ON COGNITIVE MAPPING**

The article addresses the relevant task of ensuring the autonomy of mobile robots in complex conditions, where the use of traditional navigation methods based on global coordinate systems and satellite data is impossible or ineffective. To solve this problem, an approach based on cognitive (interpretive) navigation is proposed, where semantic understanding of the environment plays the central role. The key feature of the method is the construction of a cognitive map – a semantically oriented graph whose vertices correspond to landmark objects (or groups of homogeneous landmarks), and whose edges correspond to fixed sets of information-motor actions (elementary conditioned behavioral patterns). Thus, the robot's route while moving along the cognitive map is reduced to a fixed set of information-motor actions. The map construction process is carried out automatically based on a pre-obtained semantically segmented image of the terrain, which allows the mobile robot to acquire a priori information about the relative positions and shapes of the landmarks. To formalize the navigation process and manage the robot's behavior based on the cognitive map, the authors propose a specially developed formal language, LRNB (Language of Robot Navigation Behavior). This language allows the decomposition of complex missions into elementary information-motor actions, the specification of their completion conditions, and the description of interaction scenarios with dynamic and static objects. The work details the principles of building a cognitive map, the syntax of the LRNB language, and the mechanism for forming a route as a sequence of commands. The practical part includes the results of verifying the approach in a simulation environment using a specially developed emulator, as well as preliminary

inary field tests on a laboratory tracked mobile robot, which confirmed the fundamental feasibility of the proposed approach. The obtained results indicate the potential of the method for application in critically important scenarios, such as disaster zones, areas of electronic warfare, and other environments with a high degree of uncertainty. Further work plans are proposed, related to bringing experimental conditions closer to the real-world conditions of potential operation.

Cognitive navigation; semantic segmentation; cognitive map; formal language; mobile robot.

Введение. Одной из ключевых задач современной робототехники является обеспечение автономности мобильных роботов (МР) при выполнении навигационных задач в сложных недетерминированных средах [1]. Традиционные подходы к навигации, основанные на точном позиционировании в глобальной системе координат с использованием данных спутниковых навигационных систем (ГНСС), инерциальных датчиков или предварительно загруженных карт, зачастую оказываются неприменимы в условиях помех, радиомолчания, динамически изменяющейся обстановки или при отсутствии заранее известной метрической модели пространства. При указанных условиях возрастает актуальность методов, позволяющих роботу ориентироваться и принимать решения на основе непосредственного восприятия и семантического понимания окружающего мира.

Перспективным направлением при решении этой проблемы является когнитивная (интерпретирующая) навигация, основанная на построении и использовании когнитивных карт – семантических структур, отражающих пространство в терминах доступных для робота объектов-ориентиров и отношений между ними [2]. В результате навигация строится не на вычислении координат, а на семантической интерпретации сцены, где каждое действие робота определяется контекстом воспринимаемых им ориентиров. Такой принцип позволяет роботу функционировать без привязки к глобальной системе координат [3, 4]. Последнее особенно актуально в зонах стихийных бедствий, в условиях разрушения инфраструктуры, радиоэлектронной борьбы и подавления сигналов GPS и ГЛОНАСС, в условиях плотной высотной застройки, в полярных и высокогорных регионах и пр.

В робототехнике когнитивное картирование представляет собой активно развивающееся междисциплинарное направление, объединяющее методы компьютерного зрения, семантической обработки данных, теории графов и машинного обучения [5]. Существует множество подходов к построению когнитивных карт: на основе графов [6, 7], векторных и потенциальных полей [8], теории множеств [9], семантического SLAM [10–14] и моделей пространственной памяти [15]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения, связанные с особенностями представления пространства, вычислительной сложностью, устойчивостью к ошибкам идентификации и способностью работать в реальном времени. Однако общей чертой этих подходов является отказ от жёсткой привязки к глобальной системе координат в пользу семантического представления среды.

Однако несмотря на многообразие подходов, актуальной остаётся задача создания унифицированного формального аппарата для описания навигационного поведения робота, который был бы независим от конкретного набора используемых сенсоров и исполнительных механизмов, но при этом позволял бы задавать сложные, условные сценарии перемещения в терминах семантических ориентиров. Такой аппарат необходим для стыковки высокоуровневого планирования на основе когнитивной карты с низкоуровневыми системами управления роботом.

В данной статье рассматривается подход к организации навигации мобильного робота, основанный на построении когнитивной карты по семантически сегментированному изображению местности. Для этого в качестве основного инструмента предложен формальный язык описания навигационного поведения LRNB (Language of Robot Navigation Behavior), ориентированный на спецификацию информационно-двигательных действий (ИДД) – элементарных паттернов поведения, связывающих восприятие семантических ориентиров с базовыми операциями движения. Такой подход позволяет роботу функционировать автономно, без связи с оператором и без доступа к данным о собственном точном положении в мировой системе координат, что критически важно для применения в условиях неопределённости и информационных ограничений.

Целью работы является демонстрация работоспособности предложенного подхода на примере решения задачи глобальной навигации – перемещения робота между заданными семантическими ориентирами в условиях отсутствия информации о его глобальных координатах. В статье описывается разработанный эмулятор для отладки навигационных сценариев, приводятся результаты предварительных экспериментов как в симуляции, так и на реальном гусеничном роботе, предложены дальнейшие направления исследований.

В следующем – втором – разделе дана постановка задачи интерпретирующей навигации и введены основные определения. Третий раздел посвящён методу построения когнитивной карты по семантически сегментированному изображению. В разделе четыре представлен формальный язык LRNB для описания информационно-двигательных действий. В разделе пять приведены результаты модельных экспериментов в эмуляторе и предварительных испытаний на реальном роботе. В заключении подведены итоги и намечены перспективы дальнейшей работы.

Постановка задачи. В качестве основной миссии мобильного робота (МР) в рамках решения задачи глобальной навигации будем рассматривать движение из некоторой начальной точки в некоторую выбранную (оператором, либо СУ мобильного робота) конечную точку. При этом подразумевается отсутствие связи с оператором, кроме момента задания миссии МР. Кроме того, требованием к разрабатываемой системе навигации является отсутствие возможности получения координат и ориентации МР в мировой системе координат при выполнении миссии.

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. При этом аналогом количественной модели ДСК выступает иная модель – ориентированный граф (когнитивная карта), вершинам которого соответствуют ориентиры, либо группы однородных ориентиров, а рёбрам – набор информационно-двигательных действий (ИДД). Т.е. организация передвижения МР основывается на фиксированном наборе ИДД. Таким образом, под когнитивным представлением пространства будем понимать представление, основанное на построении когнитивной карты.

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

- ♦ типовая технологическая операция (ТОП) [16]. Под ТОП будем понимать элементарное безусловное действие (в случае рассматриваемого далее гусеничного МР, это движение прямо, танковый поворот налево/направо и остановка),
- ♦ 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.

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

Также необходимо отметить, что вопросы, связанные со способами выполнения конкретных ИДД (локальная навигация), например, регулятор, обеспечивающий движение МР на заданном расстоянии от препятствия и т.п., в настоящей работе раскрываться не будут. Необходимые описания таких способов будут даны в следующих работах авторов.

Построение когнитивной карты. Авторами рассматриваются три способа построения когнитивной карты: по семантически сегментированному изображению; динамически, в процессе исследования МР местности; по речевому (либо текстовому) сообщению оператора с использованием больших языковых моделей (БЯМ). Далее будет использоваться первый из указанных способов.

Под семантически сегментированным изображением (рис. 1) 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.), который затем должен быть сегментирован с последующей классификацией полученных сегментов. Пример разработанной модели семантической сегментации можно найти в работе [17].

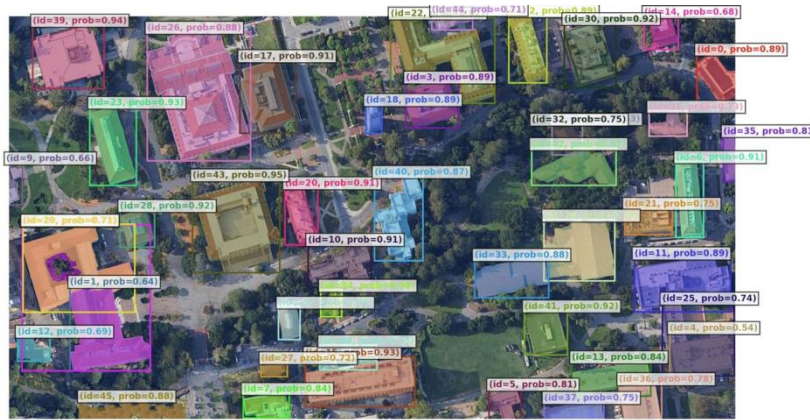


Рис. 1. Пример семантически сегментированного изображения [18]

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.

Однако у данного подхода есть и существенный 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 того, как семантически сегментированное изображение было сформировано, оно может быть использовано для построения когнитивной карты. Опишем способ построения когнитивной карты по семантически сегментированному изображению. В качестве узлов будем использовать выделенные на семантически сегментированном изображении ориентиры. Используя каждый отдельный узел в качестве вершины, можно разбить пространство вокруг него на N секторов (в настоящей работе N было принято равным четырём), после чего определить в каждом секторе ближайший соседний к нему узел. Именно к этим соседним узлам и строится направленное ребро от данного узла. Будем называть такие узлы «узлами-соседями». Отметим, что относительные идентификаторы узлов-соседей и порядок их следования являются дополнительным дескриптором данного узла-ориентира. Относительные идентификаторы узлов-соседей и порядок их следования будем называть «структурным признаком» данного узла.

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).

Как было указано выше, одним из преимуществ построения когнитивной карты на основе семантически сегментированного изображения является имеющееся изначально общее представление о форме ориентиров. Следствием из данного преимущества является возможность описания ориентиров одним из геометрических примитивов (что в дальнейшем позволяет стандартизировать ИДД). На рис. 2 представлена когнитивная карта и маршрут мобильного робота, построенные по геометрическим примитивам, соответствующим отдельным ориентирам.

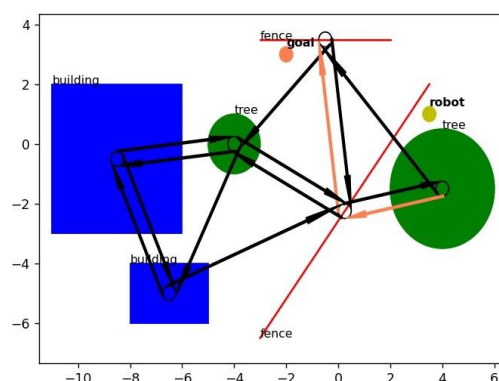


Рис. 2. Когнитивная карта и построенный маршрут при описании ориентиров геометрическими примитивами

На рис. 2 ориентиры обозначены цветными прямоугольниками, окружностями и отрезками; чёрными окружностями – узлы графа; стрелками – рёбра графов; причём оранжевым отмечены ребра, соответствующие построенному маршруту. Кроме того, рисунок 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 – ориентира с меткой *fence*.

Здесь уместно ещё раз напомнить, что при использовании любого из подходов к построению когнитивной карты (в том числе – описанного выше), ребру графа соответствует некоторый фиксированный набор ИДД. Предлагаемый способ описания ИДД представлен в следующем разделе.

Формальный язык описания информационно-двигательных действий. С целью формализации навигационного поведения МР, авторами статьи предлагается новый формальный язык описания навигационного поведения МР LRNB (Language of Robot Navigation Behavior). Поскольку в представленной в настоящей статье постановке навигационное поведение робота сводится к набору ИДД, то и LRNB был сведён к формальному языку описания ИДД. Необходимо ещё раз подчеркнуть, что ИДД задаёт именно запрос на само 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.

Для описания одного ИДД на LRNB будем использовать термин «команда». В качестве универсального решения предлагается строить отвечающие отдельным ИДД команды из восьми лексем. Структура такой команды показана на рисунке 3.

На рис. 3 «Действие» является оператором команды (далее будем непосредственно использовать термин «действие»); тогда как «объект действия», «объект завершения действия» и «условие завершения действия» – параметрами команды.

Действие (зелёные блоки на рисунке 3) определяет характер изменения положения и ориентации МР в мировой системе координат. Авторами введено четыре термина, задающих действие: *unknown* (действие не задано), *wait* (ожидание; линейные перемещения и повороты вокруг главных осей МР запрещены), *turn* (поворот; линейные перемещения запрещены) и *go* (движение; разрешает заданное линейное перемещение, любой поворот

вокруг главных осей и остановку). В качестве аргументов действия в LRNB введены следующие термы: *any*, *stop*, *left*, *right*, *left_roll*, *right_roll*, *up_trim*, *down_trim*, *forward*, *back*, *left_step*, *right_step*, *up* и *down*. Данные два набора термов позволяют независимо изменять все шесть обобщённых координат МР.

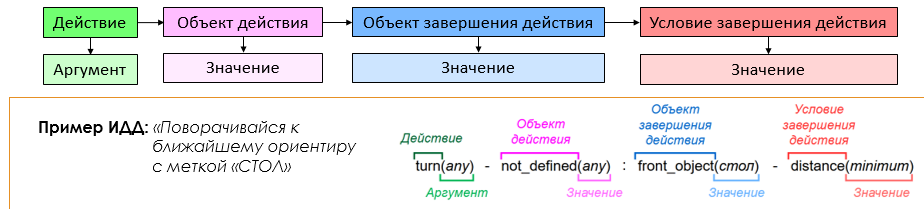


Рис. 3. Структура команды при описании ИДД на LRNB

Объект действия (фиолетовые блоки на рис. 3) обуславливает действие МР некоторым объектом (ориентиром), тогда как объект завершения действия (синие блоки на рисунке 3) определяет условие завершения ИДД, также обусловленное некоторым объектом (ориентиром). Всего введено семь термов, задающих объект действия и/или объект завершения действия: *not_defined*, *front_object*, *left_object*, *right_object*, *back_object*, *up_object* и *bottom_object*. При этом значения параметров могут быть трёх типов: *any*, *no_object* либо относительный идентификатор. При заданном значении *no_object*, в качестве объекта действия (либо завершения действия) выбирается отсутствие ориентира.

Необходимо указать на допустимость использования в LRNB логических операций AND, OR и NOT для четвёртой (а также второй и шестой) лексем. С учётом этого утверждается возможность как полностью задать положение объекта действия (завершения действия) относительно МР, так и сам объект действия (завершения действия), либо их комбинации.

Все условия завершения действия (красные блоки на рис. 3) 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. 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. Перечислим все введённые к настоящему моменту условия завершения действия: *not_defined* (0; условие завершения действия не задано), *number* (натуральное число; номер), *distance* (действительное число, *minimum*; дистанция), *jump_from* (действительное число; резкое увеличение измеренной дистанции), *jump_to* (действительное число; резкое уменьшение измеренной дистанции), *path* (действительное число; путь), *angle* (действительное число; угол), *time* (действительное число; время) и *special_event* (булева переменная; специальное событие). В скобках, перед описанием, приведены возможные значения условий завершения действия.

Очевидно, что при всём многообразии МР и сенсоров, которыми они могут быть оснащены, любой набор термов, отвечающий условию завершения действия, 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 предыдущем абзаце (например, превышение радиационным фоном некоторого порогового значения), данное событие может быть описано с использованием указанного терма.

Как было указано ранее, 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: «Стоить 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, принимается решение о невозможности выполнить данную команду с возвращением значения «*unknown*».

Кроме того, данный пример поясняет присутствие среди условий завершения действия 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 список, добавив новый терм, например, «*temperature*», либо использовать терм «*special_event*», реализованный соответствующим образом.

Проведение эксперимента в эмуляции и на мобильном роботе. На данном этапе выполнения работы эксперименты проводились при упрощённых постановках. Для проведения экспериментов был разработан специальный эмулятор, позволяющий задавать сцену, расположенные на ней ориентиры, сенсоры (видеокамеры и дальномёры). Робот в разработанном эмуляторе моделировался в качестве материальной точки, измерения данных сенсорами и отработка команд роботом происходили без погрешностей. Кроме того, построение когнитивной карты (рис. 4,б) производилось не по реальному изображению сцены сверху, а в специально предусмотренном в эмуляторе конструкторе сцен.

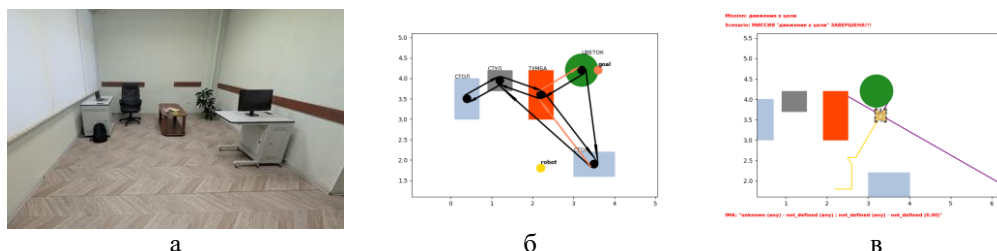


Рис. 4. Проведение экспериментов в эмуляторе: а – реальная сцена; б – построенная по ней когнитивная карта; в – выполнение миссии МР

На рис. 4,а представлена сцена, на которой проводились эксперименты как в эмуляторе, так и на реальном роботе. На рис. 4,б, представлена когнитивная карта, построенная для данной сцены, причём цветными прямоугольниками и окружностями обозначены ориентиры; чёрными окружностями – узлы графа; стрелками – рёбра графов; оранжевым отмечены рёбра, соответствующие построенному маршруту. На рис. 4,в представлен результат выполнения роботом миссии «*go_to_goal*» – движение к цели. Как видно из рисунка, при эмуляции миссия робота была выполнена.

Как было указано выше, маршрут МР, при использовании предложенного авторами подхода, сводится к фиксированному набору ИДД. Автоматически сгенерированный набор ИДД на формальном языке LRNB для данной сцены представлен на рис. 5,а.

Перед тем как приступить к полноценным экспериментам с МР, необходимо было проверить, что реализованные в эмуляторы алгоритмы выполнения ИДД в упрощённых постановках подходят для использования на МР. Поэтому на приведённом в настоящем подразделе эксперименте движение робота осуществлялось без обратной связи, т.е. по заранее записанному в эмуляторе набору команд.

В качестве МР использовался лабораторный гусеничный робот, собранный в ЦНИИ РТК. Как видно из рис. 5,б–г, при эксперименте с МР при упрощённой постановке задачи миссия «go_to_goal» также была выполнена.



Рис. 5. Выполнение роботом сценария «go_to_goal»: а – маршрут на LRNB; б – движение к ориентиру «СТОЛ»; в – движение к ориентиру «ТУМБА»; г – движение к ориентиру «ЦВЕТОК»

Проведение полноценных экспериментов с МР является предметом исследований авторов в настоящее время. Результаты этих исследований будут представлены в следующих работах авторов. Для осуществления обратной связи планируется использовать четыре видеокamеры, обеспечивающие круговой обзор, а также механический RPLidar. Для критически важных для интерпретирующей навигации задач распознавания и сопровождения отдельных ориентиров предполагается использовать известные сторонние решения (например, YOLO [19], DeepSORT [20] и т.д.).

Заключение. В статье представлены результаты работы в рамках решения авторами задачи интерпретирующей навигации на основе когнитивного представления пространства. Данный подход основывается на построении когнитивной карты по естественным ориентирам при невозможности локализации мобильного робота в мировой системе координат. Это особенно актуально в задачах, подразумевающих функционирование робота в условиях радиомолчания, помех и отсутствия данных спутниковых и навигационных систем.

В качестве одного из способов, в статье рассматривается построение когнитивной карты по семантически сегментированному изображению. В качестве основного недостатка такого подхода указана необходимость гарантировать тождественность идентификации ориентиров при их классификации как на изображении «сверху», так и на борту мобильного робота. Тем не менее, данный подход можно считать оптимальным, если нам заранее доступен план сцены.

С целью формализации навигационного поведения мобильных роботов, авторами статьи предложен формальный язык LRNB, который позволит описывать сложные миссии и сценарии, задавать условия завершения действия, характер движения агента в зависимости от объектов (в т.ч. динамических), их взаимного расположения и характеристик.

По мнению авторов, полученные результаты показывают потенциальную эффективность предложенного подхода к решению навигационных задач мобильными роботами. Намечены пути продолжения этих исследований, направленные на проведение полномасштабных экспериментов на реальных мобильных роботах как в закрытых помещениях различного назначения, так и на открытых сценах.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00558-26-00 от 25.12.2024 «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).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спасский Б.А. К вопросу об автономной навигации сельскохозяйственных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2025. – Т. 13, № 2. – С. 85-90.
2. Станкевич Л.А. Когнитивные поведенческие системы // XIX Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2017»: Лекции по нейроинформатике. – 2017. – С. 31-97.
3. Лопота А.В., Бахшиев А.В., Горюнов В.В., Плавинский М.Н., Смирнова Е.Ю. Перспективы применения интерпретирующей навигации и комплексирования в системах управления мобильными роботами // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2014. – № 11-12 (77-78). – С. 104-110.
4. Степанов Д.Н., Смирнова Е.Ю., Горюнов В.В. Когнитивная навигация мобильных роботов с использованием естественных визуальных ориентиров // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – Т. 10, № 1. – С. 62-66.
5. Wang F. et al. Object-based reliable visual navigation for mobile robot // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 6. – P. 2387.
6. Savinov N., Dosovitskiy A., Koltun V. Semi-parametric topological memory for navigation // ICLR. – 2018. – Vancouver, Canada, 2018.
7. Zhang T. et al. A neuromorphic algorithm for mapping, goal-learning, navigation, and patrolling // eLife. – 2024. – Vol. 12.
8. Villacorta-Atienza J.A., Makarov V.A. Neural Network Architecture for Cognitive Navigation in Dynamic Environments // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2013. – Vol. 24, No. 12. – P. 2075-2087.
9. Babichev A., Cheng S., Dabaghian Y.A. Topological Schemas of Cognitive Maps and Spatial Learning // Frontiers in Computational Neuroscience. – 2016. – Vol. 10.
10. Chen K., Xiao J., Liu J., Tong Q., Zhang H., Liu R., Zhang J., Ajoudani A., Chen S. Semantic Visual Simultaneous Localization and Mapping // arXiv preprint arXiv: 2209.06428 [cs]. – arXiv. – 2025.
11. Lee Y.K., Eu K.S., Choy C.W. et al. Simultaneous Localization and Mapping with Basic Cognitive Understanding of Environments // 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). – Istanbul, Turkey: IEEE, 2020. – P. 1-6.
12. Liu Y., Petillot Y., Lane D., Wang S. Global Localization with Object-Level Semantics and Topology // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Canada: IEEE, 2019. – P. 4909-4915.
13. Sharma A., Dong W., Kaess M. Compositional and Scalable Object SLAM // 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – China: IEEE, 2021. – P. 11626-11632.
14. Chen K., Liu J., Chen Q., Wang Z., Zhang J. Accurate Object Association and Pose Updating for Semantic SLAM // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, No. 12. – P. 25169-25179.
15. Lobov S.A., Zharinov A.I., Makarov V.A., Kazantsev V.B. Spatial Memory in a Spiking Neural Network with Robot Embodiment // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 8.
16. Смирнова Е.Ю., Спасский Б.А. Организация супервизорного управления в сценариях экстремальной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, № 4. – С. 245-258.
17. 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 (244). – С. 212-220.
18. Add support for SAM3. – URL: <https://github.com/opengeos/segment-geospatial/pull/430> (дата обращения: 29.12.2025).
19. 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. – P. 677.
20. Du Y. et al. StrongSORT: Make DeepSORT Great Again // IEEE Transactions on Multimedia. – 2023. – Vol. 25. – P. 8725-8737.

REFERENCES

1. Spasskiy B.A. K voprosu ob avtonomnoy navigatsii sel'skokhozyaystvennykh robotov [On the issue of agricultural robots autonomous navigation], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2025, Vol. 13, No. 2, pp. 85-90.
2. Stankevich L.A. Kognitivnye povedencheskie sistemy [Cognitive behavioral systems], *XIX Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Neyroinformatika-2017»: Lektsii po neyroinformatike* [XIX International Scientific and Technical Conference "Neuroinformatics-2017": Lectures on neuroinformatics], 2017, pp. 31-97.
3. Lopota A.V., Bakhshiev A.V., Goryunov V.V., Plavinskiy M.N., Smirnova E.Yu. Perspektivy primeneniya interpretiruyushchey navigatsii i kompleksirovaniya v sistemakh upravleniya mobil'nymi robotami [Prospects for the application of interpretive navigation and integration in mobile robot control systems], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Issues of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism], 2014, No. 11-12(77-78), pp. 104-110.
4. Stepanov D.N., Smirnova E.Yu., Goryunov V.V. Kognitivnaya navigatsiya mobil'nykh robotov s ispol'zovaniem estestvennykh vizual'nykh orientirov [Cognitive navigation of mobile robots using natural visual landmarks], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2016, Vol. 10, No. 1, pp. 62-66.
5. Wang F. et al. Object-based reliable visual navigation for mobile robot, *Sensors*, 2022, Vol. 22, No. 6, pp. 2387.
6. Savinov N., Dosovitskiy A., Koltun V. Semi-parametric topological memory for navigation, *ICLR*, 2018. Vancouver, Canada, 2018.
7. Zhang T. et al. A neuromorphic algorithm for mapping, goal-learning, navigation, and patrolling, *eLife*, 2024, Vol. 12.
8. Villacorta-Atienza J.A., Makarov V.A. Neural Network Architecture for Cognitive Navigation in Dynamic Environments, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2013, Vol. 24, No. 12, pp. 2075-2087.
9. Babichev A., Cheng S., Dabaghian Y.A. Topological Schemas of Cognitive Maps and Spatial Learning, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2016, Vol. 10.
10. Chen K., Xiao J., Liu J., Tong Q., Zhang H., Liu R., Zhang J., Ajoudani A., Chen S. Semantic Visual Simultaneous Localization and Mapping, *arXiv preprint arXiv: 2209.06428 [cs]*. arXiv, 2025.
11. Lee Y.K., Eu K.S., Choy C.W. et al. Simultaneous Localization and Mapping with Basic Cognitive Understanding of Environments, *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*. Istanbul, Turkey: IEEE, 2020, pp. 1-6.
12. Liu Y., Petillot Y., Lane D., Wang S. Global Localization with Object-Level Semantics and Topology, *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Canada: IEEE, 2019, pp. 4909-4915.
13. Sharma A., Dong W., Kaess M. Compositional and Scalable Object SLAM, *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. China: IEEE, 2021, pp. 11626-11632.
14. Chen K., Liu J., Chen Q., Wang Z., Zhang J. Accurate Object Association and Pose Updating for Semantic SLAM, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, Vol. 23, No. 12, pp. 25169-25179.
15. Lobov S.A., Zharinov A.I., Makarov V.A., Kazantsev V.B. Spatial Memory in a Spiking Neural Network with Robot Embodiment, *Sensors*, 2021, Vol. 21, No. 8.
16. Smirnova E.Yu., Spasskiy B.A. Organizatsiya supervizornogo upravleniya v stsenariyakh ekstremal'noy robototekhniki [Organization of supervisory control in extreme robotics scenarios], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2020, Vol. 8, No. 4, pp. 245-258.
17. Matveev V.D., Arkhipov A.E., Fomin I.S. Razrabotka modeli semanticheskoy segmentatsii RTC-SAM dlya opredeleniya prepyatstviy na puti mobil'nogo robota [Development of the RTC-SAM semantic segmentation model for identifying obstacles in the path of a mobile robot], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2025, No. 2 (244), pp. 212-220.
18. Add support for SAM3. Available at: <https://github.com/opengeos/segment-geospatial/pull/430> (accessed 29 December 2025).
19. 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, pp. 677.
20. Du Y. et al. StrongSORT: Make DeepSORT Great Again, *IEEE Transactions on Multimedia*, 2023, Vol. 25, pp. 8725-8737.

Корсаков Антон Михайлович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: a.korsakov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; к.т.н.; с.н.с.

Иванова Виктория Владимировна – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: v.ivanova@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; инженер.

Korsakov Anton Mikhailovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: a.korsakov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Ivanova Victoria Vladimirovna – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: v.ivanova@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; engineer.

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-232-240

В.П. Носков, О.П. Гойдин, А.Н. Курьянов**ГРУППОВАЯ ВИДЕОНАВИГАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ РОБОТОВ**

Работа посвящена решению актуальных задач совместной автономной видеонавигации беспилотных летательных аппаратов и наземных роботов в урбанизированных средах, включающих плотную городскую застройку и здания, а также в условиях пересеченной местности, включая горную и лесистую местность, где также, как в урбанизированных средах, применение традиционных средств дистанционного управления и навигации может быть ограничено наличием экранированных зон. Задачи групповой навигации предлагается решать на основе данных бортовой системы технического зрения в процессе оперативной разведки рабочей зоны беспилотным летательным аппаратом, результаты которой обеспечивают автономные движение и полет, как отдельных гетерогенных робототехнических средств, так и в группе. В основу алгоритмов навигации положены методы и алгоритмы обработки данных бортовой системы технического зрения, состоящей из комплекса взаимно-юстированных лидара, телекамеры и тепловизора, формирующих геометрию окружающего пространства в виде облака точек с распределением на нем цветовых и температурных полей, позволяющих эффективно решать SLAM-задачу (определение текущих координат объекта управления с формированием геометрической модели внешней среды) и классификацию рабочей зоны по критериям геометрической и опорной проходимости, что обеспечивает автономные полет и движение роботов воздушного и наземного применения в урбанизированных средах и на пересеченной местности. Предлагается в качестве данных для организации автономного функционирования роботов воздушного и наземного применения, в том числе и в группе, использовать информационно-навигационное поле, представленное в виде графа видимости, позволяющего планировать безопасные кратчайшие траектории полета и движения, и множества опорных изображений, позволяющего корректно обрабатывать спланированные траектории с учетом ошибок решения видеонавигационной задачи. Такое информационно-навигационное поле позволяет представить в компактном виде необходимую и достаточную для автономного функционирования беспилотных летательных аппаратов и наземных роботов информацию и упрощает обмен ею между членами группы. Приведены результаты экспериментальных исследований в реальных условиях урбанизированной среды и пересеченной местности, подтверждающие эффективность предлагаемых методов, алгоритмов и соответствующих программно-аппаратных средств.

Гетерогенные роботы воздушного и наземного применения; комплексированная система технического зрения; видео-навигационная задача; информационно-навигационное поле; групповое управление.

V.P. Noskov, O.P. Goydin, A.N. Kuryanov**GROUP VIDEO NAVIGATION OF HETEROGENEOUS ROBOTS**

This paper addresses the pressing challenges of collaborative autonomous video navigation of unmanned aerial vehicles and ground robots in urban environments, including dense urban development and buildings, as well as in rugged terrain, including mountainous and wooded areas, where, as in urban environments, the use of traditional remote control and navigation tools may be limited by the presence of shielded areas. It is proposed to solve group navigation problems using data from an onboard vision system during operational reconnaissance of the work area by an unmanned aerial vehicle. The results ensure autonomous movement and flight of both individual heterogeneous robotic systems and in a group. The navigation algorithms are based on the methods and algorithms for processing data from the onboard vision system, consist-