

# Подход к обеспечению семантической интероперабельности мобильных роботов при формировании коалиций<sup>1</sup>

А.М. Кашевник

**Аннотация.** В связи с развитием робототехники в последние годы расширяется круг задач, которые могут быть автоматизированы. Однако усложнение задач, решаемых роботами, привело к тому, что роботам необходимо объединяться в коалиции при невозможности выполнения задачи в одиночку. Таким образом, разработка новых моделей и методов для обеспечения интероперабельности при взаимодействии мобильных роботов в коалициях становится все более актуальной. В статье рассматриваются различные уровни интероперабельности и предлагается подход к обеспечению семантической интероперабельности при взаимодействии мобильных роботов в коалициях, а также описывается апробация представленного подхода на примере сценария формирования слова из букв мобильными роботами.

**Ключевые слова:** мобильные роботы, коалиции, онтологии, интероперабельность.

## Введение

В настоящее время робототехника является перспективным направлением исследований как в России так и за рубежом [1, 2]. Однако в последнее время происходит тенденция совместного решения задач несколькими роботами при невозможности их решения в одиночку. В системах, ориентированных на совместное решение задач взаимодействующими между собой мобильными роботами, можно выделить следующие стадии жизненного цикла: формирование множества мобильных роботов, готовых к участию в совместном решении задач; формирование коалиций; функционирование системы (выполнение задачи). В данной статье предложена концептуальная модель для обеспечения семантической интероперабельности

при взаимодействии мобильных роботов на второй стадии жизненного цикла таких систем.

В работах [3, 4] выделяются следующие уровни интероперабельности при взаимодействии программных компонент (Табл. 1): технический уровень, синтаксический уровень, уровень семантической интероперабельности и уровень организационной интероперабельности (или интероперабельность бизнес процессов). Технический уровень обеспечивает соединение и межкомпьютерную передачу данных между программными компонентами (интерфейсы, протоколы взаимодействия и инфраструктуру, необходимую для функционирования этих протоколов). Синтаксический уровень включает в себя форматы передачи данных от одного программного компонента к другому. Семантический уровень обеспечивает понимание смысла

<sup>1</sup> Представленные результаты исследований являются частью проектов № 16-29-04349 и 16-07-00462, финансируемых Российским фондом фундаментальных исследований, программа РАН I.31. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

Табл. 1. Уровни интероперабельности программных компонент (адаптировано из [4])

Уровни интероперабельности	Задача	Решения
Технический уровень	Техническая и безопасная передача данных	Протоколы передачи данных
Синтаксический уровень	Обработка данных	Форматы обмена данными
Семантический уровень	Интерпретация информации	Онтологии
Организационный уровень	Распределение бизнес процессов между программными компонентами	Протоколы переговоров

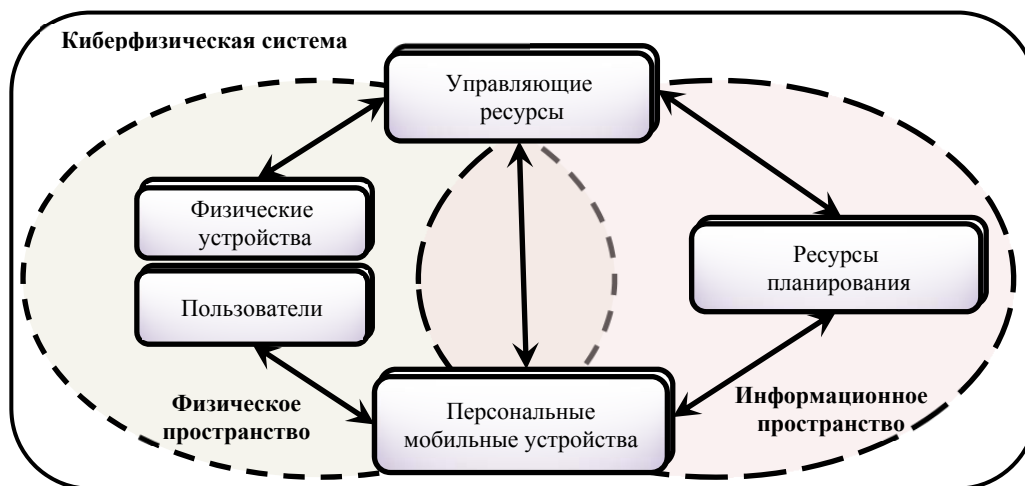


Рис. 1. Взаимодействие ресурсов в киберфизической системе

той информации, которой обмениваются программные компоненты. Организационный уровень обеспечивает понимание бизнес процессов, возникающих при взаимодействии программных компонент.

Первые два уровня связаны с техническим оснащением и базовым программным обеспечением взаимодействующих компонент, в то время как третий уровень является базовым при их взаимодействии с целью согласования поведения компонент. Четвертый уровень позволяет программным компонентам согласовывать между собой бизнес процессы при выполнении совместных задач.

Третий уровень является базовым для обеспечения «понимания» программными компонентами друг друга. В связи с этим в данной статье основной упор сделан на обеспечение семантической интероперабельности мобильных роботов, что позволит формировать коалиции для совместного решения несколькими роботами возникающих задач.

Для взаимодействия роботов между собой, а также с другими информационными компонентами было предложено использовать концепцию

киберфизических систем. Такая система представляет собой множество ресурсов, взаимодействующих между собой в информационном пространстве и управляющих устройствами в физическом пространстве в режиме реального времени (Рис. 1). При этом они базируются на инфраструктурах, обеспечивающих связь, вычисления, управление и объединяющих сенсоры, вычислительные устройства, сервисы и средства коммуникаций [5]. В данной работе к физическим устройствам относятся мобильные роботы, управляемые соответствующими программными компонентами, однако в общем виде это любое управляемое устройство, совершающее некоторое воздействие или измеряющее параметры в физическом пространстве.

## 1. Анализ подходов к организации взаимодействия мобильных роботов

В главе представлены результаты анализа различных подходов к организации взаимодействия мобильных роботов и выявлены основные особенности каждого из подходов.

В статье [6] рассматриваются механизмы координации группы М-роботов (Modular Robot), которые позволяют выполнять совместные задачи. Архитектура системы разделена на модули и М-роботы. Модули – это основные системные компоненты, которые классифицированы на три типа: питание/управление (power/control), соединяющий (joint) и специализированный (specialised). М-робот является автономным объектом, составленным, по крайней мере, из одного модуля питания/управления и одного или более соединяющих модулей и/или специальных модулей. Подход основывается на двух типах взаимодействия программных компонент: Inter Robot (между различными конфигурациями М-робота и станцией управления) и Intra Robot (внутри конфигурации М-робота). Через такую коммуникационную архитектуру реализована синхронизация модулей в конфигурации М-робота и координация группы М-роботов. Под группой в данном случае понимается совокупность М-роботов, сотрудничающих для выполнения задачи. Механизмы координации и стратегии сотрудничества реализованы в модульной системе SMART. Система SMART – это реконфигурируемая неоднородная модульная система роботов, состоящая из ряда взаимозаменяемых модулей, которые формируют различных роботов.

В статье [7] описывается разработка мобильного робота на базе комплекта Mindstorms от LEGO Group. К контроллеру NXT был подключен смартфон по протоколу Bluetooth, который определял необходимые действия для робота на основе анализа изображений со встроенной видеокамеры. В Mindstorms NXT можно управлять пользовательскими программами, используя стеки программирования стандартных блоков, чтобы обрабатывать входящие данные от датчиков и управлять устройствами вывода, такими как двигатели и датчики. Робот состоит из двух моторов, вращающих колеса для управления скоростью и направлением, одного мотора для изменения угла наклона смартфона и двух сенсоров (один ультразвуковой и один датчик касания). Смартфон на базе операционной системы Android задает поведение робота и отправляет данные в кон-

троллер NXT, который осуществляет управление двигателями и считывание показаний с сенсоров.

В работе [8] предложена многоуровневая гибридная стратегия навигации для нескольких роботов. Авторы рассматривают ситуацию, когда существуют несколько роботов и статических препятствий в двумерном пространстве. Каждый робот начинает движение из исходного положения и имеет свою задачу. Все роботы оснащены датчиками расстояния, могут общаться с другими роботами для обмена информацией о своем расположении, направлении движения, скорости, препятствиях и координации поведения. Система гибридной навигации состоит из трех уровней: уровень действий, уровень низкоуровневых коммуникаций и уровень высокоуровневых коммуникаций. Уровень действий непосредственно управляет движением робота. Уровень низкоуровневых коммуникаций первоначально осуществляет планирование маршрута на основе предварительных знаний. На данном уровне также происходит разрешение типовых конфликтных ситуаций. Если ситуация на данном уровне разрешиться не может, то она передается на уровень высокоуровневых коммуникаций.

Ключевой особенностью данной системы является архитектура управления «снизу-вверх», где слой высокого уровня активируется только тогда, когда это необходимо. В данной архитектуре уровень действий – это самый нагруженный уровень, который работает на каждом этапе управления. Гибридная стратегия навигации основана на платформе MobileSim. Платформа MobileSim – это программное обеспечение для моделирования робототехнических систем, построенных на базе наборов MobileRobots / ActivMedia. MobileSim использует данные о препятствиях из файла карт MobileRobots map, чтобы имитировать стены и другие препятствия в окружающей среде. Платформа может также использовать карту, автоматически сгенерированную путем сканирования среды с помощью лазерного дальномера.

Статья [9] описывает систему обслуживания и наблюдения здания роботами через Интернет (WatchBot). Система была разработана с помощью интегрированной среды разработки

RIDE (Robotics Integrated Development Environment). Роботы и система обслуживания здания соединены с центральным сервером. Каждый робот управляется контроллером RoboCAN, в который встроены компьютер mini-ITX PC, с установленной операционной системой Linux. Некоторые навигационные модули системы RIDE заимствованы из системы CARMEN [10], но они отличаются от нее тем, что управление движением роботов делится на высокоуровневое (стратегическое) и низкоуровневое (тактическое) планирование. Система CARMEN [10, 12] – это программное обеспечение с открытым исходным кодом для управления мобильными роботами. Авторы статьи [12] выделили ряд основных модулей, которые обеспечивают простой набор навигационных примитивов; эти примитивы (база управления, локализация, отслеживание, и планирование пути). Низкоуровневое планирование отвечает главным образом за избегание столкновений, используя BCM (beam curvature method [10]) метод. Каждый модуль – это Linux-процесс, который обменивается информацией с другими модулями, используя Inter Process Communication (IPC) [11].

В статье [13] рассматривается архитектура управления иерархической распределенной структурой контроллеров робота. В такой архитектуре контроллер на самом высоком уровне координирует все задачи, сбор данных и трафик обмена данными. Этому контроллеру подчинены остальные контроллеры более низких уровней, такие как контроллер мобильной платформы, ответственный за планирование движения, навигации и предотвращения столкновений с препятствиями; контроллер изображений и обработки звука, интерпретации голосовых команд и т.д.

В статье [14] особое внимание уделено возможности построения карты местности иерархией роботов и стратегии ее исследования, которая позволяет роботам с ограниченными возможностями обработки информации и/или распознавания предметов сканировать большие пространства. Авторы предлагают иерархическую систему HMRS (Heterogeneous multi-robot system), которая состоит из вычислительных роботов «менеджеров» на верхнем уровне и ро-

ботов с ограниченными вычислительными возможностями «рабочих» на нижнем уровне. Местность, содержащая препятствия, разделена «менеджерами» на локальные участки, которые исследуются «рабочими». «Рабочие» выполняют два типа задач: 1) перемещение между локальными участками; 2) передвижение в локальном участке и его исследование. Роботы способны выполнять обе задачи, но из-за ограниченных вычислительных возможностей обработки данных или объема памяти в реальном времени обычно они могут выполнить только одну. При этом робот может динамически изменять свою роль во время исследования для повышения эффективности функционирования системы в целом.

В статье [17] представлена модель системы неоднородных роботов с использованием фреймового представления знаний для описания функций и поведения такого робота. Знания, требуемые для построения системы роботов интегрируются в единую модель для совместного использования роботами и пользователями. Предложенная система позволяет не только интегрировать неоднородные роботы и различные методы, но также автоматически выполнять взаимодействие человек-робот и планировать поведение робота. В статье представлена система неоднородных роботов, состоящая из робота-гуманоида (Robovie, PINO), мобильного робота (Scout) и робота-собаки (AIBO). Взаимодействие роботов осуществляется на базе платформы SPAK, которая представляет собой: а) центральный модуль, который действует как «классная доска»; б) модуль работы со знаниями; в) планировщик задач. Платформа предоставляет программные инструменты, необходимые для интеграции различных существующих модулей по беспроводной сети. Согласно запросам пользователей поведение робота может быть автоматически сформировано в виде поведенческого фрейма в SPAK. Команды, определенные в таких фреймах, отправляются роботам. Кроме этого, у всех роботов есть свои локальные управляющие программы, которые управляют их поведением. Во время выполнения роботами задач инструкции от SPAK преобразуются в команду для робота таким образом, чтобы робот мог ее

Табл. 2. Сравнение подходов к обеспечению коллективной работы роботов

№	Название системы/ статьи	Объединение компонентов робота	Тип коммуникации между роботами	Координация элементов робота	Координация группы роботов	Языки программирования	Количество уровней архитектуры	Операционные системы	Используемые робототехнические наборы
1	SMART	Шина CAN	Bluetooth	Модель Intra Robot	Модель Inter Robot	Визуальный язык от Lego	3	LeJOS	Mindstorms NXT, NXT 2.0, EV3 от Lego Group,
2	Personal Robot Using Android Smartphone	NXT controller	Bluetooth	NXT controller	Не поддерживается	G – визуальный язык программирования в среде LabVIEW	2	LeJOS	Mindstorms NXT от Lego Group
3	MobileSim	Зависит от робототехнического набора	Wi-fi	Контроллер	Гибридная стратегия навигации	C++, Java, Python, Matlab	3	Windows, Unix	Pioneer 3 DX and AT, PowerBot™, AmigoBot™, PeopleBot™, PatrolBot®, Seekur®, Pioneer 2, Pioneer 1
4	WatchBot	Шина CAN	Wi-fi	RoboCAN, Контроллер	IPC	C++, Java, Python, Matlab	4	Unix	WatchBot1 – прототип робота был основан на Pioneer P3DX, WatchBot2 – прототип был разработан исследователями
5	CARMEN	Зависит от робототехнического набора	Wi-fi	Контроллер	IPC	C, C++, Java	3	Unix	iRobot ATRV, iRobot ATRVjr, iRobot B21R, ActivMedia Pioneer I, ActivMedia Pioneer II, Nomadic Technologies Scout, Nomadic Technologies XR4000, OrcBoard, Segway
6	BMSR	Шина CAN	Wi-fi, 3G/4G	Single Board	Не поддерживается стандартными средствами	LabView	3	Android	BMSR (Universal Bi-Manual Service Robot)
7	HMRS	ActivMedia controller	Bluetooth, Wi-fi,	8-bit, RAM <=2 Мб; 16-bit, RAM 4-8 Мб	Не поддерживается стандартными средствами	Matlab, Visual C++	3	Windows, Unix	ActivMedia robots
8	SPAK	Зависит от робототехнического набора	Wi-fi	Контроллер	Не поддерживается стандартными средствами	Java	3	Windows, Unix	ActivMedia robots, PINO, Scout, AIBO

выполнить. Чтобы улучшить производительность и гарантировать надежность совместной работы неоднородных роботов, необходима обратная связь от роботов для оценки их действия. Сигналы обратной связи о действиях роботов могут быть получены двумя путями. В первом случае, в среде, где находятся пользователь и роботы, устанавливаются датчики, чтобы следить за действиями роботов. Во втором случае, обратная связь получается от самих роботов, когда они заканчивают свои действия и передается обратно в SPAK.

Сравнение представленных подходов к обеспечению коллективной работы роботов

представлено в Табл. 2. Анализируя системы относительно поддерживаемых интерфейсов для объединения компонентов робота, можно сделать вывод, что три системы поддерживают стандартную шину CAN (Controller Area Network), а остальные системы используют собственные разработки. Шесть из восьми рассмотренных статей предлагают использовать сеть Wi-Fi для коммуникации между роботами. Для координации элементов каждая из рассматриваемых систем использует контроллер собственной разработки. Практически все системы обеспечивают совместную работу роботов в группе, кроме системы, предложенной в

статье [7]. К основным используемым языкам программирования можно отнести: C++, Java, Python, Matlab. Количество уровней архитектуры системы управления роботом в рассматриваемых статьях варьируется от двух до четырех. Основные поддерживаемые операционные системы – Android, Windows, Linux и LeJOS (альтернативная операционная система с открытыми исходными кодами для контроллеров Lego). Используемые робототехнические наборы весьма разнообразны, хотя наиболее популярные наборы представлены компаниями ActivMedia и Lego.

## 2. Концептуальная модель обеспечения семантической интероперабельности при взаимодействии мобильных роботов

При формировании коалиций мобильных роботов необходимо обеспечить их семантическую интероперабельность, то есть построить модель предметной области, в рамках которой взаимодействуют роботы и «понимают» друг друга. Одним из возможных подходов к построению моделей предметной области является онтологический подход. Под онтологией понимается подробная спецификация модели предметной области; она включает в себя сло-

варь (т.е. список логических констант и предикатных символов) для описания предметной области и набор логических высказываний, формулирующих существующие в данной проблемной области ограничения и определяющих интерпретацию словаря. Для учета текущей ситуации и существенного сужения пространства поиска нужной информации предлагается использовать технологию к управлению контекстом. Под контекстом в работе понимается информация, которая может быть использована, чтобы охарактеризовать ситуацию, в которой находится мобильный робот. На Рис. 2 показан процесс формирования коалиции мобильных роботов с использованием абстрактного и оперативного контекстов. Абстрактный контекст представляет собой онтологическую модель задачи для решения которых создается коалиция мобильных роботов, построенную на основании интеграции знаний проблемной области, релевантных для данной задачи. Оперативный контекст является конкретизацией абстрактного контекста для реальных условий значениями переменных, получаемых от информационных ресурсов.

Таким образом, коалиция мобильных роботов формируется в три этапа. На первом этапе осуществляется построение абстрактного контекста, которое заключается в выборе релевантных текущей задаче знаний из онтологии

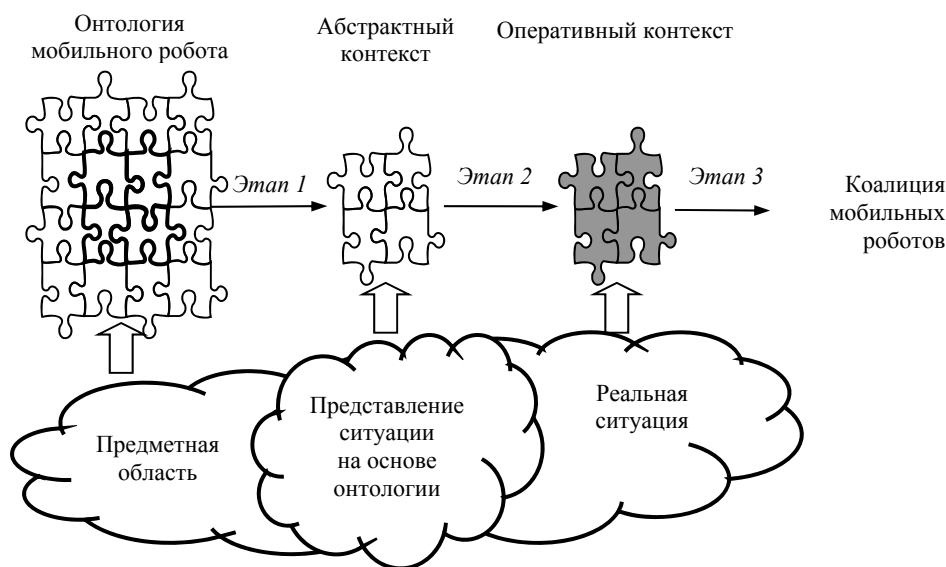


Рис. 2. Абстрактный и оперативный контекст для формирования коалиции мобильных роботов

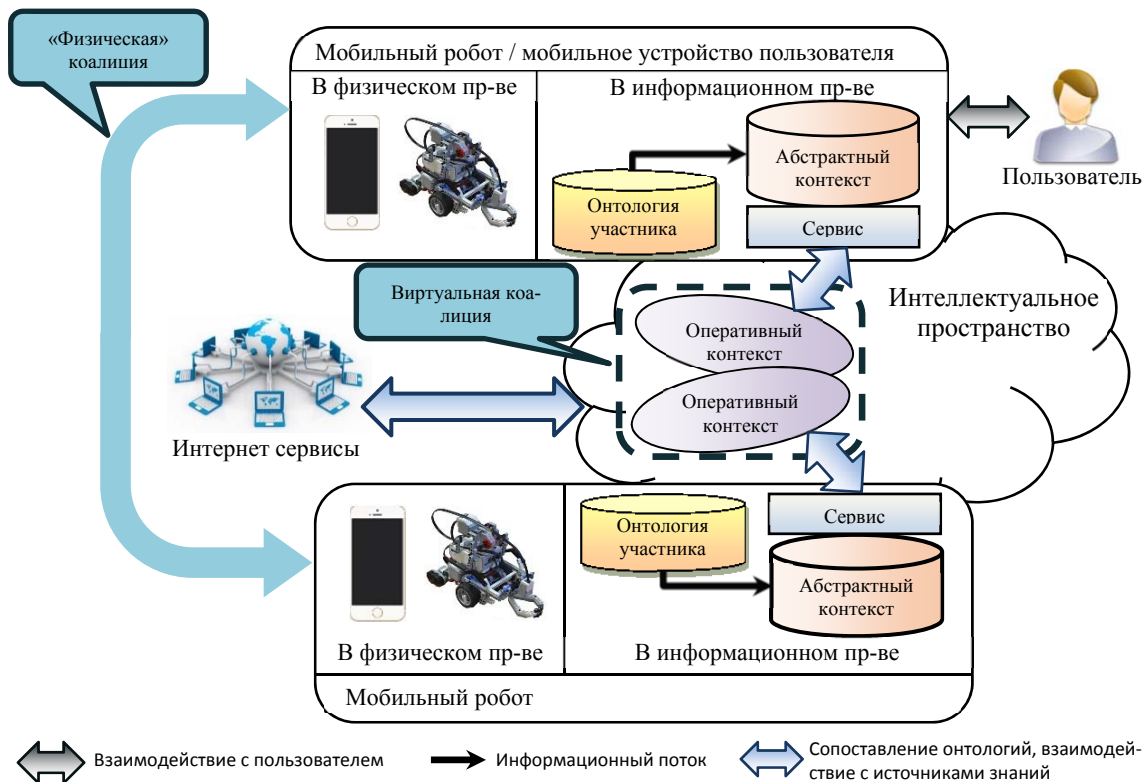


Рис. 3. Концептуальная модель обеспечения семантической интероперабельности при взаимодействии мобильных роботов в киберфизическом пространстве

мобильного робота. На втором шаге выполняется конкретизация этих знаний с использованием информации доступной в информационном пространстве, формируется оперативный контекст, который публикуется в интеллектуальном пространстве и становится доступным другим мобильным роботам. На третьем шаге по пересечениям оперативных контекстов в информационном пространстве формируются коалиции мобильных роботов.

Концептуальная модель взаимодействия мобильных роботов для формирования коалиций (Рис. 3) основывается на концепции киберфизических систем. К физическому пространству в таком случае относятся сами мобильные роботы, которые совершают в нем некоторые воздействия. При этом для координации действий мобильных роботов необходимо их информационное взаимодействие, которое осуществляется в информационном пространстве. Информационное пространство организовано на основе архитектуры классной доски, позволяющей контроллерам осуществлять не-

прямое взаимодействие между собой. Формирование коалиции происходит вначале в информационном пространстве (виртуальная коалиция) на основе этапов, показанных на Рис. 2, а затем мобильные роботы взаимодействуют в физическом пространстве (физическая коалиция).

Взаимодействие мобильных роботов и сервисов в информационном пространстве осуществляется на основе онтолого-ориентированного механизма публикации / подписки, позволяющий мобильным роботам публиковать свое состояние в информационном пространстве и подписываться на обновления состояний других роботов и сервисов с использованием онтологии. При регистрации в системе каждый робот загружает свою онтологию в общедоступное информационное хранилище. Онтология робота представляет собой его основные возможности и потребности в формализованном виде. Вычислительные сервисы производят ресурсоемкие вычисления и преобразуют информацию в информационном хранилище при необходимости. Каждый такой сервис также описывается соответствующей

онтологией, которая описывает его поведение и информацию, необходимую для его работы.

Мобильное устройство пользователя является источником информации в информационном пространстве. Приложение на устройстве пользователя публикует в информационном хранилище информацию о задаче, которую должны выполнить мобильные роботы, а также предпочтения пользователя, которые учитываются роботами для персонификации при выполнении поставленной задачи.

Таким образом, можно говорить о «понимании» при взаимодействии мобильных роботов через общедоступное информационное хранилище посредством механизма публикации / подписки. Если мобильный робот «понимает» онтологию информационного хранилища, то он принимает участие в общей задаче, решаемой в данный момент другими мобильными роботами. Если робот не понимает онтологии, то он производит операцию сопоставления своей онтологии с онтологией информационного хранилища. Подробно операция сопоставления описана в работе [18].

### 3. Апробация подхода на примере сценария формирования слова из букв

Для апробации предложенного подхода был выбран сценарий формирования слова из букв, представляющих собой трехмерные объекты, мобильными роботами, сконструированных на основе набора Lego Mindstorms EV3 Educational Kit, включающий следующие основные компоненты:

- блок управления (brick): процессор ARM v.9 с частотой 300 МГц, 64 мегабайта оперативной памяти, 16 flash памяти, microSDHC порт,

USB-порт (с возможностью подключения WiFi-адаптера которого нет в стандартном комплекте), Bluetooth модуль, LCD экран, Speaker - устройство для воспроизведения звука;

- моторы (два больших мотора и один средний, предназначенный для более точной работы);
- сенсоры: ультразвуковой сенсор (позволяет измерять расстояние до объектов на расстоянии от 3 см до 150 см), датчик касаний (позволяет определять касается ли кнопка на датчике чего-либо), гироскоп (позволяет измерять углы и скорость поворотов), сенсор определения цвета (для определения цветов объектов).

Участвующий в сценарии мобильный робот (Рис. 4, а) был разработан с использованием следующих основных частей (Рис. 4, б): два больших мотора, ответственных за движение и повороты мобильного робота; один маленький мотор, для захвата и подъема объекта; сенсор цвета, ответственный за распознавание цвета буквы; ультразвуковые сенсоры, ответственные за поиск букв и позиционирование робота в пространстве.

Для формирования коалиций мобильных роботов при их взаимодействии для совместного решения задачи были определены следующие основные операции: каждый мобильный робот регистрируется в системе и сообщает, что готов участвовать в сценарии (для этого формируется его онтология, которая публикуется в информационном пространстве); создание коалиций (постановка формализованной задачи в информационном пространстве, взаимодействие мобильных роботов); выполнение задачи (координация, синхронизация, мониторинг и управление).

Основной целью сценария, представленного в статье (Рис. 5), является формирование слова

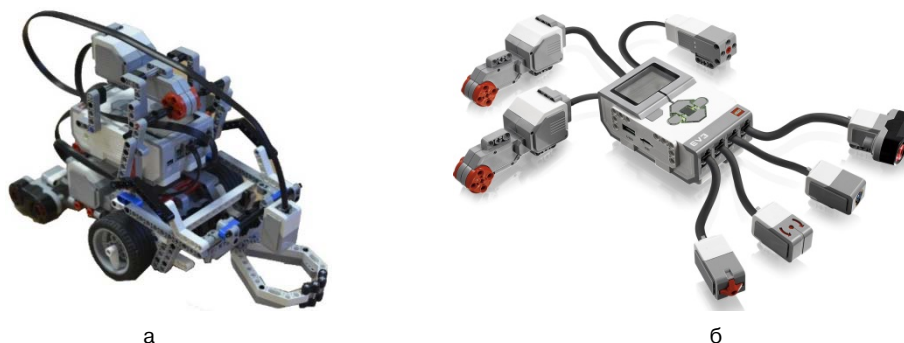


Рис. 4. Основные компоненты набора Lego Mindstorms EV3 Educational Kit



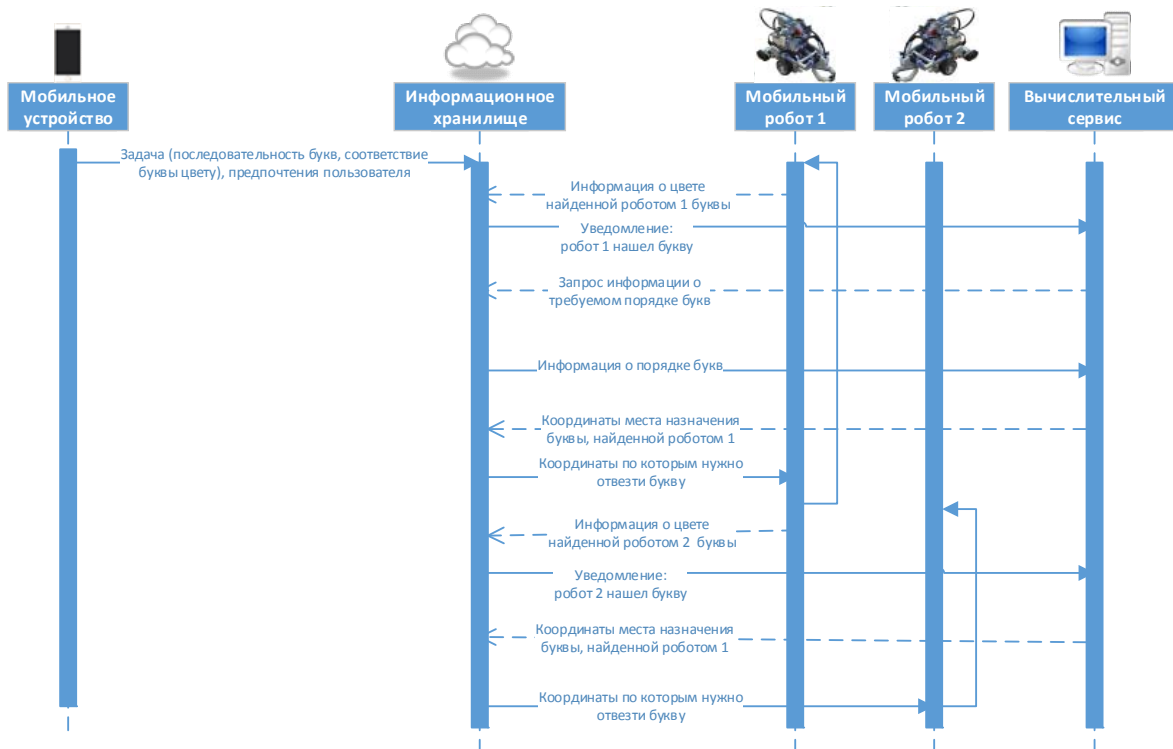


Рис. 5. Сценарий формирования слова из букв мобильными роботами

из букв мобильными роботами путем захвата буквы и перемещения ее на необходимую позицию, соответствующую заданному пользователем слову. Пользователь с использованием мобильного устройства определяет последовательность букв в слове, а также соответствие буквы и цвета (мобильный робот на базе комплекта Lego Mindstorms EV3 распознает букву по ее цвету) и публикует эту информацию в информационном пространстве. Роботы перемещаются в физическом пространстве, осуществляют поиск букв, определяют их цвет и перемещают буквы в необходимую позицию в зависимости от позиции этой буквы в слове. Информация о цвете найденной им буквы публикуется в информационном пространстве.

Вычислительный сервис получает информацию о цвете найденной роботом буквы, порядке букв в слове и соответствии распознаваемых роботами цветов буквам. На основе этой информации сервис производит расчет положения, в которое роботу необходимо переместить букву.

Так как для составления слова буквы должны быть расположены на одной линии, ордината яв-

ляется константой и рассчитывается, исходя из параметров стола, на котором выполняется сценарий таким образом, чтобы слово оказалось посередине стола. Абсцисса рассчитывается по следующей формуле:

$$x = x_0 + (i - 1)w,$$

где  $x$  – это искомое значение абсциссы,  $x_0$  – константа рассчитываемая, исходя из параметров стола, таким образом, чтобы слово оказалось посередине,  $i$  – позиция буквы в слове,  $w$  – константа, которая рассчитывается, исходя из средней ширины буквы. Информацию о координатах рассчитанного положения буквы сервис публикует в информационном хранилище. После этого соответствующий робот получает уведомление о том, куда нужно переместить букву, и выполняет эту задачу.

Для каждого робота в рассматриваемом сценарии был разработан сервис для его управления, который загружается в контроллер робота. Сценарий выполняется с допущением того, что буквы расположены с одной стороны от робота. Роботы движутся вперед и сканируют пространство с помощью ультразвукового датчика,

определяют буквы и перемещают по необходимым координатам, рассчитанным вычислительным сервисом.

Для обеспечения удобного взаимодействия пользователя с роботами разработано мобильное приложение, публикующее в информационном хранилище информацию о порядке букв в слове и соответствии цветов заданным буквам. Графический интерфейс для мобильных устройств на базе операционной системы Android разработан с использованием языка программирования Java в среде Android Studio Integrated Development Environment (IDE), которая официально рекомендуется Google для разработки мобильных приложений.

## Заключение

В статье предложен подход к обеспечению семантической интероперабельности мобильных роботов при формировании коалиций для совместного решения задач. Подход базируется на концепции киберфизических систем, которые представляет собой множество ресурсов, взаимодействующих между собой в информационном пространстве и управляющих устройствами в физическом пространстве в режиме реального времени. Апробация предложенного подхода была выполнена на примере сценария формирования слова из букв представляющих собой трехмерные объекты мобильными роботами.

## Литература

1. Аристова Н.И., Управление уровнем автоматизации при производстве роботов. Иерархическая схема. Часть 2, Информационные технологии и вычислительные системы, № 1, 2015 С. 77-82.
2. Птичкин С., Умная пуля видит цель. Секретная боевая техника впервые прошла испытание учебным боем, Российская газета, 18.07.2016.
3. Kubicek H., Cimander R., Scholl H., Organizational Interoperability in E-Government: Lessons from 77 European Good-Practice Cases, 2011, 96 p.
4. Kubicek H., Cimander R., Three dimensions of organizational interoperability: Insights from recent studies for improving interoperability frame-works, European Journal of ePractice, №6, January 2009, ISSN: 1988-625X.
5. Смирнов, А.В., Кашевник, А.М., Михайлов, С.А., Мионов, М.Д., Многоуровневая самоорганизация ресурсов киберфизической системы: контекстно-ориентированный подход и реализация, Искусственный интеллект и принятие решений, Вып. 4, 2015, С. 95–103.
6. Baca, J., Pagala, P., Rossi, C., Ferre, M., Modular robot systems towards the execution of cooperative tasks in large facilities, Robotics and Autonomous Systems, vol. 66, 2015, pp. 159–174.
7. Ono, K., Ogawa, H., Personal Robot Using Android Smartphone, Procedia Technology, vol. 18, 2014, pp. 37–41.
8. Zhu, Y., Zhang, T., Song, J., Li, X., A hybrid navigation strategy for multiple mobile robots. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 29, 2013, pp. 129–141.
9. López, J., Pérez, D., Paz, E., Santana, A., WatchBot: A building maintenance and surveillance system based on autonomous robots, Robotics and Autonomous Systems, vol. 61, 2013, 1559–1571.
10. Fernández, J.L., Sanz, R., Benayas, J.A., Diéguez, A.R., Improving collision avoidance for mobile robots in partially known environments: the beam curvature method, Robotics and Autonomous Systems, vol. 46, 2004, pp. 205–219.
11. Simmons, R., The interprocess communications system (IPC), <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/TCA/www/ipc/ipc.html>
12. Montemerlo, M., Roy, N., Thrun, S., Perspectives on Standardization in Mobile Robot Programming: The Carnegie Mellon Navigation (CARMEN) Toolkit, IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2003, pp. 2436–2441.
13. Rodić, A., Jovanović, M., Stevanović, I., Karan, B., Potkonjak, V., Building Technology Platform Aimed to Develop Service Robot with Embedded Personality and Enhanced Communication with Social Environment, Digital Communications and Networks, doi:10.1016/j.dcan.2015.03.002, 2015.
14. Chand, P., Carnegie, D.A., Mapping and exploration in a hierarchical heterogeneous multi-robot system using limited capability robots, Robotics and Autonomous Systems, vol. 61, 2013, pp. 565–579.
15. Chand, P., Carnegie, D.A., Task allocation and coordination for limited capability mobile robots, Australasian Conference on Robotics and Automation, vol. 1, ARAA, Brisbane, Australia, 2007, pp. 144-157.
16. Chand, P., Carnegie, D.A., Development of a reduced human user input task allocation method for multiple robots, Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, 2012, pp. 1231–1244.
17. Zhang, T., Ueno, H., Knowledge model-based heterogeneous multi-robot system implemented by a software platform, Knowledge-Based Systems, vol. 20, 2007, pp. 310–319.
18. Smirnov, A., Kashevnik, A., Shilov, N., Balandin, S., Oliver, I., Boldyrev, S. On-the-Fly Ontology Matching for Smart M3-based Smart Spaces, Proc. First Intern. Conf. on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM 2010). Florence, Italy, 25-30 Oct., 2010. pp. 225 – 230.

**Кашевник Алексей Михайлович.** Старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет в 2005 году. Кандидат технических наук. Количество печатных работ: более 150. Область научных интересов: управление знаниями, робототехника, профилирование, онтологии, интеллектуальные пространства, логистические системы. E-mail: alexey@iias.spb.su

## An approach to semantic interoperability support between mobile robots for coalition formation

A.M. Kashevnik

**Abstract.** Development of robotics last years significantly extends tasks that can be solved by mobile robots. However, it brings to complication of these tasks and necessity to coalition formation in case of impossibility to solve a task by one robot. Thereby, it is needed to develop new models and methods for interoperability support during the interaction of mobile robots in coalitions. The paper considers different levels of interoperability, proposes an approach for semantic interoperability support during the interaction of mobile robots in coalitions, and describe a scenario for word formation by mobile robots.

**Keywords:** mobile robots, coalitions, ontologies, interoperability.

### References

1. Aristova N., Management automation for the production of robots. Hierarchical scheme, *Information Technologies and Computation System Journal*, 1, 2015 pp. 77-82.
2. Ptichkin S., Umnaya pulya vidit cel. *Sekretnaya boevaya tekhnika vperve proshla ispytanie uchebnym boem*. Rossijskaya gazeta. 18.07.2016.
3. Kubicek H., Cimander R., Scholl H., *Organizational Interoperability in E-Government: Lessons from 77 European Good-Practice Cases*, 2011, 96 p.
4. Kubicek H., Cimander R., Three dimensions of organizational interoperability: Insights from recent studies for improving interoperability frame-works, *European Journal of ePractice*, N°6, January 2009, ISSN: 1988-625X.
5. Smirnov, A.V., Kashevnik, A.M., Mikhailov, S.V., Mironov, M.D., Multi-level cyber-physical resources self-organization: context-oriented approach and implementation, *Scientific and Technical Information Processing*, Vol. 4, 2015, pp. 95–103.
6. Baca, J., Pagala, P., Rossi, C., Ferre, M., Modular robot systems towards the execution of cooperative tasks in large facilities, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 66, 2015, pp. 159–174.
7. Ono, K., Ogawa, H., Personal Robot Using Android Smartphone, *Procedia Technology*, vol. 18, 2014, pp. 37–41.
8. Zhu, Y., Zhang, T., Song, J., Li, X., A hybrid navigation strategy for multiple mobile robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, 2013, pp. 129–141.
9. López, J., Pérez, D., Paz, E., Santana, A., WatchBot: A building maintenance and surveillance system based on autonomous robots, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, 2013, 1559–1571.
10. Fernández, J.L., Sanz, R., Benayas, J.A., Diéguez, A.R., Improving collision avoidance for mobile robots in partially known environments: the beam curvature method, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 46, 2004, pp. 205–219.
11. Simmons, R., The interprocess communications system (IPC), <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/TCA/www/ipc/ipc.html>
12. Montemerlo, M., Roy, N., Thrun, S., Perspectives on Standardization in Mobile Robot Programming: The Carnegie Mellon Navigation (CARMEN) Toolkit, *IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 2003, pp. 2436–2441.
13. Rodić, A., Jovanović, M., Stevanović, I., Karan, B., Potkonjak, V., Building Technology Platform Aimed to Develop Service Robot with Embedded Personality and Enhanced Communication with Social Environment, *Digital Communications and Networks*, doi:10.1016/j.dcan.2015.03.002, 2015.
14. Chand, P., Carnegie, D.A., Mapping and exploration in a hierarchical heterogeneous multi-robot system using limited capability robots, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, 2013, pp. 565–579.
15. Chand, P., Carnegie, D.A., Task allocation and coordination for limited capability mobile robots, *Australasian Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, ARAA, Brisbane, Australia, 2007.
16. Chand, P., Carnegie, D.A., Development of a reduced human user input task allocation method for multiple robots, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, 2012, pp. 1231–1244.
17. Zhang, T., Ueno, H., Knowledge model-based heterogeneous multi-robot system implemented by a software platform, *Knowledge-Based Systems*, vol. 20, 2007, pp. 310–319.
18. Smirnov, A., Kashevnik, A., Shilov, N., Balandin, S., Oliver, I., Boldyrev, S. On-the-Fly Ontology Matching for Smart M3-based Smart Spaces, *Proc. First Intern. Conf. on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM 2010)*. Florence, Italy, 25-30 Oct., 2010. pp. 225 – 230.

**Kashevnik Alexey**. Ph.D., Senior researcher, St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Graduated from St.Petersburg Polytechnic University in 2005. Author more than 150 research papers. Research interests: knowledge management, robotics, user profiling, ontologies, smart spaces, logistic systems. E-mail: alexey@iias.spb.su