

В. Э. Карпов, канд. техн. наук, доц., karpov_ve@mail.ru, **М. А. Ровбо**, науч. сотр., rovbooma@gmail.com,
П. С. Сорокоумов, науч. сотр., petr.sorokoumov@gmail.com,
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва

Сигнальная коммуникация для управления поведением коллаборативного робота*

От роботов все чаще требуется работать в тесном взаимодействии с людьми и другими роботами, при этом такая работа приобретает форму совместного выполнения общей задачи — коллаборации. Существующие методы управления в основном предназначены для высокоуровневого принятия решений автономным агентом, но для внешних взаимодействий необходимы специальные средства реагирования на ситуацию. В данной работе описывается реализация системы управления коллаборативного робота, основанная на эмоционально-потребностной архитектуре и обеспечивающая надежное и интерпретируемое взаимодействие робота с другими агентами. При этом общение оператора с роботом не осуществляется на императивном командном или языковом уровне, а строится на сигнальной коммуникации. Робот является автономным устройством, поведение которого направлено на удовлетворение его актуальных потребностей. Механизм взаимодействия оператора с роботом заключается в том, что сигнал оператора ("команда") активизирует элемент эмоционально-потребностной схемы — шлюз, реализующий обратную эмоциональную связь. Поскольку шлюз осуществляет связь между сенсорикой и поведенческими процедурами, его возбуждение пришедшим внешним сигналом приводит к активизации соответствующей процедуры, как если бы сенсорная система зарегистрировала реальный стимул. Внешний сигнал такого косвенного управления может быть представлен в акустической форме и в виде позы оператора. В потребности робота включены как нужды, обеспечивающие его физическое "выживание" (избежание опасности), так и поддержание социальных связей (сопровождение дружественных агентов). Распознавание других агентов и предметов обстановки выполняется по данным мощной встроенной сенсорики — стереокамер и дальномеров. Робот распознает внешние команды и активизирует шлюз, связанный с наиболее приоритетным действием, причем активность затухает постепенно, что позволяет действиям выполняться некоторое время по внешним командам даже при отсутствии соответствующего внутреннего стимула. Коллаборативный робот, управляемый описанной системой управления, оказался способен выполнять совместно с человеком простейшие задачи патрулирования, действуя предсказуемым и понятным (интерпретируемым) для человека образом.

Ключевые слова: коллаборативный робот, эмоционально-потребностная архитектура, система управления, робототехника, когнитивная архитектура, сигнальная коммуникация

Введение

Для интеллектуальных роботов весьма важно быстро реагировать на внезапные непредсказуемые события во внешней среде. В некоторых случаях обработка таких событий может происходить на самых нижних (рефлекторных) уровнях системы управления [1, 2]. Так, многие роботы реагируют на внезапно появившееся на их пути препятствие мгновенной остановкой. Однако подобная реализация реакций весьма ограничена [3], так как ответные действия, как правило, не могут быть слишком сложными, они часто конфликтуют с более высокоуровне-

выми формами поведения, а их модификация требует изменений низкоуровневой системы управления, что нежелательно.

Привлекательно выглядит возможность встраивания механизма реагирования в высокоуровневую архитектуру. Это решает перечисленные проблемы, позволяет управлять приоритетами и дает выполняемым роботом действиям единую основу для облегчения контроля и отладки. В настоящей работе описано добавление механизма реагирования на внешние события (сигналы) в одну из моделей организации системы управления интеллектуального агента — эмоционально-потребностную архитектуру. Работа этого механизма рассматривается на примере создания коллаборативного робота. Системам такого рода (см., например, работу [4]) необходимо уметь быстро

*Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (грант 20-07-00770-А). Эксперименты выполнены за счет государственного задания НИЦ "Курчатовский институт".

и адекватно обрабатывать внешние события, поэтому для них такой механизм особенно актуален.

Теоретической основой разработки является модель эмоций П. В. Симонова. Величина эмоции в данной модели определяется возможностью удовлетворения актуальной потребности имеющимися ресурсами. Каждый агент имеет некоторое множество потребностей, например, в питании, безопасности, общении с другими агентами, исследовании мира и т. п.

При разработке архитектуры системы управления (СУ) рассматриваемого робота использовались следующие принципы построения с учетом специфики взаимодействия с коллаборативным роботом (КР):

1. Робот должен быть автономной сущностью, функционирование которой подчинено задаче удовлетворения своих потребностей.

2. Роль оператора-партнера сводится к непосредственному управляющему воздействию на робота: автономное поведение самого КР сохраняется, а команды и прочие наблюдения, связанные с оператором, воспринимаются как часть анализируемой ситуации.

Таким образом, используется делегирование задач при высокой степени автономности самого КР. В этой работе рассматривается лишь один аспект построения подобных КР — организация взаимодействия оператора с роботом.

Структура статьи следующая. Сначала будут обсуждены вопросы архитектуры системы управления робота как автономного агента. Далее будут описаны общие принципы и механизмы сигнальной коммуникации, позволяющие организовывать внеязыковое взаимодействие КР с оператором. В заключительной части рассмотрены вопросы реализации разработанных методов и перспективы их развития.

Эмоционально-потребностная архитектура

Поведение робота (далее мы будем иногда использовать термин "агент") естественным образом может быть задано множеством продукций вида

ЕСЛИ <условие_состояния_сенсорной_системы>,
ТО <выполнение_поведенческой_процедуры>.

Вне зависимости от сложности описания условий или формы представления продукций (с использованием вероятностей, коэф-

фициентов уверенности, нечетких величин и т. п.) поведение таких систем будет нестабильным: малое изменение состояния сенсоров может привести к частым переключениям между поведенческими процедурами. Это связано с отсутствием таких механизмов, как память и определение значимости тех или иных факторов. Исходя из этого целесообразным представляется использование на нижнем (условно-рефлекторном) поведенческом уровне эмоционально-потребностной архитектуры системы управления. Суть ее сводится к тому, что поведение агента (робота) определяется не только текущим состоянием сенсорной системы, но и множеством существующих у него актуальных потребностей, а также контурами обратной связи, определяющими оценку баланса между фактически реализуемым поведением и тем, какие неудовлетворенные потребности имеются у робота. Эти обратные связи формируют эмоциональную оценку текущей ситуации. Теоретическим базисом такого подхода является информационная теория П. Симонова [5, 6], согласно которой интегральная эмоциональная оценка ситуации определяется оценкой баланса между необходимыми и имеющимися средствами удовлетворения актуальных потребностей. Оценочная, качественная формула Симонова имеет вид

$$E = f(N, p(I_{need}, I_{has})), \quad (1)$$

где E — эмоция, ее величина и знак (качество); N — сила и качество текущей необходимости; $p(I_{need}, I_{has})$ — оценка возможности удовлетворить потребность на базе врожденного и полученного жизненного опыта; I_{need} — информация о способе удовлетворения потребности; I_{has} — информация об имеющихся у агента средствах (ресурсах), требуемых для удовлетворения актуальных потребностей. Итак, величина эмоции в данной модели определяется возможностью удовлетворения актуальной потребности имеющимися ресурсами. Формальное описание этой модели изложено, например, в работе [7], а здесь мы ограничимся иллюстрацией примера фрагмента схемы поведения робота (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

На этой схеме показано, что активизация поведенческих процедур (здесь — "Исследование объекта интереса", "Гуляние" или "Убегание" (избегание опасности)) определяется сенсорикой робота и рядом потребностей: в пище,

самосохранении, любопытстве, отдыхе и т. п. Важным компонентом этой схемы является шлюз — элемент, отвечающий за реализацию обратной эмоциональной связи. В свою очередь, величина обратной эмоциональной связи определяется балансом между тем, какое поведение агент реализует в настоящий момент, и тем, что он должен делать для удовлетворения имеющихся потребностей.

В интерпретации эмоционально-потребностной модели, изложенной в работе [7], текущая сила каждой из потребностей может быть выражена величиной в диапазоне [0, 1], причем чем она выше, тем сильнее соответствующая потребность. Все потребности агента образуют множество определяемого заранее размера: $N = \{N_i\}$, $i = 1 \dots r$. Агенту доступны действия из некоторого множества $A = \{A_j\}$, $j = 1 \dots s$, каждое из которых направлено на удовлетворение одной или нескольких потребностей. Под действиями следует понимать не единичные операции (подачу сигнала, поворот налево, движение назад на один метр и т. п.), а поведенческие процедуры: поиск объекта, следование за целью, обследование местности и т. д. За выбор процедур отвечают продукционные правила, образующие множество R .

Если продукции R представлены правилами с коэффициентами уверенности, то итоговые коэффициенты уверенности заключений правил a , определяющих запуск той или иной поведенческой процедуры, определяются как

$$a = R_A(k_{ext}, N, S, G), \quad (2)$$

где k_{ext} — коэффициент, определяющий силу обратной эмоциональной связи; N — множество потребностей; S — множество сенсорных сигналов; G — уровни возбуждения шлюзов; R_A — функция оценки возможных действий по текущей ситуации. В свою очередь, выходное значение шлюза G_i определяется как функция от значения соответствующего сенсора S_i и множества эмоциональных состояний Es_i (т. е. множества эмоциональных сигналов от действий, с которыми связан шлюз):

$$G_i = G_i(S_i, Es_i), S_i \in S, Es_i \subset R. \quad (3)$$

Введение механизма эмоций позволяет как получить оценку ситуации с удовлетворением потребностей, так и реализовать управление

поведением системы с помощью добавления кратковременной памяти — шлюза, соответствующего некоторому сенсору, который может оставаться активным и в случае исчезновения базового сенсорного сигнала. Особенно важен для проблемы, рассматриваемой в данной статье, тот факт, что это позволяет реализовать механизм, называемый *сигнальной коммуникацией*.

Роль сигнальной коммуникации

Поскольку настоящие исследования в ряде моментов относятся к разряду биоинспирированных, рассмотрим для начала вопрос о коммуникации в животном мире (краткий обзор см., например, в работе [8]). Животные, будучи даже высокоорганизованными, способными образовывать крайне сложные и развитые социальные сообщества, обходятся в общении друг с другом без языка [9]. Некоторые этологи вообще не склонны рассматривать пресловутый "язык животных" как существующее явление, если понимать под языком отражение картины мира и использовать понятие знака-символа (см., например, работы Е. Н. Панова [10]). Взаимодействие животных основано на том, что в этологии называется *сигнальной коммуникацией*. Смысл этой коммуникации заключается в том, что животные а) генерируют сигналы, определяемые их эмоциональным состоянием, [11] и б) способны воспринимать и распознавать эти сигналы [12]. Итак, сигнальная коммуникация, во-первых, является лишь внешним проявлением состояния индивида, и, во-вторых, индивид должен обладать способностью к отзывчивости на эмоциональное состояние других.

Эмоционально-потребностная схема реализует процесс сигнальной коммуникации естественным образом. Основную роль в этом процессе играет шлюз. В эмоционально-потребностной схеме шлюз является основным эмоциональным индикатором (как приемник сигнала эмоциональной обратной связи), и именно в нем происходит итоговая оценка уровня сигнала, соответствующего активизируемому действию. Для реализации сигнальной коммуникации внешний сигнал "принимается" шлюзом, "подменяя" реальный сенсорный сигнал.

Такая архитектура также важна для реализации других механизмов, например, такого

базового феномена социального взаимодействия животных, как контагиозное или заразное поведение. Примером контагиозного поведения является действие сигнала тревоги, заставляющего всю группу обратиться в бегство. Возможность реализации подобных дополнительных механизмов полезна для групповых коллаборативных систем.

Поясним работу этого механизма. Пусть имеются два агента *A* и *B*, при этом *A* наблюдает опасность (работает сенсор "Опасность"), а *B* — нет. В течение некоторого промежутка времени агент *A* будет испытывать отрицательные эмоции (в силу того, что есть цепочка "получен сигнал — надо убежать", но робот еще занят выполнением другой процедуры). Это приведет к тому, что будет сгенерирован сигнал "Опасность". Далее сигнал воспринимается агентом *B*, у которого шлюз "Опасность" возбуждается даже при отсутствии подтверждающего сигнала от соответствующего сенсора, за счет активации с помощью сигнальной коммуникации. В итоге реципиент *B* выполняет действие "Убегать", т. е. ведет себя так, как если бы его сенсорная система зарегистрировала опасность. На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) приведена схема такого сигнального взаимодействия.

Предлагаемая архитектура системы управления (рис. 3) состоит из трех уровней:

1. Нижний уровень управления, реализующий действия и обрабатывающий сигналы от сенсоров.

2. Реактивный уровень управления, выбирающий активное действие.

3. Когнитивный уровень управления, реализующий ассоциативный механизм, влияющий на работу реактивного уровня.

Нижний уровень управления реализуется с помощью различных управляющих программ, работающих в среде *ROS*, и предоставляет верхним уровням доступ с помощью action-интерфейса к различным действиям системы, таким как "следовать за", "разведка" и т. д. На нем также работают узлы обработки сенсоров, переводящие сырые данные в модель продукционных правил реактивного уровня.

Набор продукционных правил расположен на реактивном уровне архитектуры. Они соединяют сенсорное восприятие с допустимыми действиями агента и активируют одно или более действия. Это может вызывать конфликты (несколько активных действий, которые нель-



Рис. 3. Архитектура системы управления
Fig. 3. Architecture of the proposed control system

зя выполнить одновременно), поэтому этих продукционных правил самих по себе недостаточно для работы системы управления.

Эмоционально-потребностная схема (ЭПС) формирует реактивный уровень архитектуры. Она реализуется в виде надстройки над системой продукций путем добавления степени активации узлов графа ЭПС (соответствующих предикатам продукционных правил), а также усиливающих и ослабляющих связей между некоторыми вершинами. Обычные связи между вершинами графа идут от посылки к следствию (в направлении от сенсорных предикатов к предикатам активируемых действий) и соответствуют импликации в соответствующих продукционных правилах. Можно отметить связь между механизмами усиления или ослабления в ЭПС и их аналогами в когнитивных картах.

В этой работе не рассматривается подробно вопрос такого важного компонента системы управления роботом-партнером, как когнитивный уровень. Отметим здесь, что задача когнитивного уровня — быть носителем того, что в системах ИИ называется моделью или картиной мира (КМ, рис. 4) [13]. Основная функция когнитивного уровня — подмена сенсорного восприятия агента исходя из суще-

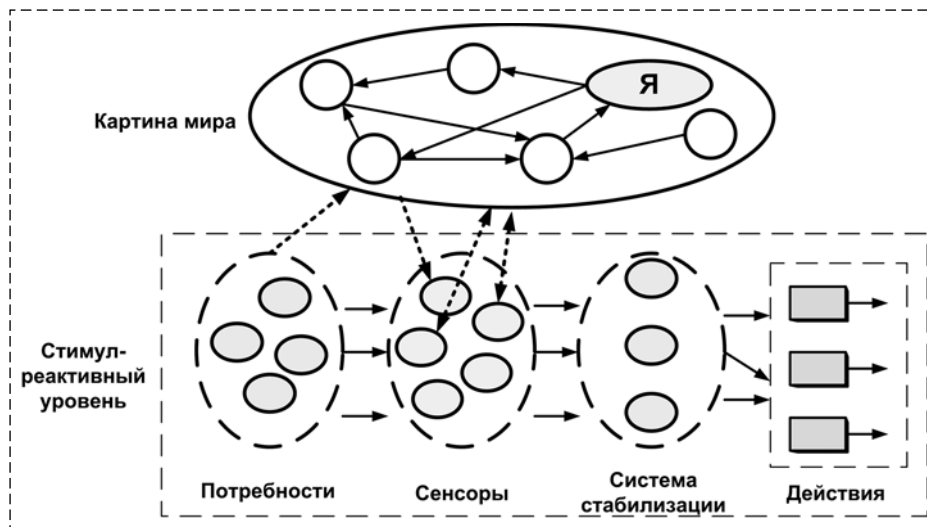


Рис. 4. Картина мира как надстройка над базовой схемой
 Fig. 4. World view as a superstructure on the basic scheme

ствующим мотиваций агента, его степени социальности и т. п., вплоть до реализации схемы управления на основе "этических" правил.

На когнитивном уровне может осуществляться сопоставление образа "Я", определение сходства в терминах "свой—чужой" и прочие важные для коллаборативных и групповых систем преобразования сенсорных данных и элементы рассуждений. Когнитивный уровень нужен для дополнения сенсорной информации реактивного уровня путем наблюдения за похожими агентами. Например, если виден агент из своей группы, который выполняет действие "нападение", а также есть продукционное правило "Если Имеется угроза, то Нападать", то можно сделать вывод, что "имеется угроза" и активировать соответствующую вершину в ЭПС. Описание особенностей работы когнитивного уровня выходит за рамки данной работы. Кроме того, определение принадлежности агента к соответствующей группе проводится на стадии анализа сенсорной информации.

Реализация сигнальной коммуникации

В биологических системах под *сигнальной коммуникацией* понимается передача управляющей информации вне обычных путей ее распространения в нервной системе и без высокоуровневой обработки [14]. В разрабатываемой архитектуре она осуществляется путем отправки агенту сигнала из короткого фиксированного списка с последующим реагированием. В отличие от более сложных форм ком-

муникации, например интерфейса на естественном языке, сигнальная коммуникация не требует выстраивания сложных интерпретаторов команд либо долгого обучения оператора работе с системой. Робот воспринимает только простейшие инструкции, полностью и предсказуемо определяющие его поведение. Несмотря на ограниченность возможностей этого подхода, поддержка его в агенте может быть весьма полезна на практике, например для контроля поведения в экстренных ситуациях.

Важным отличием сигналов от обычных команд является возможность произвольной отправки. Например, при опасности окружающие робота люди могут принять некоторые характерные позы (например, пригнуться, прикрыть голову руками и т. п.). Если данное поведение будет распознано, можно обработать его как самостоятельный сигнал опасности. Для поддержки такого функционала был реализован модуль распознавания поз людей, видимых камерами робота. После поиска фигур людей, проводимого с помощью библиотеки *mediapipe*, их позы классифицировались, и по результатам классификации формировался коммуникационный сигнал для системы управления роботом. Так осуществляется в том числе коммуникация жестами (рис. 5, см. вторую сторону обложки).

Помимо жестов человек также может отдавать роботу команды и голосом. В отличие от речевых интерфейсов, выполняющих анализ и разбор команды, в рамках сигнальной коммуникации голос выступает лишь средством запуска нужного поведения без возможности указания взаимосвязей с параметрами (объектами внешнего мира).

Сбором и обработкой внутренних (эмоционально-потребностных) и внешних (командных) сигналов занимается шлюз. Математически его работа описывается уравнением

$$g(t_1) = D^{t_1-t_0}(g(t_0)(1 - s(t_0)) + s(t_0)), \quad (4)$$

где t_1 — новый момент времени; t_0 — время последнего расчета сигнала шлюза; $g(t)$ — уровень

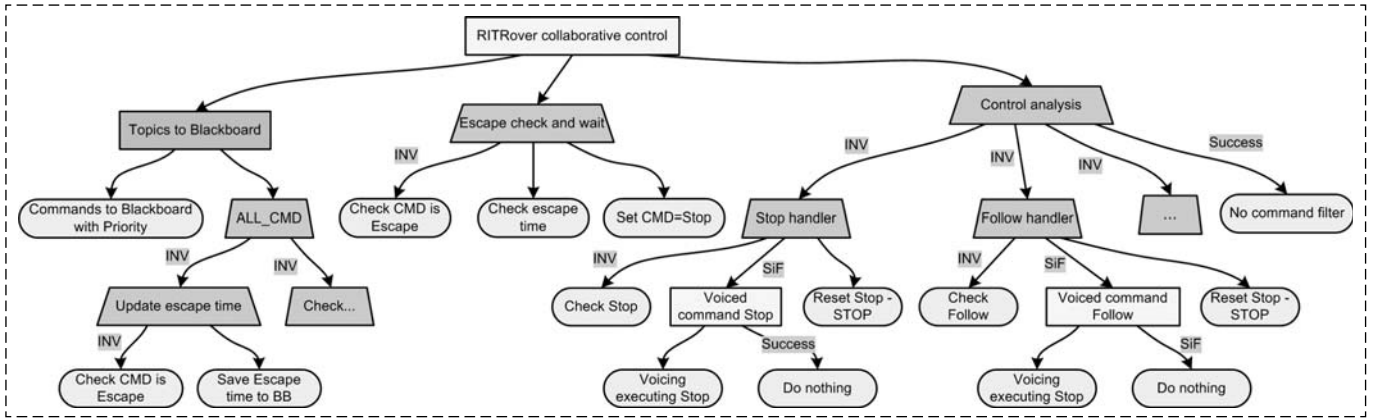


Рис. 6. Структура дерева поведения агента
 Fig. 6. Structure of agent's behavior tree

выходного сигнала шлюза в момент времени t ; $s(t)$ — уровень входного внешнего сигнала в момент времени t ; D — коэффициент затухания сигнала. Все уровни сигналов ограничены значениями в интервале $[0; 1]$. В алгоритмической реализации эта функция вызывается с фиксированной частотой, в то время как обновление значений функции $s(t)$ происходит асинхронно в промежутках между ее вызовами в некоторый произвольный момент времени \hat{t} , поэтому значение внешнего сигнала $s(t)$ считается постоянным в течение этого интервала времени $[t_0; t_1]$ и равным $s(\hat{t})$. Если внешний сигнал не приходил, он считается равным 0. После расчета уровня сигнала шлюза он проходит через пороговую функцию и возвращает значение 1, если значение сигнала выше порога, и 0, если ниже. Такая обработка в сочетании с затуханием сигнала позволяет активировать поведение по внешнему сигналу на некоторое время, зависящее от коэффициента затухания.

Таким образом, поведение активируется либо в случае, если происходит активация по эмоционально-потребностному уровню сигнала, определяемого сенсорами, связанными с поведением, либо если шлюз поддерживает высокий уровень активации из-за внешнего сигнала.

Список активированных поведенческих процедур отправляется дереву поведений [15], контролирующему их выполнение. Дерево поведения позволяет непрерывно выбирать поведение в сложных условиях, в частности, при переменном распознающихся и пропадающих целевых объектах, с обработкой преждевременных завершений, в том числе ошибок, и с учетом приоритета поведенческих процедур.

Разные поведенческие процедуры обычно конфликтуют между собой по задействован-

ным ресурсам, и потому требуется выбрать одну из них для выполнения. При этом высокоприоритетные поведенческие процедуры должны иметь возможность прерывать текущее поведение, а длительная невозможность выполнить текущее поведение (например, при потере целевого объекта) должна прерывать поведение автоматически по таймеру. Это реализуется с помощью дерева поведения, основная структура которого изображена на рис. 6.

В платформе реализованы такие поведенческие процедуры, как сон, следование за лидером, убежание от опасности, нападение (преследование цели) и исследование (рис. 7, см. третью сторону обложки). Исследование является виртуальным поведением, не имеющим конкретной физической формы, поскольку предназначено для выполнения различных операций замеров, необходимых для конкретной прикладной задачи, требующей обращения к внешним устройствам.

Апробация

Поведенческие процедуры в реальном мире.

Поведенческие процедуры, реализованные и настроенные для работы в реальном мире (не только в идеализированных условиях симуляционной среды) — это движение за целью (используемое для следования как за лидером, так и за угрозой), сон, убежание от опасности и исследование объекта. Все они в той или иной мере (кроме сна, который является длительной командой остановки) пользуются возможностями навигации робота, в которые входит обнаружение динамических препятствий, построение маршрута к точке назначения и

объезд препятствий. Для увеличения безопасности (как для робота, так и для окружающей его среды, включая людей) навигационный стек был сконфигурирован под медленное движение с ограниченным автоматическим восстановлением после попадания препятствий в опасную близость к роботу.

Важно отметить, что работа этих поведенческих процедур в реальной среде требует специальных модификаций управляющих алгоритмов в силу несовершенства датчиков, систем распознавания, расхождения реальных параметров возможностей движителей и настроек модели локального планировщика и т. п. Для этого дерево поведения отслеживает время последнего получения команды, сортирует команды по приоритетности и соответствующим образом обновляет текущую команду, а система распознавания объектов включает в себя трекинг их положения. Это позволяет продолжать двигаться за целью, когда та на время перестает распознаваться (например, в силу неудобного угла поворота и освещения) или скрывается колонной или другим предметом, и в то же время команда будет прервана из-за невозможности выполнения в ситуации, когда объект исчез из вида робота на долгое время (потерян).

Пример демонстрационного сценария. Робот работает как автономно, действуя в соответствии с ситуацией и заложенными приоритетами, так и под управлением голосовых команд человека и жестов. При отсутствии команд робот стремится следовать за человеком-лидером, а также обследовать видимые объекты интереса, а при обнаружении опасности — удаляться от нее. Тестирование осуществлялось как в симуляции Gazebo (рис. 8), так и в реальном помещении (рис. 9, см. третью сторону обложки).

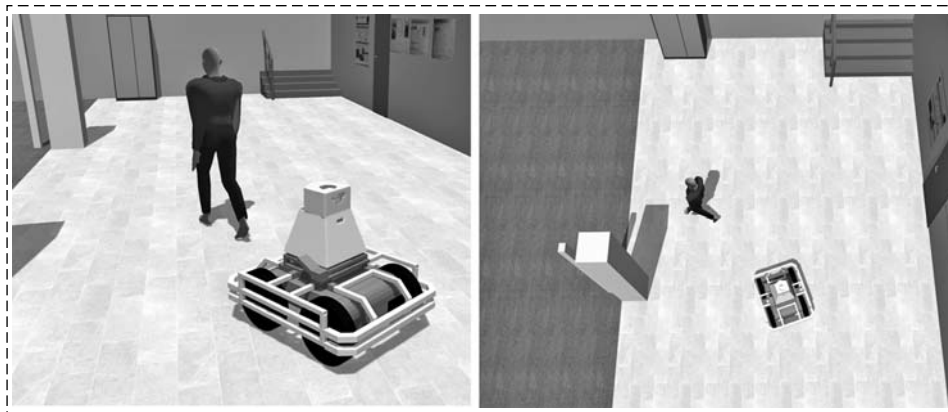


Рис. 8. Симуляция следования робота за человеком в среде Gazebo
Fig. 8. Gazebo simulation of the robot following a human

Робот запускается, проверяется корректность запуска двигательной подсистемы и удаленного ручного управления с джойстика путем подачи джойстиком команды движения вперед. После этого робот должен проехать небольшую дистанцию и при возвращении джойстика в нейтральное положение должен остановиться.

После корректной отработки команд удаленного ручного управления запускается модуль автономного поведения. Этот модуль реализует управление на основе прототипа эмоционально-потребностной архитектуры с использованием системы приоритетов на основе дерева поведения. Во время автономной работы робот озвучивает текущее состояние (исполняемое действие) с помощью динамиков. При старте системы это должна быть команда "СТОП". Состояние также можно наблюдать с помощью графического интерфейса дерева поведения.

Робот реагирует на разные целевые объекты и способен отслеживать положение человека, помеченного специальным образом (в данном случае используется *ArUco*-маркер, рис. 9). Человек с маркером, обозначающим "лидера", становится перед роботом на некотором удалении так, чтобы маркер был заметен, после чего начинает движение от робота. Робот должен перейти в состояние следования за лидером и начать двигаться за человеком, помеченным маркером. Движение осуществляется с учетом препятствий, окружающих робота, с использованием навигационного стека для избегания столкновений и продолжения движения к цели.

Робот может воспринимать команды человека, в частности, некоторые жесты. Если человек поднимает руку вертикально вверх, стоя перед роботом на некотором удалении (чтобы попасть в угол обзора камеры), робот должен воспринять это как команду "СТОП" и остановиться, перейдя в режим сна, в котором он будет находиться некоторое время (5...10 с), после чего продолжит автоматический режим работы.

Робот может переходить в другие режимы, прерывая текущую задачу, в зависимости от изменения

ситуации. При обнаружении маркера, обозначающего объект интереса, робот должен прекратить следование за человеком и подъехать к объекту интереса (например, коробке), поскольку исследование такого объекта является более высокоприоритетной задачей, чем следование за человеком (потребность в исследовании выше потребности в следовании).

Робот также способен реагировать на угрозы, назначая им один из высших приоритетов. Примером искусственной угрозы является человек с маркером угрозы. Распознав такой объект, робот перейдет в соответствующий режим и начнет уходить от угрозы, в данной реализации двигаясь назад от нее и увеличивая дистанцию.

Заключение

Важнейшая особенность коллаборативного робота — самостоятельность в принятии решений, снимающая с человека обязанность давать точные команды и жестко контролировать их выполнение. Предложенная архитектура ПО робота на основе эмоционально-потребностной схемы с сигнальной коммуникацией обеспечивает удобное косвенное управление и достаточную степень автономности. В качестве внешних сигналов могут использоваться жестовые и голосовые команды, распознаваемые соответствующими модулями обработки изображений с камер и голоса. Созданные поведенческие процедуры и архитектура в целом апробированы на упрощенной модели в симуляторе *Gazebo*, а также на реальном роботе в рамках отдельных тестовых сценариев, в том числе для проведения совместного патрулирования. Разработка показывает важность адекватного восприятия роботом оператора для развития коллаборативных систем.

Список литературы

1. Masuda Y., Miyashita K., Yamagishi K., Ishikawa M., Hosoda K. Brainless Running: A Quasi-quadruped Robot with Decentralized Spinal Reflexes by Solely Mechanical Devices // 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2020. P. 4020—4025. DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9340807
2. Saputra A. A., Botzheim J., Ijspeert A. J., Kubota N. Combining Reflexes and External Sensory Information in a Neuromusculoskeletal Model to Control a Quadruped Robot // IEEE Trans. Cybern. 2022. Vol. 52, N. 8. P. 7981—7994. DOI: 10.1109/TCYB.2021.3052253
3. Bhatia A., Mason M. T., Johnson A. M. Reacting to Contact: Transparency and Collision Reflex in Actuation // arXiv:2212.03469 [cs.RO]. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.03469
4. Ющенко А. С. Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 12. С. 812—819. DOI: 10.17587/mau.18.812-819
5. Симонов П. В. Потребностно-информационная теория эмоций // Вопросы психологии. 1982. Т. 6. С. 44—56.
6. Simonov P. V. Thwarted action and need — informational theories of emotions // Int. J. Comp. Psychol. 1991. Vol. 5, N. 2. P. 103—107. DOI: 10.46867/C40W3M
7. Карпов В. Э., Сорокоумов П. С. К вопросу о моральных аспектах адаптивного поведения искусственных агентов // Искусственные общества. Россия. 2021. Т. 16, № 2. DOI: 10.18254/S207751800014740-3
8. Andrews K. The Animal Mind. Second edition. London and New York: Routledge, 2020. P. 136—171. DOI: 10.1515/9781400835720
9. Searcy W. A., Nowicki S. The Evolution of Animal Communication: Reliability and Deception in Signaling Systems. Princeton University Press, 2005. 288 p. DOI: 10.1515/9781400835720
10. Панов Е. Н. Эволюция диалога. Коммуникации в развитии: от микроорганизмов до человека. М.: Языки славянской культуры, 2014. 400 с.
11. Preston S., Waal F. The Communication of Emotions and the Possibility of Empathy in Animals // Altruism and Altruistic Love: Science, Philosophy, and Religion in Dialogue. 2002. P. 284—308. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780195143584.003.0025
12. Parker P. R. L., Brown M. A., Smear M. C., Niell C. M. Movement-Related Signals in Sensory Areas: Roles in Natural Behavior // Trends Neurosci. 2020. Vol. 43, N. 8. P. 581—595. DOI: 10.1016/j.tins.2020.05.005
13. Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В., Кузнецова Ю. М. Знаковая картина мира субъекта поведения. М.: Физматлит, 2018. 264 с.
14. Braet K., Cabooter L., Paemelreire K., Leybaert L. Calcium signal communication in the central nervous system // Biol. Cell. 2004. Vol. 96, N. 1. P. 79—91. DOI: 10.1016/j.biocel.2003.10.007
15. Colledanchise M., Ögren P. Behavior Trees in Robotics and AI. 1st Edition. Boca Raton: CRC Press, 2018. 208 p. DOI: 10.1201/9780429489105

Signal Communication for Collaborative Robot Behavior Control

V. E. Karpov, karpov_ve@mail.ru, M. A. Rovbo, rovboma@gmail.com,

P. S. Sorokoumov, petr.sorokoumov@gmail.com,

National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation

Corresponding author: Sorokoumov Petr S., Researcher, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation, e-mail: petr.sorokoumov@gmail.com

Accepted on January 18, 2023

Abstract

Robots are increasingly required to work in close cooperation with humans and other robots, performing common tasks jointly, in collaboration. High-level decision making by an autonomous agent with such interactions require specific means

of responding to the situation. This paper describes the implementation of the control system for a collaborative robot, based on the emotion-need architecture that provides reliable and interpretable interaction means of the robot with other agents. The robot is an autonomous device whose behavior is aimed at satisfying its current needs. The communication between the operator and the robot is based on signal communication: the operator's signal ("command") activates an element of the emotion-need scheme — a gateway that implements the emotional feedback. Since the gateway connects the sensors and behavioral procedures, its activation starts the corresponding procedure, as if the sensory system had registered a real stimulus. The external signal of such indirect control can be represented in acoustic form or as the operator's posture. The needs of the robot are aimed at both its physical survival (danger avoidance) and maintenance of the social connections (accompanying friendly agents). The robot recognizes external commands and activates the gateway associated with the highest priority action. The activity also gradually fades, which allows actions to be performed for some time even in the absence of an appropriate internal stimulus. The resulting robot is able to perform the simplest patrol tasks together with a human, acting in a predictable and understandable (interpretable) way for the human.

Keywords: collaborative robot, emotion-needs architecture, control system, robotics, cognitive architecture, signal communication

Acknowledgements: This article was prepared with the financial support of Russian Foundation for Basic Research 20-07-00770-A. The experiments were performed at the expense of NRC "Kurchatov Institute".

For citation:

Karpov V. E., Rovbo M. A., Sorokoumov P. S. Signal Communication for Collaborative Robot Behavior Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 5, pp. 260–268.

DOI: 10.17587/mau.24.260-268

References

1. **Masuda Y., Miyashita K., Yamagishi K., Ishikawa M., Hosoda K.** Brainless Running: A Quasi-quadruped Robot with Decentralized Spinal Reflexes by Solely Mechanical Devices, *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020, pp. 4020–4025, DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9340807
2. **Saputra A. A., Botzheim J., Ijspeert A. J., Kubota N.** Combining Reflexes and External Sensory Information in a Neuromusculoskeletal Model to Control a Quadruped Robot, *IEEE Trans. Cybern.*, 2022, vol. 52, no. 8, pp. 7981–7994, DOI: 10.1109/TCYB.2021.3052253
3. **Bhatia A., Mason M. T., Johnson A. M.** Reacting to Contact: Transparency and Collision Reflex in Actuation, *arXiv:2212.03469 [cs.RO]*, 2022, DOI: 10.48550/arXiv.2212.03469
4. **Yushchenko A. S.** Collaborative Robotics — State of Art and New Problems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp.812–819. (In Russian), DOI: 10.17587/mau.18.812-819
5. **Simonov P. V.** Need-informational theory of emotion, *Voprosy psikhologii.*, 1982, vol. 6, pp. 44–56 (In Russian).
6. **Simonov V. P.** Thwarted action and need — informational theories of emotions, *Int. J. Comp. Psychol.*, 1991, vol. 5, no. 2, pp. 103–107, DOI: 10.46867/C40W3M
7. **Karpov V. E., Sorokoumov P. S.** On moral aspects of artificial agents' adaptive behavior, *Iskustvennyye obshchestva.*, 2021, vol. 16, no. 2 (In Russian), DOI: 10.18254/S207751800014740-3
8. **Andrews K.** The Animal Mind. Second edition, London and New York, Routledge, 2020, pp. 136–171, DOI: 10.1515/9781400835720
9. **Searcy W. A., Nowicki S.** The Evolution of Animal Communication: Reliability and Deception in Signaling Systems, Princeton University Press, 2005, 288 p., DOI: 10.1515/9781400835720
10. **Panov E. N.** Evolution of dialog. Developing Communication from microorganisms to human, Moscow, Yazyki slavyanskoj kultury, 2014, 400 p. (In Russian).
11. **Preston S., Waal F.** The Communication of Emotions and the Possibility of Empathy in Animals, *Altruism and Altruistic Love: Science, Philosophy, and Religion in Dialogue*, 2002, pp. 284–308, DOI: 10.1093/acprof:oso/9780195143584.003.0025
12. **Parker P. R. L., Brown M. A., Smear M. C., Niell C. M.** Movement-Related Signals in Sensory Areas: Roles in Natural Behavior, *Trends Neurosci.*, 2020, vol. 43, no. 8, pp. 581–595, DOI: 10.1016/j.tins.2020.05.005
13. **Osipov G. S., Panov A. I., Chudova N. V., Kuznetsova Yu. M.** Semiotic world view of behaviour subject, Moscow, Fizmatlit, 2018, 264 pp. (In Russian).
14. **Braet K., Cabooter L., Paemeleire K., Leybaert L.** Calcium signal communication in the central nervous system, *Biol. Cell*, 2004, vol. 96, no. 1, pp. 79–91, DOI: 10.1016/j.biocel.2003.10.007
15. **Colledanchise M., Ögren P.** Behavior Trees in Robotics and AI. 1st Edition, Boca Raton, CRC Press, 2018, 208 p., DOI: 10.1201/9780429489105